

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

DOUGLAS WILLIAN SOARES RODRIGUES

**AVALIAÇÃO DA PERDA DE COORDENAÇÃO NA PROTEÇÃO DE UM SISTEMA
DE DISTRIBUIÇÃO NA PRESENÇA DE FONTES DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**

ALEGRETE

2023

DOUGLAS WILLIAN SOARES RODRIGUES

**AVALIAÇÃO DA PERDA DE COORDENAÇÃO NA PROTEÇÃO DE UM SISTEMA
DE DISTRIBUIÇÃO NA PRESENÇA DE FONTES DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia elétrica
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Chrystian Dalla Lana da Silva

ALEGRETE

2023

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

R696a RODRIGUES, DOUGLAS WILLIAN

AVALIAÇÃO DA PERDA DE COORDENAÇÃO NA PROTEÇÃO DE UM SISTEMA
DE DISTRIBUIÇÃO NA PRESENÇA DE FONTES DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA /
DOUGLAS WILLIAN RODRIGUES.

42 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade
Federal do Pampa, ENGENHARIA ELÉTRICA, 2023.

"Orientação: Chrystian Dalla Lana da Silva".

1. Geração Distribuída. 2. Coordenação. 3. Proteção. I.
Título.

DOUGLAS WILLIAN SOARES RODRIGUES

**AVALIAÇÃO DA PERDA DE COORDENAÇÃO NA PROTEÇÃO DE UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO NA
PRESENÇA DE FONTES DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 17 de janeiro de 2023.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Prof. Dr. Chrystian Dalla Lana da Silva
Orientador
UNIPAMPA

Prof. Dr. Prof. Dr. Eduardo Machado dos Santos
UNIPAMPA

Prof. Dr. Eng. Eduardo Davila Kilian
UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **CHRYSIAN DALLA LANA DA SILVA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/01/2023, às 09:23, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **EDUARDO MACHADO DOS SANTOS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/01/2023, às 09:26, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **EDUARDO DAVILA KILIAN, Usuário Externo**, em 31/01/2023, às 13:47, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1029051** e o código CRC **DE15D948**.

Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete
Av. Tiarajú, 810 – Bairro: Ibirapuitã – Alegrete – RS CEP: 97.546-550
Telefone: (55) 3422-8400

Dedico este trabalho aos meus pais, minha esposa, toda minha família e amigos.

AGRADECIMENTO

Gostaria de dedicar essa conquista a todas as pessoas e colegas que de alguma forma me auxiliaram e contribuíram para chegar ao fim dessa caminhada.

Agradeço à pessoa que me inspira todos os dias, dando-me apoio emocional e ajudando durante toda a graduação, Cristiane e à nossa gatinha de estimação.

Aos meus pais Dorival e Nina, que me deram uma educação excepcional e me auxiliaram todo o tempo que preciso, aos meus sogros Sergio e Elizandra que me deram apoio como se eu fosse filho deles.

Agradeço ao meu irmão, Thiago, sua esposa Pamela, que me deram o prazer de ser tio da Matina. Também a minha cunhada Rafaela.

Agradeço aos meus amigos, colegas, vizinhos que levarei para vida Ana Clasen, Elandro, Djonathan, Kelly, Caique, Christian, Tia Fatima e Vó Marieta que sempre nos cuidou como netos dela.

Não posso esquecer dos meus amigos de internet, onde montamos um grupo que surgiu de um bando de jovens jogando juntos e, hoje, somos mais que uma família, pessoal da BullDemon, que sempre estavam lá nos momentos em que eu estava para baixo, para divertir jogando alguma coisa, ou só conversando algo engraçado, ou tiltando jogando algo competitivo.

Gostaria de agradecer também o professor que me orientou, Chrystian Dalla Lana da Silva, sempre à disposição. Agradecer também a todos os professores e servidores que eu conheci nessa caminhada, que não foi curta e sim muito árdua, mas felizmente está terminando.

“O começo da sabedoria é a declaração “eu não sei”. A pessoa que não pode fazer essa declaração é aquela que nunca aprenderá nada. E eu me orgulhei da minha capacidade de aprender”.

Thrall, The Earth-Warder: World of Warcraft

RESUMO

As instalações de módulos solares em residências, prédios e áreas industriais estão crescendo. Essas fontes de geração distribuída podem acabar acarretando problemas no sistema de distribuição de energia elétrica da concessionária, podendo causar sobrecarga de transformadores. O objetivo desse trabalho é demonstrar que é possível a coordenação, a seletividade da proteção no sistema de distribuição de energia, com a geração distribuída, fazendo a análise de elos fusíveis e religadores. Foi realizada a simulação de um caso específico escolhido, sistema IEEE 13 Barras. Para a análise do sistema utilizou-se o Software de simulação Power World. Através da análise e simulação no software, pode-se avaliar que, para os sistemas IEEE13 Barras, é possível manter a coordenação entre o elo fusível e religadores.

Palavras-Chave: Geração Distribuída, Coordenação, Proteção.

ABSTRACT

Installations of solar modules in homes, buildings and industrial areas are growing. These distributed generation sources may end up causing problems in the utility's electricity distribution system, which may cause overload of transformers. The objective of this work is to demonstrate that distribution system protection coordination as selectivity is possible even with distributed generation, analyzing fuses and reclosers. A simulation of a specific chosen case, IEEE 13 Bus system, was carried out. For the analysis of the system, the Power World simulation software was used. Through the analysis and simulation in the software, it can be evaluated that, for the IEEE13 Bus systems, it is possible to maintain the coordination between the fuse and reclosers.

Keywords: Distributed Generation, Coordination, Protection.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplificação do ciclo de operação de um religador	22
Figura 2 – Sistema IEEE 13 Barras.....	25
Figura 3 – Circuito plotado no software Power World.	28
Figura 4 – Circuito com elos fusíveis e religador (vermelho no centro barra 761).....	30
Figura 5 – Estatísticas de curto-circuito nos sistemas de distribuição.....	35
Figura 6 – Curva coordenação e seletividade trifásicas sem fonte de geração distribuída.....	35
Figura 7 – Curva coordenação e seletividade trifásicas com fonte de geração distribuída nó 671.....	36
Figura 8 – Curva coordenação e seletividade trifásicas com fonte de geração distribuída nó 633.....	36
Figura 9 – Curva coordenação e seletividade trifásicas com fonte de geração distribuída nó 671 e 633.....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados da fonte e transformador.....	25
Tabela 2 – Potências por nó.....	26
Tabela 3 – Comprimento e configuração dos trechos.....	26
Tabela 4 – Cálculo das impedâncias de linha.....	27
Tabela 5 – Potências das cargas.....	27
Tabela 6 – Potências das cargas.....	28
Tabela 7 – Tabela de curto-circuito sem fontes de geração distribuídas.....	31
Tabela 8 – Tabela de curto-circuito com fontes de geração distribuídas no nó 671..	31
Tabela 9 – Tabela de curto-circuito com fontes de geração distribuídas no nó 633..	32
Tabela 10 – Tabela de curto-circuito com fontes de geração distribuídas no nó 671 e 633.....	32
Tabela 11 – dimensionamento elo fusível sem fonte de geração distribuída.....	33
Tabela 12 – Dimensionamento elo fusível com fonte de geração distribuída no nó 671.....	33
Tabela 13 – Dimensionamento elo fusível com fonte de geração distribuída no nó 633.....	34
Tabela 14 – Dimensionamento elo fusível com fonte de geração distribuída no nó 671 e 633.....	34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

