

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**MARINA BRESOLIN RODRIGUES**

**EQUALIZAÇÃO DO SISTEMA EM ILHAMENTO PROGRAMADO: UM CASO DE  
SIMULAÇÕES DE PERTURBAÇÃO**

**Bagé  
2021**

**MARINA BRESOLIN RODRIGUES**

**EQUALIZAÇÃO DO SISTEMA EM ILHAMENTO PROGRAMADO: UM CASO DE  
SIMULAÇÕES DE PERTURBAÇÃO**

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

Orientador: Enoque Dutra Garcia

**Bagé  
2021**

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) .

R696e Rodrigues, Marina Bresolin

Equalização do sistema em ilhamento programado: Um caso de  
simulações de perturbação / Marina Bresolin Rodrigues.

77 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade  
Federal do Pampa, ENGENHARIA DE ENERGIA, 2021.

"Orientação: Enoque Dutra Garcia".

1. Sistemas Elétricos de Potência. 2. Proteção de Sistemas  
Elétricos de Potência. 3. Subestações de Energia Elétrica. I.  
Título.

**MARINA BRESOLIN RODRIGUES**

**EQUALIZAÇÃO DO SISTEMA EM ILHAMENTO PROGRAMADO: UM CASO DE  
SIMULAÇÕES DE PERTURBAÇÃO**

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

**Bagé  
2021**

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 10/05/2021.

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Enoque Dutra Garcia

Orientador

UNIPAMPA

---

Prof. Dr. Paulo Ricardo da Silva Pereira

UNISINOS

---

Prof. Dr. Carlos Sonier

UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **ENOQUE DUTRA GARCIA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 10/05/2021, às 17:49, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **CARLOS SONIER CARDOSO DO NASCIMENTO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 10/05/2021, às 17:49, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **Paulo Ricardo da Silva Pereira, Usuário Externo**, em 10/05/2021, às 17:50, 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](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador 0518563 e o código CRC AD116D42.

Referência: Processo nº 23100.007402/2021-45 SEI nº 0518563

## **AGRADECIMENTO**

Aos meus pais e minha irmã, que me acompanharam e apoiaram, acreditando nos meus sonhos e me incentivando a nunca desistir.

Ao meu orientador por acreditar no meu projeto e me atender pontualmente dando todo auxílio necessário.

Aos professores do curso de Engenharia de Energia que contribuíram na minha formação acadêmica/ profissional.

A todos os colegas de curso, em especial Larissa, Mitiâni, Cíntia e Elunize que foram grandes parceiras de estudos e projetos.

À equipe da CGT Eletrosul de Santana do Livramento que me acompanhou durante dois anos na minha trajetória contribuindo grandemente com a minha formação e abraçando e incentivando todas as minhas idéias, em especial ao Roberson que foi o grande incentivador deste trabalho.

Aos meus amigos, em especial à Danyela, Helena e Júlia que sempre me apoiaram em minhas decisões e estiveram ao meu lado em mais esta etapa.

“Só se pode alcançar um grande êxito quando nos mantemos fiéis a nós mesmos.”

Friedrich Nietzsche

## RESUMO

A energia elétrica é essencial para o desenvolvimento das atividades diárias da sociedade, consumidora em sua essência, de forma que interrupções no seu fornecimento podem causar grandes transtornos. O sistema elétrico deve sempre estar preparado para minimizar ocorrências que podem gerar perturbações e as proteções são elementos chave nesse processo, eliminando os distúrbios de forma rápida e respeitando a seletividade. O sistema elétrico brasileiro apresenta grande complexidade operativa, uma vez que, grande parte é interligado e as fontes de geração estão distribuídas nas diversas regiões do país. Algumas ocorrências podem isolar pequenas áreas com presença de unidades de geração e carga, porém, ocorrerá uma diferença do montante gerado em relação ao consumido, causando distúrbios no sistema ilhado. Com isso, ocorre a atuação de proteções anti-ilhamento, deixando uma área desabastecida, por conseguinte interrompendo a operação. Neste sentido, a proposta deste trabalho é a investigação de uma configuração alternativa para um esquema especial, baseada na própria proteção utilizada em modelos convencionais. De tal modo, busca-se detectar área composta de geração e carga que encontram-se em condição ilhada e levar essa parte do sistema a equalização. Com isso, em vez do modo convencional, se propõe o equilíbrio do sistema ilhado através do corte de geração, de maneira que se mantenha o abastecimento desta área e certifique-se que encontra-se dentro dos parâmetros para a recomposição. Para atender a proposta, utiliza-se o software Matlab/Simulink®, que possibilita a modelagem e simulação das configurações alternativas, e, baseado em um sistema similar ao encontrado em literatura, com proteções comumente utilizadas, pode-se realizar a comparação dos resultados obtidos. Partindo desta modelagem são elaborados cenários operacionais diferentes, considerando o sistema com as proteções atuais e posteriormente considerando recursos de equalização de geração e carga. Assim, busca-se explorar a viabilidade de implantação da configuração proposta.

Palavras Chave: Sistema elétrico. Proteção. Modelagem e simulação. Ilhamento programado. Equalização.



## ABSTRACT

Electricity is essential for the development of the daily activities of society, consuming in its essence, so that interruptions in its supply can cause great inconvenience. The electrical system should always be prepared to minimize occurrences that can generate disturbances and protections are key elements in this process, eliminating disturbances quickly and respecting selectivity. The Brazilian electrical system presents great operational complexity, since most of it is interconnected and the sources of generation are distributed in the various regions of the country. Some occurrences may isolate small areas with the presence of generation and load units, however, there will be a difference in the amount generated in relation to the consumed, causing disturbances in the island system. With this, anti-island protections occur, leaving an area desabastecida, consequently interrupting the operation. In this sense, the purpose of this work is the investigation of an alternative configuration for a special scheme, based on the protection itself used in conventional models. In such a way, it seeks to detect an area composed of generation and load that are in an island condition and lead this part of the system to equalization. Thus, instead of the conventional mode, it proposes the balance of the islanded system through the generation cut, so that the supply of this area is maintained and it is within the parameters for recomposition. To meet the proposal, the Matlab/Simulink® software is used, which allows the modeling and simulation of alternative configurations, and, based on a system similar to that found in the literature, with commonly used protections, one can compare the results obtained. Based on this modeling, different operational scenarios are elaborated, considering the system with the current protections and later considering generation and load equalization features. Thus, it seeks to explore the feasibility of implementing the proposed configuration.

Keywords: Electrical system. protection. Modeling and simulation. Scheduled islanding. Equalization.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Estrutura do Sistema Elétrico.....	20
Figura 2- Sistema Elétrico Brasileiro x Sistema Elétrico Europeu.....	22
Figura 3 - Linhas de Transmissão em Operação no Brasil.....	24
Figura 4: Proteção de Sistemas Elétricos de Potência.....	28
Figura 5- Etapas do procedimento metodológico.....	32
Figura 6- Disposição das Unidades de Geração.....	34
Figura 7- Situação Atual x Cenário Proposto.....	34
Figura 8- Etapas do desenvolvimento da metodologia.....	35
Figura 9- Sistema Teste.....	38
Figura 11- Carga ligada na Barra 5.....	40
Figura 12- Linha entre a barra 2 e 3 com a implantação da proteção 87L.....	41
Figura 13- Unidades de Geração e transformador entre barras e relé 81.....	42
Figura 14- Medições das barras e oscilografias.....	43
Figura 15- Implementação das gerações distribuídas.....	44
Figura 16- Medição da tensão da barra 4 pré e pós falta.....	46
Figura 17- Leitura da tensão na barra 4.....	47
Figura 18- Leitura da frequência na barra 4.....	48
Figura 19- Leitura da corrente na barra 4.....	49
Figura 20- Leitura da corrente pré e pós falta.....	50
Figura 21- Configuração com geração operada pelo relé 81.....	51
Figura 22- Frequência atuação falta e relés 87L e 81.....	52
Figura 23- Corrente atuação falta e relés 87L e 81.....	53
Figura 24- Corrente pré e pós-falta com medições.....	54
Figura 25- Tensão, atuação falta e relés 87L e 81.....	54
Figura 26- Tensão pré-falta até o corte da geração.....	55
Figura 27- Tensão pré-corte para medição da frequência.....	55
Figura 28- Gerações e proteções.....	56
Figura 29- Gerações e proteção 81.....	57
Figura 30- Gerações e proteção (automação) nova proposta.....	58
Figura 31- Intertravamento entre posição de DJ e relé proposto.....	59
Figura 32- Frequência com atuação do novo relé (81).....	60
Figura 33- Correntes com atuação do relé proposto.....	61

Figura 34- Correntes com atuação do relé proposto.....	61
Figura 35- Tensão com atuação do relé proposto.....	62

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Classificação das Linhas.....	23
Tabela 2- Equipamentos de proteção.....	28
Tabela 3- Etapas de Simulação.....	45

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

SEP – Sistema Elétrico de Potência

PCH – Pequenas Centrais Hidrelétricas

NOS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

SIN – Sistema Interligado Nacional

CPU – Unidade Central de Processamento

ERAC- Esquema Regional de Alívio de Carga

Agência Nacional de Energia Elétrica- ANEEL

transferência de atuação direta – DTT

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>1.2 OBJETIVOS.....</b>	<b>18</b>
<b>1.2.1 Objetivo Geral .....</b>	<b>18</b>
<b>1.2.3 Objeitvos Específicos .....</b>	<b>18</b>
<b>1.3 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA .....</b>	<b>19</b>
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>20</b>
<b>2.1 O Sistema Elétrico de Potência.....</b>	<b>20</b>
<b>2.2 Proteção de Sistemas Elétricos de Potência .....</b>	<b>26</b>
<b>3 METODOLOGIA .....</b>	<b>32</b>
<b>3.1 Procedimentos Metodológicos .....</b>	<b>32</b>
<b>3.3 Etapas para Validação da Metodologia em Pesquisa .....</b>	<b>34</b>
<b>4 APRESENTAÇÃO DA PESQUISA E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>37</b>
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>64</b>
<b>5.1Trabalhos Futuros .....</b>	<b>64</b>
<b>5.2 Publicações .....</b>	<b>65</b>
<b>6 REFERÊNCIAS.....</b>	<b>66</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>70</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A matriz energética é constituída pela estrutura de oferta e demanda de energia, onde se englobam as diversas fontes primárias e secundárias, bem como seu uso no sistema socioeconômico. Visualizar as perspectivas do setor elétrico e compreender as mudanças decorrentes do desenvolvimento torna-se relevante, uma vez que, deve-se garantir a entrega de energia ao consumidor final.

Com o grande crescimento populacional, bem como da economia mundial a partir da década de 70, ocorreu um correspondente acréscimo na demanda energética global, principalmente proveniente de fontes primárias de combustíveis fósseis, compondo a base da matriz energética mundial (NOGUEIRA e CARDOSO, 2007). Entretanto, no Brasil, devido ao potencial de fontes renováveis disponíveis, a geração de energia elétrica é liderada por hidrelétricas (63,8%), seguida de eólica (9,3%), biomassa e biogás (8,9%) e solar centralizada (1,4%) (BARROS, 2020). b

O (PDE, 2020) mostra a escolha de empreendedores por usinas com potência instalada menores que 100 MW, próximas às áreas de produção da matéria-prima. Assim, pode-se reduzir custos com logística, além de permitir acesso a localizações estratégicas, próximas aos centros de carga. Ainda, as centrais geradoras referidas diferem-se da micro e minigeração distribuída, e aplicam-se a fontes de energia provenientes de biomassa ou pequenas centrais hidrelétricas (PCH), por exemplo, classificando-se assim em gerações de médio porte que são conectadas ao sistema de distribuição.

Considerando o Sistema Elétrico de Potência (SEP) em toda sua complexidade, incluindo a inserção das novas unidades de geração dessas fontes, se faz necessário o uso de dispositivos de proteção apropriados para a segurança de pessoas e equipamentos que o compõem. Além do emprego destes dispositivos na coordenação e seletividade dos circuitos (SATO E FREITAS, 2017), deve-se garantir a qualidade de energia elétrica respeitando parâmetros como tensão e frequência (PRODIST, 2010).

Os principais parâmetros, são definidos em Procedimentos de Rede que, por sua vez, são elaborados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) cuja principal responsabilidade é coordenar e controlar a operação do Sistema Interligado Nacional (SIN). Além disso, os Procedimentos de Distribuição - PRODIST são

documentos elaborados pela ANEEL, os quais normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica (ANEEL, 2021). Dentre esses, serão considerados neste trabalho, principalmente, os módulos 3 e 4, que correspondem à “Acesso ao Sistema de Distribuição” e “Procedimentos Operativos do Sistema de Distribuição”, respectivamente.

Diversas tecnologias se desenvolveram ao longo dos anos com o objetivo de aprimorar os sistemas dentro das subestações. Com isso, houve a necessidade da padronização da comunicação entre equipamentos e seus diferentes fabricantes. Através da norma IEC 61850 foi possível resolver problemas relacionados à troca de informações entre esses equipamentos e facilitar a integração das novas tecnologias do mercado, ou seja, a interoperabilidade (SANTOS, 2007).

A inserção da norma IEC 61850 na área de SEP padronizou diversos requisitos e desenvolveu novos conceitos para a aplicação de sistemas de automação e proteção no grupo GTD (geração, transmissão e distribuição) (ALMEIDA, 2011). Em particular, os recursos de comunicação disponíveis atualmente possibilitam estratégias para a integração de sistemas elétricos de proteção, controle, medição, monitoramento e supervisão.

Em casos de perturbações no sistema, a proteção deve atuar isolando a fonte causadora e trechos do sistema, a fim de minimizar o número de consumidores atingidos e possíveis danos à equipamentos (COURY, 2012). Esse fato é caracterizado como ilhamento programado<sup>1</sup> e apresenta-se como alternativa para manter o equilíbrio entre as cargas e a geração, neste trabalho associado ao termo equalização (ONS, 2021).

ALMEIDA (2011) aponta que, nos sistemas de proteção, são utilizados os relés microprocessados de proteção. Uma tecnologia mais moderna, que possui uma Unidade Central de Processamento (CPU), que é capaz de processar funções de proteção do próprio dispositivo, além da comunicação da CPU com os sistemas elétricos e de supervisão. Uma das vantagens dos relés multiprocessados é a

---

<sup>1</sup> Ilhamento programado: Separação automática de uma parte do sistema para que se possa obter e manter o equilíbrio entre as cargas e a geração.



integração de diversas funções de proteção em um único equipamento, somado a isso, o relé assume a função de controle e manobras da subestação.

Com base em consulta à literatura técnica, se verifica a oportunidade de ampliar as discussões relativas à operação de um Sistema Elétrico de Potência (SEP), com presença de geração médio porte localizadas em áreas descentralizadas e conectadas ao sistema de distribuição. Para tanto, são necessários estudos nesse sentido uma vez que sabe-se que se deve garantir a operação segura do sistema elétrico mesmo que em condições de contingências como curtos-circuitos ou faltas sistêmicas (EPE, 2018). Com isso, busca-se aumentar a confiabilidade para, em caso de ocorrência de faltas onde esse sistema venha a ficar isolado, não se perca a operação do sistema regional.

Uma vez caracterizado o problema, este trabalho busca analisar os distúrbios causados em decorrência dessas faltas, buscando alternativas para equalização do sistema sem que se interrompa o abastecimento de cargas. Para tanto, neste trabalho são consideradas unidades de geração com fontes hidrelétrica e termelétrica. Alinhado à Mamede (2013), se explora uma configuração otimizada com a implementação de dispositivos que possibilitem corte parcial de geração sem a interrupção de alimentação à cargas, de forma a garantir a operabilidade do sistema até sua recomposição.

Através do estudo de soluções abordadas nas bibliografias se identifica a necessidade de usar plataformas de simulações para modelar e analisar previamente a aplicação de novas configurações nos dispositivos de proteção. Ferramentas computacionais como ANAREDE, ANAFAS, PowerWorld, ATP/EMTP e Matlab/Simulink® são aplicáveis para estudos avançados destas configurações (OLIVEIRA, 2019). Entre outros modelos usuais no Setor Elétrico Brasileiro (SEB) podem ser citados o NODAL, DESSEM, NEWAVE GEVAZP e DECOMP (Notas de aula Prof. Enoque).

Considerando Mamede (2013), para efetivar estas soluções podem ser implementadas nas simulações as proteções como: diferencial de linha e de sub/sobrefrequência. Porém, o uso dessas proteções não são objeto principal neste trabalho, mas são parte importante para viabilizar as simulações. Assim, neste trabalho são aplicadas faltas em uma linha de subtransmissão a fim de analisar as oscilações geradas ao separar os sistemas deixando geração e parte da carga

ilhados. Com isso, busca-se identificar soluções para os problemas de equalização de carga e geração em caso de ilhamento programado.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral do presente trabalho é investigar as alternativas de equalização do sistema, em casos de ilhamento programado, a partir de simulações em plataformas computacionais. Para isso, os objetivos específicos são:

- Mapear configurações de geração conectada no sistema de distribuição interligado à subtransmissão;
- Explorar a conexão de unidades de geração de médio porte de fontes termelétrica e hidrelétrica;
- Relacionar os principais desafios para operação dos sistemas de subtransmissão em caso de ilhamento programado;
- Desenvolver procedimento metodológico para superar os desafios apurados;
- Simular modelos dos sistemas em estudo com base na metodologia desenvolvida;
- Analisar as condições de equalização do sistema no cenário de corte de geração.

### **1.2.3 Objetivos Específicos**

Os objetivos propostos para esse trabalho alinham-se com os conteúdos abordados, entre outras, nas componentes curriculares de Análise de Sistemas Elétricos de Potência, Simulação de Sistemas de Energia, Qualidade de Energia Elétrica, Sistemas de Energia Conectados à Rede, Planejamento Energético e Proteção e Estabilidade de Sistema Elétricos de Potência do Curso de Graduação em Engenharia de Energia (PPC, 2019). Nestes componentes é possível compreender a importância das ferramentas computacionais para modelagem e simulação, uma vez que, no âmbito de SEP, pode-se usar plataformas de simulação para reproduzir o comportamento de um circuito elétrico de grande porte e verificar seu desempenho, além de aplicar perturbações na rede e examinar suas consequências (OLIVEIRA, 2019).

A partir disso, é possível estudar estratégias para otimização de sistemas e obter resultados condizentes com a realidade sem que se faça uso de outros recursos,

tais como ensaios destrutivos. De tal modo, diversos tipos de estudos do SEP são embasados em simulações e, no decorrer deste trabalho, será contextualizado um importante fator: equalização do sistema elétrico em casos de ilhamento programado.

### **1.3 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA**

Em casos de falha e/ou perda de um grande bloco gerador de energia no SIN, proporcionando um desbalanço entre a geração e a carga, a frequência do sistema tende a diminuir. Para evitar isso, o Esquema Regional de Alívio de Carga (ERAC) atua por cada subsistema (Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e a maior parte da região Norte) e/ou região, desligando cargas pontuais e evitando que o sistema entre em colapso (ONS, 2009). O ERAC efetua o corte automático de cargas por meio de disjuntores e atuadores, como relés, quando é detectado uma taxa de variação de frequência no tempo ( $\Delta f/\Delta t$ ), desligando assim cargas previamente estabelecidas.

Conforme Frazão (2019), considerando que fazemos parte de uma sociedade consumidora e, a energia elétrica, além da utilização na indústria, tem ligação direta com o bem-estar e lazer através de shoppings, centros acadêmicos, e em serviço essenciais como os hospitais, a interrupção de fornecimento de energia gera grandes transtornos. Além disso, leva-se em consideração os custos ocasionados pelos sistemas inoperantes em casos de pane, que podem girar na casa das dezenas de milhões.

