

UNIVERSIDADE REGIONAL INTEGRADA DO ALTO URUGUAI E DAS MISSÕES
PRÓ-REITORIA DE ENSINO, PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
CÂMPUS DE ERECHIM
ÁREA DE ENGENHARIAS E CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

LUCAS CARBONELLI

**ESTUDO DE PROTEÇÃO E SELETIVIDADE DE UMA SUBESTAÇÃO DE MÉDIA
TENSÃO COM UNIDADE GERADORA E CONSUMIDORA**

ERECHIM - RS

2024

LUCAS CARBONELLI

**ESTUDO DE PROTEÇÃO E SELETIVIDADE DE UMA SUBESTAÇÃO DE MÉDIA
TENSÃO COM UNIDADE GERADORA E CONSUMIDORA**

**Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Elétrica como
requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica, Área de
Engenharias e Ciência da Computação da
Universidade Regional Integrada do Alto
Uruguai e das Missões – Câmpus de Erechim.**

Orientador: Prof. Me. Sérgio Bordignon

ERECHIM - RS

2024

LUCAS CARBONELLI

**ESTUDO DE PROTEÇÃO E SELETIVIDADE DE UMA SUBESTAÇÃO DE MÉDIA
TENSÃO COM UNIDADE GERADORA E CONSUMIDORA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Elétrica como requisito parcial à obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Elétrica,
Área de Engenharias e Ciência da
Computação da Universidade Regional
Integrada do Alto Uruguai e das Missões –
Câmpus de Erechim.

Erechim, 11 de dezembro de 2024.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Me. Sérgio Bordignon (Orientador)

URI Erechim



Prof. Dr. Cássio Luciano Baratieri (Examinador)

URI Erechim



Prof. Esp. Fernando Luis Tartari Peres (Examinador)

URI Erechim

Dedico este trabalho à minha família e amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, aos meus pais, Marcelo e Luciane, por todo o amor, apoio e incentivo ao longo da minha caminhada. Estendo minha gratidão ao restante da minha família e aos amigos, que sempre estiveram ao meu lado, oferecendo suporte nos momentos mais desafiadores.

Ao meu orientador, professor Sérgio, expresso minha sincera admiração e reconhecimento por todo o conhecimento transmitido, pelas orientações precisas e pela paciência ao longo deste processo.

Também agradeço a todos os professores da URI, que contribuíram de maneira significativa para a minha formação acadêmica e pessoal, compartilhando saberes que me acompanharão por toda a vida.

What we know is a drop; what we ignore is an ocean.

(Isaac Newton)

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo de caso de um sistema de proteção de uma empresa metalúrgica localizada no Alto Uruguai, que será responsável por garantir a segurança do local, dos equipamentos instalados e dos funcionários, encontra-se instalado dentro do cubículo de média tensão que está presente na subestação de 13,8 kV. A subestação possui 2 transformadores, um de 1 MVA e um de 300 kVA. O cubículo de média tensão é alimentado por energia vinda da concessionária vigente CPFL e por energia vinda da geração solar. O sistema de proteção possui 3 unidades, unidade geradora, unidade consumidora e unidade geral. Na unidade geradora ou solar as proteções necessárias foram definidas através das normas vigentes para paralelismo com a rede, com os dados de curto-circuito fornecidos pela concessionária aplicou-se uma metodologia para determinar a parametrização das funções de proteções que o relé URP6000 será responsável por efetuar. A mesma metodologia foi aplicada para as outras unidades, porém, se utiliza um relé diferente pela simplicidade das unidades. Além disso, um memorial de cálculo foi realizado para dimensionar os transformadores de corrente responsáveis por realizar a aferição de correntes presentes no cubículo e também os transformadores de potencial responsáveis pela aferição de tensões e alimentação dos componentes de proteção. Por fim apresenta os coordenogramas de seletividade entre as unidades de proteção e uma seleção de componentes para o sistema de proteção. O projeto integrou uma subestação com geração fotovoltaica de 1300 kVA, focando na redução de custos e geração de receita. Foram realizados estudos de proteção e configurados dispositivos para garantir a segurança e eficiência do sistema, servindo como base para futuras implementações.

Palavras-chave: Subestação. Transformadores. CPFL. Paralelismo. URP6000.

ABSTRACT

This work presents a case study of a protection system for a metallurgical company located in Alto Uruguay, which will be responsible for ensuring the safety of the site, installed equipment and employees. It is installed inside the medium voltage cubicle that is present in the 13,8 kV substation. The substation has 2 transformers, one of 1 MVA and one of 300 kVA. The medium voltage cubicle is powered by energy from the current CPFL concessionaire and by energy from solar generation. The protection system has 3 units, generating unit, consumer unit and general unit. In the generating or solar unit, the necessary protections were defined through current standards for parallelism with the network, with the short-circuit data provided by the concessionaire, a methodology was applied to determine the parameterization of the protection functions that the URP6000 relay will be responsible for carrying out. The same methodology was applied to the other units, however, a different relay was used due to the simplicity of the units. Furthermore, a calculation report was carried out to size the current transformers responsible for measuring currents present in the cubicle and also the potential transformers responsible for measuring voltages and supplying protection components. Finally, it presents the selectivity coordinates between the protection units and a selection of components for the protection system. The project integrated a substation with 1300 kVA photovoltaic generation, focusing on cost reduction and revenue generation. Protection studies were carried out and devices were configured to ensure the safety and efficiency of the system, serving as a basis for future implementations.

Keywords: Substation. Transformers. CPFL. Parallelism. URP6000.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Geração por fontes renováveis 2021	13
Figura 2 - Aumento em energia solar 2022	14
Figura 3 - Topologia típica de um SEP	16
Figura 4 - Geração distribuída	17
Figura 5 - Tipos de curvas características IEC de relés	21
Figura 6 - Exemplo de coordenograma	22
Figura 7 - Inversor de frequência <i>on-grid</i>	23
Figura 8 - <i>Phase-locked loop (PLL)</i>	24
Figura 9 - Para-raios	25
Figura 10 - Chave seccionadora tripolar	26
Figura 11 - Transformador de corrente	27
Figura 12 - Funcionamento TC	27
Figura 13 - Transformador de Potencial	28
Figura 14 - Disjuntor de média tensão	29
Figura 15 - Diagrama Unifilar do sistema de proteção da empresa	36
Figura 16 - Coordenograma concessionária / unidade geral	65
Figura 17 - Coordenograma unidade geral / unidade solar	66
Figura 18 - Coordenograma unidade geral / unidade consumo	66
Figura 19 - Coordenogramas gerais de fase e de neutro	67
Figura 20 - Para-raio Balestro	68
Figura 21 - Transformador de corrente Soltran	68
Figura 22 - Transformador de potencial Multi INST	69
Figura 23 - Disjuntor de média tensão Schneider	69
Figura 24 - Chave seccionadora tripolar Dreyfuss	70
Figura 25 - Relé de proteção URPE 7104	70
Figura 26 - Relé de proteção URPE 7104T	71
Figura 27 - Relé de proteção URP 6000	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela ANSI	31
Tabela 2 - Parâmetros de proteção cogeração	37
Tabela 3 - Níveis de curto ramal de entrada	37
Tabela 4 - Ajustes de proteção alimentador	38
Tabela 5 - Dados transformador da unidade de geração solar	38
Tabela 7 - Dados transformador da unidade de consumo	47
Tabela 8 - Dados transformadores da unidade geral	50
Tabela 9 - Resumo unidade geral	58
Tabela 10 - Dados para coordenograma RGE / geral	59
Tabela 11 - Resumo unidade solar	59
Tabela 12 - Dados para coordenograma geral / solar	60
Tabela 13 - Resumo unidade consumo	60
Tabela 14 - Dados para coordenograma geral / consumo	61
Tabela 15 - Parametrização final unidade de consumo	63
Tabela 16 - Parametrização final unidade solar	64
Tabela 17 - Parametrização final unidade geral	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANSI	Instituto Nacional Americano de Padrões
<i>Autocheck</i>	Verificação automática
CC	Corrente contínua
CPFL	Companhia Paulista de Força e Luz
DDP	Diferença de potencial
E.I	Extremamente Inversa
GED	Gerenciamento Eletrônico de Documentos
IEC	Modelo de dados e protocolos
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
<i>Inrush</i>	Corrente elétrica de energização inicial
LPF	Controlador Proporcional Integral
<i>Pickup</i>	Corrente de atuação relé
PD	Controlador Proporcional Diferencial
PLL	<i>Phase Locked Loop</i> , sistema de controle
Rest	Restrição
RGE	Rio Grande Energia
RTC	Relação de transformação
SMF	Sistema de medição e faturamento
SEP	Sistema elétrico de potência
TC	Transformador de corrente
TP	Transformador de potência
VCO	Osciladores controlados por tensão

SUMÁRIO

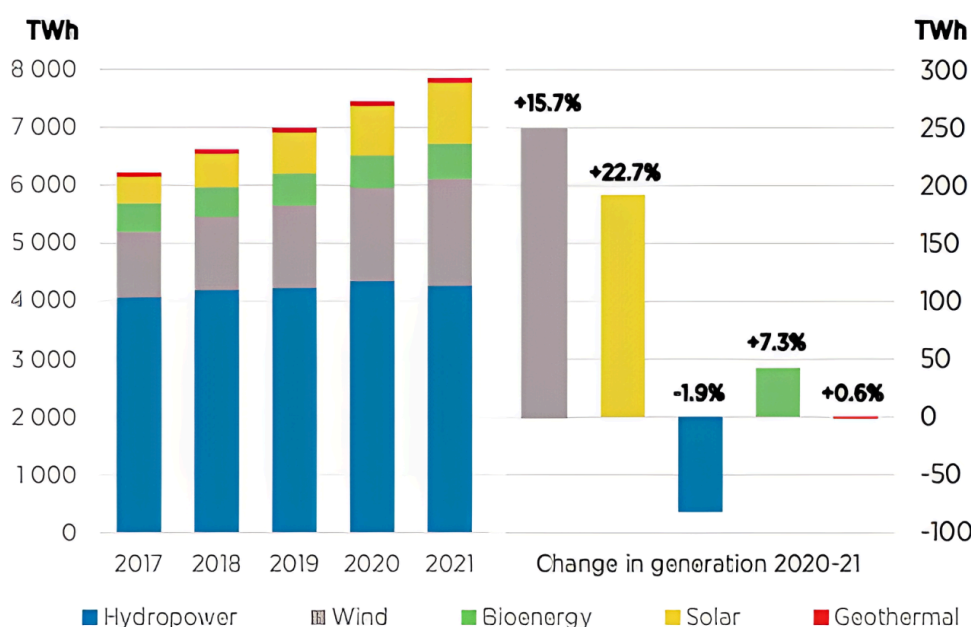
1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Objetivos.....	14
1.2 Organização do trabalho.....	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1 Introdução ao sistema elétrico de potência.....	16
2.2 Geração de energia elétrica.....	16
2.2.1 Geração distribuída.....	17
2.3 Estrutura básica de um sistema de proteção.....	18
2.4 Interrupções em um sistema elétrico de potência.....	18
2.4.1 Estatísticas e custos de interrupções.....	19
2.5 Seletividade.....	19
2.5.1 Seletividade cronométrica.....	20
2.5.2 Seletividade lógica.....	20
2.5.3 Seletividade amperimétrica.....	20
2.5.4 Curvas características.....	20
2.5.4.1 Curva normalmente inversa IEC.....	21
2.5.4.2 Curva muito inversa IEC.....	21
2.5.4.3 Curva extremamente inversa IEC.....	21
2.5.4.4 Curva de tempo definido.....	22
2.5.5 Coordenograma de seletividade.....	22
2.6 Inversores de frequência <i>on-grid</i>, sincronismo e anti-ilhamento.....	23
2.7 Elementos de proteção.....	25
2.7.1 Para-raios.....	25
2.7.2 Chave seccionadora.....	25
2.7.3 Transformador de corrente.....	26
2.7.4 Transformador de potencial.....	28
2.7.5 Disjuntores.....	28
2.7.6 Relés.....	29
2.7.6.1 Tipos de relés.....	29
2.7.6.2 Funções de proteção dos relés.....	30
3 METODOLOGIA.....	35
3.1 Sistema de proteção unidade de geração solar.....	36
3.1.1 Funções de proteção unidade de geração solar.....	39
3.1.1.1 Sobrecorrente instantânea de fase (50) e neutro (50N).....	39
3.1.1.2 Sobrecorrente temporizada de fase (51) e neutro (51N).....	40
3.1.1.3 Subtensão (27).....	42
3.1.1.4 Sobretensão de fase (59) e neutro (59N).....	42
3.1.1.5 Sobrecorrente direcional de fase (67).....	43
3.1.1.6 Direcional de potência (32).....	44

3.1.1.7	Sobrefrequência (81O), subfrequência (81U) e variação de frequência (81 df/dt).....	45
3.1.1.8	Sincronismo (25), anti-ilhamento e relé de ângulo de fase (78).....	46
3.1.1.9	Desbalanceamento de tensão (47) e desequilíbrio corrente (46).....	46
3.1.1.10	Relé de sobrecorrente com restrição de tensão (51V).....	47
3.2	Sistema de proteção unidade de consumo.....	47
3.2.1	Funções de proteção unidade de consumo.....	48
3.2.1.1	Sobrecorrente instantânea de fase (50) e neutro (50N).....	48
3.2.1.2	Sobrecorrente temporizada de fase (51) e neutro (51N).....	48
3.3	Sistema de proteção geral.....	50
3.3.1	Funções de proteção unidade geral.....	51
3.3.1.1	Sobrecorrente instantânea de fase (50) e neutro (50N).....	51
3.3.1.2	Sobrecorrente temporizada de fase (51) e neutro (51N).....	52
3.3.1.3	Subtensão (27).....	53
3.4	Transformadores de corrente.....	53
3.5	Transformadores de potencial.....	56
3.6	Sistema de medição da concessionária.....	57
3.7	Coordenogramas.....	57
3.7.1	Coordenograma concessionária / unidade geral.....	58
3.7.2	Coordenograma unidade geral / unidade solar.....	59
3.7.3	Coordenograma unidade geral / unidade de consumo.....	60
3.8	Sistema de proteção.....	61
4	RESULTADOS.....	63
4.1	Parâmetros das unidades de proteção.....	63
4.2	Coordenogramas das unidades de proteção.....	65
4.3	Componentes do sistema de proteção.....	67
5	CONCLUSÃO.....	72
	REFERÊNCIAS.....	73

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos maiores produtores de energia elétrica do mundo, com uma matriz energética diversificada e predominantemente limpa. A geração hidráulica historicamente domina a produção de eletricidade no país, respondendo por grande parte da oferta (VASCONCELOS, 2017). Entretanto, nos últimos anos, fontes alternativas e renováveis, como a energia solar e a eólica, têm ganhado relevância conforme a figura 1, devido às suas vantagens ambientais, econômicas e à necessidade de diversificar a matriz energética para garantir maior segurança energética.












Figura 1 - Geração por fontes renováveis 2021



Fonte: Irena (2023).

