

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIAO
CAMPUS CACHOEIRA DO SUL
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

Eduardo Giuliani

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA
NA PROTEÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

**Cachoeira do Sul, RS, Brasil
2018**

Eduardo Giuliani

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NA
PROTEÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso Apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) - Campus Cachoeira do Sul, como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Elétrica**.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Guilherme Kaehler Guarda

Cachoeira do Sul, RS, Brasil
2018

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

Giuliani, Eduardo

Análise da Influência da Geração Distribuída na Proteção de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica / Eduardo Giuliani - 2018

47 p.; 30 cm

Orientador: Fernando Guilherme Kaehler Guarda

TCC (graduado) – Universidade Federal de Santa Maria - Campus Cachoeira do Sul, Curso de Engenharia Elétrica, RS, 2018

1. Engenharia Elétrica 2. Proteção de sistema de distribuição de energia elétrica 3. Influência da geração distribuída 4. Coordenação e seletividade entre religador-elo fusível I. Guarda, Fernando Guilherme Kaehler. II. Análise da influência da geração distribuída na proteção de sistemas de distribuição de energia elétrica.

© 2018

Todos os direitos autorais reservados a Eduardo Giuliani. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita com autorização por escrito do autor.

Endereço: Rua Bento Gonçalves, Nº 875, Bairro Gonçalves, Cachoeira do Sul, RS, Brasil, CEP: 96501-151

Fone: (55) 999416054

Endereço Eletrônico: eduardogiuliani2009@hotmail.com

Eduardo Giuliani

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NA
PROTEÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso Apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) - Campus Cachoeira do Sul, como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Elétrica.**

Aprovado em 12 de Dezembro de 2018:

Fernando Guilherme Kaehler Guarda, Dr. (UFSM)
(Presidente/ Orientador)

Maicon Jaderson Silveira Ramos, Dr. (UFSM)

Laura Lisiane Callai Dos Santos, Dra. (UFSM)

**Cachoeira do Sul, RS, Brasil
2018**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus que permitiu que tudo acontecesse, ao longo da minha vida, e não somente nestes anos como universitário, mas em todos os momentos é a maior referência que alguém pode seguir.

Agradeço a minha mãe Zeneide, heroína que me deu apoio e incentivo nas horas difíceis, de desânimo e cansaço. Ao meu pai Nilto, que apesar de todas as dificuldades continuou me fortalecendo, esse apoio de vocês foi incondicional.

Ao meu irmão e meus avós que sempre oraram por mim, para que escolhesse o caminho certo e justo.

Aos meus colegas Ariel, Maicon e Wagner, grandes companheiros que também são responsáveis por este momento. Com certeza vocês continuaram fazendo parte da minha vida.

Muito agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Fernando Guilherme Kaehler Guarda, pela orientação, dedicação, paciência, e principalmente, pela amizade durante todo o processo. Evidente que muito iremos produzir juntos ainda.

A esta universidade, seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram a janela que hoje vislumbro um horizonte superior, eivando pela acendrada confiança no mérito e ética aqui presentes.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

“Não tenha pressa, mas não
perca tempo
José Saramago”

RESUMO

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NA PROTEÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

AUTOR: EDUARDO GIULIANI

ORIENTADOR: FERNANDO GUILHERME KAEHLER GUARDA

Atualmente, com as Resoluções Normativas (RN - 482 e RN - 687) regidas pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL (2012) e incentivos fiscais para inserção de fontes renováveis e não renováveis no sistema de distribuição, as pequenas centrais geradoras localizadas próximas dos centros de consumo, conhecidas por Geração Distribuída (GD) tem um papel fundamental no conceito energético de um determinado local. Elas contribuem para o aumento da capacidade de geração e auxiliam também ao postergar investimentos na expansão da distribuição. As distribuidoras de energia elétrica têm um grande desafio para elaborar estudos e planejamento para as áreas de proteção, operação e manutenção de suas redes, devido a migração de um sistema de fluxo de potência anteriormente unidirecional para um sistema bidirecional, isto tudo proporcionado por um grande avanço nos empreendimentos desta natureza, fato este facilitado pelo fácil acesso a créditos bancários aos produtores independentes de energia. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo analisar a influência de uma fonte de GD (gerador síncrono acoplado através de transformador) na proteção de sistemas de distribuição de energia elétrica, e através do entendimento das filosofias de proteção adotadas pelas concessionárias será possível realizar simulações via software Powerfactory DigSilent®. De posse dos resultados obtidos através destas simulações serão propostas soluções que possam mitigar os problemas constatados nas mesmas. Por fim, foi possível notar que a inserção de GD causa um aumento dos níveis de corrente de curto-circuito, o que acarreta na perda de coordenação entre religador e elo fusível. Para solucionar esse problema, foi proposta uma solução utilizando limitadores de corrente de falta, onde o resultado apresentou-se satisfatório, retornando a coordenação entre os dispositivos de proteção.

Palavras-chave: Geração distribuída. Proteção de sistema de distribuição. Sistema de distribuição de energia elétrica.

ABSTRACT

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE GENERATION DISTRIBUTED IN THE PROTECTION OF ELECTRICITY DISTRIBUTION SYSTEM

AUTHOR: EDUARDO GIULIANI

ADVISOR: FERNANDO GUILHERME KAEHLER GUARDA

Currently, with the Normative Resolutions (RN - 482 and RN - 687) governed by the National Electric Energy Agency (ANEEL) and fiscal incentives for the insertion of renewable and non - renewable sources in the distribution system, small power plants located near consumption, known as Distributed Generation (GD), plays a fundamental role in the energy concept of a given location. They contribute to increasing generation capacity and also help by delaying investments in the expansion of distribution. Electric power distributors have a major challenge in designing and planning the protection, operation and maintenance of their networks due to the migration of a previously unidirectional power flow system to a two-way system, all provided by a large This is facilitated by easy access to bank credits for independent energy producers. In this context, this work aims to analyze the influence of a source of GD (synchronous generator coupled through transformer) in the protection of electric energy distribution systems, and through the understanding of the protection philosophies adopted by the concessionaires, it will be possible to carry out simulations via software Powerfactory DigSilent . Possessing the results obtained through these simulations will be proposed solutions that can mitigate the problems found in them. Finally, it was possible to note that the insertion of GD causes an increase in the levels of short-circuit current, which leads to the coordination between the recloser and the fuse link. To solve this problem, a solution was proposed using fault current limiters, where the result was satisfactory, returning the coordination between the protection devices

Keywords: Distributed generation. Distribution system protection. Electric distribution systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	– Princípio da divisão proporcional.	15
Figura 2.2	– Tensão em relação ao comprimento de um sistema radial com e sem GD.	16
Figura 2.3	– Exemplo de descoordenação causada pela falta de método contra o ilhamento.	17
Figura 2.4	– Técnicas de detecção de ilhamentos.	18
Figura 3.1	– Tubo de fibra de vidro (a), elos fusíveis (b).	23
Figura 3.2	– Chave fusível.	25
Figura 3.3	– Religador.	26
Figura 3.4	– Efeitos de uma falta no SDEE.	26
Figura 3.5	– Coordenação religador - elo fusível sem inserção de GD.	27
Figura 3.6	– Efeitos da GD na coordenação do religador-fusível.	28
Figura 3.7	– Efeito da contribuição da GD na coordenação religador-elo fusível. .	28
Figura 4.1	– Fluxograma da metodologia proposta.	30
Figura 4.2	– Sistema teste para simulação.	31
Figura 4.3	– Alocação dos dispositivos de proteção.	32
Figura 4.4	– Coordenograma religador 2 com elo fusível 1 e 2.	35
Figura 4.5	– Coordenograma religador 1 com elo fusível 3 e 4.	36
Figura 4.6	– Sistema teste com GD acoplada.	37
Figura 4.7	– Contribuições das correntes de curto-circuitos nas barras, (a) 17, (b) 15, (c) 19, (d) 14, considerando a GD.	38
Figura 4.8	– Coordenograma do trecho atrelado ao religador 1 com GD.	39
Figura 4.9	– Coordenograma do trecho atrelado ao religador 2 com GD.	40
Figura 4.10	– Coordenograma do trecho atrelado ao religador 1 com GD e LCF... ..	42
Figura 4.11	– Coordenograma do trecho atrelado ao religador 2 com GD e LCF... ..	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1	– Impedâncias dos trechos do SDEE teste.	32
Tabela 4.2	– Dados de corrente relacionado aos elos fusíveis.	33
Tabela 4.3	– Tipos de elos fusíveis utilizados.	34
Tabela 4.4	– Dados de corrente relacionado aos religadores.	35
Tabela 4.5	– Comparação de valores de corrente de curto-circuito com e sem GD.	38
Tabela 4.6	– Comparação dos valores de impedâncias originais e para correção da coordenação.	41
Tabela 4.7	– Comparação de valores de corrente após alocar o LCF.	41

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 JUSTIFICATIVA	11
1.2 OBJETIVOS	12
1.2.1 Objetivos gerais	12
1.2.2 Objetivos específicos	12
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	14
2.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	21
3 PROTEÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO	23
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	23
3.2 ELOS FUSÍVEIS	23
3.3 CHAVES FUSÍVEIS	24
3.4 RELIGADORES	25
3.5 SISTEMA DE PROTEÇÃO COORDENADO E SELETIVO	26
3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	29
4 METODOLOGIA PROPOSTA	30
5 CONCLUSÃO	43
5.1 TRABALHOS PUBLICADOS	43
5.2 TRABALHOS FUTUROS	44
REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o cenário elétrico mundial tem provocado grandes preocupações em razão do crescente consumo e aumento nos preços da energia elétrica, necessitando, assim, a ampliação na geração de energia elétrica, visando uma maior eficiência energética. Com isso, a geração própria mostra-se uma alternativa muito atraente com a possibilidade de injetar o excedente desta geração para o Sistema de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE). Logo, são necessários equipamentos que sejam capazes de mensurar e analisar a bidirecionalidade do fluxo de energia, os medidores eletrônicos de energia elétrica de quatro quadrantes. Os conceitos destes equipamentos estão associados a redes inteligentes (smart grids), sendo elas imprescindíveis para a inclusão desse novo método de geração nos sistemas de distribuição já existentes.

A Geração Distribuída (GD) fundamentada em gerar energia próxima aos consumidores, tem atraído cada vez mais a atenção devido, principalmente, as grandes preocupações ambientais, que aumentaram como forma de preparação para uma possível escassez de energia hídrica ou oriunda de combustíveis fósseis tradicionais. Além disso, é conveniente a utilização de GD no Brasil, visto ser um país rico em recursos energéticos, e também por contar com alguns incentivos econômicos, políticos e sociais. No entanto, é necessário levar em consideração os efeitos negativos que as fontes de GD causam, para que as mesmas não interajam de forma prejudicial na rede em que estarão instaladas.

Desta maneira, é necessária a elaboração de técnicas para minimização desses efeitos, pois a GD influencia diretamente na proteção e nas correntes de curto-circuito do SDEE. Sem esta análise torna-se impossível garantir o sucesso na coordenação e seletividade entre os dispositivos de proteção do sistema.

Esta análise será realizada utilizando o *software* DigSilent PowerFactory. No Brasil esse programa está presente a mais de 20 anos no mercado, e com isso possui licenças instaladas em empresas como indústrias, concessionárias, empresas de engenharia, universidades e institutos de pesquisas. O mesmo permite cálculos de fluxo de carga, curto-circuito, harmônicas, transitórios eletromecânicos e eletromagnéticos, proteção de sobrecorrente e distância bem como o estudo de confiabilidade do sistema, tudo sobre o mesmo banco de dados, totalmente orientado a objeto e generalizado para sistemas monofásicos, bifásicos e trifásicos.

1.1 JUSTIFICATIVA

As instalações de fontes de GD vem crescendo exponencialmente e tem uma expectativa de avanço muito grande, pois segundo a Empresa Brasil de Comunicações (EBC) os números de conexões destas fontes no sistemas cresceram de 1731 conexões, no ano de

2015, para quase 10,5 mil em 2017, fato este deve-se ao fácil acesso a novas tecnologias de fontes de GD. Tudo teve início com a criação de programas de incentivo as fontes alternativas de energia, no qual os governos ainda tratam como um aumento de produtores independente de energia. Contando com uma geração própria, muitas vezes esses produtores de energia suprem sua própria necessidade e desejam vender o excedente gerado, conectando-se a rede. Essa conexão acaba afetando o sistema elétrico em que se encontra, assim as concessionárias de energia serão as responsáveis por se adaptarem a essa nova realidade.

Essa perturbação se deve ao fato de que o sistema de proteção no SDEE é projetado considerando o fluxo unidirecional de corrente e certos níveis de corrente de curto-circuito, no entanto com a crescente conexão de fontes de GD no sistema haverá um fluxo bidirecional de corrente, bem como alterações nos níveis de curto-circuito. Devido a isso, surge a necessidade de desenvolver métodos para reduzir a influência da GD nos equipamentos de proteção do SDDE, que irão contribuir também para a melhoria dos indicadores de qualidade de energia monitorados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem o intuito de analisar os impactos causados pela conexão de fontes de GD no SDEE e via simulações, propor soluções e alterações para os problemas verificados nas mesmas. Nesta análise, o foco principal será o sistema de proteção, com isso, será possível elaborar soluções/métodos para garantir o correto funcionamento destes dispositivos quando houver uma nova conexão de GD à rede das concessionárias, evitando grandes alterações no sistema de proteção.

1.2.1 Objetivos gerais

- Dimensionar o sistema de proteção original (sem considerar geração distribuída);
- Verificar a influência que as fontes de geração distribuída causam nos sistemas de proteção;
- Realizar a simulação computacional dos sistemas com geração distribuída.