No presente trabalho estuda-se as possibilidades de, em caso de faltas, como curto-circuitos, retornar à frequência do sistema elétrico aos valores nominais de operação, através de cortes de geração, em alternativa ao modo convencional de corte de energia ao consumidor.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Esse capítulo apresenta os principais conceitos relacionados aos assuntos pesquisados e utilizados como suporte para o presente estudo a fim de discuti-los. A primeira seção trata do Sistema Elétrico de Potência e por fim, a segunda seção aborda a Proteção dos Sistemas Elétricos de Potência.

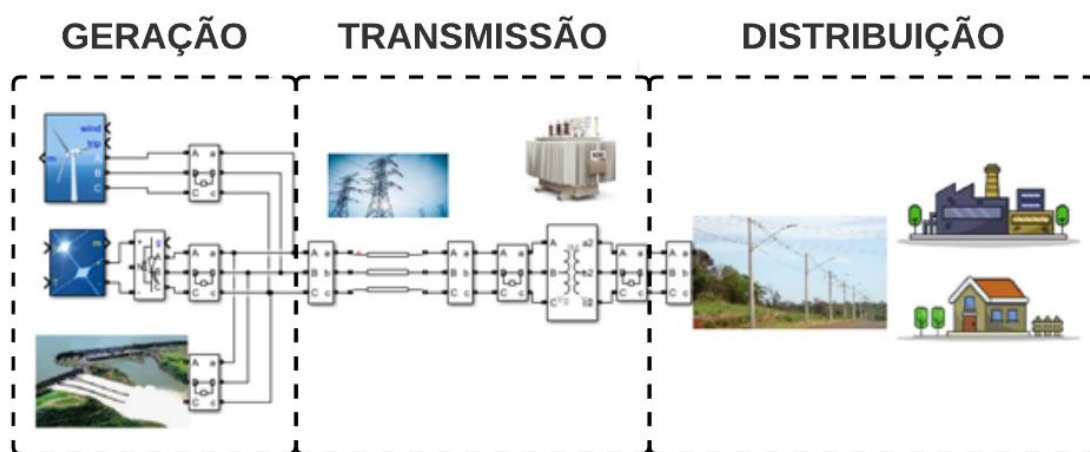
### 2.1 O Sistema Elétrico de Potência

Segundo Rafael (2019), o SEP é definido pela conexão, através de linhas de transmissão e distribuição, de usinas de geração aos consumidores finais, a fim de suprir suas demandas, sejam elas industriais, comerciais ou residenciais.

Ainda, Bichels (2018) define o SEP como um conjunto composto de todos os equipamentos, assim como todas as instalações, destinadas à geração, transmissão e distribuição incluindo as subestações de energia que elevam ou abaixam os níveis de tensão. Através destas garante-se o abastecimento de energia com os níveis de grandezas elétricas adequados, referentes aos processos de transmissão e distribuição, e certifica-se maior confiabilidade, qualidade, segurança e economia de energia. O SEP é considerado dentre as máquinas construídas pelo homem como uma das mais complexas, elevando assim a tecnicidade para as exigências desta máquina a nível de operação, controle e manutenção (MOHAN, 2016).

Na figura 1 pode-se observar o modelo tradicional de estrutura do sistema elétrico, compreendendo geração, transmissão e distribuição de energia.

Figura 1- Estrutura do Sistema Elétrico.



Fonte: Autora (2021).

Os custos e os investimentos necessários para operação do sistema tiveram que ser diluídos entre os usuários para aproveitar melhor os ganhos de um sistema de maior escala, garantindo a confiabilidade de suprimento nesta interligação das usinas e os pontos de consumo, sendo necessário neste momento também as padronizações de tensões e frequências, tornando-se assim um embrião de sistema elétrico. (BICHELS, 2018).

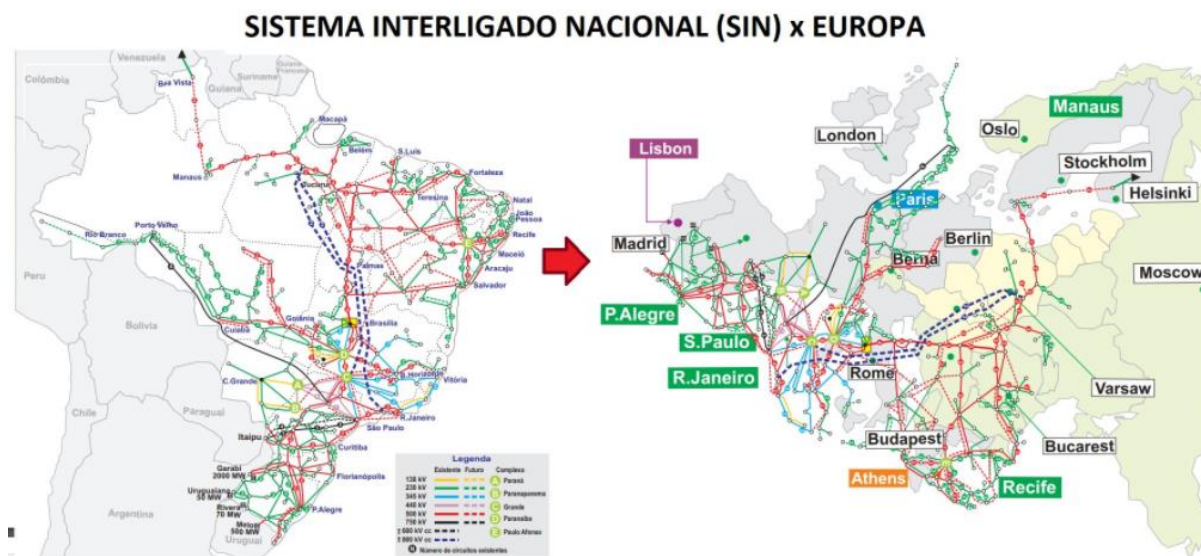
Posteriormente, segundo Bichels (2018), com os desenvolvimentos tecnológicos de equipamentos e materiais como isoladores, relés inteligentes, disjuntores de alta capacidade de interrupção de corrente e alta velocidade, sistemas de medição, controle e proteção, tornou-se possível a interligação das áreas de consumo do país com as usinas de geração, formando o que chamamos atualmente de Sistema Interligado Nacional (SIN).

O desenvolvimento da tecnologia atrelado ao crescimento do setor industrial aumenta consideravelmente a demanda por energia. Sendo assim, além da diversificação da matriz energética nacional é de extrema importância o aumento da capacidade dos sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia. Com isso, espera-se aumentar a confiabilidade no fornecimento de energia aos consumidores finais, em face aos desafios que estão por vir (PDE,2019).

Os modernos sistemas de energia elétrica dependem das facilidades para o transporte a granel dessa energia, que é feito através das linhas de transmissão ou eletrodutos. A expansão da Rede Básica de transmissão (instalações com tensão igual ou superior a 230 kV) deve ser estabelecida de forma a permitir que os agentes de mercado tenham livre acesso à rede, possibilitando um ambiente propício para a competição na geração e na comercialização de energia elétrica no sistema interligado.

Considerando todos os fatores apresentados neste capítulo é notável a complexidade de operação do SIN. Ainda, na figura 2, pode-se verificar a comparação entre o SIN e o Sistema Elétrico Europeu constatando mais uma vez os grandes desafios apresentados pelo setor.

Figura 2- Sistema Elétrico Brasileiro x Sistema Elétrico Europeu.



Fonte: Autora (2021).

De acordo com Rangel (2009), às linhas de transmissão definem-se por serem condutores de energia elétrica sustentados por estruturas geralmente feitas de metal, chamadas torres de transmissão, e isoladores. Geralmente, devido à localização das usinas geradoras de energia, a energia gerada necessita ser transportada até as unidades consumidoras. Portanto, há a necessidade da utilização de linhas de transmissão para transportar a energia gerada na fonte geradora (usinas) para a carga consumidora (subestações, residências ou indústrias) de forma econômica e com a menor perda de energia possível.

As linhas de transmissão podem variar em sua extensão de centímetros a milhares de quilômetros e são usadas como parte integrante de circuitos de alta frequência e no transporte de grandes blocos de energia elétrica (LEÃO, 2021).

O sistema de transmissão, além do atendimento ao mercado, permite a equalização dos preços da energia, uma vez que têm a função de interligar os submercados, dessa forma, possibilitando um despacho otimizado do parque gerador (PDE, 2026).

Em resumo as linhas de transmissão são basicamente constituídas por três partes: parte passiva, parte ativa e elementos acessórios. Na parte passiva estão os isoladores, as ferragens e as estruturas. Na parte ativa estão os fios ou cabos condutores. Já nos elementos acessórios, encontram-se os pára-raios e aterramentos. Cada uma das partes é responsável por uma função, para a parte

passiva cabe assegurar o afastamento dos condutores do solo e entre si, por exemplo. Além disso, os pára-raios e aterramentos são destinados a interceptar e a descarregar ao solo as ondas de sobretensão de origem atmosférica (FERREIRA, 2017).

No Brasil, como em outros países, os níveis de tensão que são usados para operação das diversas redes são normalizadas. No que se refere às linhas, elas podem ser classificadas da seguinte maneira (ANEEL, 2017):

Tabela 1- Classificação das Linhas.

<b>Classificação</b>	<b>Classe de Tensão (kV)</b>
Transmissão	Igual ou Superior a 230
Subtransmissão	69/ 138
Distribuição	13,8/ 34,5

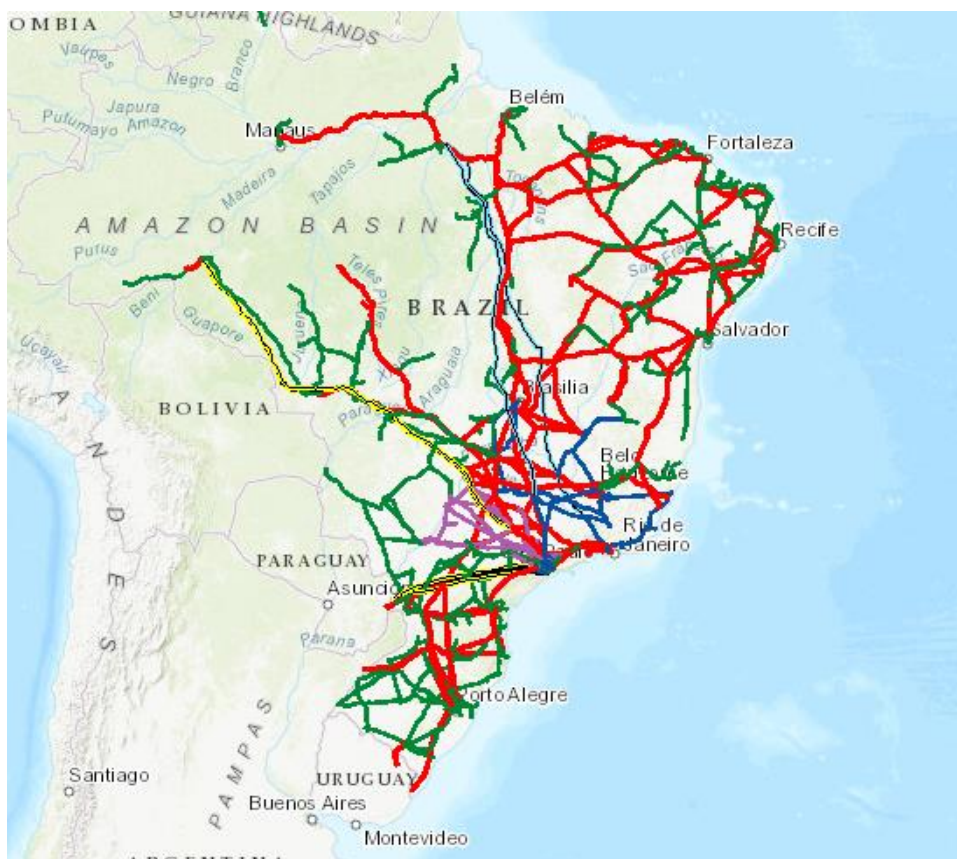
Fonte: Autora (2021)

Para critérios de projeto de linhas de transmissão, quando este faz parte da Rede Básica, devem ser seguidas às especificações da ANEEL, que tem origem em estudos da Empresa de Pesquisa Energética. Essas linhas são de classe igual ou superior a 230 kV. A subtransmissão, por sua vez, ocorre em linhas de transmissão de alta tensão, sendo estas entre 69 kV, 138 kV e, excepcionalmente, em 230 kV, além de redes de distribuição em média tensão, entre 13,8 kV e 34,5 kV, e baixa tensão, entre 220 V e 380 V. As linhas de alta tensão estão incluídas nas chamadas Demais Instalações de Distribuição (DIT) e são de responsabilidade exclusiva das empresas distribuidoras (MATZENBACHER, 2015).

Na figura 3, é possível observar as linhas de transmissão em operação no Brasil.



Figura 3 - Linhas de Transmissão em Operação no Brasil



Fonte: EPE (2021).

Ainda, segundo Matzenbacher (2015), os dados básicos usados no projeto de uma linha de transmissão são, normalmente, a potência a ser transmitida e a distância entre os pontos emissor e receptor. As principais especificações para uma linha aérea CA podem ser definidas pela frequência, potência a ser transmitida em kW ou MW, fator de potência no terminal receptor, distância da linha em km, a queda de tensão permitida sob condição de plena carga em relação à tensão no receptor, as perdas possíveis na linha, as limitações de perda por corona por km e eficiência da linha, a variação de temperatura a qual a linha estará sujeita, força do vento e carregamento de gelo.

Segundo Almeida (2019), após o projeto da linha de transmissão, para a construção da linha são necessárias as informações sobre bitola dos condutores, espaçamento de condutores, número de isolados por cadeia, bitola do condutor neutro, a localização do condutor neutro na torre, a tração permitida nos condutores, flechas entre diferentes distâncias entre torres e resistência de aterramento. As linhas ou trechos de linha de transmissão devem ter capacidades operativas de longa e de

curta duração atendendo a NBR 5422 da ABNT. A capacidade de corrente de curta duração refere-se à condição de emergência estabelecida na norma técnica NBR 5422 da ABNT.

Além disso, no SEB, ao longo dos anos, devido, principalmente, à inserção de usinas com fontes intermitentes de geração eólica e solar, além da ampliação nas linhas de transmissão do Sistema Interligado Nacional (SIN) passou por processos de modernização. Além disso, as empresas que realizam as atividades do setor como o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), Ministério de Minas e Energia (MME), Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) passaram por reestruturações assim como nas maneiras de regulação (CYRINO, 2019)

O ONS, composto pelas empresas de geração, transmissão e distribuição, além dos consumidores livres, importadores e exportadores de energia, considerados membros associados e membros participantes, tem como responsabilidade coordenar e controlar a operação das instalações do SIN no âmbito de geração e transmissão de energia elétrica, assim como planejar a operação dos sistemas isolados. Todas estas atividades são realizadas com a fiscalização e regulação da ANEEL, sendo que na composição do ONS existe também a participação do MME e de representantes dos Conselhos de Consumidores (GESEL, 2020).

Cabe à ONS propor regras para a operação das instalações de transmissão da rede básica do SIN, a serem aprovadas pela ANEEL. Essas regras são consolidadas nos Procedimentos de Rede, que são documentos de caráter normativo elaborados pelo ONS, com participação dos agentes (ONS, 2020). Os Procedimentos de Rede estabelecem os requisitos técnicos necessários para garantir o livre acesso às instalações de transmissão, a realização das atividades de planejamento e programação da operação eletroenergética, administração de serviços de transmissão de energia elétrica, proposição de ampliações e reforços para a Rede Básica e para as DITs, bem como as atividades de supervisão, coordenação e controle da operação do SIN.

Segundo ONS (2002), os principais objetivos dos Procedimentos de Rede são:

- Legitimar, garantir e demonstrar a Transparência, Integridade, Equanimidade,
- Reprodutibilidade e Excelência da Operação do Sistema Interligado Nacional;
- Estabelecer, com base legal e contratual, as responsabilidades do ONS e dos Agentes de Operação, no que se refere a atividades, insumos, produtos e prazos dos processos de operação do sistema elétrico;

- Especificar os requisitos técnicos contratuais exigidos nos Contratos de Prestação de Serviços de Transmissão - CPST, dos Contratos de Conexão ao Sistema de Transmissão -CCT e dos Contratos de Uso do Sistema de Transmissão - CUST.

Ainda, segundo ONS (2020), os Procedimentos de Rede permitem a transparência e embasamento técnico-operacional às atividades realizadas pelo ONS no exercício de suas atribuições, e tem como principais clientes os agentes e órgãos do setor elétrico e a sociedade, como consumidora final de energia elétrica. São relevantes para o desenvolvimento deste trabalho, conforme supracitado, os módulos 3 e 4 referentes aos Procedimentos de Distribuição, que estabelecem os valores de frequência e tensão regulados para operação do sistema elétrico.

Baseando-se no SEP e suas peculiaridades foi fundamentado o circuito para os estudos, a fim de alcançar os objetivos propostos neste trabalho. O sistema é composto de uma barra infinita que representa o SIN, passando por uma linha de subtransmissão, assim como unidades de geração e cargas conectadas à distribuição. Para se resolver equações de fluxo de potência em um sistema composto por barras de carga e geração, normalmente se adota uma barra como referência. Normalmente, essa barra é denominada barra infinita e apresenta tensão constante independente do valor de corrente ou potência (VASCONCELOS, 2011).

## **2.2 Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**

De acordo com Frazão (2019), ao desenvolver do crescimento econômico de um país maior é o consumo de energia elétrica, por ser o sistema de energia composto tanto na geração, quanto na transmissão e distribuição por infraestruturas avançadas em termos de tecnologia. No entanto, por sua complexidade operativa, o sistema elétrico é suscetível a perturbações, sendo a principal delas os curtos-circuitos, situações estas que têm potencial de tornar o sistema caótico e com difícil controle.

Os sistemas de proteção têm a pretensão de ser o elemento chave para mitigar as consequências do corte de energia e assim garantir o fornecimento da energia de forma contínua, além de garantir a segurança dos equipamentos do SEP. Assim sendo, pode-se considerar os sistemas de proteção como um pilar de sustentação do setor elétrico (FRAZÃO, 2019).

Conforme Mamede (2011), durante a operação do SEP, frequentemente ocorrem falhas dos elementos que o compõem, resultando na interrupção de fornecimento de energia aos consumidores. A falha mais habitual é o curto-circuito, que, por sua vez, resulta em distúrbios severos de tensão ao longo do sistema. Esses distúrbios têm origem nas correntes elevadas que circulam pelos elementos durante a falha, em consequência os danos gerados ao sistema e instalações podem ser irreparáveis.

Além dos curto-circuitos, ocorrências de subtensões e sobretensões e sobrecargas, mesmo com cuidados e precauções tomadas no projeto e execução, são inerentes ao funcionamento de qualquer SEP. Ainda, as consequências destas anormalidades podem ser desastrosas ou até irrelevantes, a depender da proteção que está preparada nesta instalação (OLIVEIRA, 2014).

Assegurar que, nos casos de anormalidades que façam com que o sistema elétrico opere fora de limites previstos nas normas, ocorra a desconexão de parte ou de todo o sistema, é a função principal dos sistemas de proteção. Além disto cita-se a função de informar aos agentes responsáveis pela operação, informações que facilitem a identificação e recuperação dos defeitos (MAMEDE, 2011).