A energia solar fotovoltaica, em particular, tem se destacado como uma das tecnologias de crescimento mais acelerado. Beneficiada pela ampla disponibilidade de radiação solar em diversas regiões do mundo, essa modalidade de geração tem se mostrado uma solução eficaz e sustentável para suprir a demanda energética em setores residenciais, comerciais e industriais. Com incentivos regulatórios e avanços tecnológicos, o Brasil já se destaca como um dos líderes em capacidade instalada de geração solar na América Latina, conforme ilustrado na figura 2, que destaca os países com maior crescimento em energia solar.

Figura 2 - Aumento em energia solar 2022

1		China	106 GW
(2)		European Union	38,7 GW
2		USA	18,6 GW
3		India	18,1 GW
4		Brazil	9,9 GW
5		Spain	8,1 GW
6		Germany	7,5 GW
7		Japan	6,5 GW
8		Poland	4,9 GW
9		Australia	3,9 GW
10		Netherlands	3,9 GW

Fonte: Irena (2022).

Nesse contexto, a integração da geração distribuída, especialmente a solar, com os sistemas convencionais de energia, apresenta desafios técnicos, como o desenvolvimento de sistemas de proteção capazes de operar de forma seletiva, confiável e segura. Esses sistemas são essenciais para garantir a segurança das instalações, a proteção dos equipamentos e a continuidade do fornecimento de energia, mesmo em situações de falhas.

O presente documento tem como objetivo investigar e analisar os métodos de proteção aplicados à uma unidade de geração distribuída localizada em uma metalúrgica no Alto Uruguai.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como intuito dimensionar o sistema de proteção da subestação de média tensão com unidade geradora e consumidora.

Para desenvolver o objetivo geral no projeto, são abordados os objetivos específicos abaixo:

- Analisar o sistema elétrico da empresa.
- Avaliar a seletividade dos dispositivos de proteção.
- Verificar a conformidade com normas e regulamentações.
- Desenvolver o sistema de proteção.
- Elaborar relatório técnico e recomendações.

1.2 Organização do trabalho

No capítulo de referencial teórico é apresentada uma introdução aos sistemas de potência e geração de energia elétrica. Aborda a estrutura básica dos sistemas de proteção e possíveis interrupções nos sistemas de energia.

A seletividade é discutida e os inversores de frequência *ongrid* e sua relação com o sincronismo. Os elementos de proteção são detalhados, incluindo para-raios, chaves seccionadoras, transformadores de corrente e de potencial, disjuntores e relés. Esses componentes são primordiais para a proteção de unidades de geração solar e para o sistema de forma geral.

Na Metodologia, são descritos os sistemas de proteção específicos para cada unidade, sendo elas a geração solar, a de consumo e a geral, enfatizando as funções de proteção de cada uma delas e demonstrando como são parametrizadas de acordo com as normas vigentes da concessionária CPFL.

A metodologia também aborda o dimensionamento de transformadores de corrente conforme as normas vigentes, além dos transformadores de potencial e do sistema de medição da concessionária, que são fundamentais para a monitorização e controle da geração distribuída. Além disso, apresenta como são elaborados os coordenogramas, detalhando os passos necessários para sua criação e especificando os parâmetros exigidos para cada equipamento que compõe o sistema de proteção.

Na seção de resultados, é apresentado um resumo das parametrizações realizadas para as unidades de proteção, destacando os ajustes definidos para cada uma delas. Além disso, são incluídos os coordenogramas de seletividade, evidenciando a interação entre as unidades de proteção. Também é sugerida uma lista de modelos de equipamentos que atendem às funções necessárias, considerando critérios técnicos e normativos para garantir o desempenho adequado e a confiabilidade do sistema de proteção.

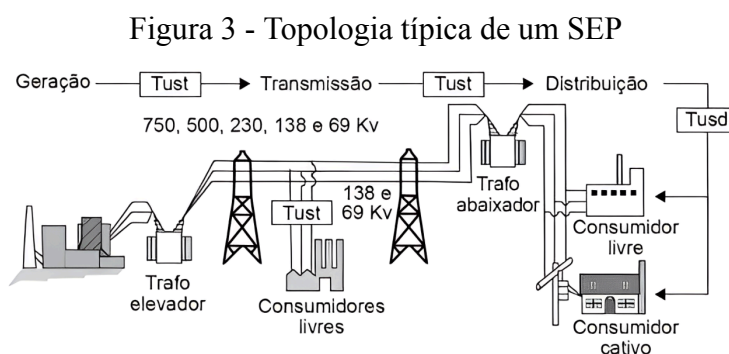
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta o estudo sobre conteúdos necessários para o desenvolvimento e compreensão do sistema desenvolvido. São explorados conceitos de sistemas de proteção, seus dispositivos e tecnologias presentes para desenvolver um sistema seguro e eficaz nos padrões normativos.

2.1 Introdução ao sistema elétrico de potência

Conforme Kagan (2008), o sistema elétrico de potência tem o papel de oferecer energia elétrica de qualidade para consumidores de pequeno ou grande porte no momento em que for requerida, responsável por produzir a energia elétrica proveniente de outra energia e distribuir aos consumidores a demanda necessária a qualquer instante, como a energia não é armazenável o sistema deve ser constantemente analisado a fim de otimizar a capacidade de produção e transporte de energia elétrica ao consumidor.

Os sistemas elétricos de potência geralmente são trifásicos e neles estão presentes diversos tipos de componentes como geradores, relés, transformadores, compensadores síncronos, bancos de capacitores, linhas, entre outros. Compostos por geração, transmissão, distribuição e consumo conforme a figura 3 apresenta (VASCONCELOS, 2017).



Fonte: Pinto (2013).

2.2 Geração de energia elétrica

A obtenção de energia elétrica ocorre através da conversão de outras formas de energia, utilizando máquinas elétricas rotativas, como geradores síncronos ou alternadores, de forma que o torque mecânico é obtido por meio de turbinas hidráulicas ou a vapor (KAGAN,

2008). Este processo de geração de energia elétrica envolve a transformação de qualquer fonte de energia em energia elétrica, podendo ocorrer em múltiplas etapas.

A energia hidrelétrica ocupa a posição de destaque na matriz elétrica brasileira, graças à abundância de grandes cursos d'água espalhados pelo território nacional. No entanto, as políticas públicas visam aumentar a participação de outras fontes na matriz elétrica brasileira nos próximos anos, sendo elas principalmente provenientes de fontes renováveis como por exemplo a energia solar (VASCONCELOS, 2017).

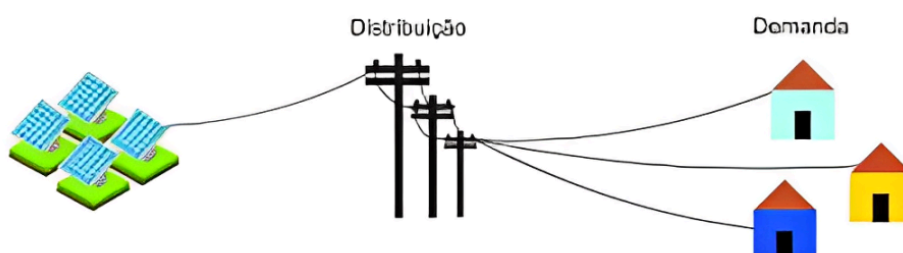
Segundo Villalva (2012), a energia solar atua através da conversão da luz solar em eletricidade por meio de painéis fotovoltaicos, compostos por células de materiais semicondutores. Quando estão irradiadas por fótons, geram uma corrente elétrica contínua, a qual é convertida em corrente alternada através de inversores, tornando a energia compatível com a rede elétrica, promovendo uma fonte de energia limpa e renovável que reduz a dependência de combustíveis fósseis.

2.2.1 Geração distribuída

A Geração distribuída é um conceito utilizado para definir geração elétrica próxima das cargas como a figura 4 indica. O sistema de tarifação brasileiro, quando há geração distribuída conectada, é baseado no sistema de compensação de energia (VASCONCELOS, 2017). Nesse sistema, o consumidor-gerador produz e consome a energia que ele mesmo gera, pagando apenas pelo excedente consumido. Se a diferença entre a energia produzida e a energia injetada na rede for positiva, recebe um crédito em kWh na sua próxima fatura, com validade de até 60 meses.

Figura 4 - Geração distribuída

Geração Distribuída



Fonte: Hyppolito (2019).

2.3 Estrutura básica de um sistema de proteção

Conforme (MAMEDE, 2020; OLIVEIRA et al., 2021), a estrutura básica de um sistema de proteção composta por:

- **Unidade de entrada:** Transformadores de potencial e transformadores de corrente atuam sobre os distúrbios presentes no sistema elétrico e enviam sinais para o relé de proteção, além de fornecer isolamento entre o sistema de distribuição de energia e o sistema de proteção que opera em baixas tensões.
- **Unidade de conversão de sinal:** Um elemento interno dos relés responsável por receber os sinais dos transformadores de potencial e corrente, gerando sinais modulados. Específica para a proteção com relés secundários.
- **Unidade de medida:** Responsável por receber os sinais da unidade de conversão e comparar com seus valores de corrente, tensão, ângulo de fase e frequência com os valores que foram projetados e armazenados como referência, se os sinais forem superiores aos de referência a unidade de medida emite um sinal à unidade de saída.
- **Fonte de tensão auxiliar:** Responsável por fornecer energia para unidades de medida, saída e acionamento, geralmente é uma bateria.
- **Unidade de saída:** Geralmente é constituída por uma pequena bobina que aciona um contato auxiliar ou por uma chave semicondutora.
- **Unidade de acionamento:** Geralmente composta por uma bobina de espiras grossas construída no corpo do elemento de desconexão do sistema, característica dos sistemas de proteção com relés secundários, para relés primários é ativada pelas unidades de entrada.

2.4 Interrupções em um sistema elétrico de potência

Segundo Oliveira et al. (2021), os curtos-circuitos representam as falhas mais severas que ocorrem num sistema elétrico de potência, produto de defeitos na isolação de um ponto sob tensão da rede considerada ou de atuação involuntária do sistema. Como resultado são obtidos valores de corrente elevados, que podem gerar danos irreparáveis à instalação se o sistema de proteção não operar. Os curtos-circuitos podem ocorrer entre duas fases, entre três fases, constando terra ou não e entre fase e terra. Geralmente são instantâneos ou de curta duração.

Para Mamede (2020), as sobrecargas são definidas pela elevação moderada da

corrente, acima dos valores de limite definidos no projeto, resultados de procedimentos operados de maneira incorreta, seja pela omissão de novas cargas no circuito, seja pelo crescimento de carga mecânicas no eixo dos motores e diferente dos curtos-circuitos que apresentam de curta duração, geralmente as sobrecargas são de duração prolongada.

2.4.1 Estatísticas e custos de interrupções

As concessionárias de energia elétrica analisam rigorosamente as interrupções de seus sistemas para obterem estratégias de operação com o intuito de melhorar a qualidade da energia que é fornecida ao cliente final. As interrupções de geração e transmissão do sistema elétrico de potência são causadas principalmente por fenômenos naturais (48%), são de origem na linha de transmissão (68%), são de duração entre 1 e 3 minutos (57%) e quando causadas por curto-circuito são majoritariamente curto-circuito fase e terra (78%) (OLIVEIRA et al., 2021).

As interrupções no fornecimento de energia ocasionam dois tipos de custos, financeiros e sociais. Os custos financeiros referem-se à perda de faturamento da concessionária graças à energia não vendida em períodos de falta. Os custos sociais podem ser os custos financeiros do cliente representando perda de faturamento de suas atividades industriais e comerciais e custos relacionados à imagem da concessionária diante os clientes (MAMEDE, 2020).

2.5 Seletividade

Seletividade é o atributo que o sistema de proteção necessita, caso esteja operando sobre correntes anormais fora dos padrões do projeto, seu objetivo é fazer com que os dispositivos de proteção do sistema atuem de maneira coordenada fazendo com que se desenergize apenas a parte do circuito que estiver com problema (MARDEGAN, 2012).

De acordo com Mamede (2020), existem dois casos principais a serem considerados. O primeiro é a proteção de primeira linha, que inclui o elemento de proteção com uma zona de responsabilidade e tem o papel de atuar dentro de limites ajustados em um tempo específico caso haja defeito nessa zona. Já a proteção de segunda linha, também conhecida como proteção de retaguarda, tem como função a desconexão do sistema caso a proteção de primeira linha falhe, dentro de um intervalo de tempo definido no projeto de coordenação. Existem 3 tipos de seletividade, a cronométrica, a lógica e a amperimétrica.

2.5.1 Seletividade cronométrica

A seletividade cronométrica baseia-se na temporização do dispositivo de proteção localizado próximo ao ponto de defeito ter um tempo de atuação inferior ao dispositivo proteção a montante, consiste em retardar a proteção a montante a fim de que a proteção instalada a jusante tenha tempo para atuar e isolar a falha. O tempo de diferença entre os disparos deve ser equivalente ao tempo de abertura do disjuntor juntamente com um tempo de incerteza da atuação do dispositivo, geralmente o tempo varia entre 200 e 400 ms (MAMEDE, 2020).

2.5.2 Seletividade lógica

Segundo Mardegan (2012), a seletividade lógica apareceu com a utilização de relés digitais, consistem em um sistema que integra a proteção de sobrecorrente com um esquema de comunicação com o intuito de obter uma proteção com pequenos intervalos de tempo, sua gama de aplicações está em novos projetos de instalações que integram relés digitais, porém, em instalações onde estão presentes disjuntores de baixa tensão, sua aplicação é inviável.

2.5.3 Seletividade amperimétrica

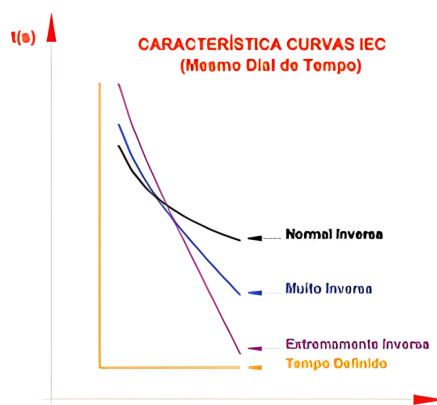
Conforme Mamede (2020), a seletividade amperimétrica baseia-se no conceito de que as correntes de curto-circuito crescem a partir do ponto de defeito de acordo com a aproximação da fonte de alimentação, diferentes níveis de curto-circuito entre os dispositivos de proteção possibilitam a coordenação do sistema. Mais utilizada em sistemas de baixa tensão pois a impedância equivalente do circuito é relevante em comparação aos sistemas de média e alta tensão, já em sistemas de transmissão com curtas distâncias as correntes de curto-circuito apresentam pouca variação, portanto, a aplicação deste procedimento é dificultada.

2.5.4 Curvas características

As curvas características desempenham um papel fundamental na proteção e coordenação de sistemas elétricos (BLACKBURN, 2006). Possibilitam que dispositivos de proteção, como relés e disjuntores, respondam de maneira adequada a diferentes condições de

sobrecarga e falhas, são abordadas as curvas normalmente inversa, extremamente inversa, muito inversa e de tempo definido. Cada uma dessas curvas possui características únicas que determinam o comportamento dos dispositivos de proteção como a figura 5 apresenta e possibilitam a manipulação do coordenograma de seletividade.