CIGRE - Conseil International des Grands Réseaux Électriques

COORD. – coordenador

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

GD - Geração Distribuída

IEA - International Energy Agency

IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers

kVA – Quilovoltampere

kW – Quilo-Watt

MME - Ministério de Minas e Energia

MW – Mega-Watt

ONS - Operador Nacional do Sistema

SDEE – Sistema de Distribuição de Energia

SEP – Sistema Elétrico de Potência

TC – Transformador de Corrente

TP – Transformador de Potencial

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 JUSTIFICATIVA.....	15
1.2 OBJETIVO	16
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1 Geração Distribuída	18
2.1.1 Geração Distribuída no Brasil	18
2.2 Sistema de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE)	19
2.2.1 Proteção do Sistema de Distribuição	20
2.2.3 Religador	21
2.2.4 Chave fusível	23
3 METODOLOGIA	25
4 APRESENTAÇÃO DA PESQUISA E ANÁLISE DOS RESULTADOS	29
4.1 Sistema teste da Norma IEEE com o circuito alimentador teste 13 barras..	29
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	38
5.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	38
ANEXOS	39
REFERÊNCIAS.....	41

1 INTRODUÇÃO

A Geração de Energia é um assunto de suma importância para o desenvolvimento mundial, e a eletricidade é o tipo de energia mais consolidado, sendo assim tendo uma influência direta sobre a natureza com o aumento de poluentes sendo dispersos no meio ambiente, entretanto nos últimos anos a quantidade de módulos de geração distribuídas foram instalados. Segundo Borbely e Kreider (2001), o conceito de GD não é novo, remontando à primeira metade do Século XIX, onde os diversos tipos de energia, como vapor, calor, hidráulica, era produzida próxima ao local de consumo. Mas em 1890, Thomas Edison criou a primeira companhia elétrica, imitando a distribuição de gás para acendimento de lâmpadas. Esse tipo de distribuição virou tendência, colocando a GD em desuso (BOBERLY E KREIDER, 2001).

Segundo Gutierrez (2013), pode-se entender como GD a geração despachada de forma centralizada e localizada próxima aos centros de consumo. Atualmente esse tipo de Geração é utilizado para designar os projetos de geração de pequeno porte, conectados à rede de energia de forma dispersa, mais comum aos sistemas de distribuição, mas dependendo da capacidade, também são encontrados conectados aos sistemas de subtransmissão. Esta forma de geração também tem sido denominada Geração Dispersa (*Dispersed Generation*), Geração Local (*On Site Generation*) e Geração Embutida (*Embedded Generation*).

Para Lora e Haddad (2002), pode-se observar um interesse crescente na GD, pois além dos incentivos e dos aspectos técnicos, esse tipo de energia passou por uma desregulamentação no setor de energia elétrica. Dessa forma, esse mercado se tornou o alvo principal em busca de um ambiente competitivo, inovador e voltado para os consumidores.

1.1 Justificativa

No cenário mundial atual a energia é imprescindível para cada detalhe do que é feito e usado pelas pessoas. E para empresas e investidores essa área se tornou de grande preocupação, pois observa-se uma notável limitação na geração de

energia. Dessa forma, tanto empresas como governos estão investindo em fonte de energias diversificadas, buscando eliminar esse entrave.

Assim, a GD tem apresentado um grande aumento no mercado de energia mundial e brasileiro, justificado pelos grandes incentivos e disponibilidade da matéria prima sem custo. Um exemplo disso, é Energia Solar. As instalações de placas solares em residências, prédios e áreas industriais estão crescendo cada vez mais, por ser um investimento lucrativo.

Apesar disso, as empresas investidoras nessa área encontram um grande dilema, pois a segurança e proteção da GD devem ser muito bem elaborados, evitando problemas e mau funcionamento. Essas fontes de geração distribuída podem acabar acarretando problemas no sistema de distribuição de energia elétrica da concessionária, causando defeitos e até perda dos equipamentos que tem um valor elevado tanto para o cliente quando para concessionária. Mas é preciso considerar o valor dos equipamentos em cada rede, o que pode elevar o valor da instalação de um sistema. Então, esse planejamento deve ser feito com base em estudos e análises, buscando não inviabilizar o investimento.

Assim, este trabalho visa a verificar e explicar se haverá coordenação entre o religador e o elo fusível com a inserção de fontes de GD no sistema elétrico.

1.2 Objetivo

Dessa forma, este trabalho teve como objetivo:

- Quer verificar a possível perda de coordenação e seletividade da proteção em sistemas de distribuição com GD.

Buscou-se estudar o comportamento dos elos fusíveis e religadores com a instalação de GD no sistema elétrico de potência. Além disso, foi realizada a simulação do sistema IEEE 13 Barras, utilizando o software Power World.

Simulando o sistema sem fontes de GD, simulando o sistema com algumas GD distribuídas no sistema, dimensionando no sistema alguns elos fusíveis e um religador no ramo central do circuito.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está dividido em 5 capítulos:

Capítulo 1 introdução ao tema, justificativa, objetivo, metodologia; Capítulo 2 apresentação dos conceitos teóricos abordados na pesquisa; Capítulo 3 especificação dos métodos e ferramentas utilizados para as análises dos resultados; Capítulo 4 análise e discussão dos dados; Capítulo 5 conclusão dos resultados e verificação do cumprimento do objetivo buscado pelo pesquisador.

2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo do trabalho são abordados os temas de GD, como o está o Brasil em relação à esse tipo de Geração, o Sistema de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE), bem como sua proteção, o regulador e chave fusível.

2.1 Geração Distribuída

A ANEEL define que GD é caracterizada por centrais geradoras de energia elétrica, de qualquer potência, com instalações conectadas diretamente no sistema elétrico de distribuição ou através de instalações de consumidores, podendo operar em paralelo ou de forma isolada e despachadas ou não pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) (ANEEL, 2014).

Segundo Giuliani (2018), a geração distribuída instalada próximo ao consumidor, devido, em grande parte, às preocupações ambientais. Além disso, sendo o Brasil um país rico em recursos energéticos, sua utilização se torna mais conveniente. Seu uso é incentivado pelas políticas econômicas 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.