1.2.2 Objetivos específicos

- Propor soluções e alterações para os problemas de descoordenação do religador com o elo fusível decorrentes da inserção de fontes de geração distribuída;

- Verificar a atuação do sistema de proteção considerando geração distribuída e novas soluções propostas.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Para alcançar esses objetivos, o presente trabalho está dividido em cinco capítulos, incluindo este introdutório. No capítulo 2, será apresentada uma revisão bibliográfica sobre as vantagens e desvantagens da inserção de fontes de GD ao SDEE, bem como os principais métodos utilizados para minimizar os efeitos causados por esta inserção no sistema de proteção do SDEE. O capítulo 3 abordará uma breve introdução a respeito dos equipamentos de proteção usados neste trabalho, bem como a conceptualização da operação coordenada e seletiva do SDEE. Já no capítulo 4 será realizado o dimensionamento dos elementos de proteção do sistema teste a ser analisado, comprovando que o mesmo está operando de forma coordenada e seletiva. Consequentemente será implementada uma solução usando limitadores de corrente para que quando uma GD seja acoplada no SDEE esses equipamentos de proteção não percam seus valores primordiais de operação. Por fim, no capítulo 5 será abordada as conclusões e os possíveis trabalhos futuros que este estudo irá proporcionar.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo serão apresentadas algumas referências relevantes sobre as vantagens e desvantagens das fontes de GD juntamente com o tema central deste trabalho: a influência da geração distribuída na proteção de sistemas de distribuição de energia elétrica. O principal objetivo deste capítulo é abordar os principais conceitos, ferramentas e metodologias aplicadas para esta finalidade.

2.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O sistema elétrico é formado pela geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. O transporte da energia, em qualquer um dos meios citados, resulta sempre em perdas técnicas relacionadas ao aquecimento dos condutores (Efeito Joule), no qual ocorre a transformação de energia elétrica em energia térmica, perdas nos núcleos dos transformadores e perdas dielétricas. As perdas não técnicas advêm de furto, ou seja, ligação clandestina, desvio direto da rede, entre outros.

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), as perdas do último ano foram de aproximadamente 14%, cerca de 69.875.168 MWh. Desta maneira, fica nítida a importância da GD, pois terá capacidade de fornecer seu potencial energético a poucos quilômetros das cargas/consumidores, reduzindo assim muitas das vezes essas perdas.

No entanto, as perdas nos sistemas elétricos estão diretamente associadas à distribuição e a intensidade do fluxo de potência nas redes que a compõem, com a presença da GD ocorre a alteração da distribuição do fluxo, levando assim o carregamento das linhas de distribuição e conseqüentemente modificando o comportamento das perdas (AYRES, 2010). Desta forma, uma GD é capaz de reduzir as perdas quando a mesma promover um alívio do carregamento da linha, e aumentar as perdas quando a mesma tende a elevar o carregamento das linhas. AYRES (2010) ainda salienta que em ambas as situações são fatores dependentes da localização da GD, do nível de geração, da demanda de carga e da topologia da rede.

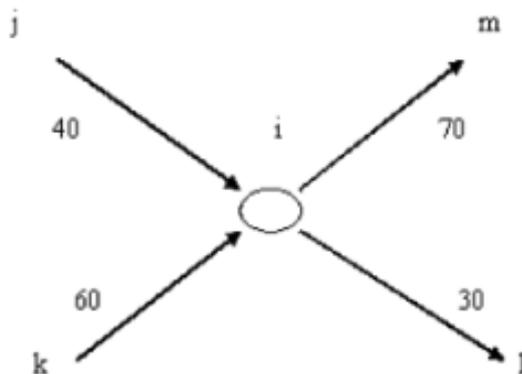
Existem vários estudos na literatura que proporcionam a análise de locais de instalações da GD, assim como as condições de operação mais convenientes para a redução das perdas elétricas. Por exemplo, CONEJO (2002) classifica os métodos de alocação das perdas em método de alocação proporcional, método de alocação marginal e método da

divisão proporcional. O método de alocação proporcional consiste em distribuir as perdas elétricas totais de mesma forma para as fontes geradoras e aos agentes consumidores e dividi-las em iguais proporções (CONEJO, 2002). Deste modo, metade das perdas é destinada para a unidade geradora e a outra metade para a carga. O autor conclui que esta metodologia não julga o sistema como um todo. Desta maneira, para duas cargas iguais, sendo uma localizada próxima à unidade de geração e a outra distante, o método qualificaria ambas pelas perdas, isto não seria correto e justo na análise.

A proposta do método de alocação de perdas baseado no princípio da divisão proporcional é criada considerando a topologia da rede, em que a alocação das perdas é fundamentada na partição dos fluxos na rede (BIALEK; CALLAN; STRONG, 1996). Dessa maneira, as perdas elétricas alocadas em uma linha, cujo fluxo de potência chega em uma barra do sistema, são divididas proporcionalmente entre as linhas cujo fluxo deixa essa barra (CONEJO, 2002).

Assim, o princípio da divisão proporcional pode ser visto na Figura 2.1, onde quatro linhas estão conectadas ao nó *i*, duas com fluxos entrando no nó *i* e duas com fluxos saindo do nó *i*. O total do fluxo de potência que atravessa este nó é 100 MW dos quais 40% resulta do nó *j* e 60% do nó *k*. Considerando 70 MW fluindo do nó *i* para o nó *m* pode-se obter (através do princípio da divisão proporcional) a potência de 42 MW ($70 \times \frac{60}{100}$), valor que passa pela linha *k-i*. Do mesmo modo o fluxo de 30 MW entre *i-l* tem a potência de 18 MW ($30 \times \frac{60}{100}$), valor que flui na linha *k-i*.

Figura 2.1 – Princípio da divisão proporcional.



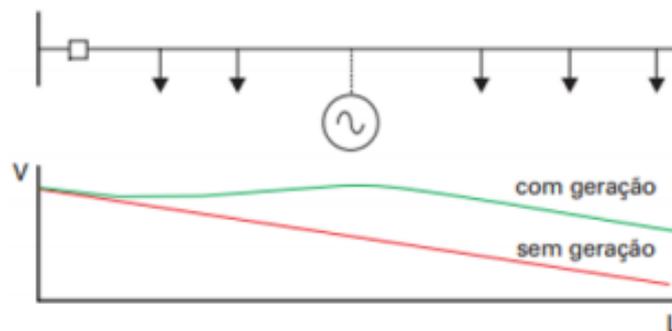
Fonte: BIALEK, CALLAN e STRONG (1996)

O método de alocação marginal é baseado em um coeficiente chamado de Perdas de Transmissão Incremental (ITL - *Incremental Transmission Losses*), (CONEJO, 2002). O método é capaz de mensurar a sensibilidade das perdas ativas totais devido à troca incremental de potência ativa injetada em cada uma das barras do sistema, com o objetivo de distribuí-las proporcionalmente entre os geradores e as cargas. Isso é obtido por meio

de resolução de fluxo de potência. Com isso é possível identificar a melhor localização para a GD, afirma CONEJO (2002).

Um importante indicativo de qualidade associado à energia são dados de sub e sobretensão no ponto de consumo comparadas à tensão nominal do sistema. De acordo com ANEEL (2014), é possível quantificar a qualidade de energia no ponto de entrega como adequada, precária ou crítica. Esse aspecto é especialmente significativo para os consumidores rurais que sofrem com a queda de tensão por estarem localizados longe da geração e dos centros de carga (NARUTO, 2017). Este problema pode ser resolvido com a conexão de fontes de geração no decorrer da rede, uma vez que nesta interligação ocorrerá a regulação de tensão para a tensão nominal do sistema, conforme Figura 2.2.

Figura 2.2 – Tensão em relação ao comprimento de um sistema radial com e sem GD.



Fonte: LORA e HADDAD (2006)

O modelo atual conta com uma grande geração centralizada, na qual os sistemas de distribuição foram criados para receber potência das subestações e segmentar para os consumidores. Conseqüentemente, o fluxo de potência tem como sentido dos maiores valores de tensão para os menores, ou seja, a rede de distribuição é um elemento passivo (SALMAN, 1996).

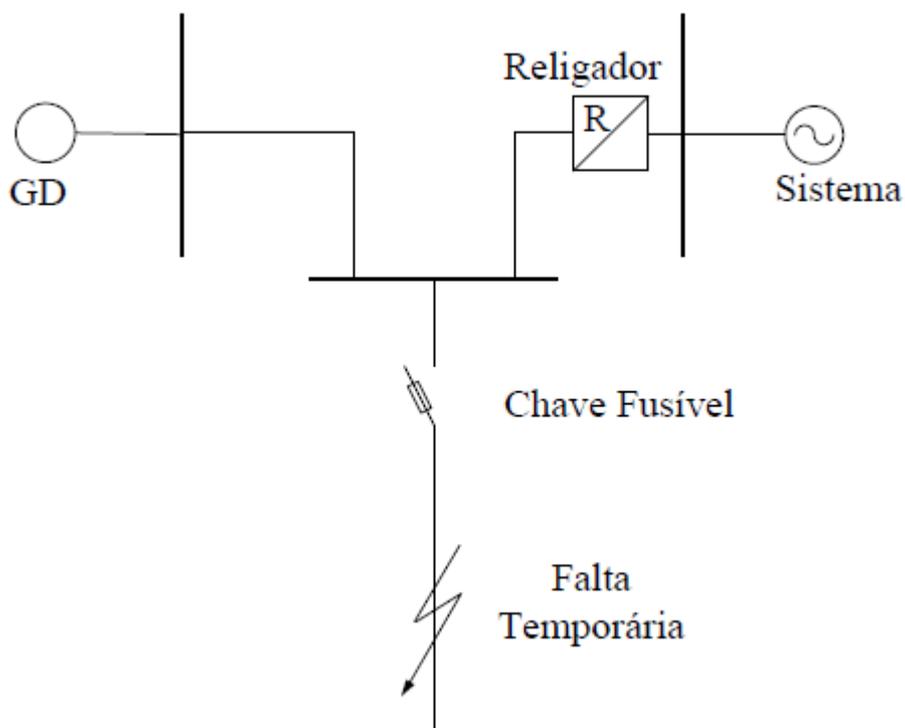
De modo contrário, quando temos o sentido de fluxo de potência dos valores menores de tensão para os valores de tensão superiores, define-se que a rede de distribuição é um elemento ativo (SALMAN, 1996). Isso acontece quando há a conexão de GD ao sistema de distribuição. Desta forma, pode-se concluir que existirá um duplo sentido de fluxo de potência na rede e, com isso, o sistema se tornará mais complexo ao analisar alguns componentes da rede de distribuição e transmissão, bem como a seletividade, nível de curto-circuito e coordenação da proteção.

Para NARUTO (2017) a opção de um ilhamento das GDs seria uma boa alternativa para atender cargas prioritárias, já para BARKER e MELLO (2000), o ilhamento aumenta a probabilidade das GDs poderem submeter condições de tensão e frequência fora da faixa estabelecida durante a sua existência. Isso pode representar uma séria ameaça à segurança de uma equipe técnica que por ventura necessite realizar alguma manutenção nesta rede,

tendo em vista que a mesma deveria estar desenergizada. Desta forma, o ilhamento pode dificultar a restauração do serviço, exigindo que as equipes de linha gastem mais tempo desabilitando as condições da ilha isso afetará os índices de confiabilidade e seletividade.

Um ilhamento gerado pela operação da curva rápida de um relé ou até mesmo de um religador poderá causar a descoordenação das proteções, uma vez que a GD pode continuar a alimentar a falta e o elo-fusível mais próximo do defeito poderá operar mesmo para uma falta temporária (MARCHESAN, 2016). Um exemplo típico de descoordenação dos dispositivos por falta na detecção de ilhamento pode ser visto na Figura 2.3. Quando a falta temporária se inicia o religador opera no sentido de eliminar a falta fragmentando a GD do sistema principal. Todavia, caso a proteção contra o ilhamento da GD não opere, esta continuará alimentando a falta provocando possivelmente a fusão da chave fusível. Como consequência disso, ocorre o desligamento contínuo de uma considerável parte do sistema de distribuição.

Figura 2.3 – Exemplo de descoordenação causada pela falta de método contra o ilhamento.

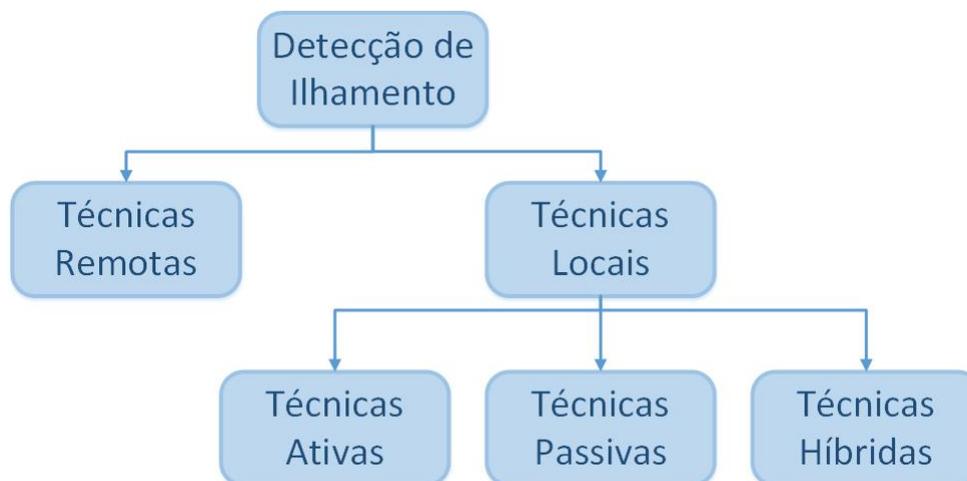


Fonte: MARCHESAN (2016)

Dessa maneira, torna-se clara a importância pelo qual a detecção de ilhamento deve ser efetuada no menor tempo possível, pois caso a GD demore para ser desligada, pode-se perder a coordenação entre os dispositivos de proteção. Com isso, existem algumas técnicas na literatura que são capazes de reconhecer essa característica indesejada, fazendo com que ocorra o desligamento da GD quando a mesma operar de forma ilhada. Segundo

VIEIRA (2006) essas técnicas são divididas em duas categorias: remotas e locais. As técnicas locais se subdividem em três grupos: ativas, passivas e híbridas, como pode ser visto na Figura 2.4.