Figura 5 - Tipos de curvas características IEC de relés



Fonte: Mardegan (2012).

2.5.4.1 Curva normalmente inversa IEC

A curva normalmente inversa é caracterizada por seu tempo de operação ser inversamente proporcional à magnitude da corrente de falha, ou seja, quanto maior a corrente de falha mais rápido será o período de atuação do dispositivo de proteção. Possibilita respostas rápidas para grandes falhas e retém um tempo de retardo para menores sobrecorrente (HOROWITZ, 2008).

2.5.4.2 Curva muito inversa IEC

A curva muito inversa é caracterizada por seu tempo de operação ser significativamente reduzido com o aumento da magnitude da corrente de falha, ou seja, apresenta grande sensibilidade às correntes de falha. Possibilita respostas muito rápidas para grandes falhas (MARDEGAN, 2012).

2.5.4.3 Curva extremamente inversa IEC

2.6 Inversores de frequência *on-grid*, sincronismo e anti-ilhamento

Quando o controle de fluxo de potência em sistemas fotovoltaicos *on-grid* é realizado por meio da tensão de saída do inversor, o mesmo se comporta como uma fonte de tensão senoidal de maneira que para se efetivar o paralelismo entre duas fontes senoidais é indispensável que fase, amplitude e frequências sejam iguais no instante de conexão, o processo descrito é o sincronismo. Na ausência de sincronismo as correntes das fontes podem oscilar e atingir valores elevados próximos aos de curto-circuito.

De acordo com Machado (2017), para controlar um inversor *on-grid* semelhante ao apresentado na figura 7 é necessário fazer com que o mesmo se comporte como fonte de corrente pois esta abordagem facilita a injeção precisa de energia, reduz interferências e harmônicas, possibilita a implementação de técnicas de sincronismo e garante a segurança do ponto de conexão com a rede entregando um fator de potência unitário e apenas a transferência de potência ativa conforme as normas. O sincronismo é fundamental mesmo após a conexão inicial, o inversor deve monitorar constantemente as variações para evitar deslocamento entre fases e mudança de potência de fornecimento a rede e realizar a desconexão segura do inversor.

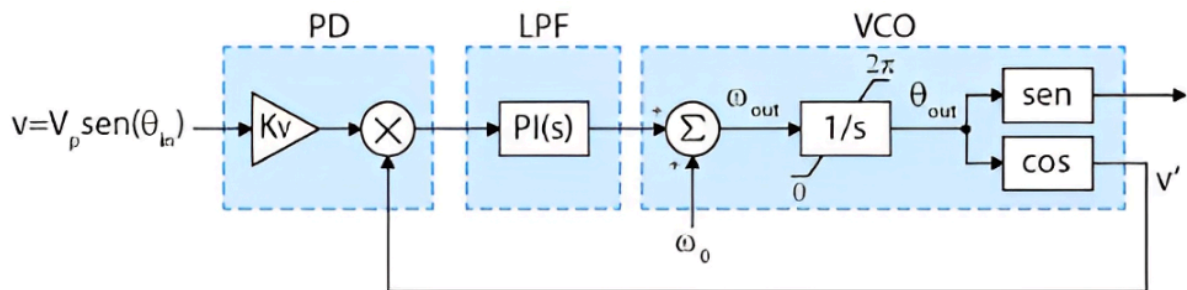
Figura 7 - Inversor de frequência *on-grid*



Fonte: Solis (2024).

Segundo Ghoshal (2007), na literatura para o paralelismo com a rede elétrica existem diversas técnicas de sincronismo, classificadas como técnicas de malha aberta e malha fechada. Em malha aberta a estabilidade é a principal vantagem e funciona muito bem com valores de fase e frequência nominais ou próximos a este, portanto, em valores que desviam o nominal sua eficácia é drasticamente afetada. Em malha fechada, entre as técnicas está o PLL (*Phase-Locked Loop*) seu esquema de funcionamento está presente na figura 8, neste método sua saída é realimentada para gerar um erro de referência seu objetivo é controlar esse erro de referência para que seja o mínimo possível.

Figura 8 - *Phase-locked loop* (PLL)



Fonte: Moraes (2022).

O intuito do block PD é fazer a comparação do sinal de entrada com o sinal de saída do VCO e gerar um erro, para obter o erro se multiplicam os sinais de entrada e VCO e seu produto resulta em uma expressão não linear que varia no dobro da frequência de rede e contém as informações de erro entre as fases, portanto, é necessário remover a componente de segunda ordem. O bloco LPF é um controlador Proporcional Integral que tem a função de filtrar altas frequências e levar o erro a zero entregando a frequência angular necessária para sincronização dos sinais. O bloco VCO integra o sinal gerado pelo bloco LPF e estima um ângulo do sinal de entrada (GHOSHAL, 2007).

O ilhamento em um sistema de geração distribuída ocorre quando o equipamento continua a alimentar as cargas do sistema mesmo na ausência de rede de alimentação, além de suprir energia às demais cargas conectadas à rede elétrica. Embora seja raro de acontecer, as normas de interconexão para sistemas fotovoltaicos exigem a presença desta proteção. Podem ocorrer diversos problemas durante o ilhamento, a rede não consegue controlar a tensão e frequência e a reconexão pode danificar os equipamentos do sistema. O inversor detecta o ilhamento por métodos ativos e passivos por meio da função de anti-ilhamento (BRITO, 2018).

2.7 Elementos de proteção

Nesta seção são discutidos os dispositivos de proteção indispensáveis para sistemas elétricos, que são cruciais para assegurar a segurança, a confiabilidade e a continuidade do fornecimento de energia. Entre esses dispositivos, incluem-se os para-raios, as seccionadoras, os disjuntores, os transformadores de corrente (TC), os transformadores de potencial (TP) e os relés de proteção.

2.7.1 Para-raios

Os para-raios conforme a figura 9 protegem o sistema elétrico de surtos de tensão e de manobras de chaves seccionadoras e disjuntores. O equipamento deve suportar a corrente de curto-circuito e a tensão de operação, são instalados geralmente próximos a transformadores e pontos de entrada e saída de energia (MAMEDE, 2019). São compostos por varistores de óxido de zinco ou outro material, corpo isolante de porcelana ou polímero, eletrodos de conexão, e uma base e terminal superior para fixação e integração ao sistema elétrico.

Figura 9 - Para-raios



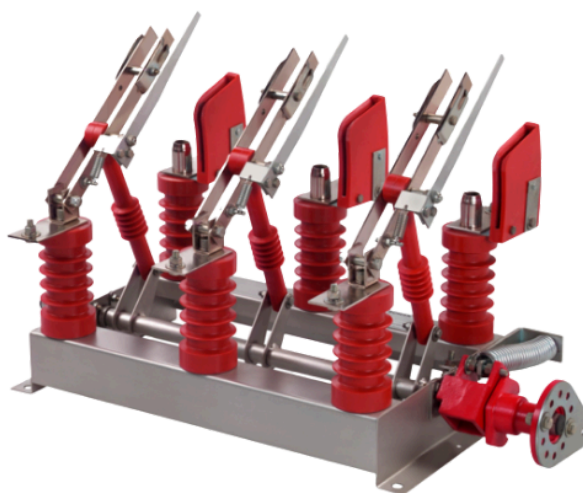
Fonte: Sieletric (2024).

2.7.2 Chave seccionadora

Chave seccionadora é um dispositivo mecânico simples que possui 2 posições como está apresentado na figura 10, aberta que isola o circuito e fechada que mantém a

continuidade do circuito. Pode interromper o circuito quando submetido a variações significativas de tensão e no momento em que correntes são interrompidas ou restabelecidas (MAMEDE, 2019). Seccionadoras garantem a distância de isolamento requerida pelo nível de tensão. Utilizados em subestações para possibilitar manobras de circuito e isolar dispositivos de proteção como TC, TP, disjuntores e o próprio barramento.

Figura 10 - Chave seccionadora tripolar



Fonte: Schak (2024).

2.7.3 Transformador de corrente

Os transformadores de corrente são equipamentos utilizados para fornecer uma corrente secundária com redução de magnitude proporcional, para isso ser possível é necessário que o TC esteja conectado em série com o condutor que deseja ser medido. O TC é um equipamento monofásico conforme a figura 11, ou seja, para sistemas trifásicos são necessários um TC para cada condutor (FRAZÃO, 2019). O primário do TC está ligado a um condutor cuja DDP em relação ao aterramento pode chegar a dezenas de kV. portanto, o isolamento seguro entre os enrolamentos é inevitável.

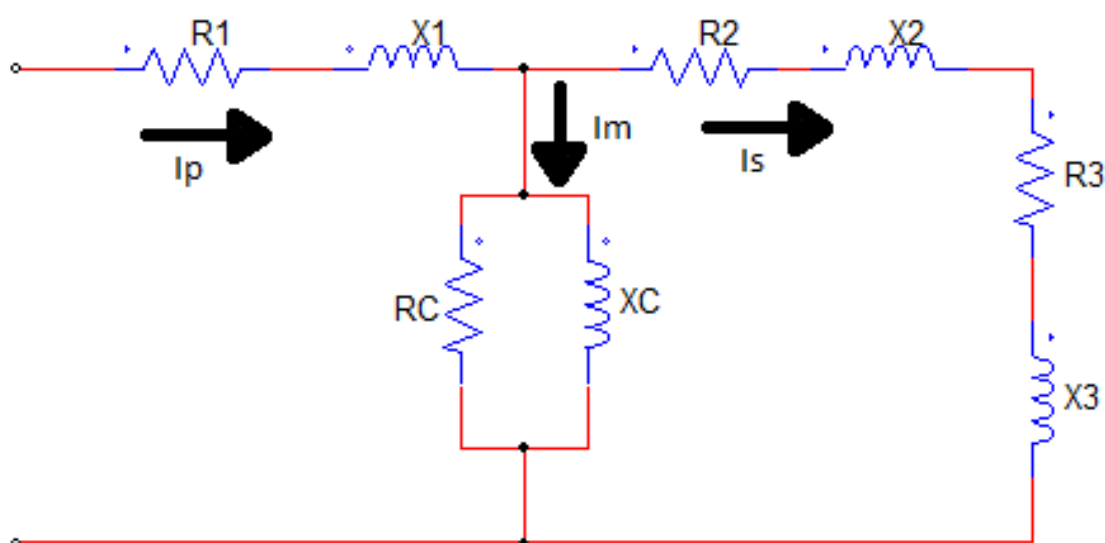
Figura 11 - Transformador de corrente



Fonte: Rehtom (2024).

Através da figura 12 pode-se compreender o funcionamento básico de um transformador de corrente (MAMEDE, 2020). Determinada carga absorve corrente primária I_p que circula nos enrolamentos primários do TC, a corrente I_s que circula no secundário do TC provoca uma queda de tensão na impedância interna ($Z_2 = R_2 + X_2j$) e na impedância de carga conectada ($Z_3 = R_3 + X_3j$). Devem ser especificados de acordo com a carga ligada no secundário, geralmente apresentam correntes secundárias de 1A ou 5A.

Figura 12 - Funcionamento TC



Fonte: Adaptado de Mamede (2020).

2.7.4 Transformador de potencial

Os transformadores de potencial (TP) são equipamentos que permitem que os instrumentos de medição e proteção funcionem corretamente, sem a necessidade de possuir uma tensão de isolamento correspondente à da rede à qual estão conectados (MAMEDE, 2019). Construtivamente em seu enrolamento primário possuem muitas espiras para adequar o alto nível de tensão à um secundário desejado que geralmente está em 115V ou $115/\sqrt{3}$ V possibilitando que os instrumentos de proteção sejam dimensionados em tamanhos reduzidos devido ao rebaixamento do nível de tensão.

Os TPs conforme a figura 13 são utilizados para suprir altas demandas de impedâncias que os aparelhos de medição possuem, como relés de tensão, voltímetros, medidores de energia, entre outros. São utilizados tanto para proteger quanto para medir energia do sistema e ficam instalados juntos aos TCs.

Figura 13 - Transformador de Potencial



Fonte: Rehton (2024).

2.7.5 Disjuntores

Os disjuntores são equipamentos destinados à interrupção e ao restabelecimento das correntes elétricas num determinado ponto do circuito. Os disjuntores de média tensão conforme a figura 14 precisam ser controlados por meio de relés, pois o equipamento basicamente serve para abrir e fechar o circuito, o que torna o equipamento sem nenhuma

característica de proteção, apenas como chave de manobra. Quando instalados com relé, os sensores realizam as leituras e enviam ao relé que controla o dispositivo para realizar as aberturas quando necessário. Sua função principal é interromper correntes de defeitos em um menor tempo possível e energizar os circuitos mesmo que estejam em falta em condição normal (MAMEDE, 2019).

Figura 14 - Disjuntor de média tensão



Fonte: Siemens (2024).

2.7.6 Relés

Os relés de proteção são dispositivos cruciais utilizados para comandar equipamentos elétricos quando ocorrem mudanças nas condições desses equipamentos ou dos circuitos a eles associados (OLIVEIRA et al., 2021). De maneira simples, os relés são projetados para revelar condições perigosas e iniciar uma manobra de chaveamento ou fornecer um aviso de perigo.

2.7.6.1 Tipos de relés

Neste subitem, são referidos os diversos tipos de relés de proteção utilizados em sistemas elétricos, incluindo relés eletromecânicos, relés eletrônicos e relés digitais. Suas características construtivas, funcionamento e aplicações. Essa análise permitirá uma compreensão de diferentes tecnologias de relés e sua importância para a operação dos sistemas de proteção.

Relés eletromecânicos

Os relés eletromecânicos são compostos por elementos magnéticos e elétricos, como núcleo ferromagnético e condutores, além de partes mecânicas, como êmbolos móveis ou alavancas. Esses elementos mecânicos são utilizados para abrir ou fechar contatos (MAMEDE, 2020). Os relés eletromecânicos são conhecidos por sua robustez e confiabilidade, sendo amplamente usados em sistemas simples e que necessitam de grande durabilidade.

Relés eletrônicos

Para Mamede (2020), relés eletrônicos funcionam de maneira semelhante aos eletromecânicos, contudo suas peças são estáticas e utilizam elementos semicondutores de eletrônica de potência, como tiristores, transistores e diodos. Esses relés possuem contatos elétricos para sinalizar ou acionar bobinas auxiliares e têm a vantagem de tempos de reação mais rápidos. A ausência de partes móveis também contribui para uma maior durabilidade e menor manutenção.

Relés digitais

Os relés digitais são os mais avançados tecnologicamente e integram microprocessadores. Esses relés são capazes de administrar situações complexas, promovendo maior lógica no controle e tomada de decisão. Oferecem uma ampla gama de funções de proteção, podendo incluir teclados próprios ou conexões externas. Os relés digitais são caracterizados por seus tempos de resposta extremamente curtos e sua capacidade de tomada de decisão precisa e são ideais para aplicações que exigem alta precisão (OLIVEIRA et al., 2021).

2.7.6.2 Funções de proteção dos relés

As funções de proteção são identificadas por um código que caracteriza o tipo de proteção para qual o relé é designado.