Para Lora e Haddad (2002), pode-se observar um interesse crescente na GD, pois além dos incentivos e dos aspectos técnicos, esse tipo de energia passou por uma desregulamentação no setor de energia elétrica. Dessa forma, esse mercado se tornou o alvo principal em busca de um ambiente competitivo, inovador e voltado para os consumidores.

Portanto, a GD é aquela gerada próximo ao consumidor através de recursos naturais utilizados de forma consciente, tendo um conceito ecológico. Tem grande potencial de crescimento no Brasil, sendo sua utilização de grande importância, seja em termos ambientais e econômicos.

2.1.1 Geração Distribuída no Brasil

O Brasil possui um grande potencial solar e eólico, sendo esse tipo de GD impulsionada pela queda nos custos de implantação das tecnologias. A ANEEL,

Agência Nacional de Energia Elétrica, é a agência reguladora das condições gerais da GD, publicando normas e condições de acesso de micro e minigeração aos sistemas de distribuição, o que inclui as fontes de geração de energia fotovoltaicas residenciais.

Além da diminuição dos custos dessas tecnologias, esse tipo de distribuição, considerado mais limpo, é alvo de investidores e programas governamentais, que tem o intuito de expandir as linhas de crédito e financiamento de projetos de sistemas de distribuição, incentivando a indústria de componentes e equipamentos. Essas ações têm foco no desenvolvimento produtivo, tecnológico e inovação, fomento à capacitação e formação de recursos humanos para atuar na área de GD e a promoção e atração de investimentos nacionais e internacionais e de tecnologias competitivas para energias renováveis. Segundo o MME (2015) e o EPE (2015) *apud* Tonhá (2017), através desses incentivos e ações em prol da GD, projeta-se que até o ano de 2030 a emissão de gases do efeito estufa sejam reduzidas em 43% as emissões de gases do efeito e que a matriz elétrica brasileira será composta por 23% de energias renováveis, além da energia hídrica.

Assim, ao observar a evolução da potência instalada da micro e mini GD no Brasil, não se observa até 2015 nenhuma evolução significativa. Por outro lado, entre os anos de 2015 e 2018, é observada uma evolução exponencial da capacidade instalada de mini e micro GD, que pode ser correlacionadas às ações apresentadas anteriormente. Entre 2011 e 2012, houve um aumento de 805 vezes a potência instalada das GD, passando de 0,5 kW para 403 kW. Já entre 2015 e 2018, o salto foi de 5173%, passando de 12,5 MW para 669,6 MW de potência instalada (EPE, 2019). Apesar deste crescimento, a potência instalada das GD representa ainda 0,41% da potência instalada brasileira (EPE, 2019).

2.2 Sistema de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE)

O Sistema de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE) geralmente começa na subestação de distribuição, que pode ser alimentada por uma ou mais linhas de subtransmissão ou diretamente pelo sistema de transmissão em alta tensão. Cada subestação se conecta a um ou mais alimentadores primários (KERSTING, 2012). O SDEE tem característica dedicada ao rebaixamento de tensão proveniente do sistema

de transmissão, para fornecer energia com qualidade para o consumidor final, sendo eles: residências, indústrias apartamentos e iluminações públicas.

2.2.1 Proteção do Sistema de Distribuição

Para Giuliani (2018), os dispositivos de proteção das redes de distribuição de energia elétrica são essenciais para a segurança e operação do sistema. Dessa forma, é necessário que haja o dimensionamento correto, que seja confiável, rápido, sensível a surtos e que exista coordenação e seletividade.

O sistema de proteção sempre deve atuar de forma eficaz, para evitar desligamentos desnecessários, pois a qualidade no fornecimento de energia está relacionada também ao número de interrupções e afundamentos de tensão.

Para Jenkins *et al.* (2008), diferentes aspectos da proteção em sistemas de distribuição com geradores distribuídos podem ser identificados:

- Proteção de faltas internas nos equipamentos de geração.
- Proteção da rede de distribuição contra correntes de falta sustentadas pela geração distribuída.
- Proteção de anti-ilhamento.
- Impacto da GD no sistema de proteção existente.

Para o perfeito funcionamento do sistema de proteção deve-se atender alguns requisitos fundamentais, conforme Eletropaulo (2017).

a) Sensibilidade: Capacidade que um dispositivo de proteção tem, em identificar uma condição anormal e variações indesejáveis de grandezas elétricas pré-estabelecidas.

b) Seletividade: Capacidade de dois dispositivos de proteção não atuarem simultaneamente para um defeito dentro da intersecção de suas zonas de proteção, sendo que o dispositivo mais próximo do curto-circuito deve atuar primeiro. Esta configuração permite que o dispositivo de proteção isole o menor trecho defeituoso possível.

c) Coordenação: Condição de dois ou mais equipamentos de proteção para que operem numa determinada ordem ou sequência pré-estabelecida, permitindo melhorar o desempenho da proteção e facilitar a localização do defeito.

d) Metodologia de Coordenação de Proteção: Conjunto de procedimentos que tem como objetivo principal a orientação para a execução de um estudo de proteção, visando o melhor desempenho do sistema.

Um dos pontos mais importantes a serem considerados é o valor de corrente de curto-circuito que circula em diversos pontos da rede, pois é em relação a esse valor que será feito o planejamento do Sistema Elétrico de Distribuição. Tais dados irão auxiliar no dimensionamento e calibração dos equipamentos de proteção instalados no SDEE, como por exemplo, elos fusíveis e religadores (GIULIANI, 2018).

Segundo Mamede (2013), 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 deste intervalo 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.

2.2.3 Religador

Ao detectar um nível anormal de sobrecorrente, o religador interrompe tal corrente por meio da abertura de seus contatos elétricos. Durante um tempo determinado, esses contatos elétricos são mantidos abertos, denominado “Tempo de religamento”. Após, este instante os religamentos se fecham automaticamente, reenergizando a rede novamente. Os meios para a interrupção dos contatos mais comuns são: óleo isolante, gás (SF₆) e câmara a vácuo. (ELETROPAULO, 2017).