Figura 2.4 – Técnicas de detecção de ilhamentos.



Fonte: Autor.

O sistema fundamentado em técnicas remotas utiliza meios de telecomunicação, entre as GDs e a concessionária, para alertar quando ocorre a formação das ilhas. Já os esquemas de detecção local dependem dos sinais de tensão e corrente acessível no ponto de acoplamento comum entre a GD e o sistema de distribuição, onde uma condição de ilha é detectada se os índices derivados dos sinais excederem determinados valores iniciais. A primeira subdivisão da detecção local são as técnicas passivas, que utilizam apenas os valores de tensão e corrente medidos no ponto de acoplamento comum. O segundo são as técnicas ativas, que realizam a injeção de distúrbios controlados no sistema de distribuição. Já a terceira técnica é a híbrida, uma combinação das duas já citadas (GOMES, 2016). O autor ainda salienta que as técnicas remotas são mais confiáveis, no entanto, se tornam mais difíceis de serem elaboradas, fato esse que agrava ainda mais com a adição de novas GDs. Consequentemente as técnicas mais viáveis economicamente são as locais.

Os dispositivos de proteção tradicionais em redes de distribuição resumem-se em religadores, seccionadores e fusíveis. Para coordenar os dispositivos de proteção, os esquemas tradicionais do sistema de distribuição implementam a proteção de sobrecorrente e a proteção de falta à terra, essas classificações são obtidas através da curva de tempo mínimo definido inverso. Cada curva incorpora uma margem de erro para considerar os atrasos no processamento do sinal, transmissão do sinal e o tempo para o dispositivo atuar e eliminar a falta/falha (KENNEDY; CIUFO; AGALGAONKAR, 2014).

Hoje, encontramos uma rede elétrica, quase que em sua totalidade, projetada para operar com um fluxo de potência unidirecional (SALMAN, 1996). Desta forma, quando uma GD é implementada neste circuito pode provocar o mal funcionamento dos elementos

de proteção, devido à bidirecionalidade do fluxo de potência. Consequentemente, este mal funcionamento acaba contribuindo para a perda de coordenação e seletividade do sistema de proteção. Vale ressaltar que este acontecimento ocorre devido ao fato destas proteções não estarem preparadas para receber tal operação.

Segundo HADJSAID, CANARD e DUMAS (1999) a seletividade das proteções é modificada quando há geradores conectados a redes de distribuição, porque os geradores síncronos ou de indução alteram a magnitude, a duração e a direção da corrente de falta. A corrente de falta é modificada, pois a conexão da GD modifica as características das redes de distribuição. Os níveis crescentes da corrente de falta podem exceder os parâmetros estabelecidos de corrente dos disjuntores, levando, assim, à ruptura/fusão deste dispositivo de proteção.

Quando uma GD é implementada em um sistema de distribuição, a natureza típica de uma direção do fluxo de energia pode ser perdida. Nesse caso, existe o risco de a coordenação de relés existente ser perturbada ou até se tornar ineficaz (GIRGIS; BRAHMA, 2001). Ainda é salientado que a contribuição para a falta de uma única pequena unidade de GD não é grande, mas as contribuições agregadas de muitas unidades pequenas, ou algumas poucas unidades grandes, podem alterar os níveis de curto-circuito o suficiente para causar a descoordenação entre os dispositivos de proteção, comprometendo a segurança e a seletividade da rede de distribuição.

Desta maneira, todo o processo de escolha de curvas apropriadas para o projeto da coordenação entre os relés, não engloba os efeitos da GD atrelada ao sistema de distribuição. Com isso a (1547.2TM, 2008) afirma que, para a conexão de geração distribuída juntamente ao sistema, a mesma não deve causar operação ou impedir o religamento de quaisquer dispositivos protetores instalados na rede de distribuição, e ainda salienta que as coordenações entre esses dispositivos devem ser realizadas sem causar quaisquer alterações às práticas de tempo dos religadores.

Dessa forma, surge a necessidade de que sejam desenvolvidos estudos baseado em métodos de proteção relacionado à incorporação de GD na rede de distribuição, para que não ocorra a perda de seletividade e segurança da mesma. (ZEINELDIN; EL-SAADANY; SALAMA, 2006) apresenta um método usando proteção diferencial em microrredes para aplicação juntamente com GD. Para realizar a proteção diferencial, o final de cada linha deve ser equipado com um transformador de corrente (TC), relé e disjuntor. Um link de comunicação será necessário entre dispositivos no final de cada linha, de modo que as correntes possam ser comparadas. Um relé enviará um sinal de trip se a diferença na comparação das correntes exceder um nível predeterminado e uma vez que exceder o nível ambos os disjuntores da linha serão desarmados. No esquema proposto por ZEINELDIN, EL-SAADANY e SALAMA (2006), cada unidade de GD tem uma proteção anti-ilhamento que informará o controlador central e a unidade de GD se uma ilha se formou. No entanto, esse método não prevê nenhuma proteção auxiliar caso a os disjuntores/relés venham a

falhar. Além disso, o esquema de proteção proposto é muito caro e mais indicados para nível de sub - transmissão (KENNEDY; AGALGAONKAR; CIUFO, 2016).

O estudo de AL-NASSERI e REDFERN (2008),propõem um esquema que envolve o uso de conteúdo harmônico de formas de onda de tensão da GD, interligadas por inversores. Neste método, o relé de proteção monitora a Distorção Harmônica Total (THD) da tensão do terminal do inversor (na GD) e desliga o inversor se o THD exceder um limite predeterminado. A lógica é que, em operação normal, a rede de distribuição atua como uma fonte de tensão rígida (baixa impedância), mantendo uma baixa tensão de distorção (THD = 0) nos terminais do inversor. Quando ocorrer qualquer tipo de falha um aumento na tensão da THD será notado. A impedância nos terminais do inversor aumenta porque a rede de distribuição de baixa impedância é desconectada (devido a atuação dos elementos de proteção na rede de distribuição) e somente a carga local permanece. Um relé de proteção monitora a THD do ponto de conexão da GD e fará que o disjuntor local opere, isso se o THD exceder o limite predeterminado e se a falha estiver comprovada dentro da zona de proteção do relé de proteção.

Para GUTIERRES (2013) o método estudado baseia-se em comparadores de valores quadráticos médios da corrente (*Root Mean Square - RMS*) localizados nas extremidades do ponto de conexão comum da GD. As correntes supridas pela GD são analisadas em tempo real por esses comparadores, eles são capazes de identificar faltas e verificar as perdas da coordenação e da seletividade entre religadores e elos fusíveis do sistema de distribuição.

No estudo de GUTIERRES (2013), destaca-se que somente os geradores que causam a descoordenação das proteções são desconectados temporariamente do sistema elétrico de distribuição através de tirestor *Gate Turn-Off Thyristor* (GTO). Desta maneira, os níveis de corrente são recuperados de acordo com a proteção radial já existente e assegurada a permanência da coordenação e da seletividade entre as proteções. Em uma análise mais aprofundada onde obtêm-se várias GDs descentralizados por exemplo, somente serão desconectados do sistema a GD que contribuir para a corrente de curto-circuito.

No trabalho de NAIEM et al. (2012), aborda um estudo relacionando há descoordenação do religador com o elo fusível quando uma GD é adicionada no sistema de distribuição de energia. O primeiro passo que o autor considera em seu estudo é classificar o estado de coordenação do elo fusível e o religador nas condições de falha, tanto para manter a coordenação quanto para perder a coordenação. O segundo passo é aplicar duas soluções complementares para diminuir os casos de descoordenação. O primeiro baseia-se em encontrar a melhor localização GD do ponto de vista de coordenação de proteção, já o segundo baseia-se na alteração da configuração do religador para que os casos de descoordenação sejam minimizados.

(HUSSAIN et al., 2013) propõem um esquema adaptativo com o propósito de garantir a coordenação entre religador e fusível no sistema de distribuição com GD, este

estudo também visa garantir a filosofia *fuse saving*. O método trabalha com as características temporizadas e instantâneas (funções 50 e 51), segundo o autor ao utilizar um religador essas funções devem operar sempre juntas para que não ocorra limitações na coordenação com o fusível. Para tal, é recomendando a substituição de religadores existentes por religadores multiprocessados com disponibilidade de comunicação. Um problema citado no estudo é a não garantia de proteção do fusível para diferentes características de inserção de GD no sistema se a função instantânea (função 50) estiver com corrente de *pick-up* fixa, com isso, é proposto um algoritmo que altera a corrente de *pick-up* da função 50 do religador de forma *online*, acompanhando as diferentes inserções de GD no sistema.

Relés de sobrecorrente direcional de configuração dupla são usados no estudo de ZEINELDIN et al. (2015), no qual garantem a coordenação da proteção do sistema de distribuição com GD. Estes relés de ajuste duplos são equipados com duas características de corrente de tempo inversa, cujas configurações dependerão da direção da falta. O problema de coordenação de proteção para este relé é formulado como um problema de programação não linear, em que o objetivo é minimizar o tempo total de operação dos relés durante a operação primária e de backup. O autor aplica esse método à uma rede de distribuição de energia do sistema IEEE de 30 barramentos equipado com GD síncrona e GD baseada em inversores. No entanto, segundo FUNMILAYO, SILVA e BUTLER-PURRY (2012), o sistema com GD baseada em inversores tem impactos quase insignificantes na coordenação da proteção do sistema.

Por outro lado, as fontes baseadas em geração síncrona podem impactar a coordenação entre o fusível e o relé de sobrecorrente resultando em disparo desnecessário de um alimentador inteiro (BARKER; MELLO, 2000). Por fim, os resultados mostram que o esquema de coordenação de proteção proposto com o relé de ajuste duplo pode reduzir significativamente o tempo de operação geral do relé, tornando-se uma opção atraente para sistemas de distribuição com GD.

2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar das propostas referenciadas terem como objetivos manter a coordenação e seletividade com a presença de GD no SDEE, nenhuma mencionou uma análise dos impactos que a substituição dos equipamentos de proteção do sistema atual irão causar perante a sociedade e para as concessionárias levando em consideração os seus planos orçamentários.

O método proposto que utiliza os conteúdos harmônicos das formas de onda de tensão das fontes de GD podem ser inadequados e impossíveis para minimizar a descoordenação do elementos de proteção do SDEE, pois ao analisar um transformador conectado em delta-estrela verifica-se um grande impacto na corrente de falta e na forma de onda

de tensão no ponto de conexão da GD, dessa forma complicando a análise da distorção de harmônicos totais (THD). Assim este método poderia ser usado como uma forma de proteção complementar, o que não deixa de ser importante.

Ademais, os trabalhos referenciados buscam a manutenção da coordenação e seletividade entre os dispositivos de proteção apenas reduzindo a corrente de falta para a zona de coordenação definida pelas curvas tempo x corrente dos dispositivos. Essa solução é incompleta, pois ao ocorrer a operação rápida do religador, é possível que a GD mantenha sua contribuição para o curto-circuito, invalidando a aplicação de um esquema de proteção coordenado (*fuse saving*).

3 PROTEÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

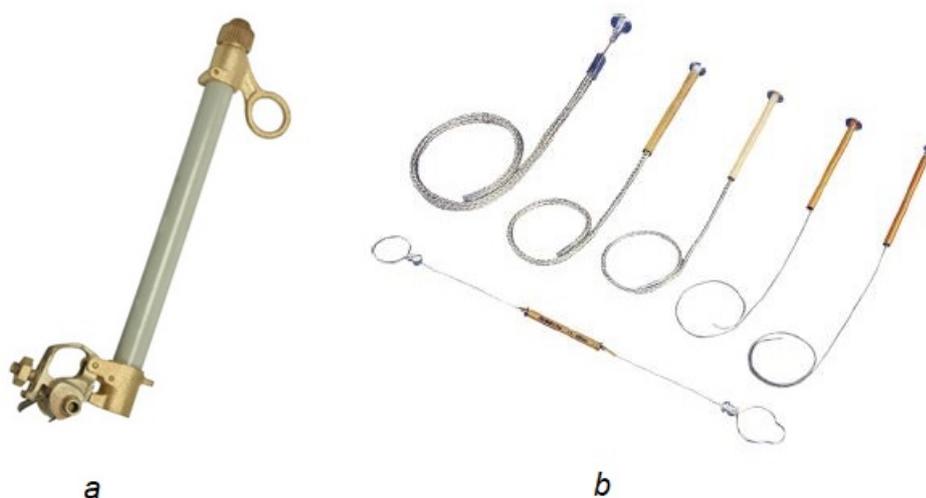
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo será apresentada uma breve introdução sobre os equipamentos de proteção que serão abordados neste trabalho, bem como algumas considerações sobre a importância dos mesmos no SDEE. Em seguida será exposto as curvas tempo x corrente desses elementos de proteção, juntamente com a explanação e a conceptualização de seus pontos de coordenação e seletividade.

3.2 ELOS FUSÍVEIS

Elo fusível é uma peça facilmente substituível, composta de um elemento fusível, fabricado com liga de estanho ou outro material, que por ocasião de circulação de uma sobrecorrente entra em fusão, interrompendo o circuito elétrico. Não devem fundir-se com a corrente de carga de equipamentos e devem obedecer às curvas características tempo x corrente fornecidas pelos fabricantes. Consequente, não permitindo que valores de sobrecorrente passem para as cargas dos consumidores, evitando danos nos equipamentos elétricos, este dispositivo pode ser visualizado na Figura 3.1. *b*.