Funções para o projeto de proteção

Esta subseção tem como objetivo caracterizar e explicar as funções de proteção importantes para o desenvolvimento do trabalho. Serão especificadas as características de cada função de proteção e como são aplicadas para assegurar a eficiência e a segurança do sistema elétrico. Ao determinar e descrever essas funções, busca-se proporcionar uma compreensão clara e detalhada dos mecanismos de proteção escolhidos e os métodos de proteção empregados de acordo com as normas. Para universalizar as diversas proteções existentes, a ANSI (*American National Standards Institute*) implementou uma tabela com os códigos e a descrição de cada função com o intuito de facilitar o entendimento de projetos de proteção. A tabela 1 representa uma adaptação da tabela ANSI de funções.

Tabela 1 - Tabela ANSI

Nº	DENOMINAÇÃO	Nº	DENOMINAÇÃO
2	Relé partida ou fechamento temporizado	56	Relé de aplicação de campo
3	Relé de verificação ou interbloqueio	58	Relé de falha de retificação
21	Relé de distância	59	Relé de sobretensão
24	Relé de sobreexcitação ou Volts por Hertz	60	Relé de balanço de corrente ou tensão
25	Relé de verificação de Sincronismo ou Sincronização	62	Relé temporizador
27	Relé de subtensão	63	Relé de pressão de gás (Buchholz)
30	Relé anunciador	64	Relé detetor de terra
32	Relé direcional de potência	66	Relé de supervisão do número de partidas
37	Relé de subcorrente ou subpotência	67	Relé direcional de sobrecorrente
40	Relé de perda de excitação	68	Relé de bloqueio por oscilação de potência
44	Relé de sequência de partida	74	Relé de alarme
46	Relé de reversão ou desequilíbrio de corrente	76	Relé de sobrecorrente CC
47	Relé de reversão ou desbalanceamento de tensão	79	Relé de religamento
48	Relé de sequência incompleta / partida longa	81	Relé de frequência (sub ou sobre)
49	Relé térmico	82	Relé de religamento de carga de CC
50	Relé de sobrecorrente instantâneo	83	Relé de seleção / transferência automática
51	Relé de sobrecorrente temporizado	85	Relé receptor de sinal de telecomunicação
53	Relé para excitatriz ou gerador CC	91	Relé direcional de tensão
55	Relé de fator de potência	92	Relé direcional de tensão e potência

Fonte: Adaptado de tabela ANSI.

Relé de sobrecorrente instantâneo (50/50N)

Os relés de sobrecorrente instantâneos são utilizados para realizar uma proteção de atuação imediata para curto-circuito, quando a corrente elétrica exceder um valor definido pelo projeto, é fundamental para a proteção de sistemas elétricos pois evita danos aos equipamentos instalados (FRAZÃO, 2019). Podem monitorar tanto a corrente de fase (50) quanto a de neutro (50N).

Relé de sobrecorrente temporizado (51/51N)

Os relés de sobrecorrente temporizados são utilizados para realizar uma proteção de atuação com retardo, quando a corrente elétrica exceder um valor definido pelo projeto e permanecer em valores superiores menores que os valores instantâneos por um tempo definido a proteção deve efetuar o desligamento, é fundamental para a proteção de sistemas elétricos pois evita paradas desnecessárias causadas por picos de corrente e transientes (OLIVEIRA et al., 2021). Podem monitorar tanto a corrente de fase (51) quanto a de neutro (51N).

Relé direcional de sobrecorrente e potência (67/32)

Os relés direcionais de sobrecorrente são comumente empregados para detectar falhas entre fases ou entre fase e terra, bem como para controlar o fluxo excessivo de potência em máquinas geradoras. Sua função principal é reconhecer o sentido de fluxo da corrente ou da potência em uma parte específica do sistema elétrico (FRAZÃO, 2019). Se a corrente ou potência estiver fluindo em sentido contrário ao esperado, o relé direcional deve enviar um sinal de disparo ao disjuntor, garantindo uma proteção seletiva fundamental no sistema de potência (CSANYI, 2017).

Relé sobretensão e sobretensão de neutro (59/59N)

Os relés de sobretensão são dispositivos dedicados a proteger os sistemas elétricos contra os níveis de tensão acima dos valores máximos que garantem o funcionamento dos equipamentos em operação (MAMEDE, 2020). Os relés digitais de sobretensão convertem sinais analógicos em sinais digitais e possuem *autocheck*, que possibilita a detecção de

qualquer falha operacional e realiza o bloqueio, além de realizar a comunicação com a sala de controle do sistema. Podem monitorar tanto a tensão de fase (59) quanto a de neutro (59N).

Relé de frequência (81O/81U/81df/dt)

Os relés de frequência são usados para medir e avaliar valores de frequência com o intuito de manter a frequência em um limite estabelecido pelo projeto de proteção, atuam tanto instantaneamente como em tempo definido, em função de sobrefrequência ou subfrequência. A subfrequência ocorre quando a potência fornecida a carga é insuficiente, já a sobrefrequência ocorre quando cargas são desligadas inesperadamente, gerando sobrevelocidade em geradores (OLIVEIRA et al., 2021).

Para evitar que o relé de frequência não atue sobre ciclos utiliza-se o relé df/dt que opera no momento em que a variação de frequência cai abaixo de um limite estabelecido de tempo. A proteção monitora a tangente da tensão no tempo, assim antes do meio ciclo senoidal da tensão já se sabe se a frequência irá cair. Bastante utilizados em sistemas onde pode ocorrer perdas parciais de geração (MARDEGAN, 2010).

Relé de subtensão (27)

Os relés de subtensão tem a aptidão de converter os sinais analógicos de subtensão em valores digitais e possuem a função de *autocheck*, possibilitando que o mesmo identifique falhas operacionais eventuais e informe à sala de controle o momento para interromper seu funcionamento. Geralmente possuem fonte interna de alimentação chaveado e podem ser alimentados por transformadores de potencial em corrente alternada ou por uma fonte de corrente contínua e são equipados com uma fonte capacitiva que viabiliza a atuação do dispositivo mesmo que não ocorra alimentação auxiliar (FRAZÃO, 2019).

Relé de desbalanceamento de tensão (47) e desequilíbrio de corrente (46)

Os relés de reversão ou desbalanceamento de tensão são utilizados para atuar quando a sequência de fases lida pelo relé está diferente da sequência ajustada ou no momento em que a tensão estiver desbalanceada, impossibilitando o sistema de operar caso ocorram as discrepâncias, além de ser bastante utilizados para reconhecer erros de ligação em cabos secundários dos transformadores de potência. Correntes desequilibradas resultam em

correntes de sequência negativa que produzem um campo girante de sentido contrário ao campo normal (MARDEGAN, 2010).

Relé de ângulo de fase (78)

A proteção contra a perda de sincronismo tem a função de verificar a ocorrência de instabilidade transitória utilizando a relação entre fasores de corrente e tensão para calcular uma impedância representativa e o por meio do ângulo presente na impedância é possível determinar a condição de instabilidade do gerador que faz com que ocorra a perda de sincronismo (FRAZÃO, 2019).

Relé de sobrecorrente com restrição de tensão (50V/51V)

A proteção desloca as características de sobrecorrente à esquerda do coordenograma, modifica o *pickup* proporcionalmente a tensão, ou seja, ao reduzir o *pickup* a tensão cai e aumenta a sensibilidade. Depende da queda de tensão para funcionar e poder diferenciar falhas de condições normais do sistema com segurança (DUARTE, 2018).

3 METODOLOGIA

O trabalho está relacionado com uma empresa do ramo metalúrgico localizada no Alto Uruguai, a subestação de média tensão ao tempo presente terá seu painel de média tensão substituído por um novo que contém uma unidade consumidora integrada com uma unidade geradora.

A potência total instalada na subestação é de 1300 kVA sendo dividida entre dois transformadores a seco, um de 300 kVA destinados para o consumo próprio das cargas instaladas no setor de produção e outro de 1000 kVA para a unidade geradora fotovoltaica.

Na unidade de geração estão presentes 8 inversores de frequência de 100 kW, cada um conectado aos módulos fotovoltaicos que estão instalados sobre o teto do pavilhão onde a empresa está localizada.

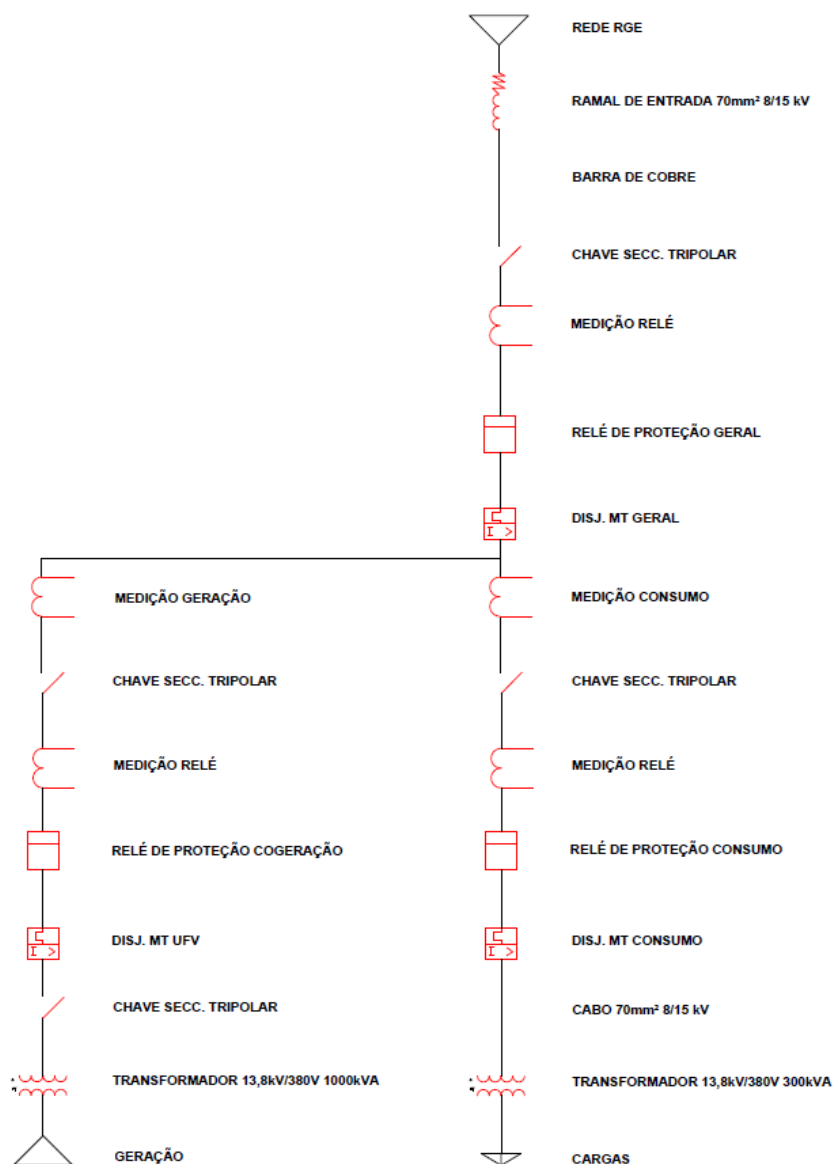
A subestação terá um painel de média tensão com uma entrada de energia vinda da concessionária e a outra entrada será da minigeração solar, é necessário dimensionar todo o sistema de proteção e medição que é exigido pela concessionária.

A rede elétrica utilizada na empresa pertence a concessionária RGE que faz parte do grupo CPFL, portanto, todo o sistema de proteção desenvolvido é baseado nos padrões de normas desta concessionária em específico, pelo fato de que projetos de proteção devem ser embasados em normas vigentes da concessionária que fornecer a energia ao local o que significa que cada empresa tem suas exigências para o fornecimento de energia, caso o projeto não se adeque às exigências não será ligada a energia do local.

A configuração dos transformadores e dos inversores de frequência, juntamente com a integração dos módulos fotovoltaicos, representa um desafio técnico significativo que deve ser abordado com precisão. O objetivo é garantir que o sistema funcione de forma otimizada, maximizando a produção de energia renovável e assegurando a estabilidade do fornecimento para a empresa.

O sistema de proteção foi projetado para as três unidades conforme a figura 15, unidade de consumo, unidade de geração ou solar e unidade geral. Essas unidades estão interligadas para garantir a eficiência e segurança no fornecimento de energia para toda a operação da empresa. Além disso, a implementação desse sistema de proteção requer uma análise detalhada das condições operacionais, incluindo a avaliação dos riscos associados e a definição dos parâmetros de proteção necessários para cada unidade.

Figura 15 - Diagrama Unifilar do sistema de proteção da empresa



Fonte: O autor (2024).

3.1 Sistema de proteção unidade de geração solar

Para a unidade de geração de 800 kW, é essencial atender às exigências de proteção especificadas pela Companhia Paulista de Força e Luz (2020) para garantir a operação segura e confiável do sistema. As proteções selecionadas visam preservar tanto a integridade dos equipamentos quanto a continuidade do fornecimento de energia, além de prevenir falhas que possam afetar a rede elétrica e garantir conformidade com as normas da concessionária conforme a tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros de proteção cogeração

PROTEÇÃO	CÓDIGO ANSI	POTÊNCIA INSTALADA		
		P<75	75<P<500	500<P<5000
Sub e Sobretensão	27/59	X	X	X
Sub e Sobrefrequência	81 U/O	X	X	X
Desequilíbrio de corrente	46	-	-	X
Desbalanço de tensão	47	-	-	X
Sobrecorrente direcional	67	-	X	X
Sobrecorrente com rest. de tensão	51V	-	-	X
Sincronismo	25	X	X	X
Anti-ilhamento	-	X	X	X
Sobrecorrente de fase	50/51	-	X	X
Sobrecorrente de neutro	50N/51N	-	X	X
Sobretensão de neutro	59N	-	X	X
Direcional de potência	32	X	X	X
Medição de ângulo de fase	78	-	X	X
Taxa de variação de frequência	81 df/dt	-	X	X

Fonte: Adaptado GED 15303.

Para se obter as diversas funções solicitadas, um simples relé digital não teria capacidade de suprir, portanto o relé utilizado foi um relé digital robusto o URP6000.

Foi solicitado à concessionária RGE os dados de curto-circuito localizados no ramal de entrada da subestação de acordo com a tabela 3 para efetuar os cálculos necessários para os parâmetros de proteção e os ajustes de proteção do relé instalado no alimentador da concessionária conforme a tabela 4 para evidenciar os coordenogramas de seletividade.

Tabela 3 - Níveis de curto ramal de entrada

Curto	Simétrico	Assimétrico
Trifásico	3.681 A	4.204 A
Fase-Fase	*	*
Fase-Fase-Terra	3.188 A	*
Fase-Terra	2.360 A	*
Fase-Terra mínimo	194 A	*

Fonte: O autor.

Tabela 4 - Ajustes de proteção alimentador

Ajuste	Neutro	Fase
PickUp 51	70 A	600 A
Dial	0,9	0,15
Curva	IEC-M.I	IEC-E.I
PickUp 50	2.500 A	4.100 A

Fonte: O autor.

Para definir parâmetros de proteção é necessário definir as propriedades do transformador a seco de 1 MVA instalado que estão presentes na tabela 5.