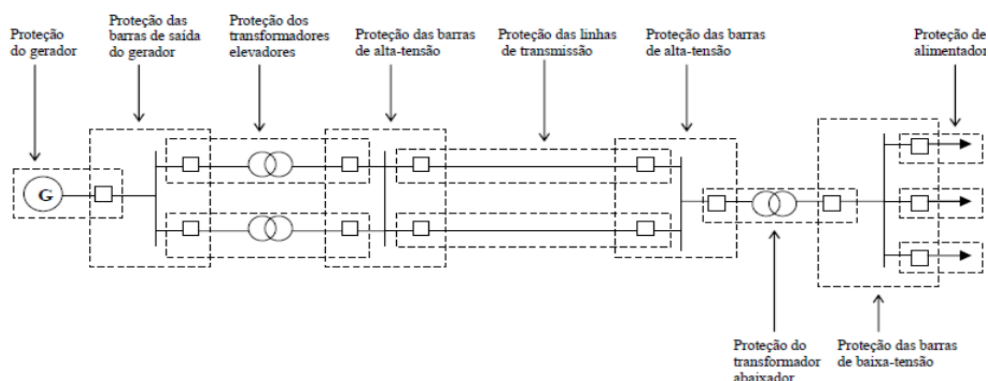
No entendimento de Frazão (2019), considera-se falho todo fenômeno elétrico que ocasiona uma perturbação do sistema, como consequência podendo levar a operação do sistema a um estado crítico. Além das falhas citadas por Mamede (2011), é incluído no grupo seletivo das piores falhas a instabilidade de frequência, no entanto ainda considerando o curto-circuito como a principal falha.

De modo geral, a atuação de um sistema de proteção se dá em três níveis (CAMINHAS, 2019):

- Proteção Principal: É o primeiro equipamento que atuará em caso de falta, dentro da zona protegida;
- Proteção de Retaguarda: Atua em caso de falha da proteção principal;
- Proteção Auxiliar: Constituída por funções auxiliares das proteções principal e de retaguarda, com objetivo de sinalização, alarme, temporização, entre outras funções complementares.

De modo geral, em um sistema elétrico, pode-se considerar as proteções explícitas na figura 4:

Figura 4: Proteção de Sistemas Elétricos de Potência



.Fonte: Mamede, (2011)

Através da figura 4 e dos conceitos trazidos nesta seção pode-se perceber que o emprego de equipamentos e dispositivos de proteção é parte importante e essencial nos sistemas elétricos. Com isso, será comentado neste trabalho as proteções adotadas para o modelo de sistema elétrico apresentado. Além disso, serão implementadas, nas simulações, as parametrizações nas proteções utilizadas, visando atender aos Procedimentos de Rede (PRODIST, 2017).

Em uma síntese, os principais equipamentos de proteção e suas funcionalidades podem ser observados de acordo com a tabela 2 (SOUZA E GUIMARÃES, 2020):

Tabela 2- Equipamentos de proteção.

Relé de proteção	Mede grandezas de tensão, corrente e sequência de fases e modificam estados de contatos, enviando comando para outros dispositivos, como os disjuntores.
Disjuntores e Chaves Interruptoras	Após recebimento do comando dos relés, assegura que na ocorrência de má distribuição de energia a energia seja cortada com alto desempenho.
Transformadores para Instrumentos	Isolar eletricamente o circuito de potência do circuito dos instrumentos.

Fonte: SOUZA e GUIMARÃES, 2020.

Segundo Elmore (2003), relés são dispositivos conectados ao sistema elétrico que tem como objetivo detectar condições intoleráveis de operação. Ainda, (FRAZÃO, 2019) aponta que a proteção deve ser sensível às menores faltas, selecionando os estados de operação definidos para o mesmo, ou seja, atuando somente nas faltas programadas, de forma rápida operando na velocidade requerida, minimizando assim possíveis impactos de suprimento de energia.

Ligado às questões de projeto são citadas as características de segurança, que garante que o relé não vai operar para qualquer falta, assim como a confiabilidade e a disponibilidade, de forma que a disponibilidade está em um sistema confiável o suficiente para realizar, a qualquer tempo, a tarefa solicitada (FRAZÃO, 2019). Quando é possível dispor em um arranjo, organizando os dispositivos, a fim de alcançar o objetivo determinado, esse efeito é definição de coordenação, e uma proteção sem coordenação pode contribuir na severidade da falta e não mitigar o mesmo, desligando de forma desnecessária partes do sistema ou equipamentos, gerando impactos severos no suprimento de energia.

Para indicar os tipos de proteção que os relés se destinam se definiu um código numérico, sendo que um relé pode ser configurado para um ou mais tipos de atuação. A fim de padronizar esses tipos de atuação, foi elaborado pela American National Standards Institute (ANSI) uma tabela descrevendo a função da proteção relacionando ao código numérico, facilitando o entendimento pleno de esquemas de proteção (MAMEDE, 2013).

Segundo Almdeida (2011), o princípio de atuação do relé de proteção diferencial de linha é o mesmo da proteção diferencial de transformadores, onde são comparados os valores das correntes das extremidades da linha, com a diferença que essa proteção utiliza um relé em cada extremidade, sendo interligados através de meios de comunicação, semelhantes aos utilizados em teleproteção.

Para um correto funcionamento deve ocorrer a comparação das correntes de fase e de sequência, a fim de que a operação ocorra em um curto espaço de tempo. A proteção 87L veio em substituição a proteção de distância em linhas de transmissão muito curtas, onde normalmente essa proteção tinha a aplicação comprometida (MAMEDE, 2013).

Por característica, a operação desta proteção é muito rápida, sendo inferior a um ciclo a sua partida, sendo importante o aspecto que os ajustes entre os relés das extremidades sejam o reflexo entre eles, sendo necessário também que os relés

sejam iguais inclusive em versões de *firmware*, de tal modo, o relé sendo sensibilizado, transmite sinal de transferência de atuação direta (DTT) (MAMEDE, 2013).

Ainda segundo Mamede (2013) relés de frequência (81) podem ser utilizados em situações de subfrequência assim como sobrefrequência, os ajustes são realizados normalmente para as duas situações, assim, é sabido que em determinados instantes os geradores podem gerar potências menores que a exigida pela carga, desta forma a frequência fornecida fica fora da nominal.

Em geral também pode ocorrer a sobrefrequência, que tem origem principalmente quando, de forma intempestiva, são desligados alguns blocos de carga, conseqüentemente provocando a sobrevelocidade dos geradores. Como solução apresentada está a inserção de carga, através de um sistema escalonado, com o intuito de retornar à condição do sistema ao valor normal (Mamede, 2013). Quando se tem a intenção de operar em paralelo duas ou mais fontes de energia, um dispositivo que é obrigatório é o relé de sincronismo, que tem por função comparar a frequência da geração destas duas fontes, medidas por cada uma das duas entradas de tensão que o relé possui, possibilitando assim a colocação em paralelo de um gerador e a rede de distribuição ou até sincronizar dois geradores, além da frequência o relé de sincronismo compara ainda a tensão e o ângulo das fases (MAMEDE, 2013).

As proteções podem ser utilizadas em esquemas especiais, realizando tarefas específicas em determinadas situações, muitas destas situações são analisadas pelo ONS e solicitadas aos agentes que sejam implantadas. A situação proposta neste trabalho vem ao encontro da utilização da proteção, pois na situação específica do ilhamento programado sugerido, configurações diferentes das tradicionais são propostas aliadas a uma automação para minimizar o corte de carga.

Por sua vez, o relé 81 é amplamente utilizado como detecção de ilhamento (SBSE, 2012), portanto justifica a escolha do mesmo durante as simulações, tanto para o sistema atual como para o arranjo proposto, sendo que no segundo caso busca-se que o mesmo não atue. Ainda considerando seu princípio de operação como a medição da frequência, a base do mesmo foi utilizada com outros ajustes na proposta de automação necessária para equalização da geração e carga.

O relé de sincronismo é citado para definir os parâmetros a serem buscados na configuração do esquema especial, sendo que nesse estudo o mesmo não está modelado. A proteção de linha utilizada não têm influência direta no estudo, podendo

assim ser utilizada qualquer proteção de linha, como por exemplo sobrecorrente (50/51), relé de distância, entre outros (NICOLOTTI, R.; SILVA, R.; JORGE, T., 2011).

No entanto, nas simulações optou-se pelo relé diferencial de linha (87L), sendo a atuação do mesmo rápida e seletiva, optou-se por utilizá-lo neste estudo. Além disso, obteve-se acesso a modelagem preliminares desse relé em Matlab/Simulink em relatórios de atividades acadêmicas (LEDEBUHR, 2021).



### 3 METODOLOGIA

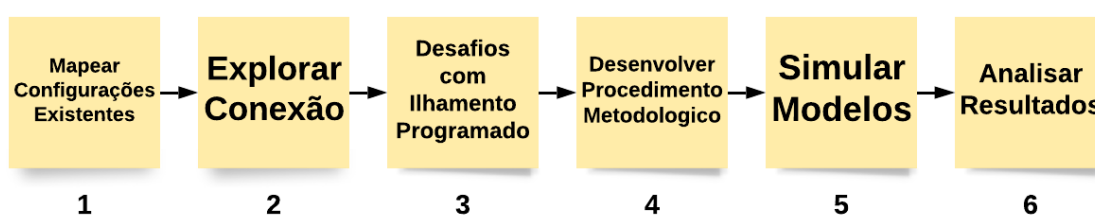
Este capítulo trata do delineamento metodológico para atingir o objetivo proposto. A metodologia apresentada neste capítulo é composta por três seções. A primeira seção apresenta a classificação metodológica da pesquisa. A segunda seção trata do cenário de aplicação do estudo. A terceira seção expõe as etapas da pesquisa.

Introduzidos os conceitos de proteção de SEP na seção 2.2 do capítulo de referencial teórico, neste capítulo observa-se um paralelo entre a configuração da proteção comumente utilizada no SEP e a estratégia proposta com base em procedimento metodológico para otimização dessa configuração usual, denominadas situação atual e cenário proposto, respectivamente. De tal modo, se propõe alternativas para manter as cargas conectadas ao sistema de distribuição mesmo em condições de ilhamento, neste caso, um ilhamento programado e intencional.

#### 3.1 Procedimentos Metodológicos

As etapas seguidas no procedimento metodológico podem ser observadas na figura 5:

Figura 5- Etapas do procedimento metodológico



Fonte: Autora (2021)

Onde, cada bloco representa:

Etapa 1: Mapear configurações de geração conectada no sistema de distribuição interligado à subtransmissão;

Etapa 2: Explorar a conexão de Unidades de Central Geradora, conectadas ao Sistema de Distribuição, por exemplo, por circuito alimentador expresso. No capítulo

4 de validação da metodologia através de estudo de caso, são consideradas quatro centrais de geração sendo cada uma delas de potência igual à 7,5 MVA, totalizando 30 MVA. Na modelagem dos elementos elétricos, as centrais são arranjadas na forma de uma termelétrica e uma hidrelétrica totalizando 15 MVA cada. Na figura 6 pode-se observar a disposição das centrais geradoras estudadas;

Etapa 3: Relacionar os principais desafios para a operação dos sistemas de subtransmissão em caso de ilhamento programado. Na situação atual, na forma de operação convencional, a proteção 81 atua (sobrefrequência) desconectando toda a geração do sistema de distribuição. Com isso, é interrompido o fornecimento de energia a carga. Já no cenário proposto, é implementado um relé em um dos conjuntos de centrais geradoras, que possibilita a desconexão parcial da geração conectada à rede de distribuição e, após o corte de parte da geração, acontece a equalização de cargas e geração, normalizando a frequência do sistema de distribuição. O esquema pode ser observado na figura 7;

Etapa 4: Desenvolver procedimento metodológico para superar os desafios apurados, representado na figura 8;

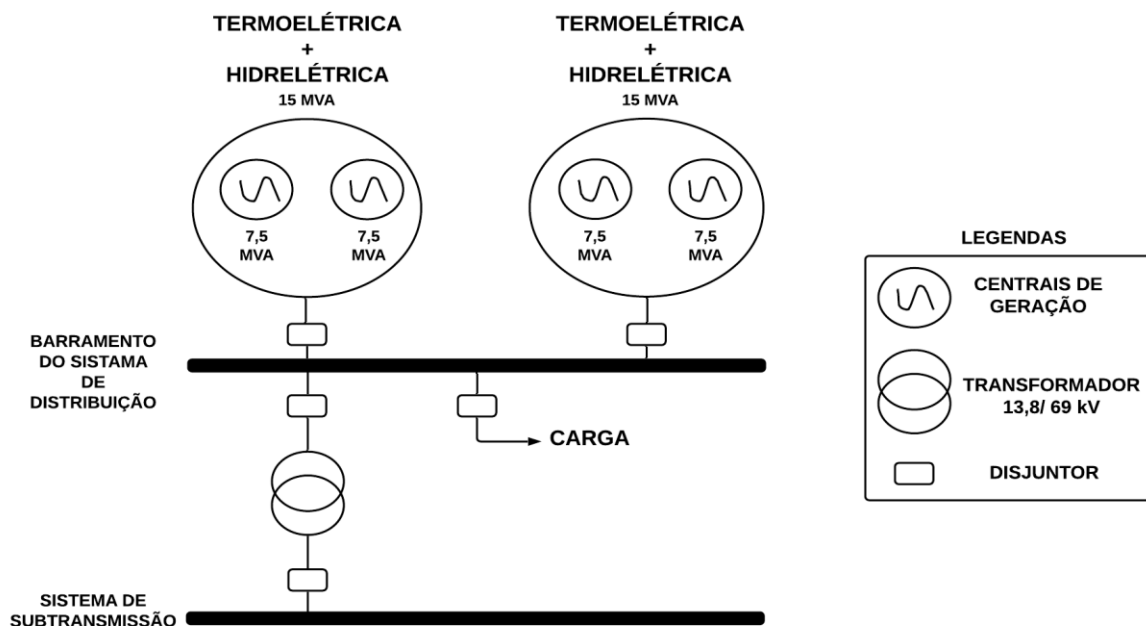
Etapa 5: Simular modelos dos sistemas em estudo com base na metodologia desenvolvida, conforme recursos da plataforma de simulação;

Etapa 6: Analisar as condições de equalização do sistema no cenário proposto. A validação da configuração abordada pode ser verificada através de situações simuladas no capítulo 4 de aplicação da metodologia.

### **3.2 Cenários de Aplicação da Metodologia no Sistema em Estudo**

A metodologia proposta conforme Etapa 1 se aplica a arranjos com centrais geradoras conectadas por alimentadores à subestação cuja conexão ao sistema de distribuição é feito através de duas linhas de subtransmissão, dispostas conforme figura 6:

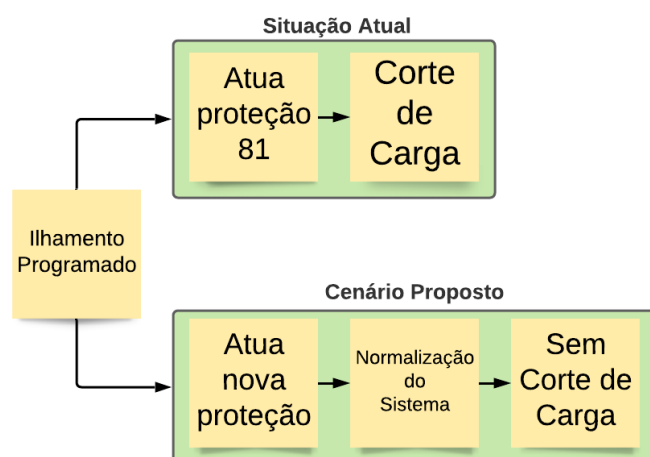
Figura 6- Disposição das Unidades de Geração



Fonte: Autora (2021)

Pode-se analisar o procedimento metodológico proposto através do fluxograma da figura 7, relacionado à Etapa 3, no qual os modelos de configuração adotados são divididos em Situação Atual e Cenário Proposto:

Figura 7- Situação Atual x Cenário Proposto.



Fonte: Autora (2021)

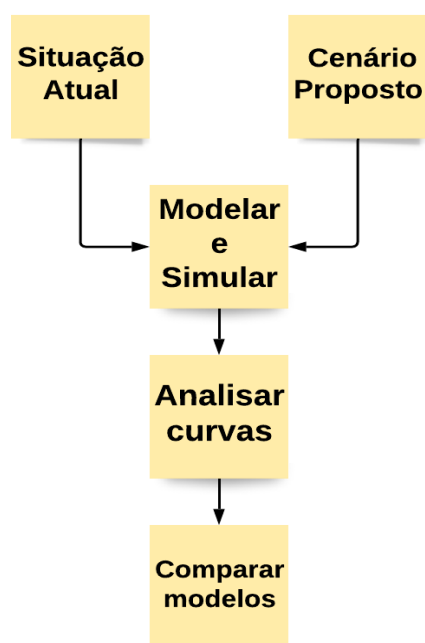
### 3.3 Etapas para Validação da Metodologia em Pesquisa

Avançando no procedimento metodológico, alinhado à Etapa 4, na figura 8 a seguir, se expressa as estratégias adotadas para superar os desafios apurados. Onde, o primeiro momento, consiste em modelar e simular o curto-circuito através do software Matlab/Simulink na situação atual, para atender a Etapa 2 da metodologia a fim de realizar o mapeamento da conexão de geração no sistema de distribuição frente a situação de perturbações, previsto nos objetivos.

Após, repete-se as simulações com a modelagem da configuração do Cenário Proposto, implementando tecnologias com o objetivo de otimizar o sistema elétrico e evitar o corte de carga em casos de ilhamento. Ressalta-se que todas as modelagens e simulações são realizadas através do software Matlab/Simulink no modelo adotado para o Cenário Proposto, conforme Etapa 5.

Ainda, atendendo a Etapa 6, busca-se gerar e analisar as curvas de tensão, frequência e corrente, através das simulações, após o curto-circuito ocasionado em uma linha do sistema de subtransmissão na Situação Atual e do Cenário Proposto. De tal modo, é atendida a questão dos desafios na operação de sistemas frente a situações de ilhamento programado, conforme explicitado na Etapa 3 e nos objetivos traçados nos capítulos anteriores.

Figura 8- Etapas do desenvolvimento da metodologia



Seguindo o procedimento metodológico proposto na figura 5 deste capítulo, busca-se alcançar os objetivos explanados no capítulo 1 e, ainda, viabilizar a aplicação do procedimento metodológico proposto para cenários com diferentes tipos de fontes de geração de energia e outros modelos de configuração. As análises e resultados obtidos nas simulações, assim como a modelagem da Situação Atual e Cenário Proposto são abordados no próximo capítulo.

## 4 APRESENTAÇÃO DA PESQUISA E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo será apresentada a modelagem do sistema elétrico proposto realizada através da plataforma de simulação do *software* Matlab, conforme supracitado. Ainda, será explanada as modelagens e simulações realizadas e os resultados observados para cada situação operativa nos cenários investigados. Optou-se por utilizar o *software* MATLAB/Simulink® para realizar a modelagem do Sistema Teste a fim de utilizar uma ferramenta sólida e que apresente potencial de interconectividade com outros recursos computacionais, bem como potencial de abranger outras fontes de energia além da hidrelétrica e termelétrica (PREISLER, 2016).

Neste sentido, a escolha desse programa se deu pela sua vantagem em permitir utilizar funções que levariam tempo significativo para serem desenvolvidas em outras linguagens, além de possuir recursos visuais que são simples em comparação a algumas linguagens de programação. Além disso, a modelagem dos relés de proteção utilizados, que não são objeto deste trabalho, foram desenvolvidas em outro momento através do Matlab/Simulink®, facilitando o desenvolvimento do presente estudo nesta plataforma. As modelagens dos respectivos relés de proteção 87L e 81 estão disponibilizadas no anexo 2.