Figura 3.1 – Tubo de fibra de vidro (a), elos fusíveis (b).



Fonte: DELMAR (2018)

Este dispositivo fica localizado dentro de um tubo de fibra de vidro dotado de

revestimento interno, destinados à interrupção do arco elétrico, Figura 3.1.a. Para recompor a energização do circuito é necessário eliminar o defeito que provocou a sua abertura, seguido com substituição do elo na chave fusível. Para os níveis de distribuição de energia elétrica os elos fusíveis são classificados da seguinte forma:

- Tipo K - Elos fusíveis rápidos;
- Tipo T - Elos fusíveis lentos;
- Tipo H - Elos fusíveis de alto surto, ou seja, de ação lenta para surtos de corrente (corrente transitória de magnetização de transformador, por exemplo). Geralmente, são usados para proteger transformadores de pequenas potências (até 75 kVA) e pequenos bancos de capacitores.

As correntes nominais normalmente padronizadas para esses elos fusíveis são:

- Valores preferenciais para os tipos K e T: 1, 2, 5, 6, 10, 15, 25, 40, 65, 100, 140 e 200 A;
- Valores não preferenciais para os tipos K e T: 8, 12, 20, 30, 50 e 80 A;
- Valores para os tipos H: 1, 2, 3, 5 A.

3.3 CHAVES FUSÍVEIS

Chaves fusíveis são elementos mais utilizados na proteção de redes de distribuição urbanas e rurais, por apresentar preços reduzidos e desempenho satisfatório para o nível de proteção que se deseja. Tem como principal função sustentar o elo fusível e o tubo de fibra de vidro (cartucho) explicados anteriormente, tal equipamento pode ser visto na Figura 3.2. O principal componente deste equipamento é a parte de isolamento, ou seja, um material cerâmico vai preso ao poste, permitindo a sustentação de todo o conjunto e a garantia de isolamento do sistema para o restante da estrutura.

Nestes equipamentos são utilizados elos fusíveis que possuem característica inversa na relação tempo x corrente, ou seja, quanto maior a corrente de curto-circuito ou de sobrecorrente, maior o calor gerado e menor o tempo de fusão do elo. Este dispositivo é empregado sempre antes de transformadores de baixa tensão, para efetuar a proteção do dispositivo, ou em derivações de dos ramais principais dos sistemas.

Figura 3.2 – Chave fusível.



Fonte: DELMAR (2018)

3.4 RELIGADORES

Os religadores tem funcionamento automático de desligamento e religamento de circuitos alimentadores, com a capacidade de repetição destas operações, conforme parametrização. Em redes aéreas de distribuição de energia instalados em área rural, principalmente em alimentadores longos, os religadores têm sido muito aplicados devido à grande incidência de defeitos causados pela vegetação alta e densa que estão presentes nestes locais. Com isso, aumenta a possibilidade de faltas transitórias, fazendo com que a utilização do religador se torna essencial para filtrar esse tipo de ocorrência, facilitando a operação do sistema (MAMEDE, 2013).

Quando um religador, Figura 3.3, sente uma condição de sobrecorrente, a circulação dessa corrente é interrompida pela abertura de seus contatos. Os contatos são mantidos abertos durante determinado tempo, chamado tempo de religamento, após o qual se fecham automaticamente para reenergização da linha. Se no momento do fechamento dos contatos, a sobrecorrente persistir, a sequência de abertura/fechamento é repetida até o número de vezes programado no dispositivo, e após a última operação de abertura, os contatos ficam abertos e travados. O novo fechamento só poderá ser feito manualmente.

Figura 3.3 – Religador.



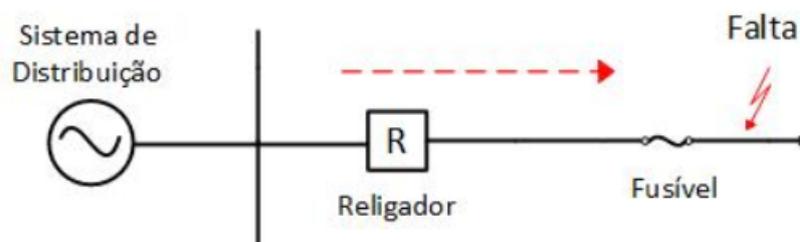
Fonte: SCHNEIDER (2018)

3.5 SISTEMA DE PROTEÇÃO COORDENADO E SELETIVO

Os dispositivos de proteção das redes de distribuição de energia elétrica são essenciais para a segurança e operação do sistema, pois quando uma falta ocorre em determinado trecho deste sistema, as consequências podem causar danos ou o mal funcionamento de equipamentos instalados em casas, indústrias e hospitais, por exemplo. Portanto para que um sistema de proteção seja eficiente é necessário que haja o dimensionamento correto, que seja confiável, rápido, sensível a surtos e que exista coordenação e seletividade.

O valor de corrente de curto-circuito que circula em diversos pontos da rede é um importante dado para o planejamento do SDEE. Tais dados irão auxiliar no dimensionamento e calibração dos equipamentos de proteção instalados no SDEE, como por exemplo, os fusíveis e religadores. Na figura 3.4 é possível observar um exemplo de um SDEE radial onde os elementos de proteção deverão operar de modo que o curto-circuito existente seja eliminado do sistema, permitindo a completa segurança da rede.

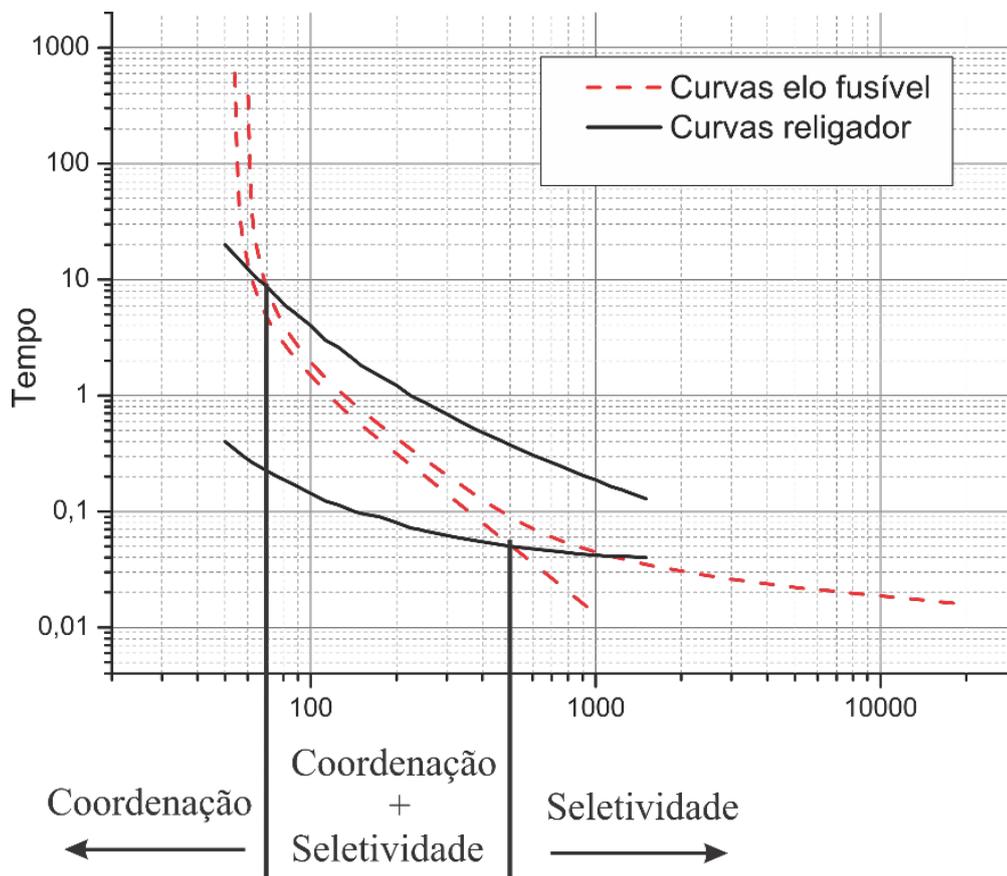
Figura 3.4 – Efeitos de uma falta no SDEE.



Fonte: Autor.

No entanto para que o sistema atenda as exigências de confiabilidade, protegendo de forma segura e correta o SDEE, é necessário verificar se os valores máximos de corrente de curto-circuito, na zona de proteção dos equipamentos, irão operar dentro dos limites estabelecidos para coordenação e seletividade, como pode ser visto na Figura 3.5.

Figura 3.5 – Coordenação religador - elo fusível sem inserção de GD.

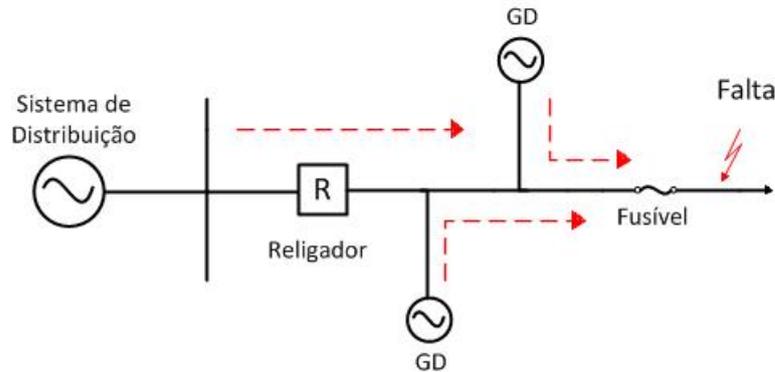


Fonte: GUARDA (2017)

Através da Figura 3.5 pode-se perceber que a coordenação entre religador e elo fusível é realizada a partir da interseção da curva de mínima fusão do elo fusível com a curva de operação rápida do religador, e com a interseção da curva máxima de interrupção do elo fusível com a curva temporizada do religador. Estas duas interseções geram uma área onde os dispositivos deverão operar em modo de coordenação e seletividade, pois a corrente de curto-circuito situada dentro desta área sempre fará com que o religador atue em sua curva rápida, impedindo que a fusão do elo fusível ocorra sem necessidade (*fuse saving*). Por outro lado, caso a falta seja permanente deverá ocorrer a fusão do elo fusível, que funciona como proteção de retaguarda. Caso o elo fusível falhe em sua operação a curva temporizada do religador será responsável pela desconexão do circuito.

No entanto, como o foco deste trabalho é analisar os efeitos causados quando fontes de GD forem inseridas no SDEE, a Figura 3.6 representa a contribuição de corrente de curto-circuito destas fontes para o sistema em que estão conectadas.

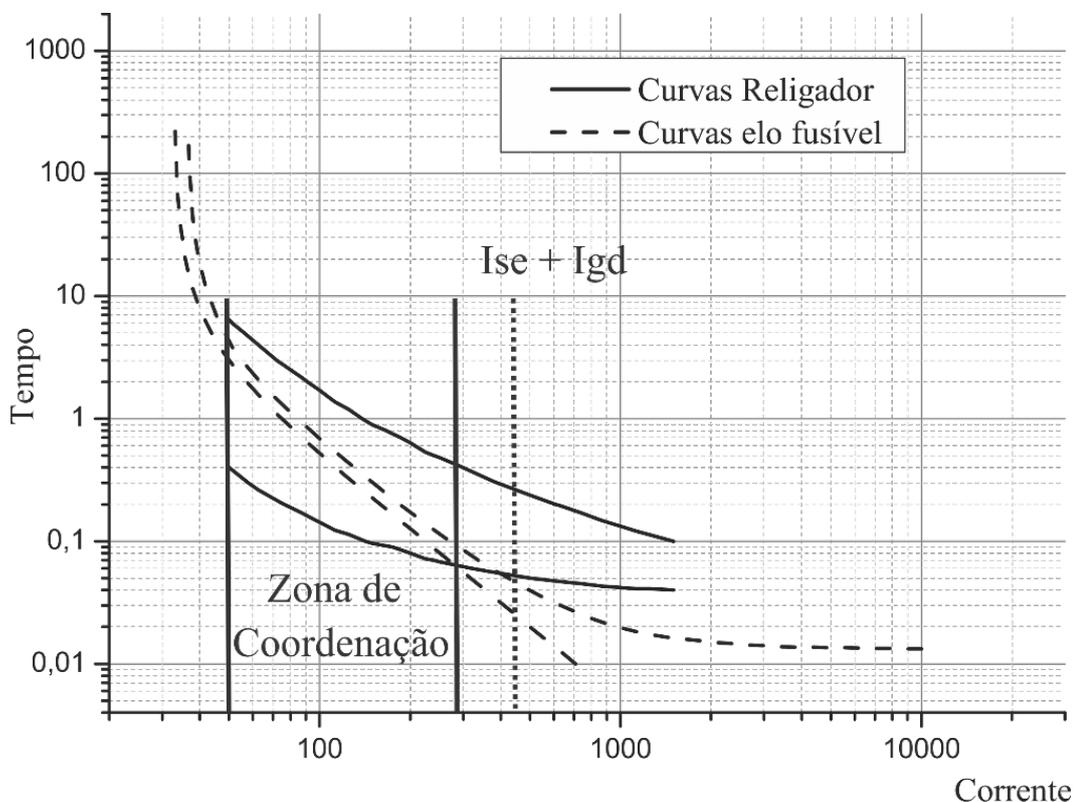
Figura 3.6 – Efeitos da GD na coordenação do religador-fusível.



Fonte: Autor.