Tabela 5 - Dados transformador da unidade de geração solar

Potência	Corrente Nominal	Tensão Primária	Tensão Secundária	Z%
1 MVA	41,84 A	13,8 kV	0,38 kV	6

Fonte: O autor.

A corrente de magnetização do transformador é uma corrente transitória elevada que ocorre no momento em que o equipamento é energizado, essa corrente é várias vezes maior que a corrente nominal do transformador e opera sobre um curto período de tempo (KAGAN, 2008). Pode ser calculada de acordo com a equação 1.

$$I_{Mgs} = 14 \cdot I_{Ns} \quad (1)$$

Onde:

I_{Ns} = Corrente Nominal do transformador da unidade de geração solar (A)

Outras correntes importantes são as corrente *inrush* e *inrush* real, são similares à corrente de magnetização, a corrente *inrush* tem o intuito de mensurar um valor de corrente para que seja utilizado na parametrização do relé que deve operar para distinguir essas correntes transitórias e evitar paradas desnecessárias (MAMEDE, 2020). Esta corrente ocorre devido à rápida mudança no campo magnético, que induz uma corrente significativa.

Como existe apenas um transformador nesse circuito, a corrente magnetização foi

adotada como a corrente *inrush* conforme a equação 2 e em seguida a corrente de *inrush* real foi calculada de acordo com a equação 3 para servir como referência para a parametrização das proteções.

$$I_{Ins} = I_{Mgs} \quad (2)$$

$$I_{Inrs} = \frac{1}{\frac{1}{I_{cc3\phi}} + \frac{1}{I_{Inrs}}} \quad (3)$$

Onde:

$I_{cc3\phi}$ = Corrente de curto-circuito trifásico assimétrico conforme tabela 3 (A)

I_{Ins} = Corrente *inrush* do transformador de geração solar (A)

I_{Inrs} = Corrente *inrush* real do transformador de geração solar (A)

3.1.1 Funções de proteção unidade de geração solar

Esta subseção tem como objetivo evidenciar o processo de cálculo das proteções para a unidade de geração solar, seguindo as normas e diretrizes estabelecidas pela concessionária CPFL. É apresentado como são determinados os parâmetros necessários para garantir a segurança e a eficiência do sistema. Tudo conforme as exigências das GEDs da concessionária vigente.

3.1.1.1 Sobrecorrente instantânea de fase (50) e neutro (50N)

Para garantir a proteção do transformador contra curto-circuito, foi implementada uma unidade de sobrecorrente instantânea. A proteção foi configurada conforme a equação 4.

$$I_{50s} = 110\% \cdot I_{Inrs} \quad (4)$$

Onde:

I_{Inrs} = Corrente *inrush* real do transformador de geração (A)

% = O percentual é um valor definido para que a corrente fique entre os limites que são estabelecidos pela própria concessionária conforme Companhia Paulista de Força e Luz (2021), para caracterizar a equação acima.

Já a sobrecorrente instantânea de neutro é calculada conforme a equação 5 e tem o objetivo de proteger a instalação para defeitos relacionados à terra, foi ajustada uma proteção de sobrecorrente instantânea de neutro com corrente de 20% da corrente ajustada na equação 4.

$$I_{50Ns} = 20\% \cdot I_{50s} \quad (5)$$

3.1.1.2 Sobrecorrente temporizada de fase (51) e neutro (51N)

Para garantir a proteção do transformador contra sobrecargas, foi implementada uma unidade de sobrecorrente temporizada. Esta proteção foi configurada conforme a equação 7 porém, essa corrente é obtida através da corrente nominal do transformador da geração solar conforme a equação 6.

$$I_{Ns} = \frac{S_{Ts}}{FP \cdot \sqrt{3} \cdot V} \quad (6)$$

Onde:

S_{Ts} = Potência aparente do transformador da unidade de geração solar (VA)

FP = Fator de potência

V = Tensão nominal (V)

$$I_{51s} = 110\% \cdot I_{Ns} \quad (7)$$

Onde:

I_{Ns} = Corrente nominal do transformador da unidade de geração solar (A)

% = O percentual é um valor definido para que a corrente fique entre os limites que são estabelecidos pela própria concessionária conforme Companhia Paulista de Força e Luz (2021), para caracterizar a equação acima.

Foi utilizada uma curva IEC extremamente inversa, o dial de tempo é calculado conforme a equação 8. A qual pode ser utilizada para encontrar qualquer uma das variáveis que estão presentes, geralmente é utilizada para calcular o dial de tempo que é responsável por determinar o comportamento da curva, considerando uma corrente de proteção que é obtida através do parâmetro de proteção para qual a curva de atuação se destinará, um tempo de atuação que leva em conta a identificação do relé, envio de sinal ao disjuntor e disparo do disjuntor e os valores de k e α que são constantes que variam conforme a curva IEC selecionada.

$$Dt = \frac{\left(\frac{I_{Inrs}}{I_{51s}}\right)^\alpha - 1}{k} \cdot t \quad (8)$$

Onde:

k = Constante da curva padrão IEC conforme a tabela 6

α = Constante da curva padrão IEC conforme a tabela 6

I_{Inrs} = Corrente de *Inrush* real unidade solar (A)

I_{51s} = Corrente de proteção de sobrecorrente de fase unidade solar (A)

Dt = Dial de tempo

t = Tempo de atuação do relé (s)

Tabela 6 - Constantes curvas IEC

Tipo de curva IEC	k	α
Normalmente inversa	0,14	0,02
Muito Inversa	13,5	1
Extremamente Inversa	80	2

Fonte: O autor.

Já a sobrecorrente temporizada de neutro tem o objetivo de proteger a instalação para

defeitos relacionados à terra, foi ajustada uma proteção de sobrecorrente temporizada de neutro conforme a equação 9, com corrente 20% da corrente ajustada na equação 7.

$$I_{51Ns} = 20\% \cdot I_{51s} \quad (9)$$

Foi utilizada uma curva IEC extremamente inversa com dial de tempo de 0,15 para a unidade de sobrecorrente temporizada de neutro.

3.1.1.3 Subtensão (27)

Para desconectar o barramento do cliente da rede da concessionária em caso de anomalias causadas por redução da tensão eficaz de fornecimento, foi configurada uma proteção baseada nas tensões fase-neutro, padrão de parametrização do relé de proteção, conforme descrito na equação 10. A função de proteção foi ajustada para que o relé atue com um tempo máximo de resposta de 1 segundo.

$$V_{27s} = 85\% \cdot V\phi_s \quad (10)$$

Onde:

$V\phi_s$ = Tensão de fase na unidade de geração solar (V)

% = O percentual é um valor definido para que a tensão fique entre os limites que são estabelecidos pela própria concessionária conforme Companhia Paulista de Força e Luz (2021), para caracterizar a equação acima.

3.1.1.4 Sobretensão de fase (59) e neutro (59N)

Para garantir a desconexão do barramento do cliente da rede da concessionária em caso de aumentos anormais na tensão eficaz de fornecimento, foi programada a função de proteção contra sobretensão. A parametrização dessa proteção utilizará tensões fase-neutro, conforme a equação 11. A função foi configurada para que o relé opere com o menor tempo de resposta possível.

$$V_{59s} = 110\% \cdot V\phi_s \quad (11)$$

Onde:

$V\phi_s$ = Tensão de fase na unidade de geração solar (V)

% = O percentual é um valor definido para que a tensão fique entre os limites que são estabelecidos pela própria concessionária conforme Companhia Paulista de Força e Luz (2021), para caracterizar a equação acima.

Com o intuito de desconectar o barramento do cliente da rede da concessionária diante de alterações anormais provenientes de faltas monofásicas no lado de alta tensão do transformador, foi utilizada a proteção 59N de acordo com a equação 12. A função deverá utilizar um tempo de atuação do relé máximo de 0,5 segundos.

$$V_{59Ns} = 20\% \cdot V\phi_s \quad (12)$$

3.1.1.5 Sobrecorrente direcional de fase (67)

Para esta função foi definido um ajuste de sobrecorrente temporizada e instantânea com direcionalidade definida pela função 67.

Para determinação dos parâmetros de ajustes foi considerado que o acessante terá uma demanda de 800 kW, que corresponde à potência nominal de geração. Além disso, os inversores estão ajustados com um fator de potência unitário. Dessa forma, determinou-se a corrente nominal do sistema no sentido da concessionária conforme a equação 13.

$$I_{Nd} = \frac{D}{FP \cdot \sqrt{3} \cdot V} \quad (13)$$

Onde:

I_{Nd} = Corrente nominal de demanda de geração (A)

D = Demanda de geração (W)

FP = Fator de potência

V = Tensão nominal (V)

Com a corrente nominal de demanda de geração, a corrente de sobrecorrente instantânea é calculada conforme a equação 14 e a sobrecorrente temporizada é calculada conforme a equação 15.

$$I_{ins}_{67} = 110\% \cdot I_{Nd} \quad (14)$$

Onde:

I_{Nd} = Corrente nominal de demanda de geração (A)

% = O percentual é um valor definido para que a corrente fique entre os limites que são estabelecidos pela própria concessionária conforme Companhia Paulista de Força e Luz (2021), para caracterizar a equação acima.

$$I_{temp}_{67s} = 106\% \cdot I_{Nd} \quad (15)$$

Onde:

I_{Nd} = Corrente nominal de demanda de geração (A)

% = O percentual é um valor definido para que a corrente fique entre os limites que são estabelecidos pela própria concessionária conforme Companhia Paulista de Força e Luz (2021), para caracterizar a equação acima.

3.1.1.6 Direcional de potência (32)

Para limitar a injeção de potência na rede da concessionária, foi aplicada a função direcional de potência ativa, conforme especificado na equação 16. Essa função foi configurada para que o relé atue com um tempo máximo de 2 segundos.

$$P_{32s} = 110\% \cdot D \quad (16)$$

Onde:

D = Demanda de geração (W)

% = O percentual é um valor definido para que a potência ativa fique entre os limites que são estabelecidos pela própria concessionária conforme Companhia Paulista de Força e Luz (2021), para caracterizar a equação acima.

3.1.1.7 Sobrefrequência (81O), subfrequência (81U) e variação de frequência (81 df/dt)

Com o intuito de desconectar o barramento do cliente da rede da concessionária diante de alterações anormais de frequência foi programada a função de sobrefrequência e de subfrequência. Deve-se determinar unidades de proteção instantâneas e temporizadas.

Unidades instantâneas devem atuar imediatamente assim que o relé detecta uma sobrefrequência ou subfrequência. O parâmetro é definido no projeto para um valor acima da frequência nominal de rede para sobrefrequência e abaixo da frequência nominal de rede para subfrequência conforme Companhia Paulista de Força e Luz (2021).

Unidades instantâneas devem atuar em 62,5 Hz para sobrefrequência e 57 Hz para subfrequência. Unidades temporizadas devem atuar com um tempo de retardado entre os limites de frequência estabelecidos. Para a unidade de sobrefrequência temporizada, se a frequência for maior que 62 Hz a proteção atua em até 0,2 segundos. Para a unidade de subfrequência temporizada, se a frequência for menor que 57,5 Hz a proteção atua em até 0,2 segundos.

O tempo de reconexão conforme Companhia Paulista de Força e Luz (2021) deve ser após 180 segundos da frequência ser menor que 60,1 Hz para sobrefrequência e maior que 59,9 Hz para subfrequência, a reconexão deve ser realizada apenas por ação humana.

No relé de proteção, a função de variação de frequência é configurada definindo-se um valor para a taxa de variação de frequência, geralmente expressa em hertz por segundo (Hz/s). Esse limite representa a taxa máxima de variação que o sistema pode suportar sem comprometer a estabilidade. A configuração da função df/dt também envolve um tempo de detecção ou atraso, que permite que a proteção atue somente quando a taxa de variação persiste por um período específico, evitando operações intempestivas devido a pequenas oscilações momentâneas.

Para o sistema de proteção em questão, foi adotada uma taxa limite de variação de frequência de 0,1 Hz/s, com um tempo de atuação de 1 segundo. Esses parâmetros são configurados diretamente no software do relé de proteção, assegurando a resposta adequada do sistema em casos de variação abrupta de frequência.

3.1.1.8 Sincronismo (25), anti-ilhamento e relé de ângulo de fase (78)

Para que o sistema de geração funcione em paralelo com a rede elétrica da concessionária, é essencial garantir o sincronismo. Neste caso, o equipamento responsável é o inversor de frequência, que está instalado no sistema de geração, localizado fora do cubículo de média tensão. Além disso, o inversor de frequência desempenha funções de proteção contra anti-ilhamento e contra falta de sincronismo, sendo este último conhecido como relé de ângulo de fase.

De acordo com a Companhia Paulista de Força e Luz (2020), todos os inversores presentes na instalação deverão estar em conformidade com o INMETRO e precisam estar de acordo com os requisitos mínimos de normas ABNT, pois, para o sistema de geração distribuída o dispositivo apresenta um papel importante.

3.1.1.9 Desbalanceamento de tensão (47) e desequilíbrio corrente (46)

Para a função de desbalanço de tensão, o relé de proteção detecta uma sequência incorreta de tensão, ativa automaticamente uma saída configurada. Esse acionamento possui um retardo ajustável, após o tempo definido o relé envia o comando para desarmar o disjuntor de média tensão, interrompendo o circuito e protegendo o sistema. Para garantir essa proteção, é fundamental habilitar a função no relé.

A função de desequilíbrio de corrente é configurada para assegurar a coordenação entre as proteções do gerador e da rede, de forma que o relé de interconexão responda com maior sensibilidade em casos de desequilíbrio de correntes de fase, em comparação com a proteção interna do gerador. Esse ajuste permite que o relé de interconexão atue primeiro em situações de desequilíbrio levando em conta um desequilíbrio conforme a equação 17.

$$I_{46} = 20\% \cdot I_{Ns} \quad (17)$$

Onde:

I_{Ns} = Corrente nominal do transformador da unidade de geração solar (A)

% = O percentual é um valor definido para que a potência ativa fique entre os limites que são estabelecidos pela própria concessionária conforme Companhia Paulista de Força e Luz (2021), para caracterizar a equação acima.

3.1.1.10 Relé de sobrecorrente com restrição de tensão (51V)

No relé de proteção, o parâmetro de tensão de restrição foi configurado com um valor de 7.170 V, ou seja representa 90% da tensão nominal de fase. Esse ajuste tem o objetivo de evitar disparos indevidos da proteção 51V, garantindo que esta só atue em situações de queda significativa de tensão devido a falhas reais. Com esse valor de tensão de restrição, qualquer redução anormal da tensão provocada por uma falta resultará em uma adaptação das características operacionais da função 67, elevando sua sensibilidade.

3.2 Sistema de proteção unidade de consumo

Para definir parâmetros de proteção é necessário definir as propriedades do transformador a seco de 300 kVA conforme a tabela 7.

Tabela 7 - Dados transformador da unidade de consumo

Potência	Corrente Nominal	Tensão Primária	Tensão Secundária	Z%
300 kVA	12,55 A	13,8 kV	0,38 kV	6

Fonte: O autor.