Segundo Eletropaulo (2017), as quatro operações de um religador podem ser combinadas nas seguintes sequências de religamentos:

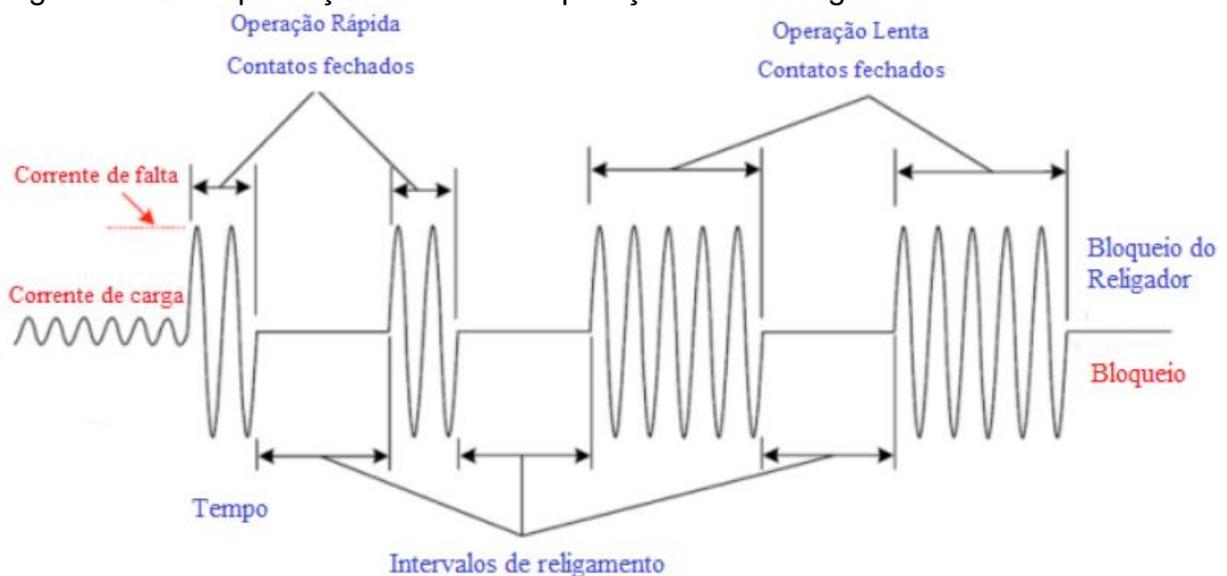
- a) Uma rápida e três retardadas;
- b) Duas rápidas e duas retardadas;
- c) Três rápidas e uma retardada;

d) Todas rápidas ou todas retardadas.

Segundo Hoss (2018), quando um religador sente uma condição de sobrecorrente, a circulação dessa corrente é interrompida pela abertura de seus contatos. 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.

O controle do religador é realizado por um relé digital multifuncional, que é sensibilizado por sinais analógicos dos de corrente (TCs). Esses sinais comandam a abertura do religador, o mesmo entra em um ciclo de religamentos com os tempos mortos de até 1 segundo. Na Figura 1 tem-se um exemplo do ciclo de operação de um religador.

Figura 1 – Exemplificação do ciclo de operação de um religador



Fonte: Motoki *et al*, 2015.

Os religadores têm 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 torne essencial para filtrar esse tipo de ocorrência, facilitando a operação do sistema (MAMEDE, 2013).

2.2.4 Chave fusível

A chave fusível é o equipamento responsável por romper a distribuição dos circuitos menores da rede, estando coordenado diretamente com o religador, através de curvas. Chaves fusíveis são elementos mais utilizados na proteção de redes de distribuição urbanas e rurais, por apresentarem 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). 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 (HOSS, 2018).

O 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.

Conforme Mamede (2013), este dispositivo fica localizado dentro de um tubo de fibra de vidro dotado de revestimento interno, destinados à interrupção do arco elétrico. 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.

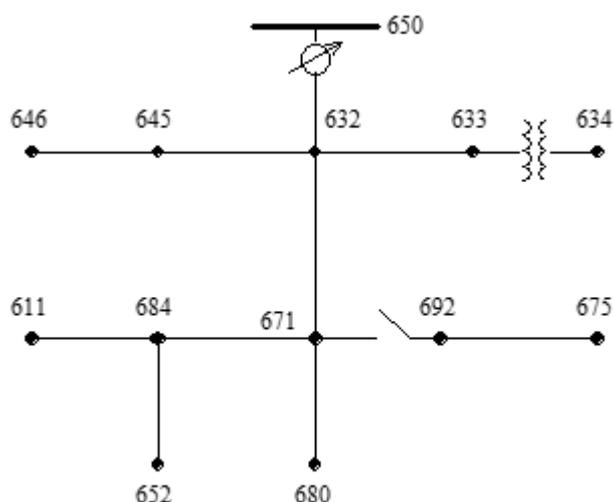
3 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do trabalho primeiramente foi escolhido o sistema a ser estudado e simulado utilizando o software Power World. O sistema escolhido foi o IEEE 13 Barras, Figura 2, os dados disponibilizados pelo próprio manual da IEEE estão disponíveis nas Tabelas a seguir 1, 2 e 3. Segue as configurações utilizadas para o cálculo da impedância em PU, anexo 1.

Tensão base, $V_{base} = 4,16\text{v}$

Potência base, $S_{base} = 100\text{kvar}$

Figura 2 – Sistema IEEE 13 Barras.



Fonte: Manual IEEE.

Tabela 1 – Dados da fonte e transformador.

	kVA	kV-high	kV-low	R - %	X - %
Substation:	5,000	115 - D	4.16 Gr. Y	1	8
XFM -1	500	4.16 - Gr.W	0.48 - Gr.W	1.1	2

Fonte: Manual IEEE.

Tabela 2 – Potências por nó.

Node	Load	Ph-1	Ph-1	Ph-2	Ph-2	Ph-3	Ph-3
	Model	kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr
634	Y-PQ	160	110	120	90	120	90
645	Y-PQ	0	0	170	125	0	0
646	D-Z	0	0	230	132	0	0
652	Y-Z	128	86	0	0	0	0
671	D-PQ	385	220	385	220	385	220
675	Y-PQ	485	190	68	60	290	212
692	D-I	0	0	0	0	170	151
611	Y-I	0	0	0	0	170	80
	TOTAL	1158	606	973	627	1135	753

Fonte: Manual IEEE

Tabela 3 – Comprimento e configuração dos trechos.

Nó A	Nó B	Comprimento(ft.)	Config.
632	645	500	603
632	633	500	602
633	634	0	XFM-1
645	646	300	603
650	632	2000	601
684	652	800	607
632	671	2000	601
671	684	300	604
671	680	1000	601
671	692	0	Switch
684	611	300	605
692	675	500	606

Fonte: Manual IEEE

Para obter os dados de corrente nominal do circuito, precisou-se converter os dados de impedância e utilizar a equação 1 para obter-se os valores de impedância das linhas e fazer a média das potências com os dados retirados da tabela 2 utilizando a equação 2 para colocar nas cargas da simulação no software, Tabela 4 e Tabela 5.

$$i = \frac{z}{(V^2/S_{base})} \quad (1)$$

$$P(pu) = \frac{P_{média}}{S_{base}} \quad (2)$$

Tabela 4 – Cálculo das impedâncias de linha.

IMPEDANCIA			
(R+jX)p.u.		Vbase = 4,16v	Sbase = 100
A	B	X (pu)	J (pu)
632	645	+ 0,7244	+ 0,7425
632	633	+ 0,4069	+ 0,6628
633	634	0,0000	0,0000
645	646	+ 0,4346	+ 0,4455
650	632	+ 0,7473	+ 2,2650
684	652	0,0000	0,0000
632	671	+ 0,7473	+ 2,2650
671	684	+ 0,4365	+ 0,4423
671	680	+ 0,3736	+ 1,1325
671	692	0,0000	0,0000
684	611	+ 0,4364	+ 0,4424
692	675	+ 0,4368	+ 0,2442

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 5 – Potências das cargas.