Com isso, para uma falta existente no SDEE, as fontes de GD irão contribuir aumentando a corrente de curto-circuito, causando assim a má operação e conseqüentemente a descoordenação dos equipamentos, como é mostrado na Figura 3.7. Mantendo o mesmo religador e elo fusível da análise anterior, a nova corrente de curto-circuito, corrente da subestação (I_{se}) mais a corrente da GD (I_{gd}), fará com que ocorra a operação do elo fusível antes da operação do religador, caracterizando uma descoordenação.

Figura 3.7 – Efeito da contribuição da GD na coordenação religador-elo fusível.



Fonte: GUARDA (2017)

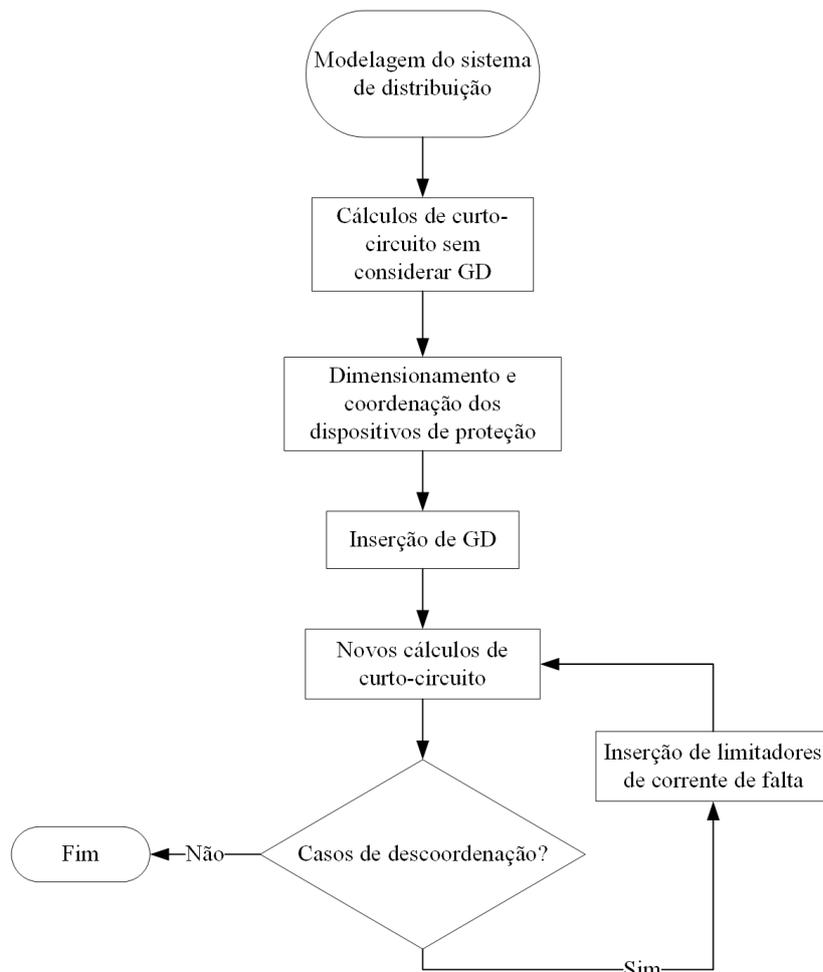
3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi apresentada uma breve introdução dos equipamentos de proteção de SDEE que serão utilizados na análise desse trabalho, e suas características principais. Utilizando as curvas características de tempo x corrente dos religadores e elos fusíveis, com e sem a presença de fontes de GD, no SDEE foi possível definir e demonstrar a coordenação e descoordenação entre religador e elos fusíveis, bem como a seletividade. Foi possível obter o completo entendimento quando este conjunto de equipamentos está operando de forma seletiva (*Fuse Blowing*), ou apenas de forma coordenada (*Fuse Save*), ou então operando de forma coordenada e seletiva, o que se espera do SDEE.

4 METODOLOGIA PROPOSTA

A metodologia proposta segue algumas etapas que podem ser vista na Figura 4.1, onde um fluxograma é apresentado. Ele demonstra a sequência seguida para a aplicação de um limitador de corrente de falta quando ocorrer a descoordenação dos dispositivos de proteção do SDEE. Tudo inicia-se quando um sistema teste é modelado, ou seja, em um *software* é montado todo o SDEE o qual deseja-se executar testes no dispositivos de proteção juntamente com uma inserção de GD. Conseqüentemente é efetuado cálculos de curto-circuito com o intuito de realizar o dimensionamento dos equipamento de proteção do sistema modelado. Uma fonte de GD é inserida no sistema com a finalidade de observar as contribuições das mesmas para a operação dos equipamentos de proteção já existentes na estrutura.

Figura 4.1 – Fluxograma da metodologia proposta.



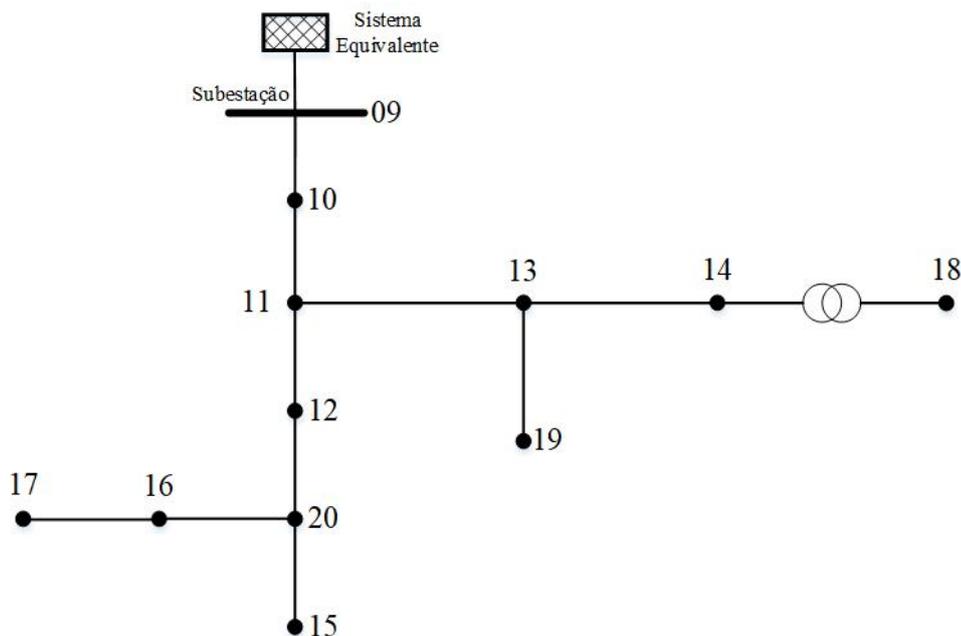
Fonte: Autor.

Por fim, novos cálculos de curto-circuito são efetuados para que se seja possível observar essas alterações. Caso elas existam, serão utilizados limitadores de corrente

de falta tendo como função alterar as correntes de curto-circuito, aumentadas devido a contribuição das fontes de GD, para níveis desejados.

O sistema de distribuição considerado, mostrado na Figura 4.2, encontra-se disponível no DigSilent para estudos de proteção e curto-circuito. Este sistema foi escolhido devido aos dados disponíveis no *software* e pelas características elétricas que facilitaram as simulações.

Figura 4.2 – Sistema teste para simulação.



Fonte: Autor.

Como pode ser visto o sistema é composto por um circuito equivalente, ou seja, é todo o sistema que existe a montante deste sistema analisado. Esta equivalência contém todas as características do SDEE existente anteriormente. Uma subestação rebaixadora de tensão é vista no barramento nove, onde as tensões são rebaixadas de níveis de média tensão (superior a 1000 Volts e inferior 69000 Volts) para níveis de baixa tensão (igual ou inferior a 1000 Volts).

Também é importante relacionar dados de impedâncias para cada trecho das linhas deste sistema, as quais se foram necessárias para os cálculos de curto-circuito demonstrados no decorrer do trabalho. A Tabela 4.1 relaciona os níveis de impedâncias com cada trecho do SDEE da Figura 4.2. Estes valores são extraídos das características dos condutores utilizados, assim a partir da simulação do sistema teste é possível obter esses dados em valores Por unidade (Pu).

Sistemas por unidade é uma forma de expressar as grandezas elétricas de forma normalizada, com base em valores pré determinados. Este sistema é baseado em valor de tensão base (tensão nominal de cada barramento) e potências base (valor arbitrário).

Desta forma, todos os outros medidas elétricas também poderão ser expressos desta forma.

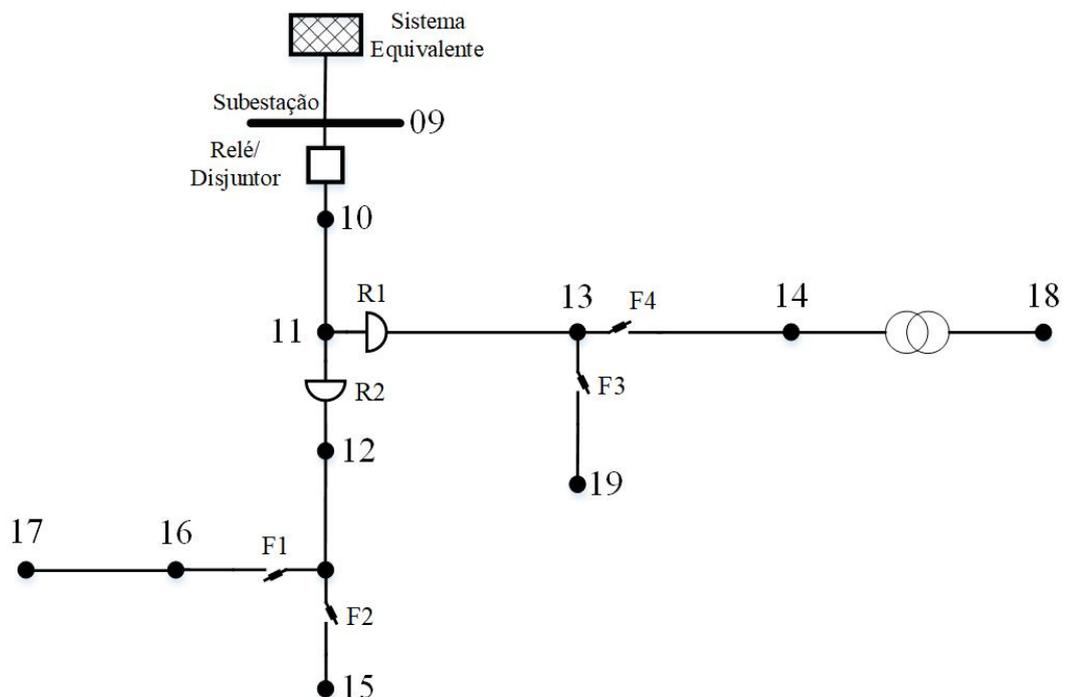
Tabela 4.1 – Impedâncias dos trechos do SDEE teste.

Trecho	Impedância (Pu)
09-11	0,018878
11-12	0,018878
12-20	0,094393
20-16	0,018878
16-17	0,026430
20-15	0,056635
11-13	0,018878
13-14	0,056635
13-19	0,075514

Fonte: Autor.

Os equipamentos de proteção foram alocados de forma a respeitar normas das distribuidoras de energia elétrica, de modo que o sistema opere com segurança e confiabilidade, esta disposição pode ser visualizada na Figura 4.3. Com este arranjo se faz necessário a realização dos dimensionamentos destes equipamentos de proteção, para que a operação deste sistema de distribuição exerça sua função sem comprometer os consumidores a ele conectado.

Figura 4.3 – Alocação dos dispositivos de proteção.



Fonte: Autor.

Os equacionamentos utilizados neste estudo seguem padrões utilizados pela Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL, 2016). Para dimensionamento dos elos fusíveis, Figura 4.3, para a proteção de ramais é utilizado as equações 4.1 e 4.2 .

$$FC \times I_{carga_max.} < I_{elo} \leq \frac{I_{ccFT\ min}}{4} \quad (4.1)$$

Onde:

- I_{elo} é a corrente nominal do elo fusível;
- FC é o fator de crescimento da carga, Equação 2;
- $I_{ccFT\ min}$ é o valor de corrente de curto-circuito fase-terra mínimo;
- $I_{carga_max.}$ é a corrente de carga máxima atual passante no ponto de instalação.

$$FC = \left(1 + \frac{x\%}{100}\right)^n \quad (4.2)$$

Onde:

- $x\%$ é o fator de crescimento percentual anual (considerado 10%);
- n é o número de anos para horizonte de estudo (considerado 5 anos).

Para efetuar tal tarefa é necessário a obtenção de alguns valores de corrente do sistema, tais como, corrente de carga que passa sobre o elo fusível e os valores de curto-circuito no final de cada trecho em que o elo fusível irá proteger. Estes valores serão adquiridos por meio de simulação utilizando o *software* Powerfactory DigSilent®[®], os quais podem ser visualizados da Tabela 4.2. O *software* calcula os valores de curto-circuito através da matriz de admitâncias (Y_{bus}) do sistema, sendo que para o cálculo da corrente de curto-circuito fase-terra mínimo é utilizado uma impedância de falta de 40Ω .

Tabela 4.2 – Dados de corrente relacionado aos elos fusíveis.

Barra	Corrente de curto-circuito fase-terra mínimo (A)	Elo fusível	Corrente de carga máxima (A)
14	544	F1	32,91
15	512	F2	25,98
17	543	F3	25,98
19	854	F4	33,92

Fonte: Autor.

Os elos fusíveis analisados serão do tipo K, pois tem rápida característica de atuação tornando-se muito recomendado principalmente para proteção de ramais, e do tipo preferencial, ou seja, elos de 6K, 10K, 15K, 25K, 40K, 65K ,100K ,140K ou 200K. Desta

Tabela 4.3 – Tipos de elos fusíveis utilizados.