A corrente de magnetização do transformador é uma corrente transitória elevada e pode ser calculada de acordo com a equação 18.

$$I_{Mgc} = 14 \cdot I_{Nc} \quad (18)$$

Outras correntes importantes são as corrente *inrush* e *inrush* real, como existe apenas um transformador nesse circuito, a corrente magnetização foi adotada como a corrente *inrush* conforme a equação 19 e em seguida a corrente de *inrush* real vai ser calculada de acordo com a equação 20 para servir como como referência para a parametrização.

$$I_{Inc} = I_{Mgc} \quad (19)$$

$$I_{Inrc} = \frac{1}{\frac{1}{I_{cc3\phi}} + \frac{1}{I_{Inc}}} \quad (20)$$

Onde:

I_{Inrc} = Corrente de *inrush* real do transformador da unidade de consumo (A)

$I_{cc3\phi}$ = Corrente de curto-circuito trifásico assimétrico conforme tabela 3 (A)

I_{Inc} = Corrente de *inrush* transformador de consumo (A)

3.2.1 Funções de proteção unidade de consumo

Esta subseção tem como objetivo demonstrar o processo de cálculo das proteções para a unidade de consumo, seguindo as normas e diretrizes estabelecidas pela concessionária CPFL. É apresentado como são determinados os parâmetros necessários para garantir a segurança e a eficiência do sistema. Tudo conforme as exigências das GEDs da concessionária vigente.

3.2.1.1 Sobrecorrente instantânea de fase (50) e neutro (50N)

Para garantir a proteção do transformador contra curto-circuito, foi implementada uma unidade de sobrecorrente instantânea. A proteção foi configurada conforme a equação 21.

$$I_{50c} = 110\% \cdot I_{Inrc} \quad (21)$$

Já a sobrecorrente instantânea de neutro é calculada conforme a equação 22 e tem o objetivo de proteger a instalação para defeitos relacionados à terra, foi ajustada uma proteção de sobrecorrente instantânea de neutro com corrente de 20% da corrente ajustada na equação 21.

$$I_{50Nc} = 20\% \cdot I_{50c} \quad (22)$$

3.2.1.2 Sobrecorrente temporizada de fase (51) e neutro (51N)

Com o objetivo de proteger o transformador da unidade de consumo para sobrecargas no sentido do cliente foi prevista uma unidade de sobrecorrente temporizada de ajustada conforme a equação 24, porém, essa corrente é obtida através da corrente nominal do transformador da unidade de consumo conforme a equação 23.

$$I_{Nc} = \frac{S_{Tc}}{FP \cdot \sqrt{3} \cdot V} \quad (23)$$

Onde:

S_{Tc} = Potência aparente do transformador da unidade de consumo (VA)

FP = Fator de potência

V = Tensão nominal (V)

$$I_{51c} = 110\% \cdot I_{Nc} \quad (24)$$

Foi utilizada uma curva IEC extremamente inversa, o dial de tempo é calculado conforme a equação 25.

$$Dt = \frac{\left(\frac{I_{Inrc}}{I_{51c}}\right)^\alpha - 1}{k} \cdot t \quad (25)$$

Onde:

k = Constante da curva padrão IEC conforme a tabela 6

α = Constante da curva padrão IEC conforme a tabela 6

I_{Inrc} = Corrente de *Inrush* real unidade consumo (A)

I_{51c} = Corrente de proteção de sobrecorrente de fase unidade consumo (A)

Dt = Dial de tempo

t = Tempo de atuação do relé (s)

Já a sobrecorrente temporizada de neutro tem o objetivo de proteger a instalação para defeitos relacionados à terra, foi ajustada uma proteção de sobrecorrente temporizada de neutro conforme a equação 26, com corrente 20% da corrente ajustada na equação 24.

$$I_{51Nc} = 20\% \cdot I_{51c} \quad (26)$$

Foi utilizada uma curva IEC extremamente inversa com dial de tempo de 0,12 para a unidade de sobrecorrente temporizada de neutro.

3.3 Sistema de proteção geral

De acordo com a Companhia Paulista de Força e Luz (2020), a presença de um disjuntor que separa a instalação particular da rede da concessionária é indispensável.

Ainda sobre a mesma norma técnica, as funções 50, 51, 50N, 51N e 27 deverão obrigatoriamente atuar no interruptor geral de entrada que separa a rede concessionária do acessante e o restante das proteções solicitadas pela concessionária fica a critério do acessante definir em outros interruptores que serão comandados pelos relés no seu sistema.

Para definir parâmetros de proteção é necessário definir as propriedades dos transformadores a seco de 1 MVA e 300 kVA instalados na planta do cliente conforme a tabela 8.

Tabela 8 - Dados transformadores da unidade geral

Potência	Corrente Nominal	Tensão Primária	Tensão Secundária	Z%
1 MVA	41,84 A	13,8 kV	0,38 kV	6
300 kVA	12,55 A	13,8 kV	0,38 kV	6

Fonte: O autor.

As correntes de magnetização dos transformadores são correntes transitórias elevadas e podem ser calculadas de acordo com as equações 1 e 18.

Outras correntes importantes são as corrente *inrush* e *inrush* real, como existem dois transformadores nesse circuito, a corrente *inrush* foi adotada como a soma das correntes de magnetização dos transformadores da unidade de consumo e da unidade de geração conforme

a equação 27 e em seguida a corrente de *inrush* real vai ser calculada de acordo com a equação 28 para servir como referência para a parametrização das proteções.

$$I_{Ing} = I_{Mgs} + I_{Mgc} \quad (27)$$

$$I_{Inrg} = \frac{1}{\frac{1}{Icc3\phi} + \frac{1}{I_{Ing}}} \quad (28)$$

Onde:

I_{Inrg} = Corrente de *inrush* real dos transformadores (A)

$Icc3\phi$ = Corrente de curto-circuito trifásico assimétrico conforme tabela 3 (A)

I_{Ing} = Soma das correntes *inrush* do transformador de geração solar e do transformador de consumo (A)

3.3.1 Funções de proteção unidade geral

Esta subseção tem como objetivo demonstrar o processo de cálculo das proteções para a unidade geral, seguindo as normas e diretrizes estabelecidas pela concessionária CPFL. É apresentado como são determinados os parâmetros necessários para garantir a segurança e a eficiência do sistema. Tudo conforme as exigências das GEDs da concessionária vigente.

3.3.1.1 Sobrecorrente instantânea de fase (50) e neutro (50N)

Para garantir a proteção dos transformadores contra curto-circuito, foi implementada uma unidade de sobrecorrente instantânea. A proteção foi configurada conforme a equação 29.

$$I_{50g} = 110\% \cdot I_{Inrg} \quad (29)$$

A sobrecorrente instantânea de neutro é calculada conforme a equação 30 tem o objetivo de proteger a instalação para defeitos relacionados à terra, ajustada uma proteção de

sobrecorrente instantânea de neutro com corrente de 20% da corrente ajustada na equação 29.

$$I_{50Ng} = 20\% \cdot I_{50g} \quad (30)$$

3.3.1.2 Sobrecorrente temporizada de fase (51) e neutro (51N)

Com o objetivo de proteger os transformadores da subestação para sobrecargas no sentido do cliente foi prevista uma unidade de sobrecorrente temporizada ajustada de fase conforme a equação 32, porém, essa corrente é obtida através da corrente nominal dos transformadores da geração solar e da unidade de consumo conforme a equação 31.

$$I_{Ng} = \frac{S_{Ts} + S_{Tc}}{FP \cdot \sqrt{3} \cdot V} \quad (31)$$

Onde:

S_{Ts} = Potência aparente do transformador da unidade de geração solar (VA)

S_{Tc} = Potência aparente do transformador da unidade de consumo (VA)

FP = Fator de potência

V = Tensão nominal (V)

$$I_{51g} = 110\% \cdot I_{Ng} \quad (32)$$

Foi utilizada uma curva IEC extremamente inversa, o dial de tempo é calculado conforme a equação 33.

$$Dt = \frac{\left(\frac{I_{Inrg}}{I_{51g}}\right)^{\alpha} - 1}{k} \cdot t \quad (33)$$

Onde:

k = Constante da curva padrão IEC conforme a tabela 6

α = Constante da curva padrão IEC conforme a tabela 6

I_{Inrg} = Corrente de *Inrush* real unidade geral (A)

I_{51g} = Corrente de proteção de sobrecorrente de fase unidade geral (A)

Dt = Dial de tempo

t = Tempo de atuação do relé (s)

Já a sobrecorrente temporizada de neutro tem o objetivo de proteger a instalação para defeitos relacionados à terra, foi ajustada uma proteção de sobrecorrente temporizada de neutro de acordo com a equação 34, com corrente 20% da corrente ajustada na equação 32.

$$I_{51Ng} = 20\% \cdot I_{51g} \quad (34)$$

Foi utilizada uma curva IEC extremamente inversa com dial de tempo de 0,13 para a unidade de sobrecorrente temporizada de neutro.

3.3.1.3 Subtensão (27)

Com o intuito de desconectar o barramento do cliente da rede da concessionária diante de alterações anormais provenientes da redução da tensão eficaz de fornecimento. As tensões utilizadas para dimensionamento da proteção serão de fase-neutro visto que é o padrão de parametrização do relé de proteção conforme a equação 35.

$$V_{27g} = 85\% \cdot V\phi_g \quad (35)$$

3.4 Transformadores de corrente

Para determinação dos transformadores de corrente são utilizados os dados de curto-circuito conforme a tabela 3 fornecida pela concessionária no ponto de entrega do acessante. Para o cálculo de saturação é necessário atender alguns critérios conforme Companhia Paulista de Força e Luz (2016), é fundamental que os transformadores de corrente de proteção representem com precisão as correntes de falha, sem serem afetados pela

saturação. Eles só devem entrar em saturação em níveis elevados de indução magnética, correspondendo a correntes 20 vezes superiores à corrente nominal primária conforme a equação 36.

$$I_{tc} = \frac{I_{cc3\phi}}{20} \quad (36)$$

Onde:

$I_{cc3\phi}$ = Corrente de curto-circuito trifásico assimétrico conforme tabela 3 (A)

I_{tc} = Corrente primária TC mínima

Considerou-se uma relação de transformação (RTC) em que a corrente primária do transformador de corrente seja superior a corrente I_{tc} , neste caso modelo comercial com corrente superior a 210,2 A é o de 250 A. Conforme informado nesta mesma norma técnica, corrente de curto-circuito máxima nas barras de média tensão das subestações alteram de acordo com a classe de tensão, sendo de 10,6 kA para sistemas com tensão máxima de operação de 15 kV.

Para os cálculos é necessário definir um cabo para conectar o transformador de corrente ao relé digital, neste caso um cabo de 4mm² de 10 metros, a impedância do cabo e o comprimento são dados indispensáveis. As informações de consumo do relé digital utilizado em determinado sistema, estão disponibilizadas no manual do fabricante, serão abordadas no desenvolvimento da metodologia de cálculo para determinação da saturação do transformador de corrente, pois com todos dados citados no parágrafo pode-se determinar a total impedância de carga deste equipamento conforme a equação 37.

$$Z_{total} = Z_{fiação} + Z_{relé} + Z_{TC} \quad (37)$$

Para obter a impedância de carga do equipamento é necessário obter as impedâncias da fiação conforme a equação 38, a impedância do relé de acordo com a equação 39 e a impedância do próprio equipamento segundo a equação 40.

$$Z_{\text{fiação}} = 2 \cdot Z_{\text{cond}} \cdot d \quad (38)$$

Onde:

Z_{cond} = Impedância do condutor (Ω/km)

d = distância (m)

$$Z_{\text{relé}} = Z_{\text{Frelé}} + (3 \cdot Z_{\text{Nrelé}}) \quad (39)$$

Onde:

$Z_{\text{Frelé}}$ = Impedância de fase do relé (Ω)

$Z_{\text{Nrelé}}$ = Impedância de neutro do relé (Ω)

Para o cálculo da impedância do TC utilizou-se 20% da impedância de carga do TC que, segundo as tabelas 8 e 9 da NBR 6856, é de 1 Ω , conforme a equação 40.

$$Z_{\text{TC}} = Z_f \cdot 20\% \quad (40)$$

Onde:

Z_f = Impedância de carga do Transformador de corrente (Ω)

Com a relação de transformação de 50 foi calculada a corrente de curto-circuito para 10,6kA de acordo com a equação 41 e a tensão de saturação por meio da equação 42 considerando uma impedância de 0,319 Ω e uma corrente de curto circuito máxima equivalente a 212 A.

$$I_{cc} = \frac{I_{ccm}}{RTC} \quad (41)$$

Onde:

I_{ccm} = Corrente de curto-circuito máxima (A)

RTC = Relação de transformação do TC

$$V_{SAT} = I_{cc} \cdot Z_{total} \quad (42)$$

Onde:

V_{SAT} = Tensão de saturação calculada (V)

I_{cc} = Corrente de curto-circuito (A)

Z_{total} = Impedância total (Ω)

A tensão de saturação calculada precisa ser menor que a tensão de saturação nominal do transformador de corrente escolhido que é obtida conforme a equação 43.

$$V_{SATn} = Z_f \cdot 20 \cdot I_n \quad (43)$$

Onde:

V_{SATn} = Tensão de saturação nominal (V)

I_n = Corrente nominal secundária do TC (A)

Z_f = Impedância de carga do Transformador de corrente (Ω)

As tensões obtidas de acordo com a metodologia de cálculo listada acima são comparadas de forma que a tensão de saturação nominal precisa ser maior que a tensão de saturação calculada, dessa maneira o equipamento não irá saturar sobre as situações mais críticas do sistema onde será inserido.

Conforme os cálculos apresentados acima, o transformador de corrente de 250/5 A, além de ter a corrente primária maior que a mínima não apresenta problemas de saturação, está apto para utilização no projeto.

3.5 Transformadores de potencial

Para o presente projeto, foram utilizados transformadores de potencial dedicados exclusivamente para o sistema de proteção, não sendo aplicados para alimentação de qualquer outra carga ou envio de sinal para outros sistemas que não seja os relés de proteção que são utilizados nas unidades de proteção geral e solar sendo assim necessários seis transformadores de potencial apenas para a medição dos relés do acessante. Além disso, é primordial determinar o TP responsável por alimentar o relé de proteção e outros serviços auxiliares que estão dentro do cubículo de média tensão.

3.6 Sistema de medição da concessionária

Segundo a Companhia Paulista de Força e Luz (2020), instalações com paralelismo necessitam da presença de sistema de medição para controle de geração e qualidade de energia. O sistema deve incluir conjunto de TCs e TPs para medição, medidores de energia ativa e reativa, cabos para interligação dos componentes e interface de comunicação com o sincronismo.

Segundo a Companhia Paulista de Força e Luz (2024), o sistema de medição para faturamento (SMF) é instalado no ponto de entrega de subestações, a concessionária irá fornecer os medidores eletrônicos de potência trifásica ativa e reativa, TCs e TPs de classe 15, 25 e 36,2 kV, chaves de aferição e equipamentos para sistema de comunicação. Fica de responsabilidade do cliente projetar o ambiente de modo que a concessionária venha apenas instalar seus equipamentos do SMF.