CARGAS		
POTÊNCIA MÉDIA		
Nó	ativa (p.u.)	reativa (p.u.)
634	+ 0,1333	+ j 0,0967
645	+ 0,0567	+ j 0,0417
646	+ 0,0767	+ j 0,0440
652	+ 0,0427	+ j 0,0287
671	+ 0,3850	+ j 0,2200
675	+ 0,2810	+ j 0,1540
692	+ 0,0567	+ j 0,0503
611	+ 0,0567	+ j 0,0267

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Através de trabalhos realizados em campo e verificações feitas sobre os valores de potência de inversores de frequência que são normalmente comercializados no mercado. Os valores de potências escolhidos para a seleção dos inversores de frequência foram os da Tabela 6.

4 APRESENTAÇÃO DA PESQUISA E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesse capítulo, são mostrados os dados do sistema escolhido para o estudo neste trabalho, as definições feitas para obtenções dos resultados através de cálculos e tabelas.

4.1 Sistema teste da Norma IEEE com o circuito alimentador teste 13 barras.

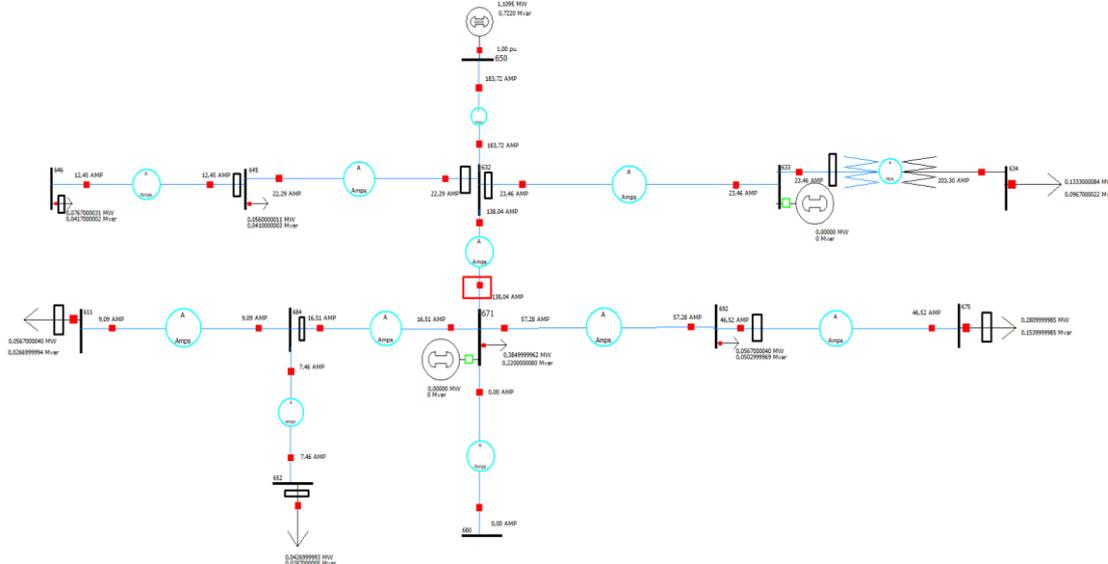
Para análise do comportamento das correntes do circuito IEEE 13 barras apresentado na Figura 2 no Capítulo 3, foi modelado e simulado no software Power World, tendo assim todos os dados necessários para obtenção das correntes do circuito.

Assim, o circuito teste 13 barras foi redesenhado no software, utilizando os dados disponíveis na apostila da IEEE. Obteve-se as correntes do circuito em cada barra, assim com o auxílio de outro software, o Excel, onde também foram plotadas as curvas de proteção para cada equipamento da rede de distribuição.

No próprio software Power World é possível obter os níveis de curto-circuito monofásico terra, trifásico e entre nós de cada nó, assim plotando no Excel os gráficos de tempo por corrente dos elos fusíveis sobre o gráfico do religador. Possuindo a corrente de curto-circuito é possível fazer a verificação se o sistema irá se manter coordenado.

Para o estudo de caso envolvendo o circuito escolhido, posicionou-se em lugares selecionados previamente, os elos fusíveis e o religador dentro do circuito, conforme a Figura 4, onde os retângulos pretos são os elos fusíveis e o quadrado vermelho é o religador. Neste caso, infelizmente o software não dispõe da ferramenta para incluir ao sistema os equipamentos de proteção, religador e elo fusível.

Figura 4 – Circuito com elos fusíveis e religador (vermelho no centro barra 761).



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Através da simulação no próprio Power World obteve-se a corrente de curto-circuito trifásico e monofásico nos nós dos circuitos. O software por ser versão para estudante não possibilita o cálculo do curto-circuito na linha. As simulações de curto-circuito estão disponíveis nas Tabelas 7, Tabela 8, Tabela 9 e Tabela 10.

Para obter os valores de corrente nominal foi utilizado a equação 3, para ter uma taxa de segurança de dimensionamento do elo fusível. Em consenso com o orientador decidiu-se onde ficaria cada elo fusível e o religador, dimensionando também as fontes de geração distribuída, para simular e verificar se haverá a coordenação e seletividade, Figura 3.

$$I_{nom} < 1,5 * I_{nom} \quad (3)$$

A legenda das cores da Tabela são:

- Verde: Nome da tabela.
- Amarelo: Elo escolhido para o religador nó 671.
- Vermelho: barra escolhido para o estudo do curto circuito.

Tabela 7 – Tabela de curto-circuito sem fontes de geração distribuídas.

CORRENTE CC EM CADA NÓ SEM GD		
NÓS	CC Trifásico	CC Monofásico
611	815,43	1042,25
632	1007,48	1398,34
633	954,69	1297,16
634	Não ira fusível	
645	936,72	1264,66
646	898,46	1195,61
650	1161,73	1742,09
652	846,98	1094,37
671 (RELIGADOR)	881,66	1153,23
675	855,46	1108,55
680	821,76	1050,77
684	847,38	1095,07
692	880,88	1151,87

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 8 – Tabela de curto-circuito com fontes de geração distribuídas no nó 671.

CORENTE CC EM CADA NÓ COM GD 671		
NÓS	CC Trifásico	CC Monofásico
611	849,32	1086,04
632	1025,55	1423,51
633	971,82	1320,61
634	Não irá fusível	
645	953,71	1287,85
646	914,88	1217,76
650	1157,14	1735,22
652	882,1	1140,18
671 (RELIGADOR)	882,52	1201,34
675	890,94	1155,01
680	855,59	1094,44
684	882,52	1140,92
692	917,34	1199,93

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 9 – Tabela de curto-circuito com fontes de geração distribuídas no nó 633.