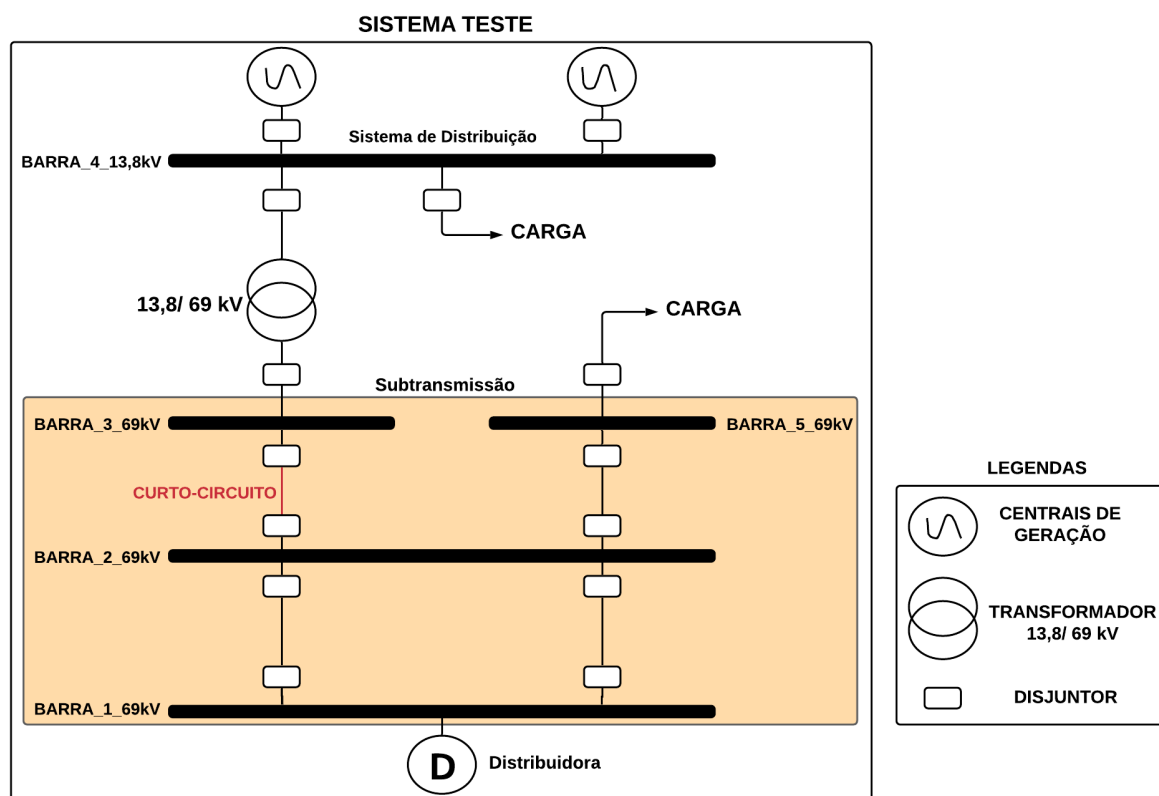
### 4.1 Modelagem do Sistema Teste no Matlab

Para a realização do presente estudo toma-se como base um sistema elétrico composto por cinco barras, similar ao abordado no Anexo I da página 765 do livro *Proteção de Sistemas Elétricos* de João Mamede Filho (2013). Durante o desenvolvimento da modelagem foram utilizadas as bibliotecas do Simulink encontradas na aba *Simscape/Electrical/Specialized\_Power\_Systems*, nela são disponibilizadas as bibliotecas de disjuntores, linhas, transformadores, fonte para barra infinita, blocos de medição e cargas. Além disso, pode-se usar o comando “help” do respectivo *software* para encontrar as bibliotecas necessárias e informações sobre recursos avançados (SILVA, 2002).

A fim de atingir os objetivos propostos, conforme procedimentos metodológicos apresentados no capítulo anterior, adaptou-se o sistema elétrico modelo de modo que sua nova composição compreende quatro barras de subtransmissão de 69 kV, uma

barra de distribuição de 13,8 kV conectada ao conjunto de duas centrais geradoras, somando 15 MVA cada. As configurações propostas para o sistema teste podem ser observadas na figura 9:

Figura 9- Sistema Teste



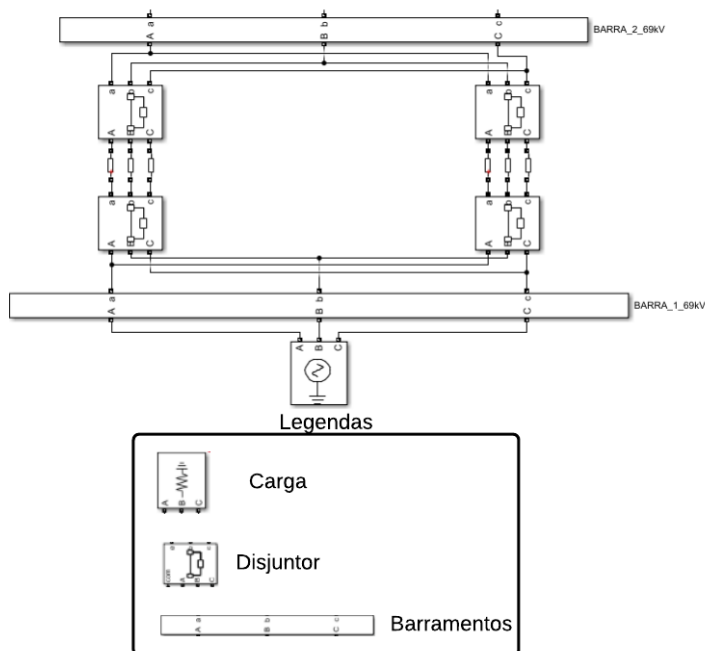
Fonte: Autora (2021)

Os centros de geração são desenvolvidos com dois tipos de fonte, sendo elas termelétrica e hidrelétrica, conforme supracitado. A escolha dos tipos de fonte se deu pela sua fácil configuração e aplicação. Sendo que para trabalhos futuros, sugere-se rodar as simulações com a alteração e combinação de fontes eólica e solar, a fim de apontar as diferenças apresentadas com a implementação das mesmas.

A seguir a modelagem dos elementos e dos arranjos do Sistema Teste é apresentado por partes, alinhado ao proposto no capítulo da metodologia, figura 6, sendo analisadas as características de cada etapa, para o desenvolvimento das simulações dos cenários estabelecidos. Na figura 10 é apresentada a distribuidora e as barras 1 e 2, que neste caso são a barra 1 o ponto de conexão com a distribuidora e desta barra duas linhas paralelas alimentam uma segunda subestação sendo

representada pela barra 2. O desenvolvimento da modelagem do Sistema Teste baseia-se na figura 9. Neste caso, a conexão com a distribuidora representa que o sistema está conectado à barra infinita, que neste caso representa o SIN.

Figura 10- Bloco de implantação da distribuidora e barras 1 e 2.

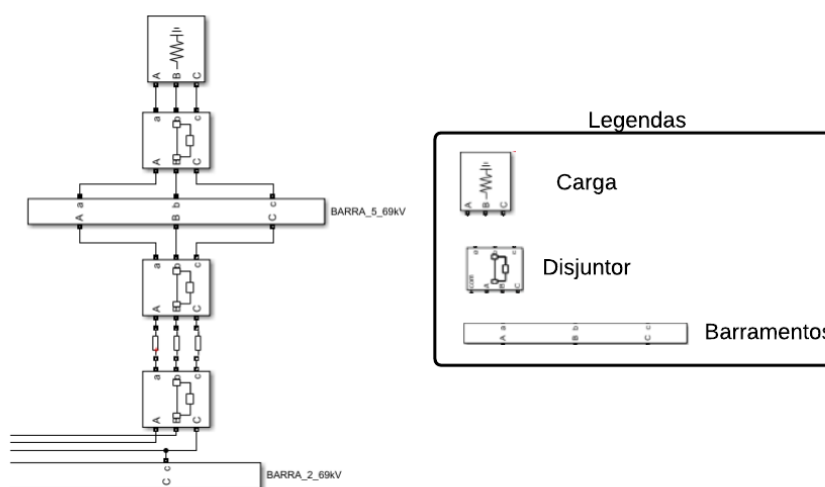


Fonte: Autora (2021)

Avançando na implementação do modelo, conectou-se uma carga junto ao sistema de subtransmissão. Essa carga está diretamente ligada à barra 5, representada na figura 11, e tem como fonte de alimentação principal a rede da distribuidora e considerando a configuração adotada para o sistema, onde se tem uma parte da alimentação das gerações conectadas ao sistema de distribuição, estas também contribuem para alimentação desta carga. A conexão entre os barramentos é realizada através de linhas de subtransmissão, ressalta-se que a simbologia de todos elementos utilizados na configuração do sistema teste estão na figura 10.



Figura 11- Carga ligada na Barra 5.

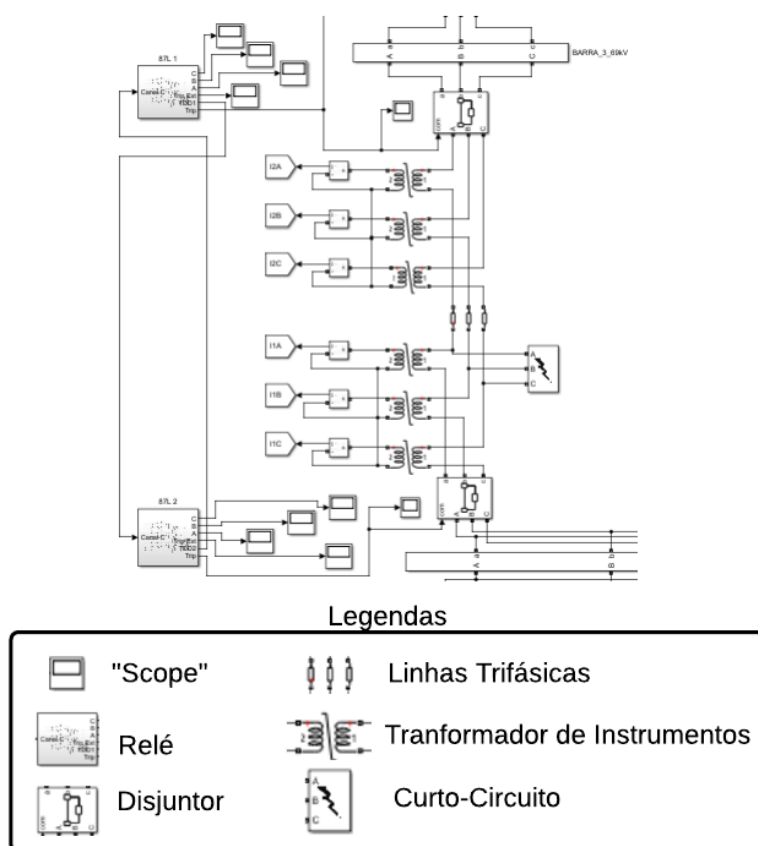


Fonte: Autora (2021).

Em seguida, na figura 12 pode ser verificada a linha que interliga a barra 2 com a barra 3, nessa linha será simulado a situação de curto-circuito, através dos recursos disponíveis na biblioteca específica do Simulink. A proteção é realizada através do relé de proteção diferencial de linha (87L), como citado o mesmo estava previamente modelado, assim, é apresentado neste trabalho como um bloco de subsistema e nos anexos se encontra a base de sua modelagem. Na condição de atuação deste relé, ocorre o ilhamento das gerações e das cargas conectadas ao sistema de distribuição, e em caso de um sistema com mais linhas, a abertura de todas elas deixaria ilhado o sistema, no entanto, para o estudo essa situação não é relevante.

Para modelagem desta proteção, na referida plataforma, foram utilizados também as bibliotecas de transformadores de corrente, medição de corrente, além das bibliotecas "From" e "Goto", que levaram as informações para o bloco de subsistema do relé 87L, apresentadas na figura 12. Ainda, a figura 12 apresenta as bibliotecas RMS, Scope e Display, que serão utilizados posteriormente para modelagem das medições e oscilografias.

Figura 12- Linha entre a barra 2 e 3 com a implantação da proteção 87L.



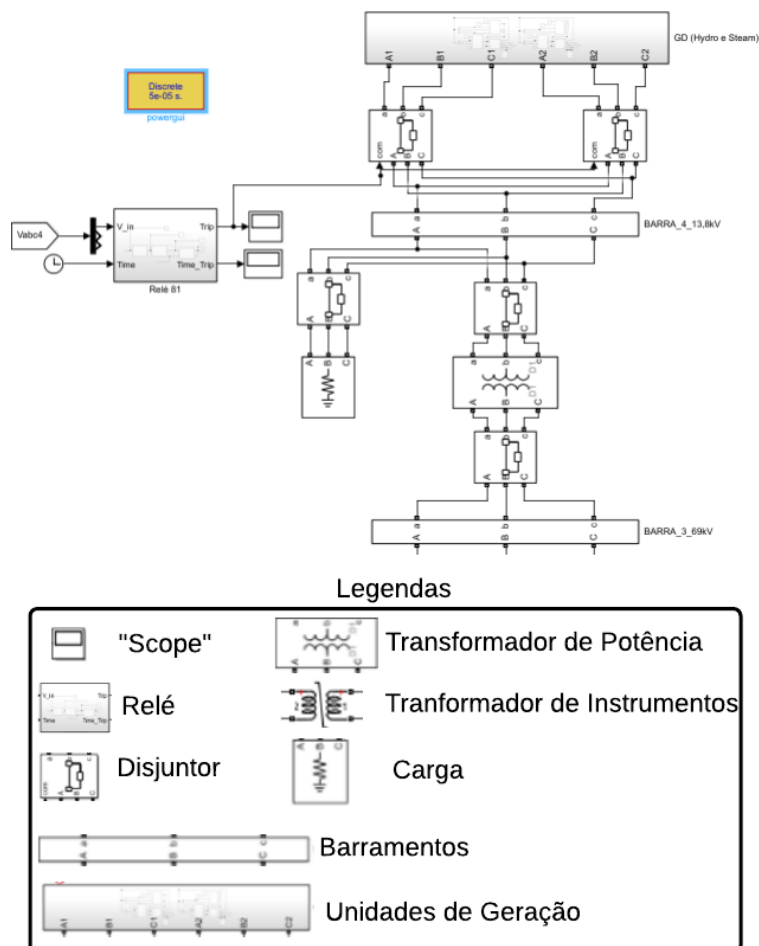
Fonte: Autora (2021)

As respectivas centrais de geração, consideradas unidades de geração distribuída, podem ser verificadas na figura 13. As mesmas foram modeladas em bloco e conectadas à barra 4, que representa o sistema de distribuição com tensão igual à 13,8 kV. O restante das barras presentes nesse sistema elétrico foram definidas com tensão igual à 69 kV, consideradas subtransmissão. Para interligação e redução da tensão é utilizado um transformador de potência entre as barras 3 e 4.

Na barra 4, conforme figura 13, também está conectada uma carga cujo valor será fixo nos cenários elaborados para todas as simulações realizadas neste trabalho. Todos os disjuntores estão configurados para iniciar ligados/fechados e assim permanecer, exceto os disjuntores da linha entre a barra 3 e 4 que desligam por proteção (87L) e os disjuntores de proteção das gerações que recebem comando de

abertura para atuação de acordo com a proteção de frequência (sobre ou sub), verificada na barra 4, com numeração de tabela ANSI 81.

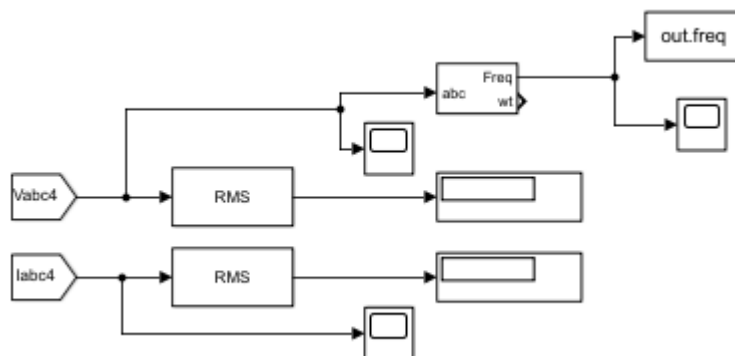
Figura 13- Unidades de Geração e transformador entre barras e relé 81.



Fonte: Autora (2021)

Além disso, foram implantadas medições de tensão e correntes RMS, assim como registros de oscilografia para análise das formas de onda, conforme figura 14, essas medições são provenientes da barra 4 por ser o ponto principal para realizar as análises e buscar as soluções propostas.

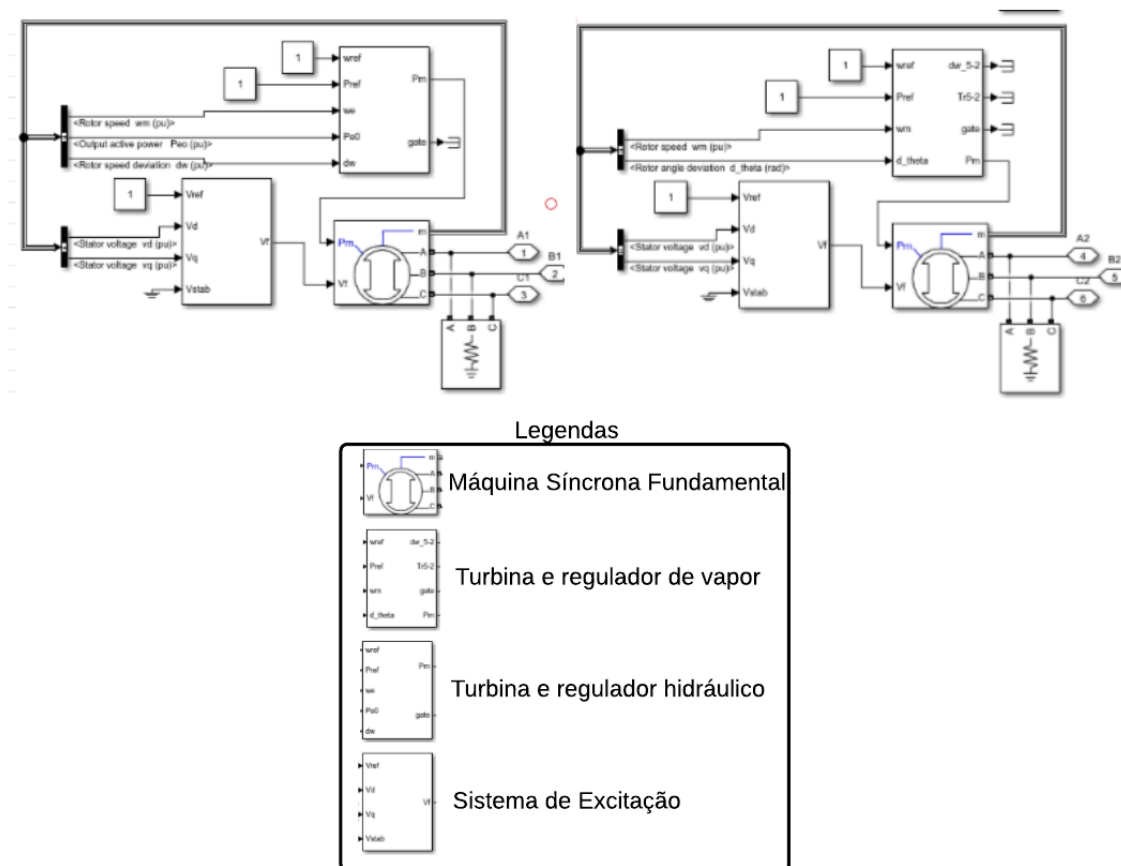
Figura 14- Medições das barras e oscilografias.