3.7 Coordenogramas

O coordenograma de seletividade é fundamental para evidenciar que as curvas de proteção das unidades de proteção não fiquem sobrepostas e próximas, tornando o sistema seletivo as variações de corrente conforme a magnitude da mesma. O coordenograma é um gráfico logarítmico que utiliza a equação 44 como base para traçar as curvas, basicamente os parâmetros como dial e coeficientes de curva permanecem constantes e as correntes de variam resultando no tempo (t) gerando uma curva característica com os pontos que são obtidos.

$$t = \frac{k}{\left(\frac{I_{Inr}}{I_p}\right)^\alpha - 1} \cdot Dt \quad (44)$$

Onde:

k = Constante da curva padrão IEC conforme a tabela 6

α = Constante da curva padrão IEC conforme a tabela 6

I_{Inr} = Corrente de *Inrush*

I_p = Corrente de proteção

Dt = Dial de tempo

t = Tempo de atuação do relé

Os coordenogramas que serão exibidos levam em conta as curvas características de proteções que são comuns para as 3 unidades de proteção, no caso a proteção de sobrecorrente instantânea de fase e neutro (50/50N) e sobrecorrente temporizada de fase e neutro (51/51N).

3.7.1 Coordenograma concessionária / unidade geral

Inicialmente a unidade geral de proteção foi coordenada com relação ao alimentador da concessionária. Os dados do alimentador da concessionária estão na tabela 4, os dados da unidade geral foram calculados durante a metodologia e a tabela 9 apresenta um resumo dos valores obtidos.

Tabela 9 - Resumo unidade geral

Ajuste	Neutro	Fase
PickUp 51	11,97 A	59,83 A
Dial	0,13	0,31
Curva	IEC-E.I	IEC-E.I
PickUp 50	141,83 A	709,17 A

Fonte: O autor.

Os dados das duas tabelas 4 e 9, foram inseridos na planilha excel conforme a tabela 10, a planilha gera gráfico logarítmico obtido através da equação 44. O coordenograma obtido evidencia as curvas de proteção da unidade geral e do alimentador da concessionária.

Tabela 10 - Dados para coordenograma RGE / geral

RELÉ	RTC	CURVA	TEMPORIZADAS			INSTANTÂNEAS			TENSÃO
			ON/OFF	TAP	DIAL	ON/OFF	INST	TEMPO	
RGE 50/51	1	E.I	ON	600	0,15	ON	4.100	0,01	13,8 kV
RGE 50/51N	1	M.I	ON	70	0,9	ON	2.500	0,01	13,8 kV
GERAL 50/51	1	E.I	ON	59,83	0,29	ON	709,17	0,01	13,8 kV
GERAL 50/51N	1	E.I	ON	11,97	0,13	ON	141,83	0,01	13,8 kV

Fonte: O autor.

3.7.2 Coordenograma unidade geral / unidade solar

A unidade geral de proteção foi configurada de forma a garantir a coordenação com as unidades de proteção a jusante, permitindo uma operação seletiva e eficiente em caso de falhas. Para prosseguir com o processo de coordenação, foi ajustada a unidade geral em relação à unidade solar, assegurando que cada dispositivo atue conforme sua prioridade no sistema.

Os dados detalhados da unidade geral, incluindo ajustes de corrente, estão apresentados na tabela 9, enquanto os parâmetros específicos da unidade solar foram determinados durante a fase de metodologia. A tabela 11 oferece um resumo dos valores obtidos para a unidade solar.

Tabela 11 - Resumo unidade solar

Ajuste	Neutro	Fase
PickUp 51	9,2 A	46,02 A
Dial	0,15	0,31
Curva	IEC-E.I	IEC-E.I
PickUp 50	113 A	565,5 A

Fonte: O autor.

Os dados das duas tabelas 9 e 11, foram inseridos na planilha excel conforme a tabela 12, a planilha gera gráfico logarítmico obtido através da equação 44. O coordenograma obtido evidencia as curvas de proteção da unidade geral e da unidade solar.

Tabela 12 - Dados para coordenograma geral / solar

RELÉ	RTC	CURVA	TEMPORIZADAS			INSTANTÂNEAS			TENSÃO
			ON/OFF	TAP	DIAL	ON/OFF	INST	TEMPO	
GERAL 50/51	1	E.I	ON	59,83	0,29	ON	709,17	0,01	13,8 kV
GERAL 50/51N	1	E.I	ON	11,97	0,13	ON	141,83	0,01	13,8 kV
SOLAR 50/51	1	E.I	ON	46,02	0,31	ON	565,5	0,01	13,8 kV
SOLAR 50/51N	1	E.I	ON	9,2	0,15	ON	113	0,01	13,8 kV

Fonte: O autor.

3.7.3 Coordenograma unidade geral / unidade de consumo

A unidade geral de proteção foi configurada de forma a garantir a coordenação com as unidades de proteção a jusante, permitindo uma operação seletiva e eficiente em caso de falhas. Para prosseguir com o processo de coordenação, foi ajustada a unidade geral em relação à unidade de consumo, assegurando que cada dispositivo atue conforme sua prioridade no sistema.

Os dados detalhados da unidade geral, incluindo ajustes de corrente estão apresentados na tabela 9, enquanto os parâmetros específicos da unidade de consumo foram determinados durante a fase de metodologia. A tabela 13 oferece um resumo dos valores obtidos para a unidade de consumo.

Tabela 13 - Resumo unidade consumo

Ajuste	Neutro	Fase
PickUp 51	2,76 A	13,8 A
Dial	0,12	0,37
Curva	IEC-E.I	IEC-E.I
PickUp 50	37,1 A	185,5 A

Fonte: O autor.

Os dados das duas tabelas 9 e 13, foram inseridos na planilha excel conforme a tabela 14, a planilha gera gráfico logarítmico obtido através da equação 44. O coordenograma obtido evidencia as curvas de proteção da unidade geral e da unidade de consumo.

Tabela 14 - Dados para coordenograma geral / consumo

RELÉ	RTC	CURVA	TEMPORIZADAS			INSTANTÂNEAS			TENSÃO
			ON/OFF	TAP	DIAL	ON/OFF	INST	TEMPO	
GERAL 50/51	1	E.I	ON	59,83	0,29	ON	709,17	0,01	13,8 kV
GERAL 50/51N	1	E.I	ON	11,97	0,13	ON	141,83	0,01	13,8 kV
CONSUMO 50/51	1	E.I	ON	13,8	0,37	ON	185,5	0,01	13,8 kV
CONSUMO 50/51N	1	E.I	ON	2,76	0,12	ON	37,1	0,01	13,8 kV

Fonte: O autor.

3.8 Sistema de proteção

Nesta seção, será abordada a justificativa para a escolha dos componentes utilizados, com base nas especificações técnicas necessárias para cada um deles.

A seleção dos para-raios levou em conta a tensão de fase em média tensão. Foram escolhidos modelos de 12 kV, que serão instalados em cada fase em pontos de entrada, saída e derivação de energia, conectados diretamente ao aterramento do painel. Esses dispositivos garantirão a proteção contra surtos ao longo do sistema.

A seccionadora tripolar foi dimensionada para suportar as correntes nominais do sistema, além de possuir capacidade de curto-circuito superior à máxima corrente de curto-circuito possível. Cada unidade de proteção será equipada com essa seccionadora para garantir segurança e isolamento durante manutenções ou em caso de falhas.

O disjuntor de média tensão deve operar na faixa de tensão do sistema, que neste caso é de 13,8 kV, e também apresentar uma capacidade de interrupção superior ao valor máximo de curto-circuito do sistema. Além disso, ele deve possuir funcionalidades específicas de acionamento de suas bobinas. Serão utilizados disjuntores de média tensão em cada uma das três unidades de proteção, assegurando a capacidade de interromper a corrente em caso de falhas.

O transformador de corrente de média tensão foi escolhido com relação de transformação de 250/5 A, conforme calculado nas seções anteriores, e com classe de exatidão 10B100. Embora um modelo de 200/5 A fosse uma opção, a exigência da

concessionária é que a corrente mínima suportada pelo TC seja 210,2 A, o que torna o modelo de 250/5 A o mais adequado. Cada unidade de proteção contará com três transformadores de corrente, um por fase, totalizando nove TCs.

Os transformadores de potencial devem ser capazes de medir a tensão de fase e enviar esses dados para o relé de proteção. A relação de transformação selecionada é de $13,8/\sqrt{3}$ kV para 115 V, com uma potência de 500 VA. Cada relé que requer referência de tensão será conectado a três TPs, sendo seis unidades ao todo para as proteções das unidades geral e solar. Um transformador de potencial adicional será utilizado para os serviços auxiliares do painel, como iluminação, alimentação das bobinas dos disjuntores de média tensão, alimentação dos relés de proteção e outros circuitos auxiliares.

A seleção dos relés foi feita com base nas funções de proteção exigidas por cada unidade. Na unidade de consumo, será utilizado um relé com funções 50/50N e 51/51N. Para a unidade solar será necessário um relé com todas as funções de proteção mencionadas anteriormente em sua respectiva seção. Na unidade geral, o relé deve possuir as funções 50/50N, 51/51N e 27, de modo a proporcionar a proteção completa do sistema.

4 RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos ao longo do desenvolvimento deste trabalho, com o objetivo de validar as hipóteses levantadas e responder aos objetivos propostos. Os dados foram organizados de forma clara e objetiva, utilizando tabelas, figuras e análises para facilitar a compreensão.

4.1 Parâmetros das unidades de proteção

Durante a execução da metodologia, foram realizados estudos detalhados sobre os padrões técnicos exigidos pela concessionária, considerando as normas aplicáveis e as especificidades do sistema elétrico. Esses estudos visam identificar as funções de proteção indispensáveis para garantir a segurança e o desempenho adequado do sistema. Além disso, foi realizado o dimensionamento e o ajuste dos parâmetros associados a essas funções.

A seleção das funções e ajustes considerou a capacidade de cada unidade de proteção em detectar e atuar diante de condições anormais. Esses valores foram projetados para garantir uma resposta eficiente do sistema em cenários de falhas, respeitando as diretrizes da concessionária.

Para organizar os resultados, foram elaboradas três tabelas, cada uma dedicada a um segmento específico do sistema. A tabela 15 apresenta um resumo detalhado da parametrização da unidade consumo assegurando que as cargas conectadas estejam devidamente protegidas contra sobrecorrentes e outros eventos adversos. A tabela 16 fornece os parâmetros ajustados para a unidade solar, destacando os ajustes necessários para assegurar a proteção da geração fotovoltaica e sua integração à rede. Por fim, a tabela 17 compila os ajustes realizados para a unidade geral de proteção, que desempenha um papel central na coordenação com a concessionária e na proteção do sistema como um todo.

Tabela 15 - Parametrização final unidade de consumo

Proteção	Parâmetro	Tipo de curva	Dial de tempo
Sobrecorrente instantânea de fase (50)	185,5 A	-	-
Sobrecorrente instantânea de neutro (50N)	37,1 A	-	-
Sobrecorrente temporizada de fase (51)	13,8 A	E.I	0,37
Sobrecorrente temporizada de neutro (51N)	2,76 A	E.I	0,12

Fonte: O autor.

Tabela 16 - Parametrização final unidade solar

Proteção	Parâmetro	Tipo de curva	Dial de tempo
Sobrecorrente instantânea de fase (50)	565,5 A	-	-
Sobrecorrente instantânea de neutro (50N)	113 A	-	-
Sobrecorrente temporizada de fase (51)	46,02 A	E.I	0,31
Sobrecorrente temporizada de neutro (51N)	9,2 A	E.I	0,15
Subtensão (27)	6.772 V	-	-
Sobretensão de fase (59)	8.764 V	-	-
Sobretensão de neutro (59N)	1.593 V	-	-
Sobrecorrente temporizada direcional de fase (67)	35,48 A	-	-
Sobrecorrente instantânea direcional de fase (67)	36,81 A	-	-
Direcional de potência (32)	880 kW	-	-
Sobrefrequência (81O)	62,5 Hz	-	-
subfrequência (81U)	57 Hz	-	-
Variação de frequência (81 df/dt)	0,1 Hz/s	-	-
Desequilíbrio de corrente (46)	8,4 A	-	-

Fonte: O autor.

É importante destacar que algumas proteções da unidade solar não possuem valores pré-definidos de parametrização e, portanto, devem ser configuradas diretamente durante a inserção dos dados no software do relé. Essa etapa é essencial para garantir que as funções específicas sejam ajustadas de acordo com as características operacionais e os requisitos do sistema.

Adicionalmente, vale ressaltar que as funções de proteção relacionadas ao sincronismo (25), anti-ilhamento e o relé de ângulo de fase (78) são responsabilidades exclusivas do inversor de frequência. Esses dispositivos já vêm equipados com as proteções necessárias para garantir a desconexão segura em situações de falha ou desconexão da rede, bem como para assegurar a sincronização adequada durante a operação. Dessa forma, essas funções não requerem ajustes nos relés de proteção externos, pois são inerentes ao funcionamento do próprio inversor.

Essa integração entre os relés de proteção e os inversores de frequência é fundamental para a operação segura e confiável da unidade solar, garantindo conformidade com os padrões técnicos e normativos exigidos pela concessionária e pelo sistema elétrico.

Tabela 17 - Parametrização final unidade geral

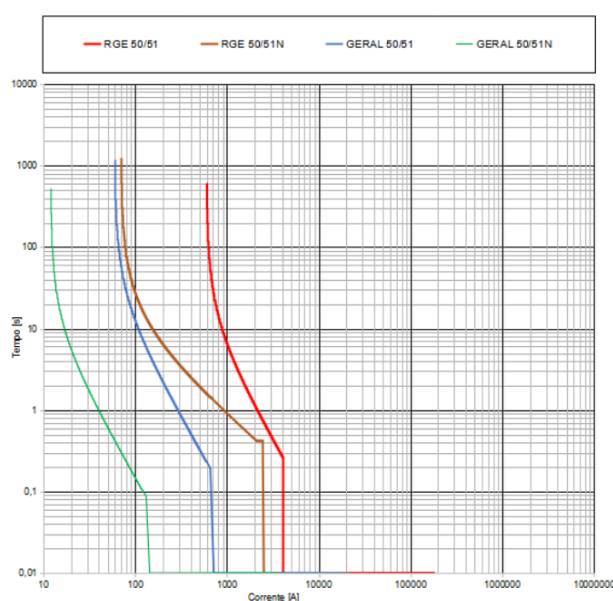
Proteção	Parâmetro	Tipo de curva	Dial de tempo
Sobrecorrente instantânea de fase (50)	709,17 A	-	-
Sobrecorrente instantânea de neutro (50N)	141,83 A	-	-
Sobrecorrente temporizada de fase (51)	59,83 A	E.I	0,29
Sobrecorrente temporizada de neutro (51N)	11,97 A	E.I	0,13
Subtensão (27)	6.772 V	-	-

Fonte: O autor.

4.2 Coordenogramas das unidades de proteção

Os dados apresentados na tabela 10 foram organizados em uma planilha Excel, a partir da qual foi gerado o coordenograma ilustrado na figura 16. Este gráfico evidencia as curvas de proteção e a seletividade entre o alimentador da concessionária e a unidade geral.