CORENTE CC EM CADA NÓ COM GD 633		
NÓS	CC Trifásico	CC Monofásico
611	832,54	1036,87
632	1030,34	1429,58
633	982,95	1335,07
634	Não irá fusível	
645	957,76	1292,65
646	918,53	1221,96
650	1163	1744,04
652	864,74	1117,01
671 (RELIGADOR)	900,15	1177,03
675	873,44	1131,55
680	838,76	1072,2
684	865,16	1117,73
692	899,34	1175,65

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 10 – Tabela de curto-circuito com fontes de geração distribuídas no nó 671 e 633.

CORENTE CC EM CADA NÓ COM GD 671 E 633		
NÓS	CC Trifásico	CC Monofásico
611	855,29	1092,34
632	1038,19	1439,87
633	986,12	1338,76
634	Não irá fusível	
645	964,81	1301,61
646	925,2	1230,26
650	1165,6	1747,89
652	888,51	1147,08
671 (RELIGADOR)	925	1208,96
675	897,54	1162,18
680	861,42	1100,51
684	888,94	1147,83
692	924,27	1207,54

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tendo os dados de curto-circuito analisou-se o circuito para dar valores aos elos fusíveis, através da Tabela 11, sendo assim coordenando os elos fusíveis do sistema, conforme Tabela 12, Tabela 13 e Tabela 14.

Tabela 11 – dimensionamento elo fusível sem fonte de geração distribuída.

CALCULO DO ELO FUSIVEL SEM GD				
Inom>1,5*Inom				
BARRA	Inom	Ifus	Elo CC 3φ	Elo 1φ
611	9,09	14	15	25
632	23,46	35	40	100
633	23,46	35	15	40
634	Não ira fusivel nesse ramo			
645	22,29	33	25	65
646	12,45	19	15	40
650	182,64	274	RELÉ	RELÉ
652	7,46	11	25	25
671 (RELIGADOR)	138,04	207	65	100
675	46,52	70	15	25
680	0	0	0	0
684	16,51	25	40	40
692	57,28	86	40	40

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 12 – Dimensionamento elo fusível com fonte de geração distribuída no nó 671.

CALCULO DO ELO FUSIVEL SEM GD 671				
Inom>1,5*Inom				
BARRA	Inom	Ifus	Elo CC 3φ	Elo 1φ
611	8,71	13	15	25
632	22,96	34	40	100
633	22,96	34	15	40
634	Não ira fusivel nesse ramo			
645	21,81	33	15	65
646	12,18	18	10	40
650	152,9	229	RELÉ	RELÉ
652	7,15	11	15	15
671 (RELIGADOR)	125,83	189	65	100
675	44,55	67	15	15
680	0	0	0	0
684	15,81	24	40	40
692	54,85	82	25	40

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 13 – Dimensionamento elo fusível com fonte de geração distribuída no nó 633.

CALCULO DO ELO FUSIVEL SEM GD 633				
Inom>1,5*Inom				
BARRA	Inom	Ifus	Elo CC 3φ	Elo 1φ
611	8,9	13	15	25
632	105,63	158	40	100
633	105,63	158	15	40
634	Não ira fusivel nesse ramo			
645	21,84	33	25	65
646	12,2	18	15	40
650	150,73	226	RELÉ	RELÉ
652	7,31	11	15	15
671 (RELIGADOR)	135,18	203	65	100
675	45,56	68	15	40
680	0	0	0	0
684	16,17	24	25	40
692	56,09	84	40	65

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 14 – Dimensionamento elo fusível com fonte de geração distribuída no nó 671 e 633.

CALCULO DO ELO FUSIVEL SEM GD 671 E 633				
Inom>1,5*Inom				
BARRA	Inom	Ifus	Elo CC 3φ	Elo 1φ
611	8,71	13	15	25
632	21,19	32	40	100
633	24,19	36	15	40
634	Não ira fusivel nesse ramo			
645	21,75	33	25	65
646	12,15	18	15	40
650	152,4	229	RELÉ	RELÉ
652	7,15	11	15	15
671 (RELIGADOR)	118,75	178	65	100
675	44,55	67	15	40
680	0	0	0	0
684	15,81	24	25	40
692	54,85	82	25	65

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Conforme os dados de dimensionamento dos elos fusíveis são possíveis analisar as curvas do religador e dos elos fusíveis e fazer a avaliação das mesmas para obtenção dos resultados que serão utilizados para a conclusão do trabalho, conforme Figura 6, 7, 8, 9. São conhecidos os casos de curto-circuito, trifásicos e os

monofásicos, conforme Figura 5. Assim para o estudo de caso foram escolhidos os trifásicos e os monofásicos, para verificar se haverá coordenação do sistema.

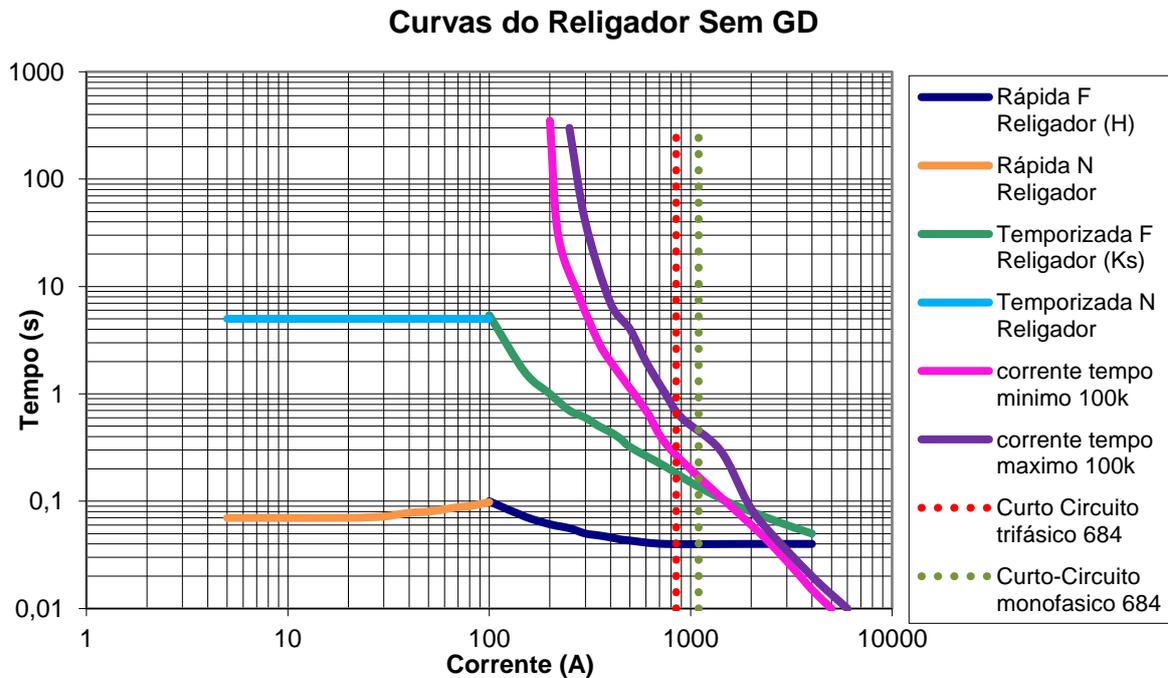
Conforme estudo de curtos-circuitos ocorridos há uma estatística criada para saber qual CC é mais comum de ser detectado no SEP, Figura 5.