Elo fusível	Tipo do elo fusível
F1	65K
F2	40K
F3	40K
F4	65K

Fonte: Autor.

forma com a utilização das Equações 4.1 e 4.2 e da Tabela 4.2 é possível obter os valores da corrente nominal dos elos fusíveis a serem instalados, Tabela 4.3.

Com a execução do projeto anterior faz-se necessário o dimensionamento dos religadores existentes no sistema, R1 e R2 vistos na Figura 4.3. Será considerado os mesmos padrões anteriores de dimensionamento, ou seja, padrões utilizados pela CPFL. Serão considerados para tal equipamento apenas ajustes de disparo de fase pelo fato dos religadores utilizados não possuírem ajuste de disparo de neutro. A Equação 4.3 demonstra o dimensionamento utilizado para religadores conforme normas da concessionária.

$$FC \times I_{carga_max.} < I_{pickupF} \leq \frac{I_{cc2F}}{FS} \quad (4.3)$$

Onde:

- $I_{pickupF}$ é a corrente de pick-up de fase do religador;
- FC é o fator de crescimento da carga, Equação 4.2;
- I_{cc2F} é o valor de corrente de curto-circuito bifásico simétrico no final do trecho protegido pelo religador;
- $I_{carga_max.}$ é a corrente de carga máxima atual passante no ponto de instalação;
- FS é um fator de segurança, ou seja, são erros acumulados nos transformadores de corrente e transformadores de potencial, normalmente usa-se 1,5 a 2.

Com a auxílio da simulação podem ser levantados dados de corrente de curto-circuito bifásico simétrico no final de cada trecho que o religador irá proteger, e dados de corrente de carga existentes no local de instalação dos mesmos, dados estes disponíveis na Tabela 4.4.

Desta maneira, será considerado o menor valor corrente de curto-circuito bifásica no final de cada trecho que o religador irá proteger, assim para realizar o projeto foi considerado a barra 15 para o religador 2 e a barra 19 referente ao trecho do religador 1. Com isso os religadores a serem utilizado são do tipo KF (com extinção a vácuo) com bobina série de 100A. Como se sabe, esses religadores estão sendo substituídos nos SDDE, no entanto eles serão utilizado pois ainda são muito encontrados nos SDDE atuais, e também

Tabela 4.4 – Dados de corrente relacionado aos religadores.

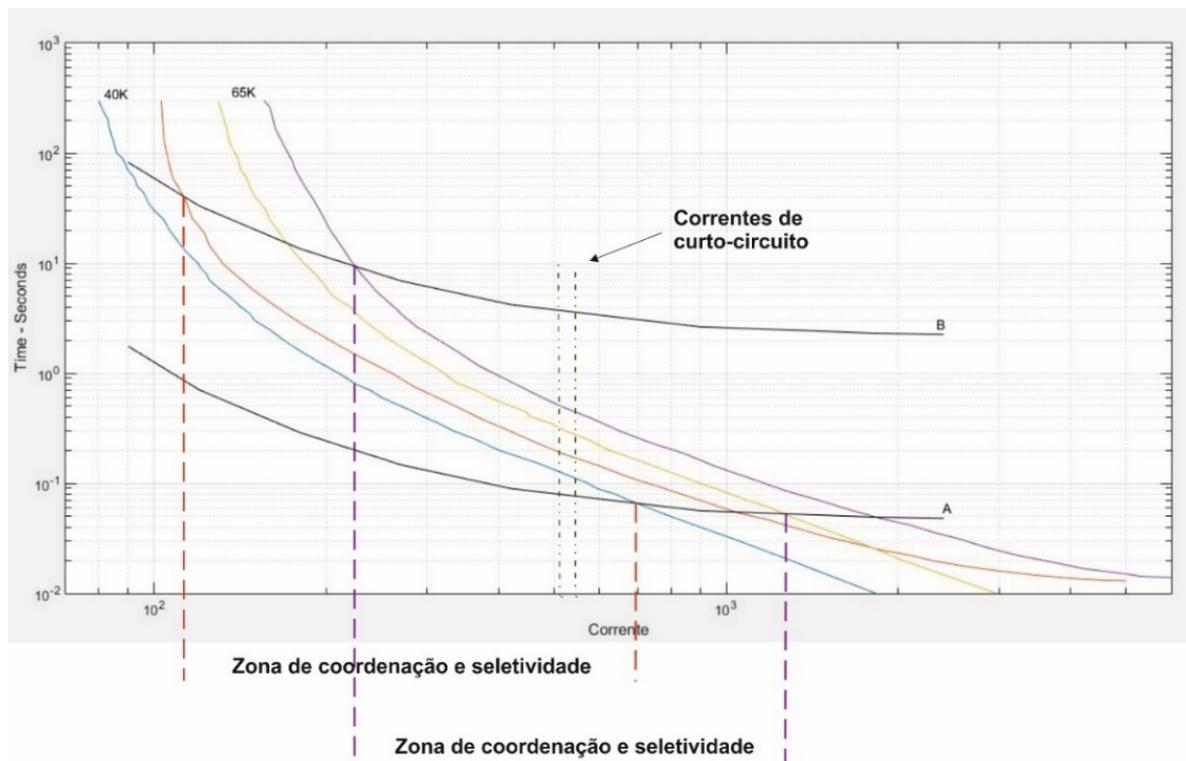
Religador	Corrente de carga máxima (A)	Barra	Corrente de curto-circuito bifásico (A)
R1	73,35	14	1481
		19	1261
R2	76,21	15	738
		17	836

Fonte: Autor.

pela fácil execução e contato com suas respectivas curvas de operação. Assim tornando o estudo mais eficaz e não menos importante quando comparado à outros dispositivos existentes.

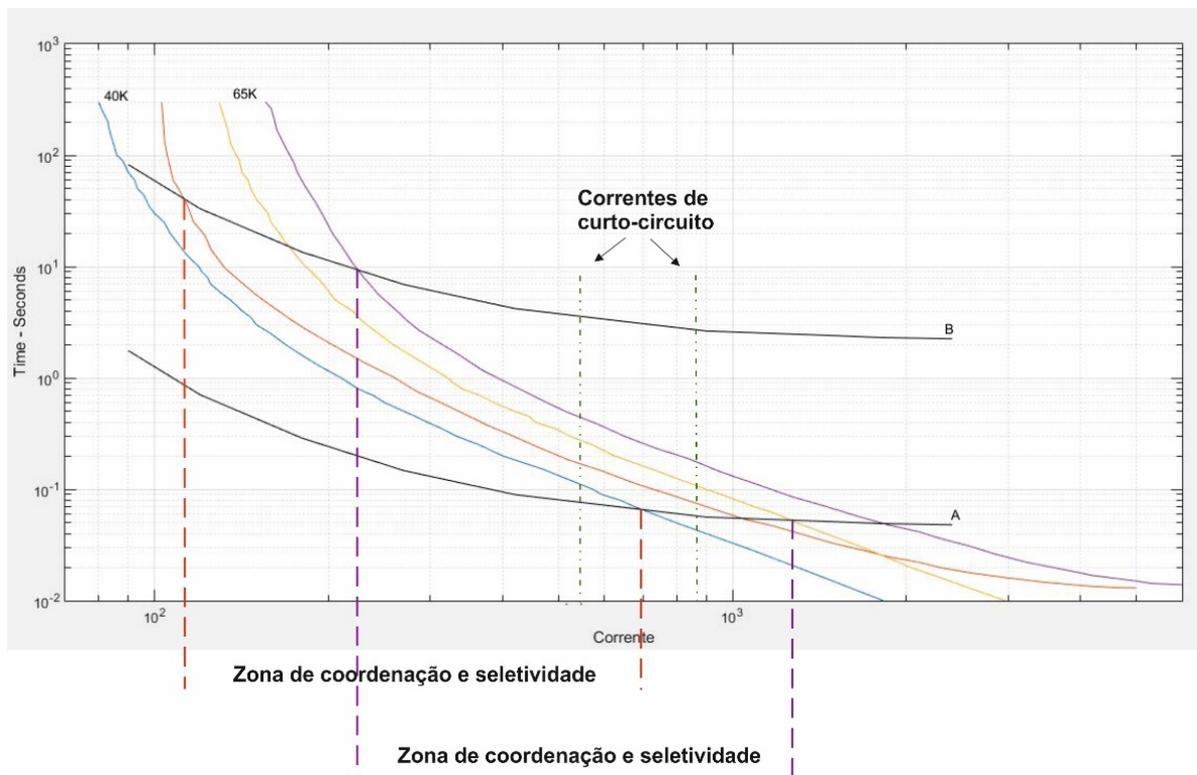
Para garantir que o sistema seja coordenado e seletivo, conforme conceituado no capítulo três, serão apresentados os coordenogramas referentes aos dispositivos de proteção associados ao sistema teste. Estes coordenogramas foram realizados utilizando o software Matlab, onde as curvas dos religadores e dos elos-fusíveis podem ser simulados e sobrepostas salientando desta as zonas de coordenação e seletividade, esses dados podem ser vistos na Figura 4.4 e Figura 4.5.

Figura 4.4 – Coordenograma religador 2 com elo fusível 1 e 2.



Fonte: Autor.

Figura 4.5 – Coordenograma religador 1 com elo fusível 3 e 4.

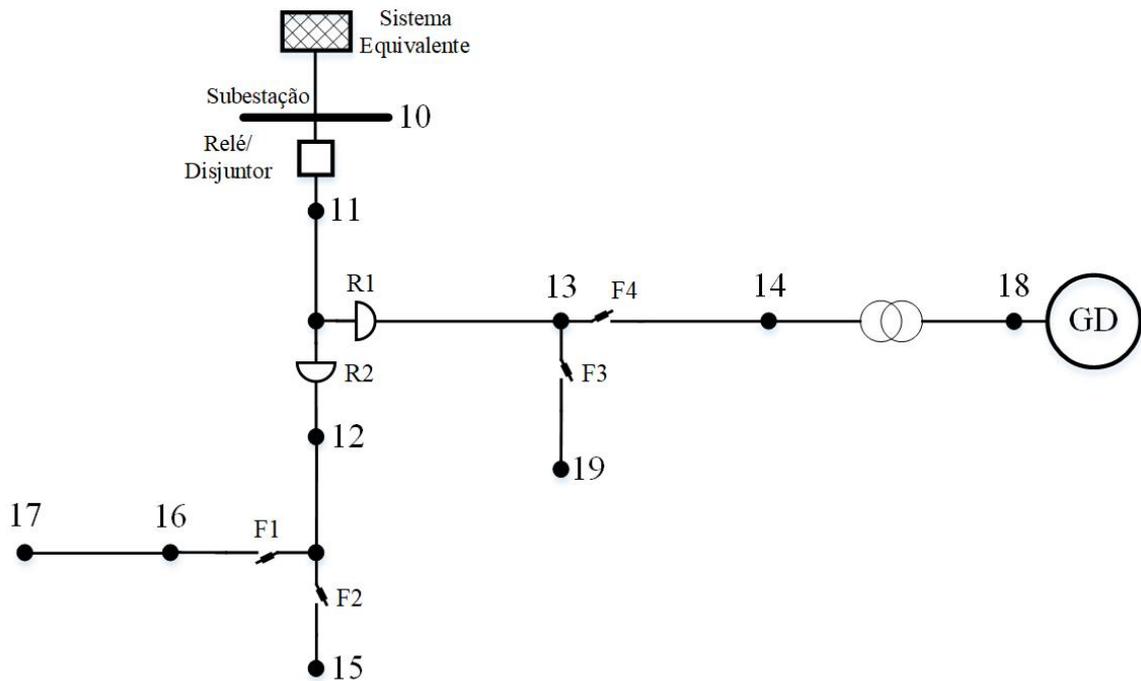


Fonte: Autor.

Desta forma é garantido que o SDEE teste esteja operando de forma correta e segura em relação aos seus equipamentos de proteção, ou seja, religadores e elos fusíveis coordenados e seletivos. Pois as correntes de curto-circuito estão localizadas dentro de suas respectivas zonas de coordenação e seletividade, como visto nas figuras anteriores.

Como o objetivo deste trabalho é analisar as consequências que a GD causa nos equipamentos de proteção do SDEE, assim a Figura 4.6 apresenta uma GD diretamente conectada ao sistema. Esta geração será um gerador síncrono acoplado ao sistema através de um transformador. Este gerador opera com sua potência nominal, ou seja, fornece ao sistema 4.9MVA de potência. Este gerador foi escolhido pelo fato de já estar modelo e disponível no *software* de simulação, e também pelo fato de sua potência nominal estar entre os limites estabelecidos para ser considerada uma fonte de GD. Tornando assim uma simulação mais real e precisa, pelo fato da fonte de GD ser um modelo real.