Fonte: Autora (2021)

As gerações foram definidas como sendo com recursos hídricos (PCH) e a vapor (Termoelétrica), conforme destacado. A implementação destas fontes na plataforma de simulação é apresentada na figura 15. Para modelagem das gerações foram utilizadas as bibliotecas de máquina síncrona, sistema de excitação, assim como, turbinas e reguladores hidráulicos e a vapor.

Figura 15- Implementação das gerações distribuídas.



Fonte: Autora (2021)

De tal modo que a proposta de um cenário de simulação fica elaborada, seguindo o circuito modelo indicado na figura 9, este cenário mesmo sendo teórico, representa bem sistemas atuais em operação no SEB, o que indica que os resultados obtidos durante os estudos, mesmo que com pequenas alterações, podem ser replicados em diversas situações reais.

De tal modo, são aplicadas adequações durante o desenvolvimento, para atender as etapas de simulação do Sistema Teste referente às condições de Situação Atual e Cenário Proposto, indicadas na tabela 3, conforme as necessidades de comprovação de conceitos teóricos, como a equalização de geração e carga, assim como para analisar os resultados alcançados com a configuração de proteção proposta.

Tabela 3- Etapas de Simulação.

Cenário	Objetivo
Primeiro Cenário (COMPOSIÇÃO DE GERAÇÃO E CARGA EQUALIZADA)	Provar que, com geração e carga equilibradas, o sistema tende a se recompor assegurando as os níveis de grandezas elétricas definidos.
Segundo Cenário (COMPOSIÇÃO DE GERAÇÃO E CARGAS DIFERENTES COM PROTEÇÕES PADRÃO)	Visualizar o comportamento dos níveis de tensão, frequência e corrente no cenário onde a geração é maior que a carga com a proteção tradicional.
Terceira Cenário (COMPOSIÇÃO DE GERAÇÃO E CARGAS DIFERENTES COM ESQUEMA ESPECIAL PROPOSTO)	Simular a configuração proposta com desconexão de geração sem que se interrompa o abastecimento das cargas presentes no sistema ilhado.

Fonte: Autora (2021)

## 5.2 Simulação do Primeiro Cenário

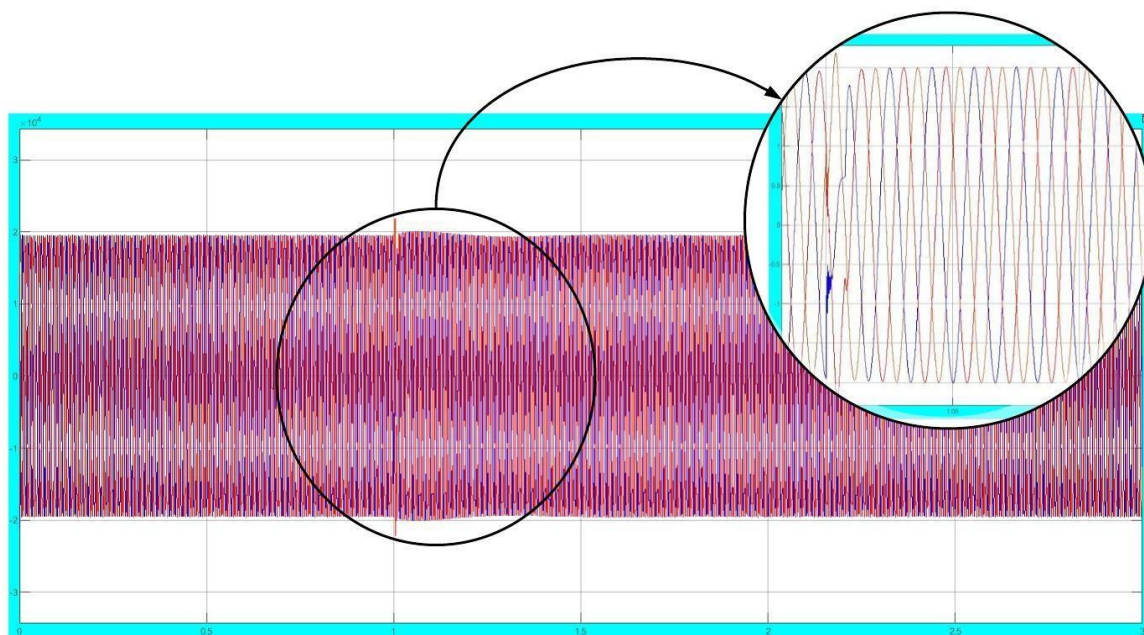
A simulação proposta inicialmente tem o objetivo de constatar que um sistema equalizado entre carga e geração, apesar de sofrer ocorrência de falta, com uma correta atuação da proteção possibilita que os valores de tensão, frequência e corrente possam se manter dentro dos valores padrões.

Configurou-se a carga conectada à barra 5 com potência aparente de 20 MVA. Em um primeiro momento, carga e geração, na barra 4, serão configuradas com potência de 15 MVA, os valores de carga, tanto na barra 4 que é objeto principal do estudo assim como na barra 5 serão mantidos durante todo o estudo, sendo as alterações principais durante os cenários propostos se dará no valor da potência das gerações .

Colocando o programa para rodar, monitorando as tensões e frequência na barra 4, configurou-se a atuação da falta em 1 segundo, a fim de garantir que o

sistema estaria estável, sem influência de oscilações de partida das máquinas no início da simulação. Dessa forma, obtém-se os gráficos das figuras 16 e 17. A figura 16 apresenta o gráfico da tensão na barra 4 e observa-se em aproximação o momento posterior à atuação da proteção onde ocorre uma oscilação.

Figura 16- Medição da tensão da barra 4 pré e pós falta

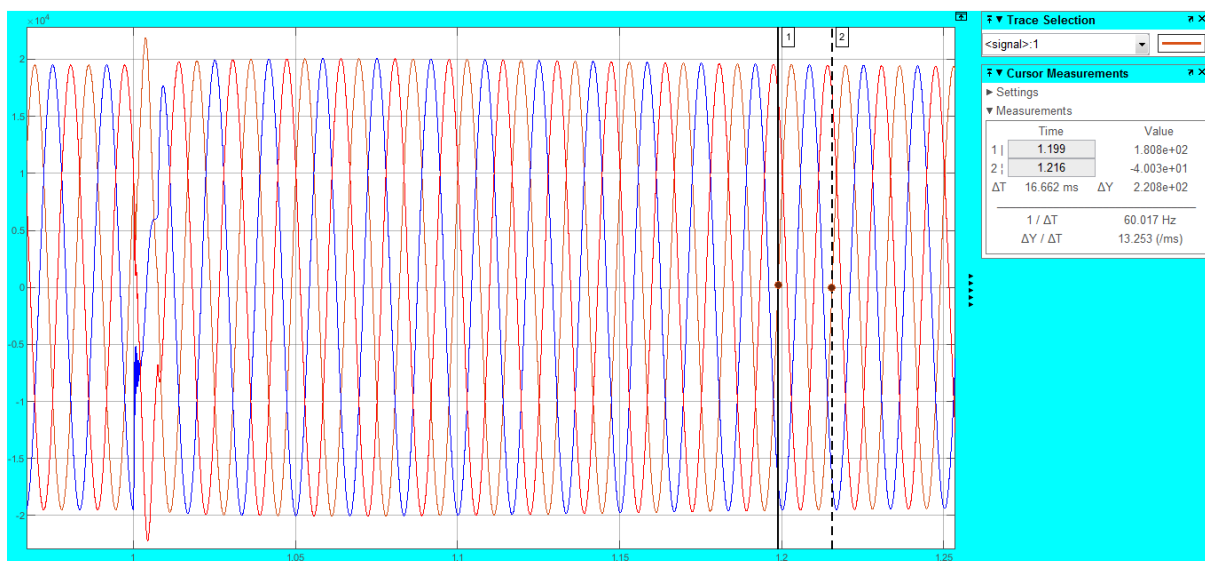


Fonte: Autora (2021)

Nessa figura observa-se na ampliação que a falta ocorreu e foi isolada a área sob falta em aproximadamente um ciclo, no gráfico verifica-se também que a tensão após a falta tende a ter uma elevação que logo é corrigida pelo fato de estar equilibrado os valores de geração e carga, os valores de pico da tensão, conforme eixo vertical, não ultrapassaram o valor de 20 kV, ou seja, menor que 3% de aumento, e o valor retornou ao valor padrão em menos de 250 ms, isso ainda conforme o gráfico da figura 16, verificado no eixo horizontal, que representa o tempo.

Já na figura 17 é demonstrada essa oscilação e é realizado medições na forma de onda para verificar a frequência, que pode ser observado na caixa de medições que em 200 ms já estava com 60 Hz, a medição foi realizada em um ponto próximo ao zero para garantir uma medição correta, desta forma os valores de tensão da caixa não são utilizados para a análise.

Figura 17- Leitura da tensão na barra 4

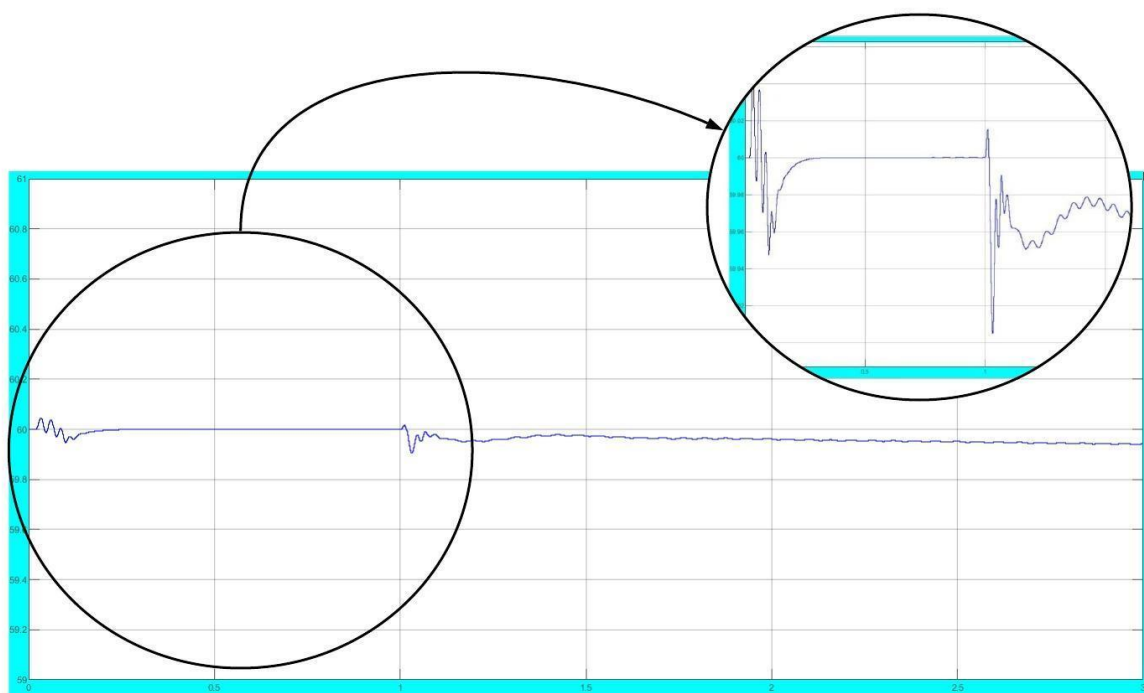


Fonte: Autora (2021)

Na figura 18, é verificada a medição de frequência com uma aproximação do período inicial até a atuação da proteção da linha. A frequência apresenta uma oscilação inicial que corresponde a inicialização das máquinas, característico da simulação, sem comprometer resultados. A frequência mantém o valor padrão de 60 Hz, até a atuação da falta, onde ocorre uma segunda oscilação. Observa-se nas medições da figura 21 máximo valor menor que 60,02 Hz e mínimo maior que 69,9 Hz no momento da falta, retornando quase instantaneamente para valores muito aproximados ao padrão de 60 Hz. Este fato indica que, conforme o esperado, em um sistema equalizado é possível operar mesmo em condições de ilhamento.



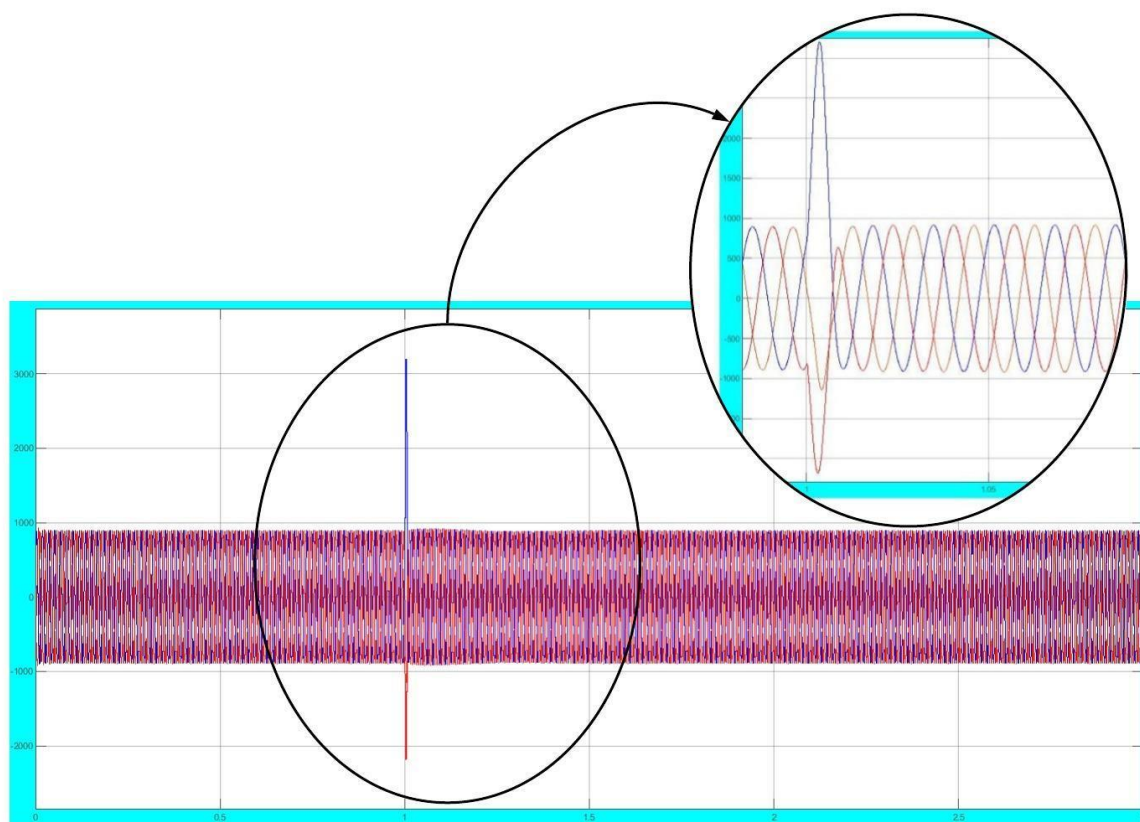
Figura 18- Leitura da frequência na barra 4



Fonte: Autora (2021)

Na figura 19, é apresentada a corrente na barra 4, com uma aproximação do período inicial até a atuação da proteção da linha. Assim como o gráfico da medição das tensões, verifica-se que ocorre uma variação dos valores de corrente no momento da falta, elevando até 3 vezes os valores nominais. Esse fato é esperado, no entanto, conforme a aproximação, a área sob falta foi isolada e o valor das correntes retornou ao nominal em praticamente um ciclo, apresentando uma pequena elevação em um período menor que 250 ms. As oscilações observadas correspondem, assim como na tensão, às características de regulação da máquina.

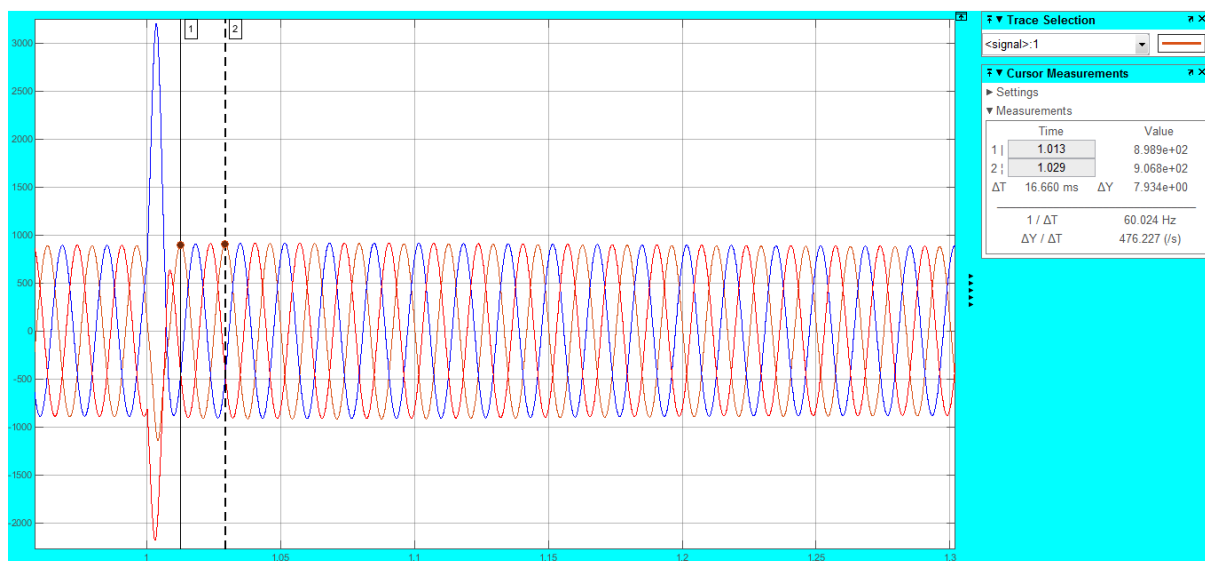
Figura 19- Leitura da corrente na barra 4



Fonte: Autora (2021)

Na figura 20, a corrente próxima a falta é apresentada com algumas medições, sendo verificado que a frequência na forma de onda da corrente já está com os valores de 60 Hz em um ciclo após falta, e com os valores de corrente no valor respectivo a carga. Com isso, é indicado que, em todas as medições, se existisse configurado um relé de verificação de frequência (81), com o sistema equilibrado, o mesmo não iria atuar, pois a variação apresenta valores que não iriam sensibilizar o mesmo. Ainda, pode ser observado que, nas medições de frequência, tomando por base os valores de tensão demoram mais a estabilizar. Conclui-se que esse fato reflete do controle das máquinas, pois para corrigir sobrecargas o controle atua na tensão através do regulador automático de velocidade (AVR), o que justifica a utilização desta medição para atuação do relé 81.

Figura 20- Leitura da corrente pré e pós falta



Fonte: Autora (2021)

Em complemento verifica-se, na figura 16 que a tensão pré falta, ou seja, até o instante 1 s, tem o valor de 1.0 PU conforme esperado, após a falta e consequente atuação do relé de proteção, que isolou a geração e a carga com valores iguais, apresentou uma oscilação, por um instante menor que 250 ms, devido aos ajustes de velocidade da máquina em uma situação pós falta, e retornou ao valor padrão conforme esperado para uma situação de equalização de geração e carga.