Figura 5 – Estatísticas de curto-circuito nos sistemas de distribuição.

Curto-circuito	Frequência (%)
trifásico	5
bifásico	25
monofásico	70

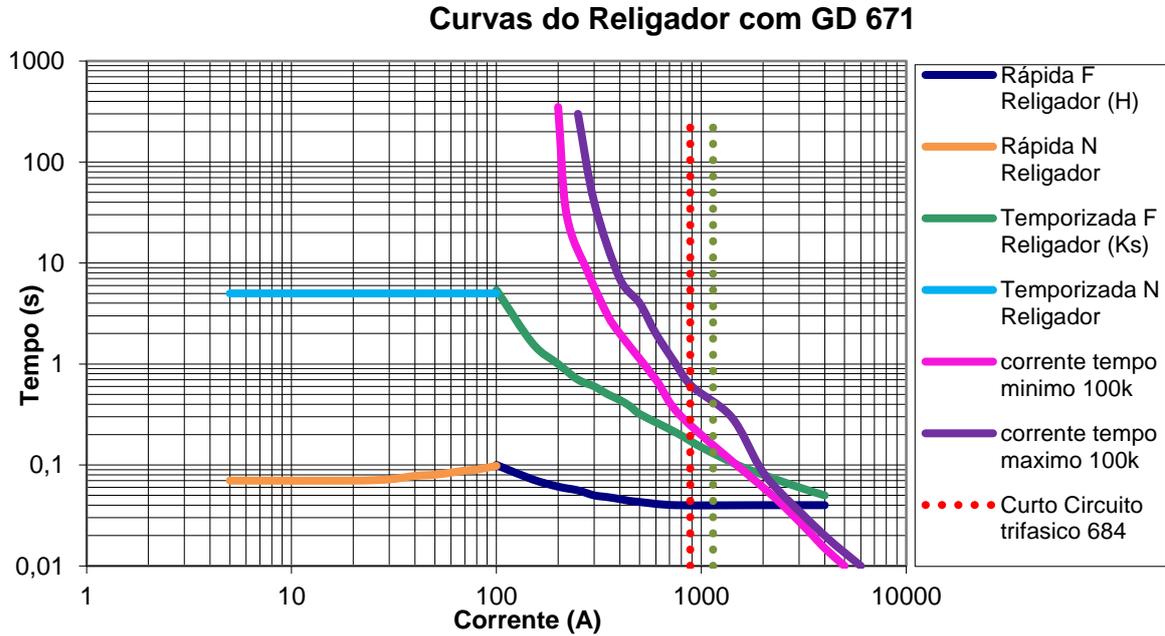
Fonte: Qual é o tipo de curto-circuito mais comum em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica? – Célula Energia (celulaenergia.com)

Figura 6 – Curva coordenação e seletividade trifásicas sem fonte de geração distribuída.



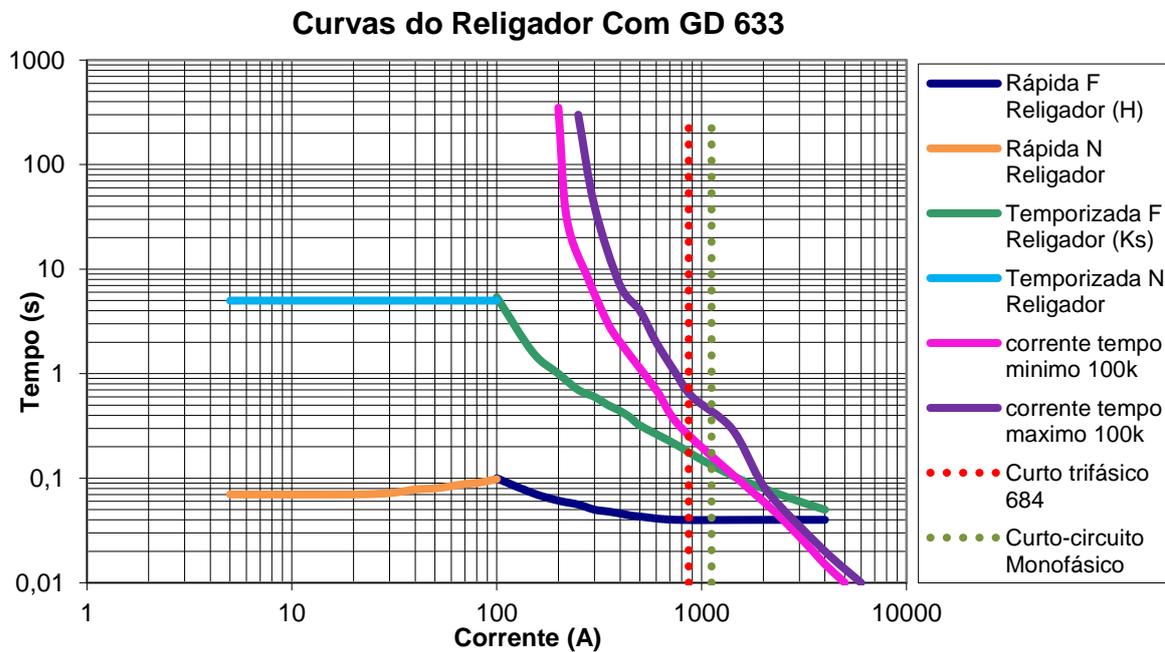
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 7 – Curva coordenação e seletividade trifásicas com fonte de geração distribuída nó 671.