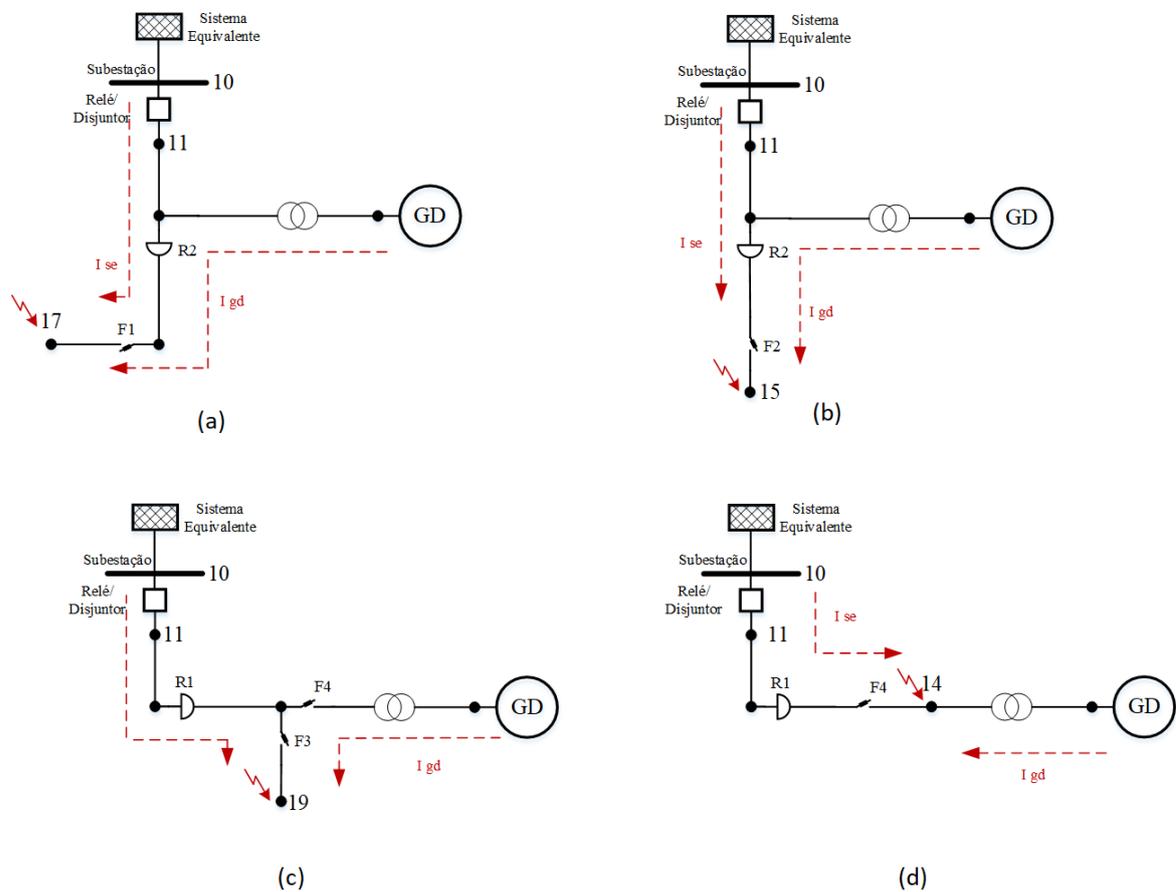
Figura 4.6 – Sistema teste com GD acoplada.



Fonte: Autor.

Levando em consideração que a GD irá contribuir para as correntes de curto-circuito em qualquer trecho do SDEE, torna-se extremamente necessário analisar os níveis destas correntes visando a garantia da coordenação do sistema, a localização dos curto-circuito realizados no sistema para esta etapa se situaram nas mesmas barras da análise anterior. Essas contribuições podem ser melhor compreendidas na Figura 4.7.

Figura 4.7 – Contribuições das correntes de curto-circuitos nas barras, (a) 17, (b) 15, (c) 19, (d) 14, considerando a GD.



Fonte: Autor.

Dessa forma, é necessário garantir que essas contribuições não alterem o funcionamento coordenado e seletivo entre religador e elo fusível, para isso é necessário saber quais alterações nos níveis de corrente de curto-circuito foram ocasionadas pela inserção desta fonte de GD. Via simulação é possível obter os valores dessas alterações para cada falta vista na Figura 4.7, e compará-las, Tabela 4.5, com valores obtidos anteriormente sem a conexão da fonte de GD.

Tabela 4.5 – Comparação de valores de corrente de curto-circuito com e sem GD.

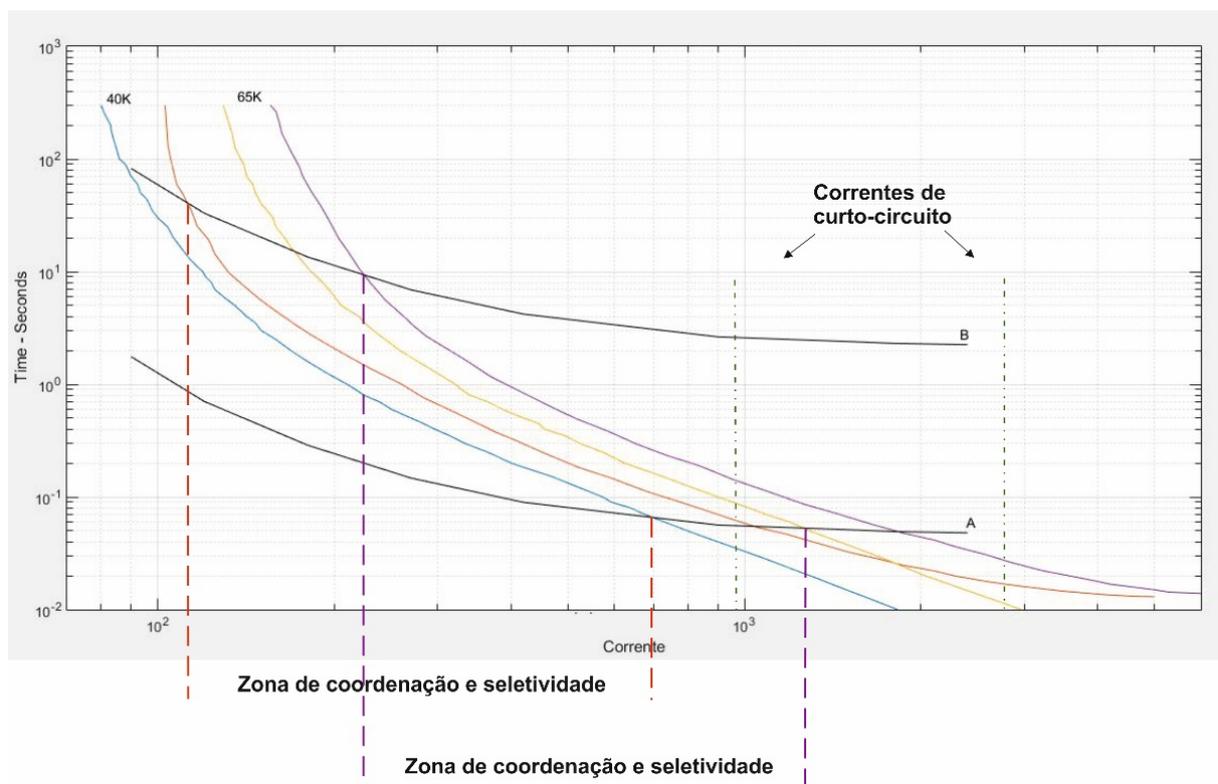
Barra	Corrente de curto-circuito sem GD (A)	Corrente de curto-circuito com GD (A)
14	544	2760
15	512	520
17	543	552
19	854	920

Fonte: Autor.

Como pode ser visto no Tabela 4.5, as correntes de curto-circuito nas barras 15 e 17

não sofreram grandes alterações com a conexão da GD, pelo fato de estarem mais distantes do ponto de conexão. Já as barras 14 e 19 sofreram maior alteração, principalmente a barra 14, que está bem próxima ao ponto de inserção da fonte de GD. Levando em consideração as correntes de curto-circuito com a contribuição da GD, é possível realizar a análise de novos coordenogramas referentes aos trechos de proteção do religador 1 e 2, onde será possível observar o comportamento dos elementos de proteção do sistema, Figura 4.8 e Figura 4.9.

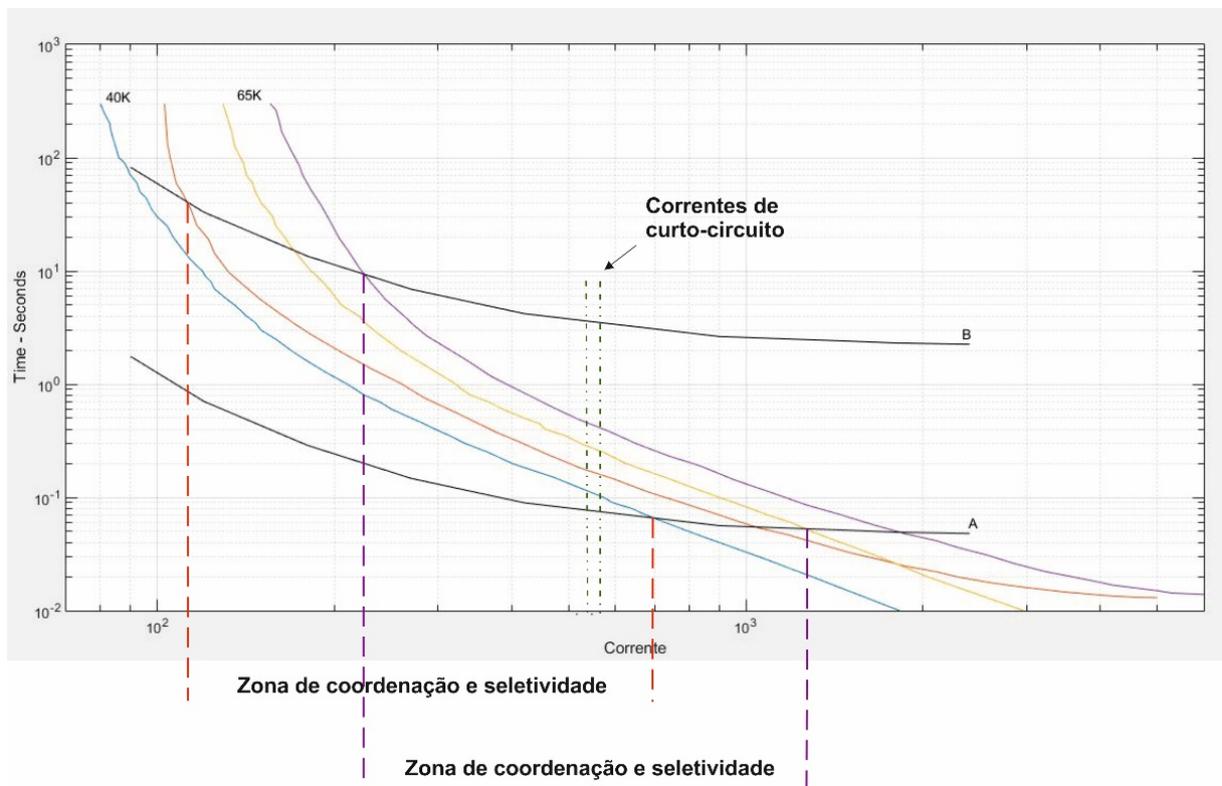
Figura 4.8 – Coordenograma do trecho atrelado ao religador 1 com GD.



Fonte: Autor.

Como pode ser visto na Figura 4.9, não houve grandes modificações nos níveis de corrente de curto-circuito, com isso podemos observar que os elementos de proteção ainda estão operando de forma correta, coordenados e seletivos. No entanto, na Figura 4.8 é possível concluir que ambos os trechos protegidos pelo religador 1 sofreram modificações nas correntes de falta, ou seja, houve uma contribuição bem considerável da fonte de GD para os pontos de falta observados.

Figura 4.9 – Coordenograma do trecho atrelado ao religador 2 com GD.



Fonte: Autor.

Com isso é necessário aplicar uma metodologia para garantir que a operação desses dispositivos volte a ser seletiva e coordenada, fazendo com que os níveis de corrente de curto-circuito retornem para dentro a zona de coordenação e seletividade, visualizadas nos coordenogramas. Nesse trabalho serão utilizados limitadores de corrente de falta (LCF), onde será determinada a impedância do LCF a ser utilizado para manutenção da coordenação entre religador e elos fusíveis no sistema com GD.

O LCF será alocado na barra 14, pois é nela que a maior contribuição nos níveis de curto-circuito, provenientes da GD, são presenciados, como pode ser observado pela Tabela 4.5. Ao sentir uma alta variação nas correntes de faltas o LCF irá alterar a impedância da linha de modo que se possa limitar os valores de corrente de curto-circuito quando os mesmos ocorrerem principalmente nas barras 14 e 19 (pontos de falta referentes à descoordenação dos dispositivos de proteção). Realizando teste via simulação, chega-se a conclusão que, considerando as piores correntes de curto-circuito, o LCF ao sentir tal efeitos terá que injetar um impedância de aproximadamente três vezes a impedância original do trecho, Tabela 4.6, fazendo com que o sistema de proteção opere para essas faltas de forma coordenada e seletiva, eliminando assim de maneira rápida e correta a falta existente, quando a GD for considera conectada ao sistema.

Tabela 4.6 – Comparação dos valores de impedâncias originais e para correção da coordenação.

Trecho	Impedâncias originais (Pu)	Novas impedâncias (Pu)
09-11	0,018878	0,018878
11-12	0,018878	0,018878
12-20	0,094393	0,094393
20-16	0,018878	0,018878
16-17	0,026430	0,026430
20-15	0,056635	0,056635
11-13	0,018878	0,018878
13-14	0,056635	0,207664
13-19	0,075514	0,075514

Fonte: Autor.

Com isso, foi possível realizar novas simulações para visualizar os novos valores de curto-circuito nas barras testes. Na Tabela 4.7 pode ser vistos os valores de corrente de curto-circuito referente ao sistema teste original sem GD, sistema teste com GD e sistema teste com LCF. A partir desses valores, novos coordenogramas, Figura 4.10 e Figura 4.11, podem ser realizados para que se possa comprovar a garantia de coordenação e seletividade entre os equipamentos de proteção (religador e elo fusível) desse SDEE em estudo.