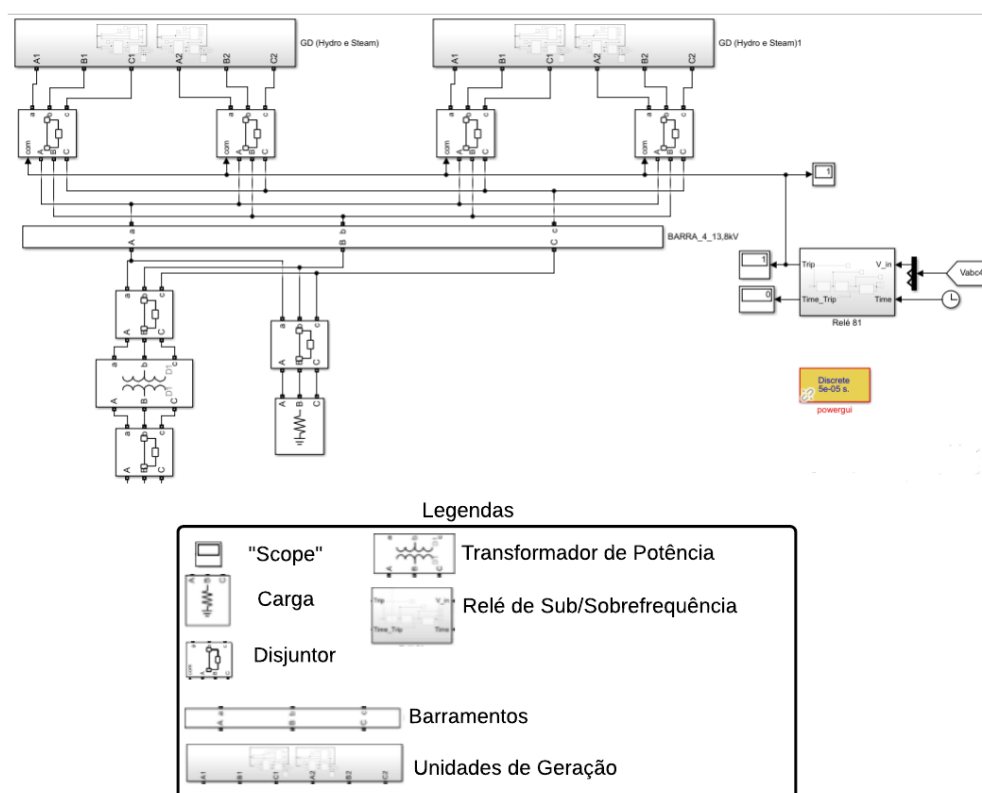
Além disso, se nota que a frequência normalizou em 60 Hz indicando que o sistema estava equalizado e as máquinas conseguiram efetuar o controle da velocidade do sistema, esse valor pode ser observado nas medições da figura 17 e também é representada na figura 18, onde verifica-se que a mesma oscila na partida da máquina mas logo estabiliza, não interferindo no estudo. No momento da falta ocorre uma nova oscilação, no entanto, por ter as cargas de valores iguais, novamente estabiliza, não chegando a valores de atuação do relé 81.

Constata-se que a frequência após estabilizar ficou um pouco abaixo da nominal, com valores em torno de 59,98 Hz, mas permaneceu estável tendendo a retornar aos 60 Hz. Estes valores possibilitam a recomposição do sistema, seja por atuação de religamento automático ou por operação do agente controlador.

### 5.3 Simulação do Segundo Cenário

Em um segundo momento configurou-se as fontes para duas gerações de 15 MVA, totalizando 30 MVA, sendo que a carga conectada ao sistema de distribuição se mantém em 15 MVA. A intenção destas configurações é de simular um sistema onde se tenha potência de geração maior do que a carga. Neste caso, ao ocorrer o ilhamento, este deve ser detectado e o sistema deve ser desligado. Para isso, o relé 81 irá atuar no desligamento dos dois grupos de geração, conforme pode-se observar na figura 21. Ainda, nota-se que os dois grupos de geração são conectados à barra 4 e que o relé 81 que monitora a frequência nesta barra e atua nos quatro disjuntores das gerações.

Figura 21- Configuração com geração operada pelo relé 81



Fonte: Autora (2021)

As medições podem ser verificadas nas figuras 22, 23 e 25 onde tem-se as curvas de frequência, corrente e tensão, respectivamente. Observa-se na figura 22 que inicialmente a frequência estava estabilizada em 60 Hz e, após o curto-circuito e

abertura da linha dada pela atuação da proteção 87L, ocorreu o ilhamento da geração e carga conectada à barra 4. Devido ao desequilíbrio de carga e geração, com valores 15 MVA e 30 MVA, respectivamente, a frequência logo tende a subir, causando assim a atuação do relé 81 e abrindo as gerações, o que pode ser comprovado nos sinais ilustrados nas figuras 23 e 25.

A figura 22 apresenta a referida frequência subindo até os valores de 60.5 Hz, configurado no relé 81, neste momento ocorre a atuação do mesmo e, conseqüentemente, o corte de toda geração. A frequência aparentemente volta a cair, mas o corte de tensão já ocorreu. Com isso, conclui-se que o valor medido é só residual e não real.

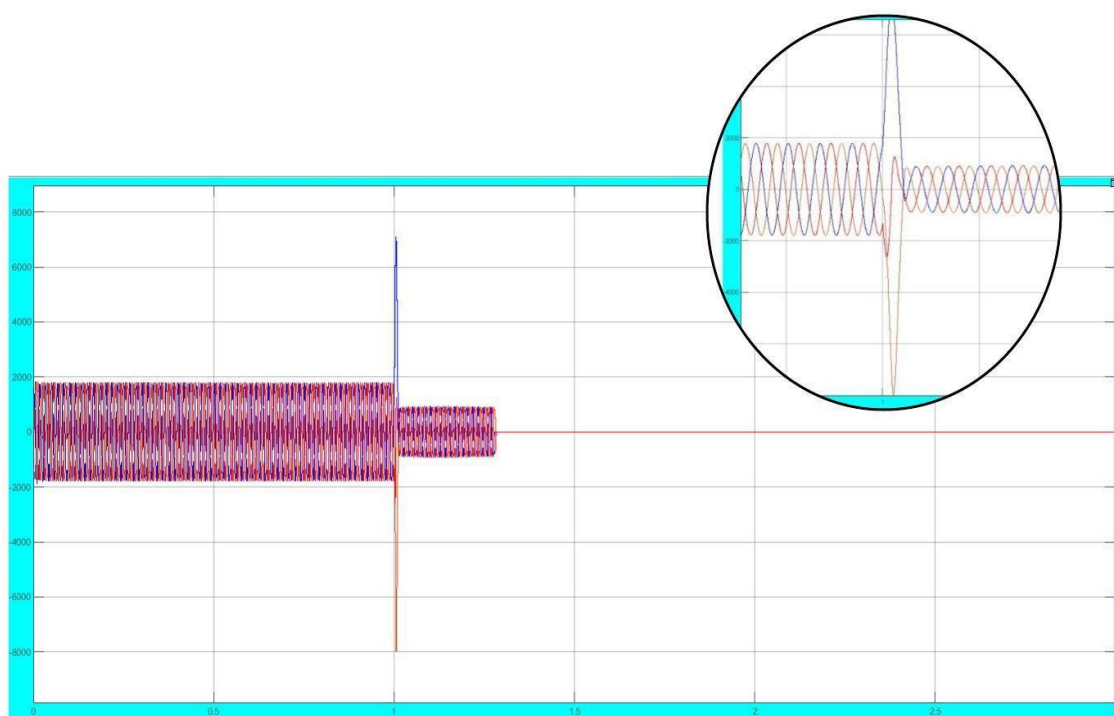
Figura 22- Frequência atuação falta e relés 87L e 81



Fonte: Autora (2021)

Se observa na figura 23 que a corrente diminuiu pela metade devido a configuração apresentada após a atuação da proteção 87L, pois a geração excedente alimenta também a carga ligada a barra 5 e é absorvida pela barra infinita e com a abertura da linha a carga ficou limitada em 15 MVA. No entanto, após atuação do 81, a corrente zerou, indicando a desconexão das gerações.

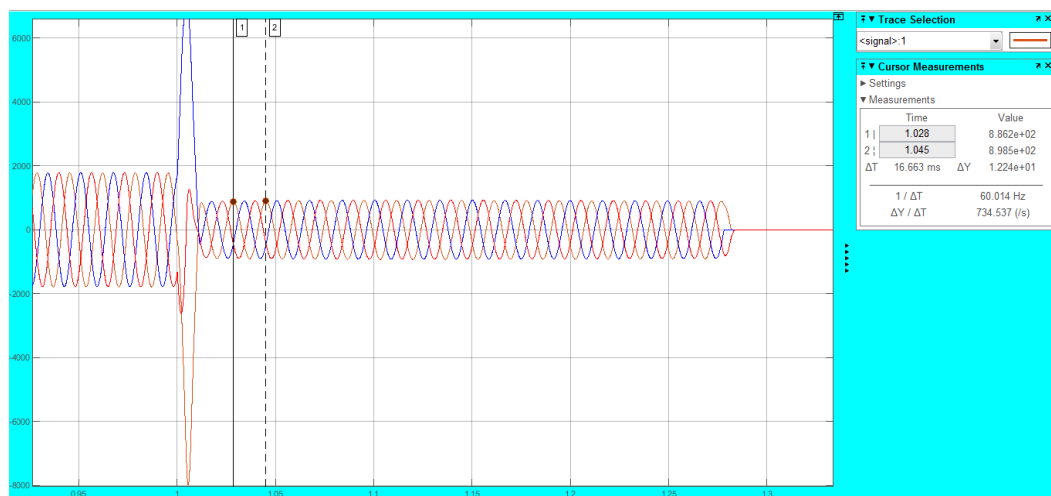
Figura 23- Corrente atuação falta e relés 87L e 81



Fonte: Autora (2021)

Esse corte da corrente é verificado também na figura 24, onde ainda é apresentada uma aproximação no momento da ocorrência da falta, demonstrando que a corrente apresenta uma rápida correção para o novo valor de configuração, e a frequência medida conforme a caixa de medição já estaria em dois ciclos em valor próximo aos 60 Hz.

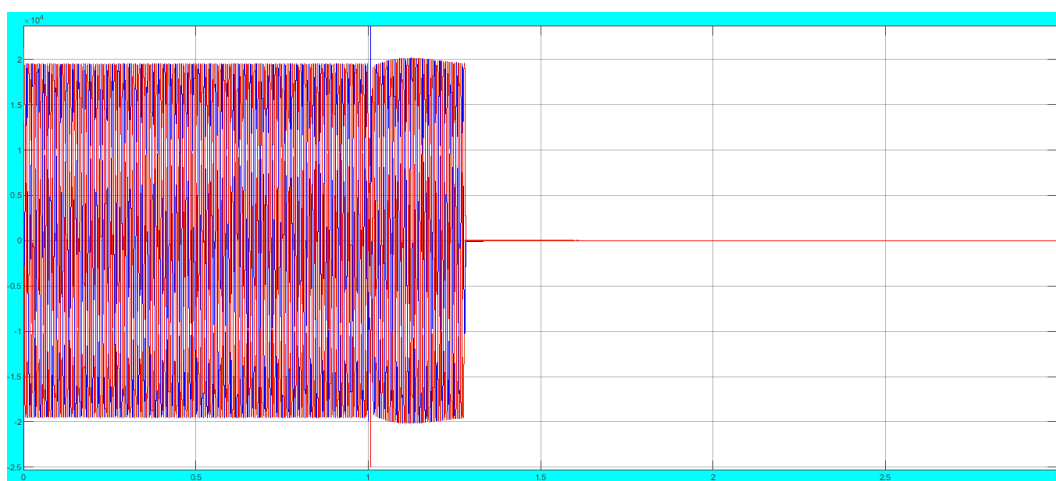
Figura 24- Corrente pré e pós-falta com medições



Fonte: Autora (2021)

Nos gráficos de tensão da figura 25, também é observado as atuações dos relés de proteção 87L no momento da falta e, aproximadamente 250 ms depois, o 81. Como consequência, ocorre o corte de toda geração, zerando o valor da tensão na barra 4. Observa-se que entre o momento da falta em 1 segundo e a atuação do relé 81 a tensão teve um leve aumento. No entanto, assim como a situação de cargas equalizadas, não ultrapassou valores de 20 kV, isso devido a tentativa da máquina em regular a velocidade, ou seja, mesmo com o sistema desequilibrado, busca se regular.

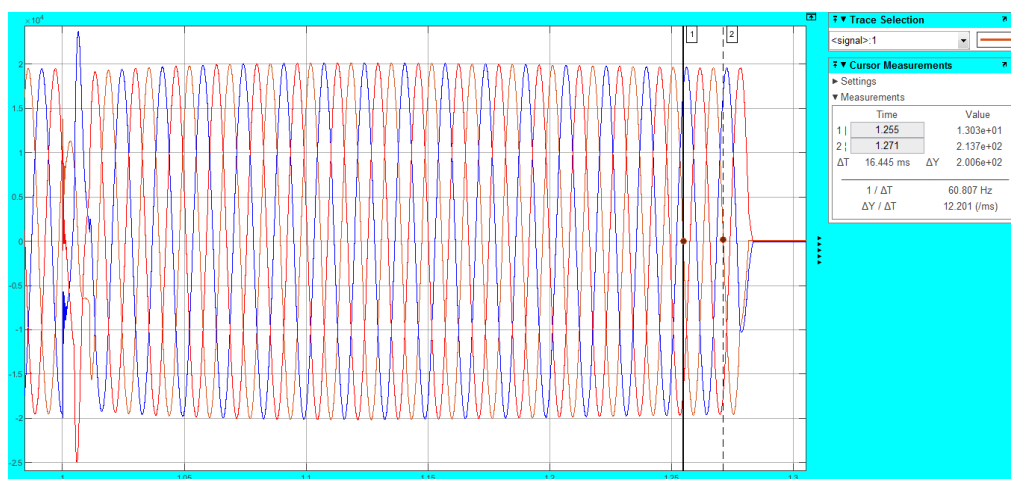
Figura 25- Tensão, atuação falta e relés 87L e 81



Fonte: Autora (2021)

Pode ser observado a tensão, representada na figura 26, que é uma aproximação do momento pré e pós falta, onde o módulo da frequência está com valor de 60,8 Hz ficando assim acima do valor da atuação do relé 81 que foi configurado em 60,5 Hz, comprovando a correta atuação do mesmo.

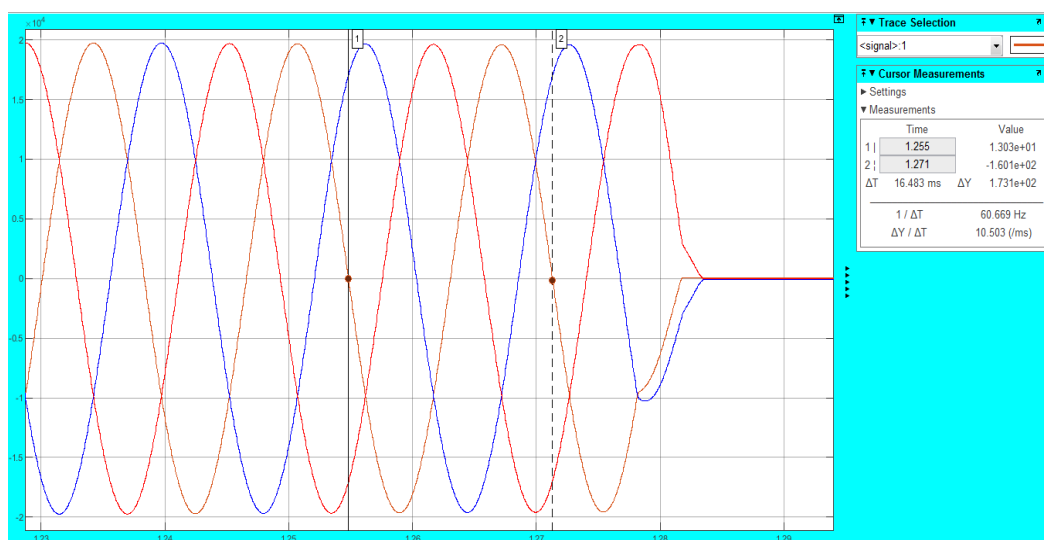
Figura 26- Tensão pré-falta até o corte da geração



Fonte: Autora (2021)

Na figura 27 a medição é realizada com a aproximação do momento de corte da carga, para garantir a medição mais precisa da frequência no instante da atuação do relé 81.

Figura 27- Tensão pré-corte para medição da frequência



Fonte: Autora (2021)

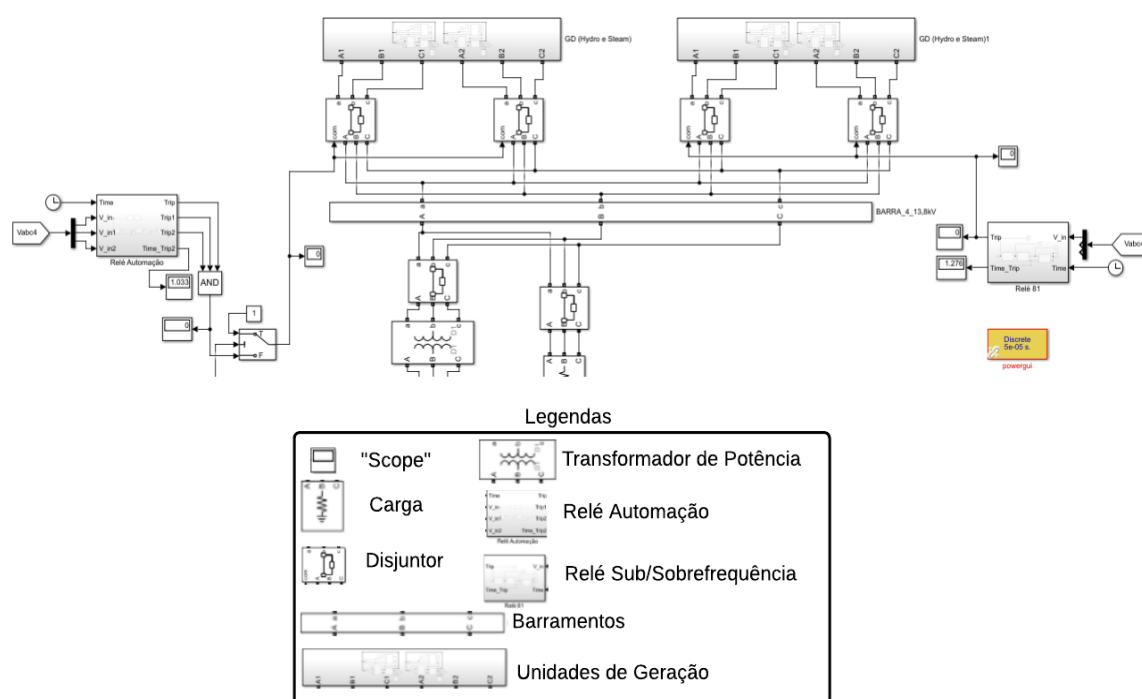


Neste cenário foi possível verificar que em uma ocorrência onde a área ilhada não tem carga e geração equalizada, as máquinas tendem a tentar corrigir, o que é observado no gráfico da tensão, onde ocorreu um aumento do valor e uma correção, no entanto, este ajuste se dá na velocidade da máquina, o que é refletido em alteração da frequência, sendo que com o valor de carga e geração este ajuste não é possível antes da sensibilização e atuação do relé 81, com o conseqüente corte da geração para carga.