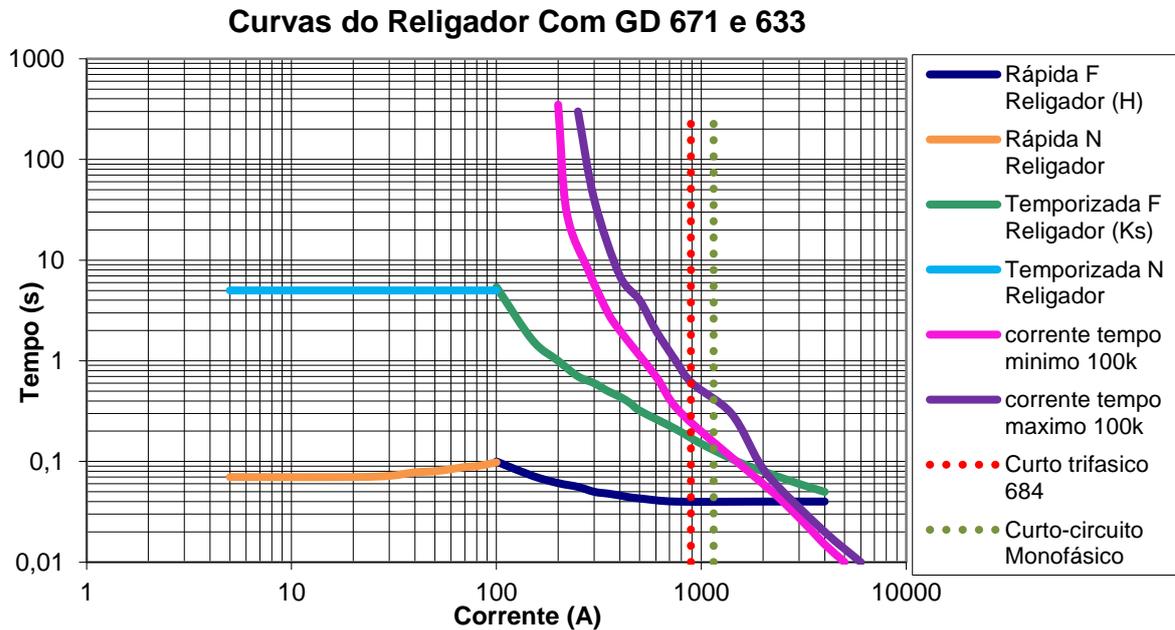
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 8 – Curva coordenação e seletividade trifásicas com fonte de geração distribuída nó 633.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 9 – Curva coordenação e seletividade trifásicas com fonte de geração distribuída nó 671 e 633.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Para verificação dos resultados, fez-se uma avaliação de coordenação logo após o dimensionamento dos elos fusíveis, lembrando que em todos os casos o ponto escolhido para a simulação do curto-circuito foi no ponto 654. Assim, verificando todos os casos disponíveis e estudados, os quatro casos utilizando a corrente de curto-circuito trifásica e cc monofásica, não está tendo problemas de coordenação do sistema elétrico escolhido.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse trabalho foi apresentado a verificação da coordenação no sistema IEEE 13 barras com a influência das fontes de geração distribuídas. Através das simulações efetuadas no software Power World.

As condições de análises do sistema demonstram que a influência das fontes de GD no Sistema Elétrico de Potência (SEP), não tem interferência na coordenação do sistema, em ambas as correntes de curto-circuito.

Também se observou que, com o aumento de fontes de GD no SEP, os componentes de segurança das redes de distribuição de energia podem não estar preparados para receber tanta corrente, pois a corrente nominal das linhas tem uma alteração considerável com a ativação das fontes GD.

Por fim, pode-se avaliar que para o sistema IEEE 13 barras o trabalho alcançou o objetivo proposto, demonstrando que é possível a coordenação entre elos fusíveis e religadores no sistema estudado, com a geração distribuída,

5.1 Sugestões de trabalhos futuros

Através dos resultados do trabalho, a seguir são apresentadas algumas sugestões para a realização de trabalhos futuros.

- Mudar o lugar ou aumentar o número de fontes de geração distribuída.
- Fazer a coordenação de elos fusíveis, dimensionando novos fusíveis para verificar a coordenação e seletividade.

ANEXOS

Anexo 1: Dados utilizados para o cálculo das impedâncias.

Configuração 601:

Z (R +jX) em ohms por milha

0.3465 1.0179 0.1560 0.5017 0.1580 0.4236

0.3375 1.0478 0.1535 0.3849

0.3414 1.0348

Configuração 602:

Z (R +jX) em ohms por milha

0.7526 1.1814 0.1580 0.4236 0.1560 0.5017

0.7475 1.1983 0.1535 0.3849

0.7436 1.2112

Configuração 603:

Z (R +jX) em ohms por milha

0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000

1.3294 1.3471 0.2066 0.4591

1.3238 1.3569

Configuração 604:

Z (R +jX) em ohms por milha

1.3238 1.3569 0.0000 0.0000 0.2066 0.4591

0.0000 0.0000 0.0000 0.0000

1.3294 1.3471

Configuração 605:

Z (R +jX) em ohms por milha

0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000

0.0000 0.0000 0.0000 0.0000

1.3292 1.3475

Configuração 606:

Z (R +jX) em ohms por milha

0.7982 0.4463 0.3192 0.0328 0.2849 -0.0143

0.7891 0.4041 0.3192 0.0328

0.7982 0.4463

Configuração 607:

Z (R +jX) em ohms por milha

1.3425 0.5124 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000

0.0000 0.0000 0.0000 0.0000

0.0000 0.0000

REFERÊNCIAS

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.

Borbely, A., Kreider, J. **Distributed Generation, the Power Paradigm for the New Millennium**. CRC Press LL: Washington, EUA, 2001.

ELETROPAULO. NTE-G-014: **Proteção de Redes de Distribuição**. 1 ed. São Paulo: Eletropaulo, 2017.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Balço Energético Nacional 2019** – Ano base 2018: Relatório Síntese. Rio de Janeiro: EPE, 2019.

GIULIANI, Eduardo. **Análise da Influência da Geração Distribuída na Proteção de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. Cachoeira do Sul, RS, Brasil, 2018.

GUTIERRES, L. F. d. F.; MORAIS, A. P. de; CORRÊA, R. Revisão de técnicas elaboradas de modo a evitar a perda da coordenação e seletividade entre religadores e elos fusíveis de sistemas de distribuição quando da inserção de geração distribuída. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA (CBA). **Anais**. . . [S.l.: s.n.], 2012.

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.

HOSS, Maiara Pies. **Estudo da melhoria alcançada nos índices de continuidade com a aplicação de religadores automáticos em rede de distribuição**. 2018. Dissertação (Graduação em Engenharia Elétrica) Universidade Regional do Noroeste, Rio Grande do Sul, 2018.

JENKINS, N. et al. **Embedded Generation**. London: IET Power and Energy Series 31, 2008.

KERSTING, W. H. **Distribution System Modeling and Analysis**. 3ª . ed. Novo México: CRC Press, 2012.

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.

MOTOKI, Édison M.; PEREZ, Filipe; R. FILHO, Homero K.; SOUZA, Paulo V. G. de; CARVALHO FILHO, José Maria de; RIBEIRO, Paulo F.. Use of Computational System for Analysis of Power Quality in Smart Grid. In: ISGT LATAM, 1., 2015, Uruguay. **Anais** [...] . [S.l.]: Ieee, 2015.

TONHÁ, Henrique Mesquita. **Análise da geração distribuída sob a perspectiva de maximização de potência injetada em sistemas de distribuição**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2017.