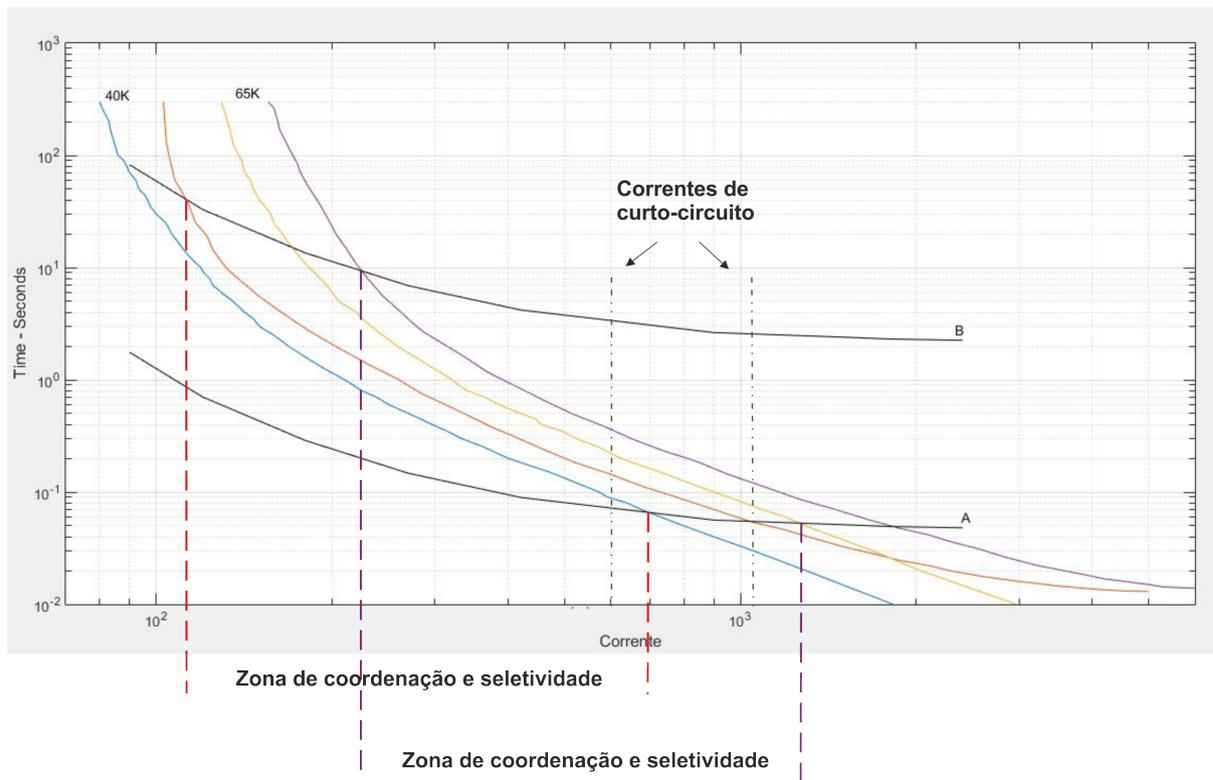
Tabela 4.7 – Comparação de valores de corrente após alocar o LCF.

Barra	Corrente de curto-circuito sem GD (A)	Corrente de curto-circuito com GD (A)	Corrente de curto-circuito com GD e LCF (A)
14	544	2760	1067
15	512	520	434
17	543	552	457
19	854	920	609

Fonte: Autor.

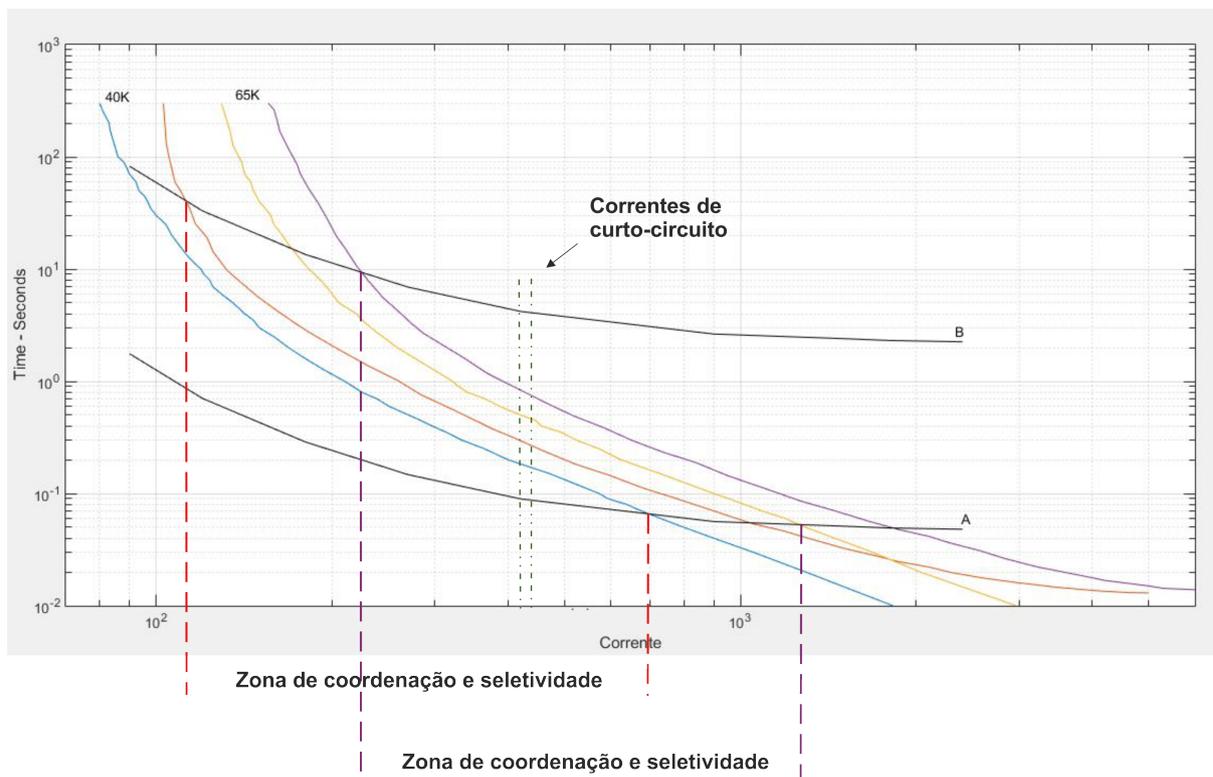
Assim, como pode ser observado nos novos coordenogramas, esta localização de instalação do LCF, bem como a impedância projetada para o mesmo (aproximadamente 0,1510299 Pu), resolvem o problema referente à descoordenação de religador e elo fusível.

Figura 4.10 – Coordenograma do trecho atrelado ao religador 1 com GD e LCF.



Fonte: Autor.

Figura 4.11 – Coordenograma do trecho atrelado ao religador 2 com GD e LCF.



Fonte: Autor.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentado um método, inserção de LCF para garantir coordenação e seletividade em SDEE com GD, que visa solucionar o problema encontrado em um sistema de distribuição moderno: a garantia de coordenação e seletividade entre religador e elo fusível em sistema de distribuição com GD. A solução proposta foi a utilização de um LCF, onde inicialmente via simulação foi comprovado que ao sentir os efeitos de descoordenação do SDEE o LCF realiza o aumento da impedância da linha para reduzir a contribuição de corrente da fonte de GD para o ponto de falta. Esta análise foi possível a partir do dimensionamento dos elementos de proteção do SDDE teste, bem como a alocação desses dispositivos, segundo normas das concessionárias.

A descoordenação entre religador e elo fusível dependerá, principalmente, dos níveis de corrente que a GD irá contribuir para o ponto de falta no SDDE. Porém, é possível concluir nesse estudo que a localização em que a GD encontra-se instalada no sistema, é muito relevante para os equipamentos de proteção, ou seja, para diferentes localizações da GD os elementos de proteção irão se comportar de formas diferentes em suas operações, para um determinado curto-circuito. Assim para que essa utilização de LCF seja válida, é necessário que seja feita uma análise minuciosa de cada nova fonte de GD inserida no SDDE, e as consequências que as mesmas causam na proteção, para que se possa realizar a aplicação de LCF.

Por fim, para o SDDE proposto obteve-se êxito na garantia de coordenação e seletividade, perdidas com a inserção de uma fonte de GD. Este estudo é primordial para que outras metodologias sejam elaboradas e conseqüentemente aplicadas em sistemas físicos reais.

5.1 TRABALHOS PUBLICADOS

Ao longo desse trabalho foram aprovados e publicados dois artigos científicos e dois resumos apresentados como *banner*, respectivamente:

- SEPOC'18 - XI Seminar on Power Electronics and Control. Título do trabalho: "*Influência de Fontes de Geração Distribuída na Proteção de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica*".
- CRICTE'18 - XXVIII Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia. Título do trabalho: "*Análise crítica do Impacto de Fontes de Geração Distribuída na Proteção de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica*".
- JAI'18 - XXXIII Jornada Acadêmica Integrada. Título do trabalho: "*Análise da Influência da Geração Distribuída na Proteção de Sistemas de Distribuição de Energia*".

Elétrica".

- MOSTRA DE PROJETOS UFSM-CS'18. Título do Trabalho: "*Análise do Impacto da Conexão de Fontes de Geração Distribuída na Proteção de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica*"

5.2 TRABALHOS FUTUROS

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

- Modelagem dos dispositivos de proteção no *software* OpenDSS;
- Simulação da influência da reconfiguração de redes de distribuição com geração distribuída na proteção de sistemas de distribuição.

REFERÊNCIAS

- 1547.2TM, I. S. *Standard for interconnecting distributed resources with electric power systems*. [S.l.], 2008.
- AL-NASSERI, H.; REDFERN, M. Harmonics Content Based Protection Scheme for Micro-Grids Dominated by Solid State Converters. **IEEE International Middle-East Power System Conference (MEPCON)**, p. 50–60, 2008.
- ANEEL, A. N. D. E. E. **Resolução Normativa número 482/2012**. 2012. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>> Acessado em: 12 de dez. 2018.
- ANEEL, A. N. D. E. E. **PRODIST - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional**. 2014. Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica. Revisão 7.
- AYRES, H. M. **Desenvolvimento de Metodologias de Análise de Geradores Distribuídos em Sistemas de Distribuição de Energia**. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas, 2010.
- BARKER, P. P.; MELLO, R. W. de. Determine the Impact of Distribution Generation on Power Systems: Part 1- radial Distribution Systems. **IEEE Power Technologies**, p. 1645–1656, 2000.
- BIALEK, W.; CALLAN, G. C.; STRONG, P. S. Field Theories for Learning Probability Distributions. **IEEE Transactions on Power Systems**, p. 4693–4697, 1996.
- CONEJO, P. M. Transmission Loss Allocation: A comparison off Different Practical Algorithms. **IEEE Transactions on Power Systems**, p. 384–389, 2002.
- DELMAR. 2018. <<http://www.delmar.com.br/pdf/dhc.pdf>>. Acessado em: 10/11/2018.
- FUNMILAYO, H. B.; SILVA, J. A.; BUTLER-PURRY, K. L. Overcurrent protection for the IEEE 34-node radial test feeder. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 22, p. 459–468, 2012.
- GIRGIS, A. A.; BRAHMA, S. M. Effect of Distributed Generation on Protective Device Coordination in Industry System. **Large Engineering Systems Conference on Power Engineering**, p. 115–119, 2001.
- GOMES, E. A. P. **Detecção de Ilhamento de Geradores Síncronos Distribuídos por Correlação da Mineração Complexa de Dados**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2016.
- GUARDA, F. G. K. **Metodologia Híbrida Para Alocação, Coordenação e Dimensionamento de Dispositivos de Proteção em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica com Geração Distribuída Diretamente Acoplada**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Maria, 2017.

GUTIERRES, L. F. F. **Proposta de um Sistema de Proteção para Preservar a Coordenação entre Religadores e elos Fusíveis de Sistema de Distribuição na Presença de Geração Distribuída**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Maria, 2013.

HADJSAID, N.; CANARD, J. F.; DUMAS, F. Dispersed generation impact on distribution networks. **IEEE Computer Application in Power**, v. 12, p. 22–28, 1999.

HUSSAIN, B. et al. An adaptive relaying scheme for fuse saving in distribution networks with distribution generation. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 28, p. 1–9, 2013.

KENNEDY, J.; AGALGAONKAR, A.; CIUFO, P. A review of protection systems for distribution networks embedded with renewable generation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, p. 1308–1317, 2016.

KENNEDY, J.; CIUFO, P.; AGALGAONKAR, A. Over-Voltage Mitigation Within Distribution Networks With a High Renewable Distributed Generation Penetration. **IEEE international energy conference (ENERGYCON)**, p. 1107–1114, 2014.

LORA, E. S.; HADDAD, J. **Geração Distribuída Aspectos Tecnológicos, Ambientais e Institucionais**. [S.l.]: Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2006.

MAMEDE, J. F. **Manual de Equipamentos Elétricos**. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

MARCHESAN, G. **Deteção de Ilhamento em Sistemas de Distribuição com Geração Sínrona DistribuÍda**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Maria, 2016.

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

NARUTO, D. **Vantagens e desvantagens da geração distribuída e estudo de caso de um sistema solar fotovoltaico conectado á rede elétrica** . Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017.

SALMAN, S. K. The impact of embedded generation on voltage regulation and losses of distribution networks. **IEEE colloquium on the impact of embedded generation on distribution networks**, 1996.

SCHNEIDER. 2018. <<https://www.schneider-electric.com/en/product-range/1407-u-series/>>. Acessado em: 11/11/2018.

VIEIRA, J. C. d. M. **Metodologias para Ajuste e Avaliação do Desempenho de Relés de Proteção Anti-Ilhamento de Geradores Síncronos DistribuÍdos**. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas, 2006.

ZEINELDIN, H.; EL-SAADANY, E.; SALAMA, M. Distributed Generation Micro-Grid Operation: Control and Protection. **IEEE Power Systems Conference**, p. 105–111, 2006.

ZEINELDIN, H. H. et al. Optimal Protection Coordination for Meshed Distribution Systems With DG Using Dual Setting Directional Over-Current Relays. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 6, p. 115–123, 2015.