### 5.3 Simulação do Terceiro Cenário

Separando as gerações onde o relé 81 atua em um conjunto de geração com 15 MVA e o relé proposto (81), comumente chamado de relé de automação, para atuação de esquema especial proposto, atua na outra geração de 15 MVA, conforme figura 28, onde temos uma visão geral das duas fontes e das proteções.

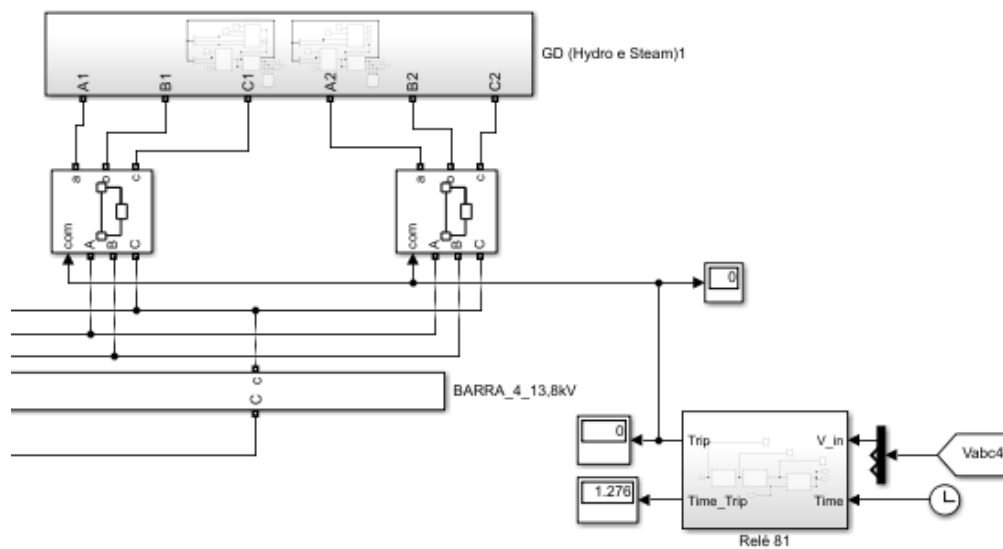
Figura 28- Gerações e proteções.



Fonte: Autora (2021)

A figura 29 apresenta a proteção 81 e suas gerações protegidas e na figura 30 se tem o outro conjunto de geração e a nova proteção (automação) proposta.

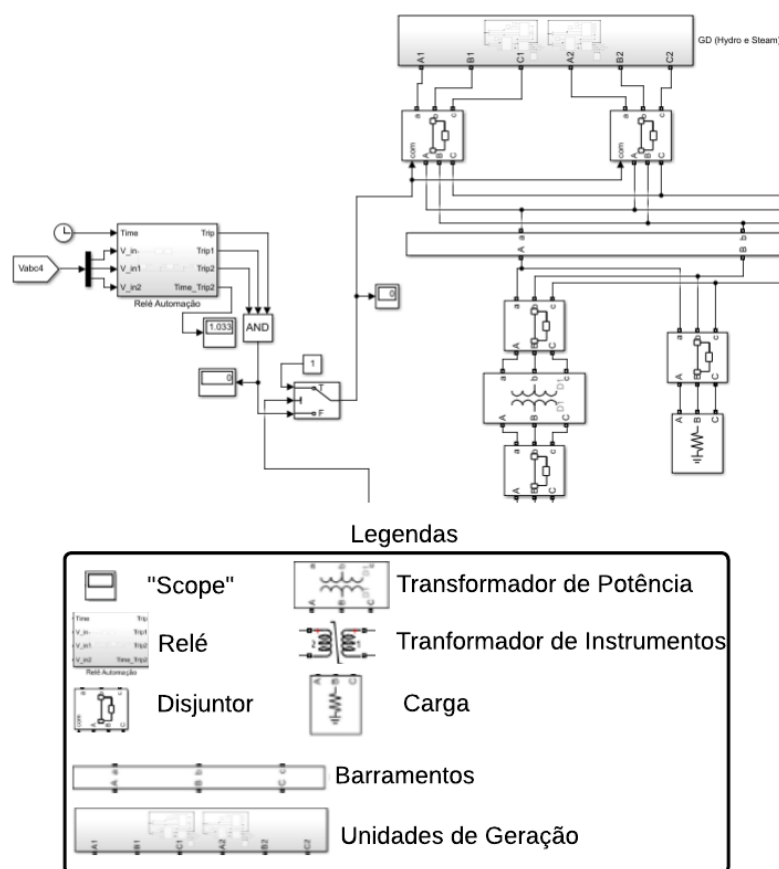
Figura 29- Gerações e proteção 81



Fonte: Autora (2021)

A atuação do relé 81 da figura 29 está diretamente ligada a duas gerações, sendo que considerando uma situação real, ele estaria também configurado como uma proteção para as outras fontes apresentadas na figura 30, como uma proteção secundária à nova proposta. No entanto, como o intuito é comprovar que com a equalização o relé não viria a atuar, foi criado o respectivo cenário, desta forma, sem prejuízo das análises.

Figura 30- Gerações e proteção (automação) nova proposta



Fonte: Autora (2021)

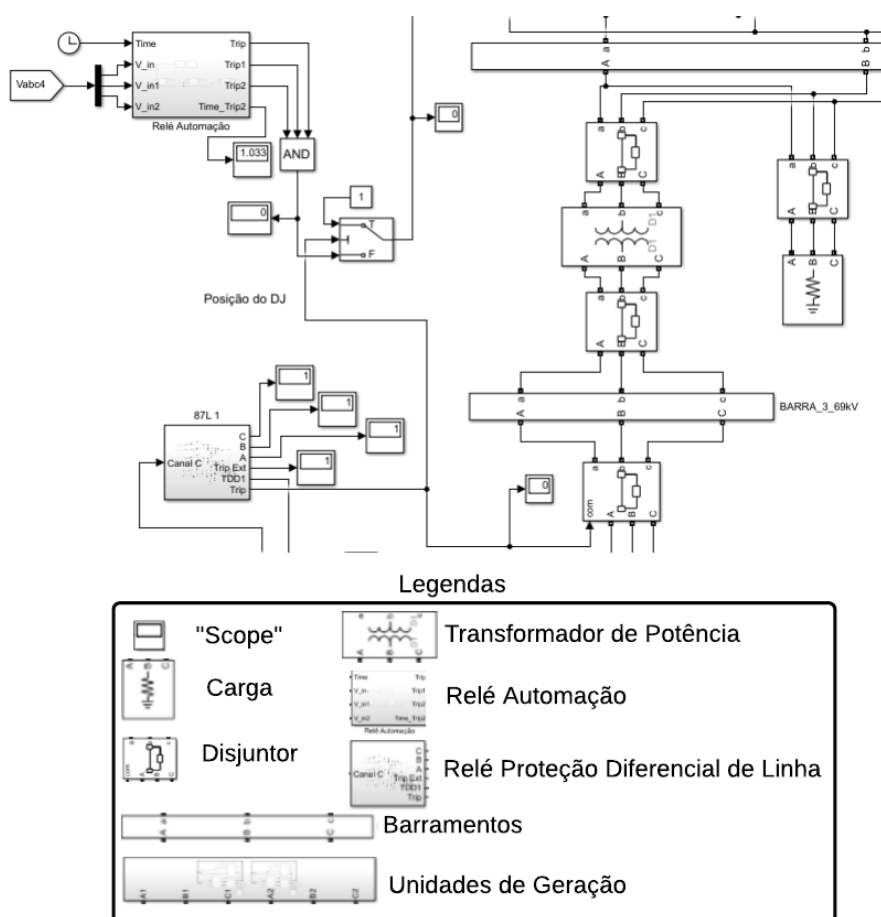
A parametrização no Cenário Proposto é definida da seguinte forma: Ao ocorrer o desarme da linha, é informado a "Nova Proteção" através da posição dos disjuntores que o sistema está isolado, desta forma o relé passa a verificar os parâmetros de frequência, chegando ao valor parametrizado de 60,2 Hz é retirado parte da geração.

Como foi utilizado uma configuração base e na mesma existia entre as barras 2 e 3 apenas uma linha, na qual foi simulado a falta, foi utilizado somente um disjuntor desta linha para informar ao relé proposto que o sistema estava isolado. No entanto, sem prejuízo aos estudos, porém, se for replicado a solução para outros cenários, com a existência de mais linhas chegando à subestação representada pelas barras 3 e 4, será necessário aumentar a lógica incluindo os disjuntores destas outras linhas. Do mesmo modo, o relé proposto - nova proteção - tem a capacidade de verificar a subfrequência, sendo que está configurado para 59,8 Hz, esta configuração tem como

proposta a atuação no corte de carga, melhorando assim a possibilidade de garantir a equalização, no entanto, neste estudo foi delimitado o estudo a atuação no corte de geração.

Na figura 31 pode-se verificar a atuação do relé 87L e a consequente abertura da linha que isola o sistema, atuando em um relé ultrarrápido auxiliar, alterando o comando dos disjuntores da geração para o relé implementado. Dessa forma, pode-se realizar a leitura da posição do disjuntor e, com isso, garantir que uma oscilação no sistema não retire a geração indevidamente, pois este relé tem configurações mais sensíveis que o relé 81.

Figura 31- Intertravamento entre posição de DJ e relé proposto.



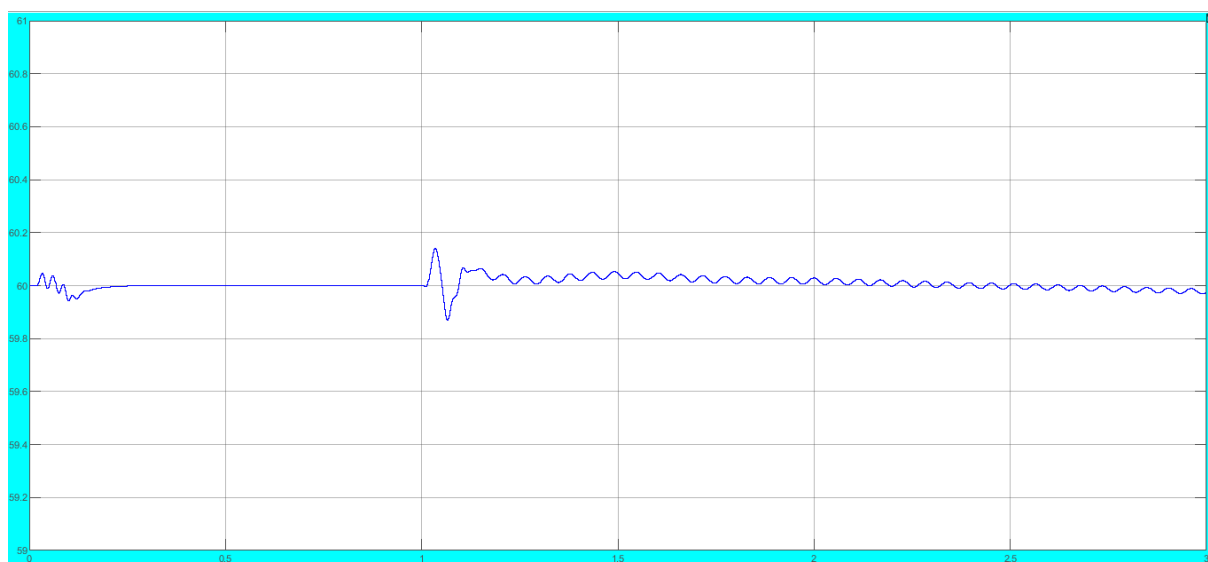
Fonte: Autora (2021)

Na figura 31, ainda observa-se que o relé proposto tem em sua entrada os valores de tensão da barra 4, pois, conforme relatado, é através da medição de tensão

que temos a variação da frequência que é detectada por este relé, assim como no relé 81. A detecção foi proposta de forma trifásica, conforme verificado nas saídas, que faz com que a mesma se torne mais rápida, pois qualquer uma das fases que detectar a variação já vai atuar na abertura dos disjuntores.

As figuras 32, 33 e 35 apresentam a frequência, as correntes e as tensões encontradas rodando a simulação conforme a proposta. Como visto anteriormente, a frequência tende a aumentar e, neste caso, ocorre a atuação da “nova proteção”, retirando o excesso de geração.

Figura 32- Frequência com atuação do novo relé (81).

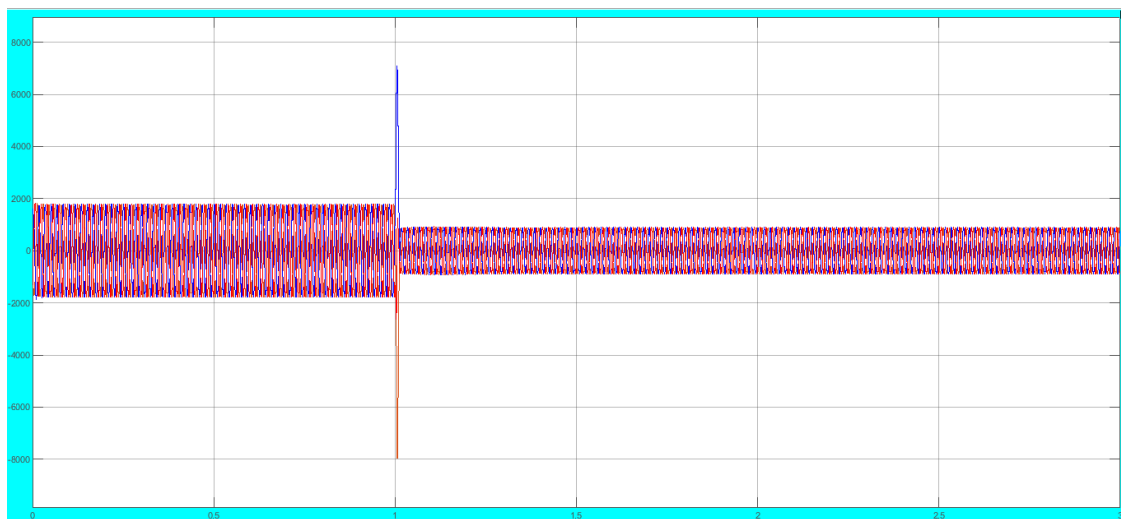


Fonte: Autora (2021)

Verifica-se que ocorre oscilação prevista durante a falta e atuação do relé 87L e após estabilização da frequência em um valor acima dos 60 hz, com a tendência de ao longo do tempo a mesma retornar ao valor padrão. Pode ser verificado também que o valor ficou abaixo de 60,2 hz, correspondente ao valor padrão que permitiria o fechamento do disjuntor, recompondo assim o sistema sem o corte de cargas.

As figuras 33 e 34 complementam o citado, pois demonstram que a corrente se manteve pelo tempo de simulação. Pode ser verificado na figura 34, que é uma aproximação da corrente no momento pós atuação dos relés 87L e do novo relé proposto, que a frequência medida na corrente em um ciclo após a oscilação já se encontra em 60 hz.

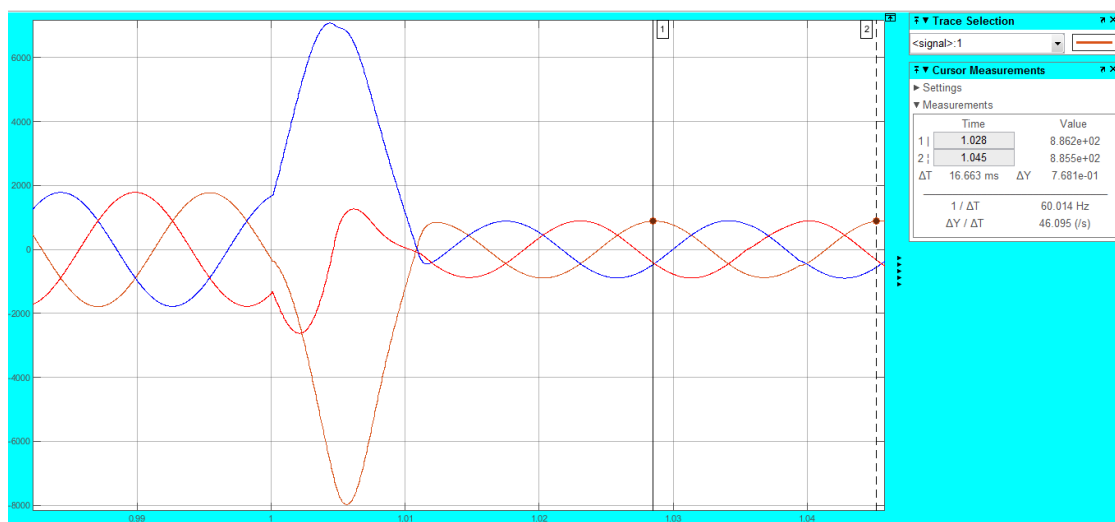
Figura 33- Correntes com atuação do relé proposto.



Fonte: Autora (2021)

Essa característica de que a frequência lida na corrente conforme figura 38 volta ao valor padrão em um ciclo, se manteve inclusive na simulação com diferenças entre carga e geração.

Figura 34- Correntes com atuação do relé proposto

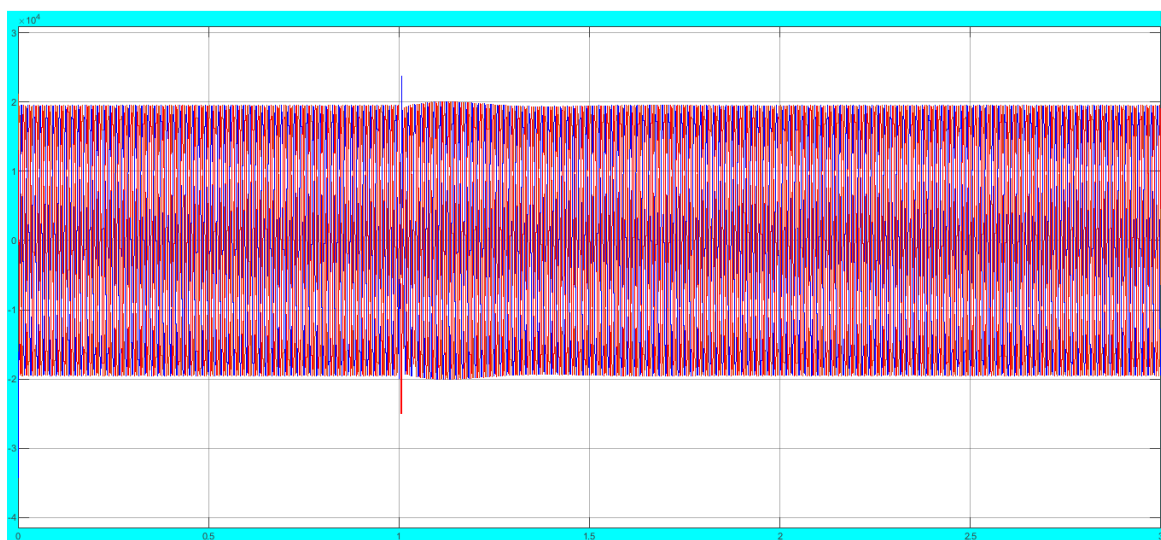


Fonte: Autora (2021)

Já a tensão apresentou uma variação e retornou à região padrão, isto pode ser verificado na figura 35, que representa a tensão na barra 4, a causa da variação na

tensão e a sua estabilização, que já foram relatados anteriormente, estão relacionados à regulação nas máquinas.