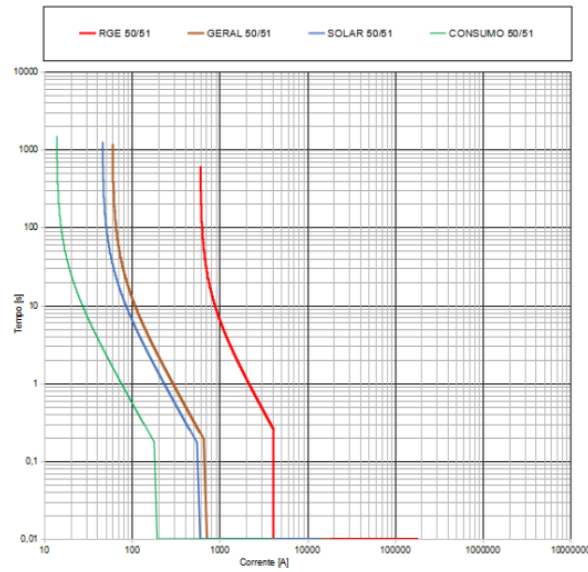
Figura 16 - Coordenograma concessionária / unidade geral



Fonte: O autor (2024).

De maneira similar, os valores da tabela 12 foram utilizados para gerar o coordenograma mostrado na figura 17, que destaca as curvas de proteção e a interação entre a unidade de proteção geral e a unidade solar. Esse coordenograma desempenha um papel crucial na análise de seletividade, demonstrando como as proteções da unidade geral e da unidade solar estão ajustadas para atuar de forma coordenada em casos de falhas no sistema.

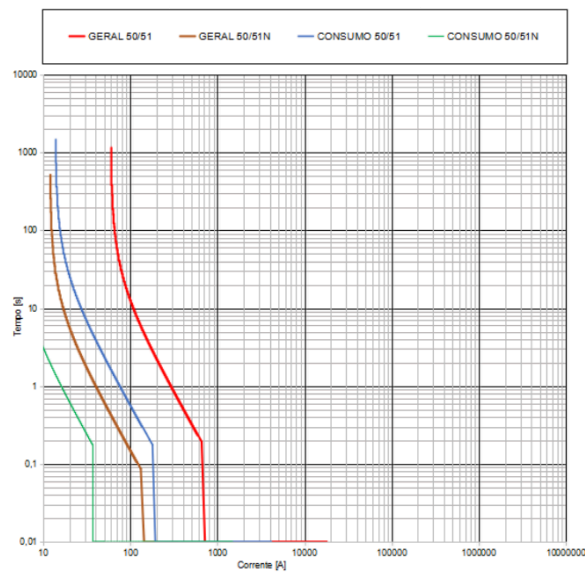
Figura 17 - Coordenograma unidade geral / unidade solar



Fonte: O autor (2024).

Por fim, os dados da tabela 14 resultaram no coordenograma representado na figura 18, que ilustra de forma detalhada as curvas de proteção entre a unidade de proteção geral e a unidade de consumo. Este gráfico é fundamental para avaliar a coordenação entre as proteções, garantindo que qualquer ocorrência de falha seja tratada pela unidade responsável mais próxima, reduzindo assim o impacto sobre o sistema como um todo e aumentando a confiabilidade operacional.

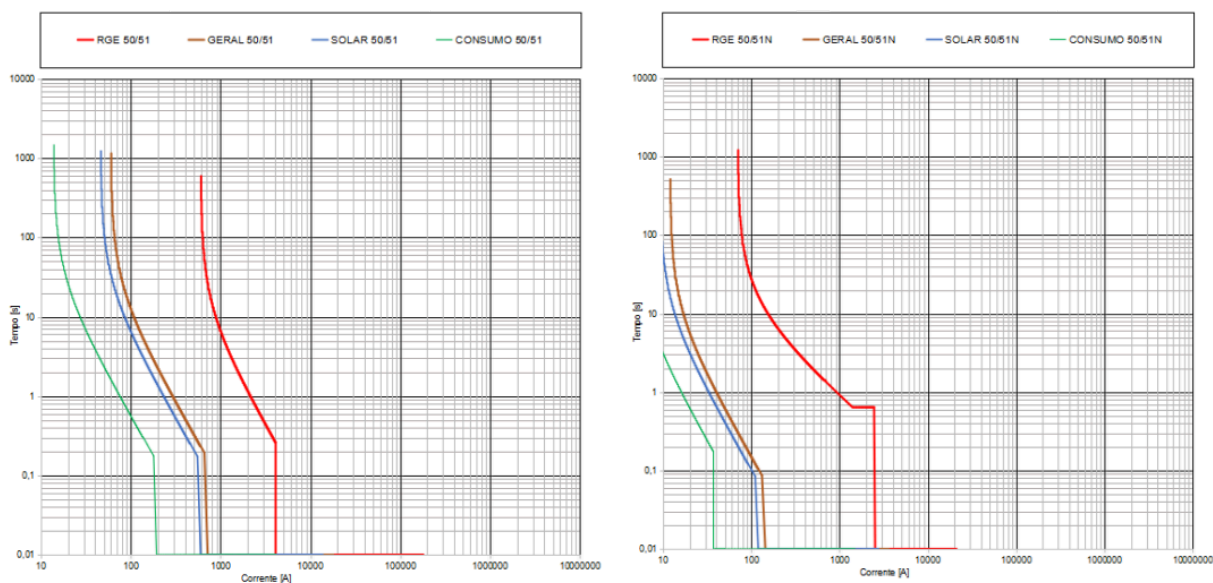
Figura 18 - Coordenograma unidade geral / unidade consumo



Fonte: O autor (2024).

Com o intuito de evidenciar a seletividade entre as diferentes unidades de proteção do sistema, a Figura 19 apresenta os coordenogramas gerais para as curvas de fase e neutro, respectivamente. Esses gráficos permitem uma análise detalhada da atuação coordenada das proteções.

Figura 19 - Coordenogramas gerais de fase e de neutro



Fonte: O autor (2024).

4.3 Componentes do sistema de proteção

Esta subseção apresenta a proposta de equipamentos para o sistema de proteção do painel de média tensão, abrangendo para-raios, transformadores de corrente e potencial, disjuntores, chaves seccionadoras e relés de proteção, de forma a garantir a segurança e a confiabilidade do sistema.

Os para-raios selecionados são do modelo polimérico de 12 kV e 10 kA da marca Balestro conforme a figura 20, que serão instalados em todas as entradas e saídas do painel de média tensão. Esses dispositivos têm como objetivo principal proteger o sistema contra sobretensões transitórias que possam comprometer a integridade dos equipamentos e a continuidade do fornecimento.

Figura 20 - Para-raio Balestro



Fonte: Pulsar medidores (2024).

Para a medição e proteção, o transformador de corrente escolhido é o modelo de 25 kV da linha SNM25 conforme a figura 21, fabricado pela Soltran, com relação de transformação de 250/5 A e classe de exatidão 10B100. Serão utilizadas três unidades por sistema de proteção, totalizando nove unidades para o painel de média tensão, permitindo a medição precisa e o acionamento correto dos dispositivos de proteção.

Figura 21 - Transformador de corrente Soltran



Fonte: Eletrotrafo (2024).

O transformador de potencial selecionado é o modelo de 15 kV 500 VA com tensão primária de $13,8/\sqrt{3}$ kV e tensão secundária de 115 V da marca Multi INST conforme a figura 22. Serão empregadas três unidades em cada unidade de proteção, exceto na unidade de consumo, que não requer referência de tensão para suas medições. Além disso, uma unidade adicional será destinada ao fornecimento de energia para os serviços auxiliares do painel de média tensão.

Figura 22 - Transformador de potencial Multi INST



Fonte: Pulsar medidores (2024).

O disjuntor de média tensão escolhido é o modelo EasyPact EXE172506B1B, da marca Schneider Electric conforme a figura 23, com especificações de 17,5 kV, 25 kA de nível de curto-circuito e corrente nominal de 630 A. Será utilizada uma unidade para cada sistema de proteção, totalizando três unidades, garantindo a interrupção segura em situações de falha.

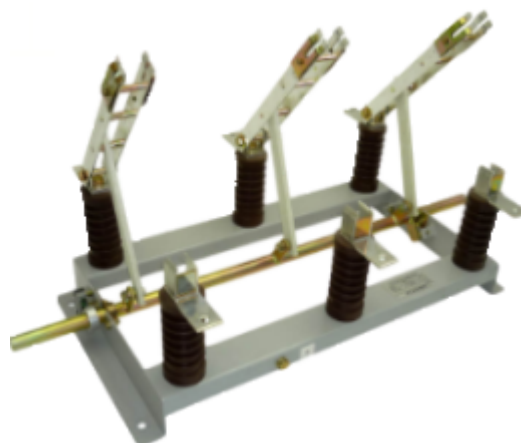
Figura 23 - Disjuntor de média tensão Schneider



Fonte: Schneider (2024).

Como chave seccionadora, será utilizado o modelo tripolar CTS 400 A 17,5 kV da marca Dreyfuss conforme a figura 24, com capacidade de curto-circuito de 16 kA. Assim como o disjuntor, uma unidade será instalada por sistema de proteção, totalizando três unidades no painel de média tensão, proporcionando isolamento seguro durante manutenções ou emergências.

Figura 24 - Chave seccionadora tripolar Dreyfuss



Fonte: Dreyfuss (2024).

Para o sistema de relés de proteção, foram definidos três modelos específicos para cada unidade de proteção. Na unidade de proteção de consumo, será utilizado o relé URPE 7104 da marca Pextron conforme a figura 25, que atende às proteções requeridas.

Figura 25 - Relé de proteção URPE 7104



Fonte: Pextron (2024).

Na unidade de proteção geral, o relé selecionado é o URPE 7104T conforme a figura 26, também da Pextron, configurado para as funções de proteção específicas dessa unidade.

Figura 26 - Relé de proteção URPE 7104T



Fonte: Pextron (2024).

Já para a unidade de proteção solar, será utilizado o relé URP 6000 conforme a figura 27, da mesma fabricante, um dispositivo robusto que oferece diversas funcionalidades para atender aos critérios de proteção mais exigentes dessa unidade de geração.

Figura 27 - Relé de proteção URP 6000



Fonte: Pextron (2024).

5 CONCLUSÃO

O projeto considerou as especificidades de uma subestação que integra uma unidade consumidora e uma unidade geradora fotovoltaica, com potência total instalada de 1300 kVA. A integração do sistema de geração particular por meio da unidade de minigeração fotovoltaica não apenas pode reduzir os custos com consumo de energia, mas também possibilita à empresa a obtenção de receita adicional por meio da venda de energia para a rede da concessionária, contribuindo para a sustentabilidade financeira do projeto.

Foi realizado todo o estudo de proteção e parametrizações para as unidades de proteção que estão devidamente protegidas contra curtos-circuitos e sobrecargas. Foram gerados os coordenogramas de seletividade, possibilitando a análise da interação entre as unidades de proteção. Esse procedimento assegura que o sistema opere de forma seletiva e eficiente, reduzindo os impactos de eventuais falhas e aumentando a confiabilidade da instalação elétrica.

A aplicação rigorosa das normas garantiu que os resultados obtidos fossem não apenas precisos, mas também alinhados com os padrões exigidos, assegurando a relevância e a aplicabilidade futura deste estudo.

A implementação de dispositivos como para-raios, seccionadoras, disjuntores, transformadores de corrente e potencial, e relés com funções específicas demonstra que a segurança elétrica vai além do cumprimento normativo, sendo essencial para preservar equipamentos, pessoas e a continuidade operacional.

Por fim, este trabalho não apenas alcança seu objetivo técnico, mas também serve como um marco para projetos futuros no campo da proteção de sistemas elétricos. Ele reafirma a importância de integrar soluções inovadoras e sustentáveis, contribuindo para a segurança e eficiência de sistemas cada vez mais complexos e interconectados.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6856: Transformador de corrente com isolamento sólida para tensão máxima igual ou inferior a 52 kV - Especificação e ensaios**. Rio de Janeiro. 2021.

BLACKBURN, L. J. **Protective relaying principles and applications**. 3. ed. CRC Press, 2006.

BRITO, M. **Estratégias de anti-ilhamento aplicadas a sistemas de geração distribuída fotovoltaica**. Disponível em: <https://sobraep.org.br/site/uploads/2018/06/rvol23no2p19.pdf>. Acesso em: 24 nov. 2024.

Companhia Paulista de Força e Luz. **Conexão de Micro e Minigeração Distribuída sob Sistema de Compensação de Energia Elétrica**. São Paulo. 2021.

Companhia Paulista de Força e Luz. **Fornecimento em Tensão Primária 15kV, 25kV e 34,5kV - Volume 3 - Anexos**. São Paulo. 2016.

Companhia Paulista de Força e Luz. **Ligação de Autoprodutores em Paralelo com o Sistema de Distribuição da CPFL**. São Paulo. 2020.

Companhia Paulista de Força e Luz. **Procedimento para realização de serviço de implantação ou adequação SMF**. São Paulo. 2024.

CSANYI, E. **The essentials of directional overcurrent protection in electrical power grid**. 2017. Disponível em: <https://electrical-engineering-portal.com/directional-overcurrent-protection>. Acesso em: 21 jun. 2024.

DUARTE, A. **Introdução à proteção de sistemas elétricos de potência**. São Paulo. 2018.

FRAZÃO, R. J. A. **Proteção do sistema elétrico de potência**. 2. ed. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2019.

GHOSHAL, A. **A Method to Improve PLL Performance Under Abnormal Grid Conditions**. Disponível em: https://eprints.iisc.ac.in/12985/1/A_method_to_improve_PLL_performance_under_abnormal_grid_conditions.pdf. Acesso em: 21 jun. 2024.

HOROWITZ, H. S. **Power system relaying**. 3. ed. England: John Wiley & Sons Ltd., 2008.

KAGAN, N. **Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. 2. ed. São Paulo: Polo Editora, 2008.

MACHADO, S. M. **Técnicas de controle e métodos de sincronização para sistemas de energia renovável ligados à rede elétrica - Uma revisão.** Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas, Londrina, v. 38, n. 1, p. 63-76, jan./jun. 2017.

MAMEDE FILHO, J. **Manual de Equipamentos Elétricos.** 1. ed. São Paulo: Grupo GEN, 2019.

MAMEDE FILHO, J. **Proteção de sistemas elétricos de potência.** 2. ed. Rio de Janeiro: LTC Livros Técnicos e Científicos Ltda., 2020.

MARDEGAN, C. S. **Proteção e seletividade: em sistemas elétricos industriais.** 2. ed. São Paulo: Atitude, 2012.

MARDEGAN, C. S. **Proteção e seletividade.** Disponível em: https://www.osestoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2010/07/ed52_fasc_protecao_seletividade_capV.pdf. Acesso em: 24 nov. 2010.

OLIVEIRA, I. C. et al. **Proteção de Sistemas Elétricos.** 1. ed. São Paulo: Grupo A, 2021

SEL – SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES. **Tabela ANSI.** Disponível em: <https://selinc.com/pt/products/tables/ansi/>. Acesso em: 21 jun. 2024.

VASCONCELOS, F. **Geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.** 2. ed. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2017.

VILLALVA, M. G. **Energia solar fotovoltaica: Conceitos e aplicações.** 2. ed. São Paulo: Érica, 2012..