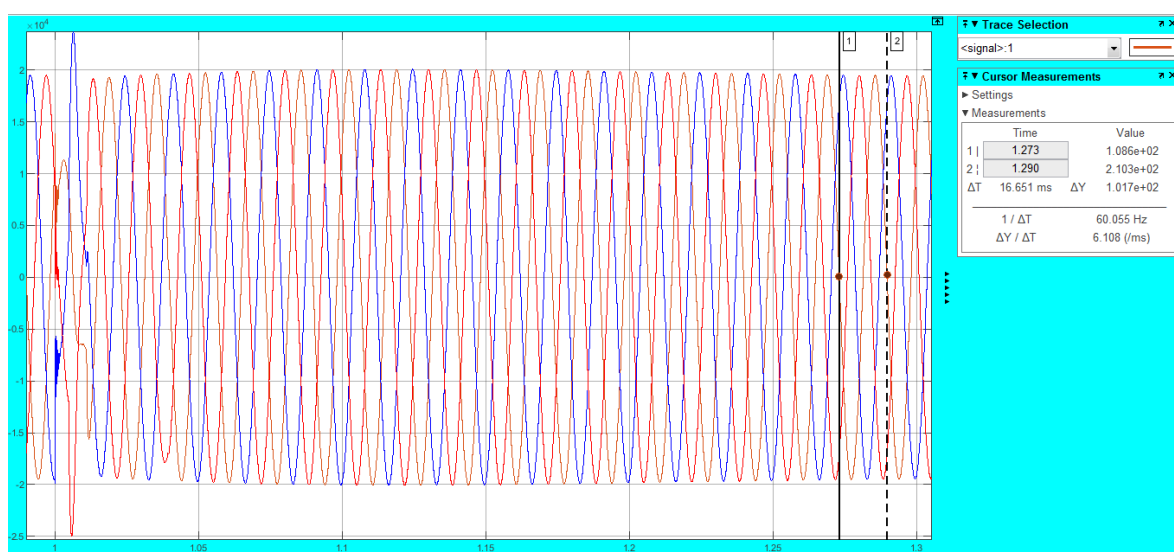
Figura 35- Tensão com atuação do relé proposto



Fonte: Autora (2021)

Na figura 36, este gráfico é aproximado para realizar a medição e pode ser observado que a frequência se mantém no valor padrão de 60 Hz, o ponto utilizado para realizar esta medição foi aproximadamente 250 ms, que anteriormente indicavam os valores máximos de tempo até a atuação do relé 81.

Figura 36- Tensão na barra 4 pós-falta e automação



Fonte: Autora (2021)

Através das situações analisadas dentro do Cenário Proposto, seguindo o procedimento metodológico, buscou-se encontrar soluções para equalização do sistema sem que se interrompa o fornecimento de energia às cargas conectadas. Com isso, observa-se através das análises que através da implementação de um relé, que foi denominado Nova Proteção, com a mesma configuração e parametrização já utilizada anteriormente, desconectando parte das gerações pode-se chegar ao equilíbrio entre geração e cargas. Por conseguinte, constatando alternativas aos modelos de operação atual dos sistemas e atendendo aos objetivos propostos neste trabalho.



## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Caracterizado o problema a respeito da necessidade de operação do sistema de maneira contínua, verifica-se através do presente estudo que, com a equivalência entre geração e carga, é possibilitado a correção de oscilações e assim a minimização do corte de carga, inclusive possibilitando que a interrupção de abastecimento de energia seja evitado. Notou-se através das simulações realizadas que essa equivalência é possível devido a união de proteções e lógicas que verificam o ilhamento, e a automação para retirada de cargas ou gerações. Ainda, destaca-se as dificuldades encontradas a respeito das simulações, uma vez que requer-se um nível alto de detalhamento, conhecimento de funções de proteções, lógicas e seletividade.

De acordo com os objetivos propostos, foi possível explorar a conexão de unidades de geração de energia ao sistema de distribuição e entender os desafios na operação do SEP frente a cenários de perturbações em ilhamento programado.

### 5.1 Trabalhos Futuros

O presente estudo propõe o início de pesquisa de soluções para evitar corte de carga em casos de ilhamento programado. Para trabalhos futuros sugere-se a continuação dos estudos com alteração das fontes de geração energia, além da realização de medição de fluxos de potência, a fim de que os cortes das cargas ou gerações sejam realizados de forma otimizada, com a possibilidade e utilização de inteligência artificial para otimização da lógica. Ainda, através da base do presente trabalho, é possível utilizar outras plataformas de simulação, incluindo softwares livres, para comparação de resultados e, devido a limitações do trabalho acerca de proteções utilizadas, é de grande valia abordar a implementação de diferentes lógicas e funções de proteção, a fim de otimizar o sistema elétrico.

Além disso, com o desenvolvimento, modelagens e simulações da solução proposta para equalização de geração e cargas em um sistema ilhado é pertinente se testarem aplicações práticas, junto de órgãos responsáveis, para validação dos recursos estudados.

## 5.2 Publicações

Artigo publicado:

RODRIGUES, Marina Bresolin; LEDEBUHR, Roberson Roberson Adriel Bergmann; GARCIA, Enoque Dutra. **Subestações de Energia Elétrica Digitalizadas: Um Estudo de Caso**. 12º Salão Internacional de Pesquisa e Extensão. Ano 2020.

Artigo esperando aprovação:

Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNPTEE 26ª edição de 15 a 18 de maio de 2022, no Riocentro, na cidade do Rio de Janeiro.

## 6 REFERÊNCIAS

ANTUNES, Fernando; LEÃO, Ruth; SAMPAIO, Raimundo. **Harmônicos em Sistemas Elétricos**. Elsevier Brasil, 2014. Disponível em: <https://www.drbrm.org/transmissao/1IIIITransmissao.pdf> Acesso em 15 abr 2021

BICHELS, Arlei. **Sistemas elétricos de potência: métodos de análise e solução**. 2018.

BRASIL, **Fontes de energia renováveis representam 83% da matriz elétrica brasileira**. 21 mar. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2020/01/fontes-de-energia-renovaveis-representam-83-da-matriz-eletrica-brasileira> Acesso em: 01 mar 2021

BRASIL, Ministério de Minas e Energia. Plano decenal de expansão de energia 2020. **Brasília, DF, Brasil: Ministério das Minas e Energia (MME), Empresa de Pesquisa Energética (EPE)**, v. 2, 2011. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-422/PDE%202029.pdf> Acesso em: 25 mar 2021

CAMINHA, Amadeu C. **Introdução à proteção dos sistemas elétricos**. Editora Blucher, 1977.

DE ALMEIDA, Ezequiel Mendes. Norma IEC 61850–Novo Padrão Em Automação de Subestações. 2011 Disponível em: <http://www.dee.ufc.br/anexos/TCCs/2011.1/EZEQUIEL%20MENDES%20DE%20ALMEIDA.pdf> Acesso em 15 mar 2021

DE LIMA DANTAS, Ozlean; APOLONIO, Roberto. Qualidade de Energia Elétrica de um Sistema Fotovoltaico de 45 kWp conectado à Rede. **E&S Engineering and Science**, v. 7, n. 4, p. 49-62, 2018.

DE OLIVEIRA, Felipe Teodoro. **Atualização do Sistema de Proteção de Ilhamento Elétrico em uma Refinaria de Petróleo**. 2014. Tese de Doutorado. Universidade

Federal do Rio de Janeiro. Disponível em:

<http://repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10012030.pdf> Acesso em 28 mar 2021

DOS SANTOS, LUIS FABIANO; PEREIRA, MAURÍCIO. Uma abordagem prática do IEC61850 para automação, proteção e controle de subestações. 2007 Disponível em <http://www.centralmat.com.br/Artigos/Mais/abordagemIEC61850LuisFabiano.pdf>

Acesso em 15 fev 2021

ENERGÉTICA-EPE, EMPRESA DE PESQUISA. XX SNTPEE SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.

Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-40/topico-70/Cap4\\_Texto.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-40/topico-70/Cap4_Texto.pdf)

Acesso em 14 abr 2021

Fundamentos do Setor Elétrico. **AANEL**, 2021. Disponível em:

[http://www.labtime.ufg.br/modulos/aneel/mod4\\_uni1\\_sl1.html](http://www.labtime.ufg.br/modulos/aneel/mod4_uni1_sl1.html) Acesso em: 12 mar 2021

LABEGALINI, Paulo Roberto et al. **Projetos mecânicos das linhas aéreas de transmissão**. Editora Blucher, 1992.

LOPES, Daniel do Souto. Modelos neurais autônomos para classificação e localização de defeitos em linhas de transmissão. 2017. Disponível em:

<https://app.uff.br/riuff/handle/1/3932> Acesso em 12 mar 2021

Mapa do Sistema Elétrico Brasileiro configuração 2027. **Eletrobras**. 2021.

Disponível em:

<https://eletrobras.com/pt/AreasdeAtuacao/Mapa%20do%20Sistema%20Eletrico%20Brasileiro%20Configuracao%202027.pdf> Acesso em 29 mar 2021

MATZENBACHER, Luca Santos. Sistema de dimensionamento de condutores de linhas aéreas de transmissão e análise financeira preliminar. 2015. Disponível em:

<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/127650> Acesso em 10 abr 2021

MAYER, Flávio Dias et al. Aproveitamento da casca de arroz em uma micro central termoelétrica avaliação dos impactos econômicos e ambientais para o setor arrozeiro do rio grande do sul. 2009. Disponível em:

[https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/8099/MAYER%2c%20FLAVIO%20DIA S.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/8099/MAYER%2c%20FLAVIO%20DIA%20S.pdf?sequence=1&isAllowed=y) Acesso em 05 abr 2021

NICOLOTTI, Rafaele Dalazuana; SILVA, Ricardo Michael Coutinho da; JORGE, Thyago de Moura. **Avaliação do desempenho dos relés de proteção anti-ilhamento em um sistema com geração distribuída**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Disponível em:

[http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/9937/2/CT\\_COELE\\_2011\\_2\\_05.pdf](http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/9937/2/CT_COELE_2011_2_05.pdf) Acesso em: 18 mar 2021

NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta et al. Perspectives for the world energy matrix and the Brazil; Perspectivas da matriz energetica mundial e no Brasil. **O Setor Eletrico**, v. 2, 2007. Disponível em: <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/21081207> Acesso em 03 mar. 2021

Nova Versão do WEBMAP EPE – Sistemas Interativos de Geoinformação do Setor Energético Brasileiro. **Empresa de Pesquisa Energética**. 2019. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/nova-versao-do-webmap-epe-sistemas-interativos-de-geoinformacao-do-setor-energetico-brasileiro> Acesso em 08 mar 2021

OLIVEIRA, Thales Lima et al. Desenvolvimento de um programa computacional livre, gráfico, e multiplataforma para analisar sistemas elétricos de potência em regime permanente e dinâmico. 2019. Disponível em:

[https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/27257/1/DesenvolvimentoProgramaCo mputacional.pdf](https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/27257/1/DesenvolvimentoProgramaComputacional.pdf) Acesso em 20 fev 2021

ONS, D. O. et al. XXI SNPTEE SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. Disponível em:

[http://www.ons.org.br/%2FProcedimentosDeRede%2FM%C3%B3dulo%201%2FSubm%C3%B3dulo%201.1%2FSubm%C3%B3dulo%201.1\\_Rev\\_0.0.pdf](http://www.ons.org.br/%2FProcedimentosDeRede%2FM%C3%B3dulo%201%2FSubm%C3%B3dulo%201.1%2FSubm%C3%B3dulo%201.1_Rev_0.0.pdf) Acesso em 28 abr 2021

RANGEL, Rodrigo K.; KIENITZ, Karl Heinz; BRANDÃO, Mauricio Pazini. Sistema de Inspecao de Linhas de Transmissao de Energia Electrica Utilizando Veiculos Aereos Nao-Tripulados. 2009. Disponível em <http://www.cta-dlr2009.ita.br/Proceedings/PDF/59018.pdf> Acesso em 10 mar 2021

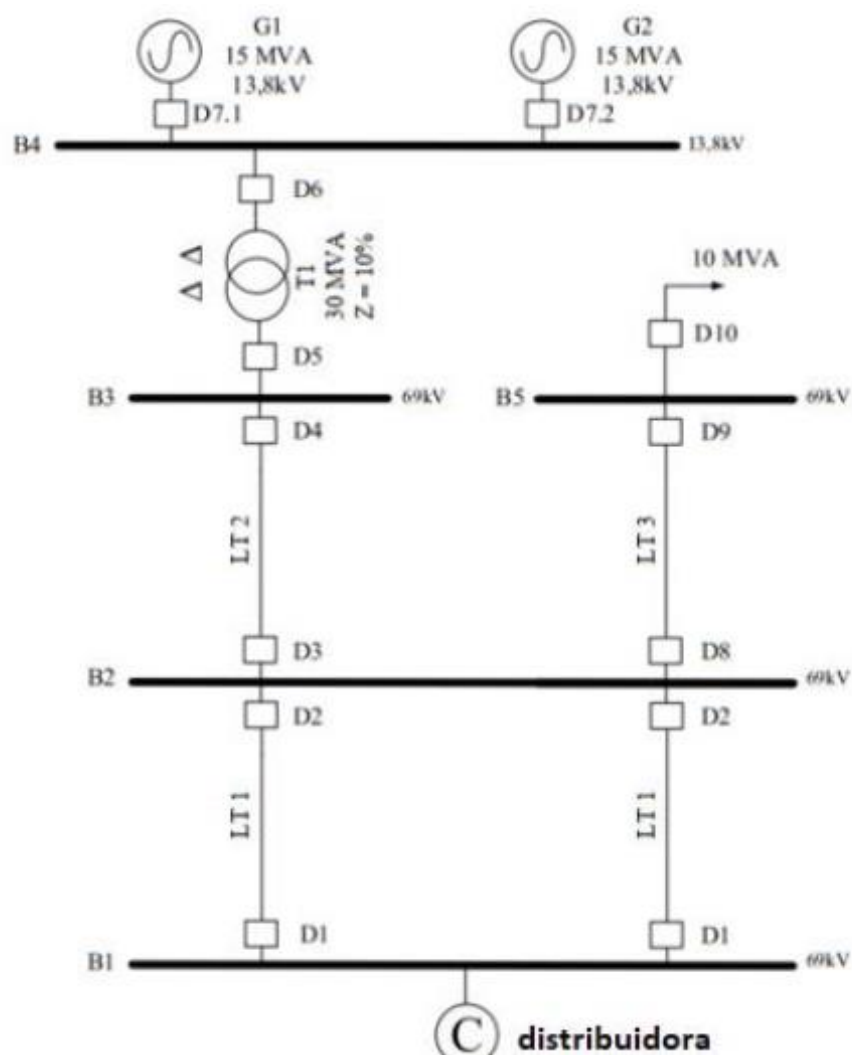
SATO, Fujio; FREITAS, Walmir. Análise de curto-circuito e princípios de proteção em sistemas de energia elétrica. **Rio de Janeiro: Elsevier**, 2015.

VASCONCELOS, Jader. Sistema Elétrico. 2011. Disponível em:

<http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/18795/material/Aula%2011-SE.pdf> Acesso em 27 abr 2021

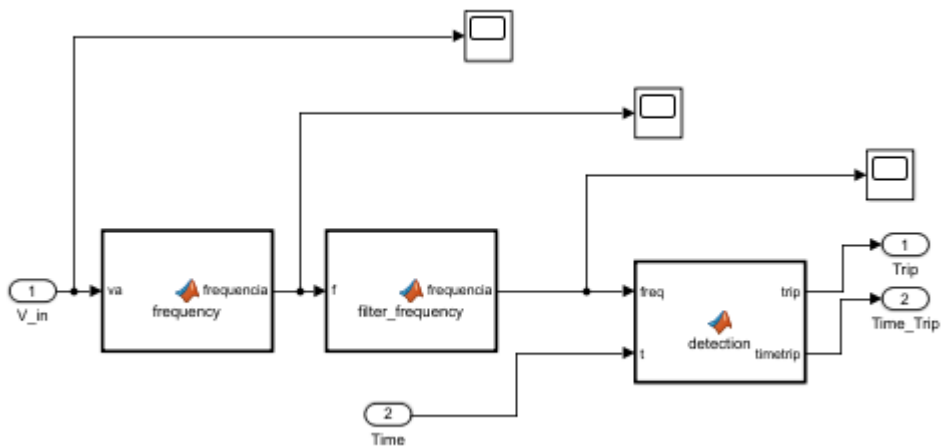
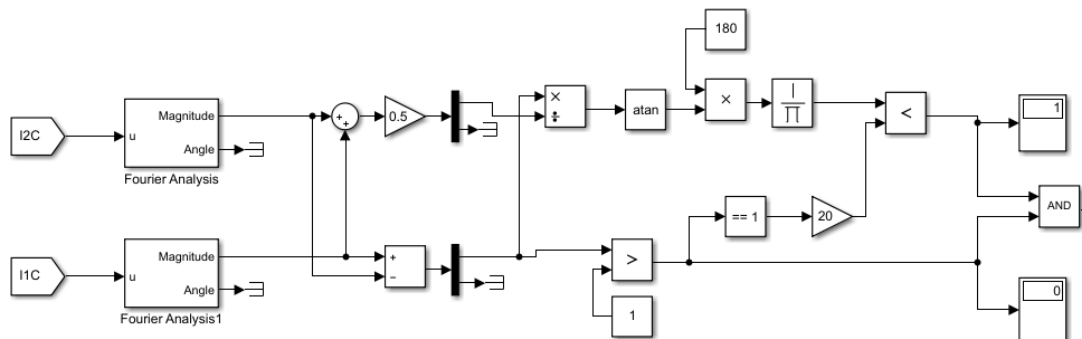
## **ANEXOS**

## Anexo 1





## Anexo 2 - Base do relé 87L (uma fase)



### Anexo 3 – Base relé 81

“Base para detecção da sub e sobrefrequência”

```
function [trip, timetrip] = detection(freq, t)
persistent contdelaya1 gd tempot
persistent freqanterior cdt
if isempty(contdelaya1)
gd = 1;
tempot = 0;
cdt = 0;
contdelaya1 = 0;
freqanterior = 0;
end
periodo = 5e-5;
fsample = 1/periodo;
FM1 = 60.50;
fm1 = 59.50;
Tdelay1 = 0.033;
Adelay1 = Tdelay1 * fsample;
limiardf = 0.5;
dt = abs(freq - freqanterior) / periodo;
if t > 1
% if (dt > limiardf) && (gd == 1)
% cdt =+ 1;
% if cdt > Adelay1
% gd = 0;
% tempot = t;
% end
% end
if (((freq > FM1)|| (freq < fm1))&&(gd == 1))
contdelaya1 = contdelaya1+1;
if (contdelaya1 > Adelay1)
```

```
gd = 0;  
tempot = t;  
end  
else  
contdelaya1 = 0;  
end  
end  
freqanterior = freq;  
trip = gd;  
timetrip = tempot;
```

## Anexo 4



75		Mecanismo de mudança de posição
76		Relé de sobrecorrente DC
77		Transmissor de impulsos
78		Relé de medição de ângulo de fase/ proteção contra falta de sincronismo
79		Relé de religamento AC
80		Reservado para futura aplicação
81		Relé de sub / sobrefrequência
82		Relé de religamento DC
83		Relé de seleção/ transferência automática
84		Mecanismo de operação
85		Relé receptor de sinal de telecomunicação
86		Relé auxiliar de bloqueio
87B	PDIF	Proteção diferencial - barra
87T	PDIF	Proteção diferencial - transformador
87G	PDIF	Proteção diferencial - gerador
87L	PDIF	Proteção diferencial - linha
88		Motor auxiliar ou motor gerador
89		Chave seccionadora
90		Dispositivo de regulação
91		Relé direcional de tensão
92		Relé direcional de tensão e potência
93		Contator de variação de campo
94		Relé de desligamento
95 à 99		Reservado para aplicações específicas