
**Projeto de uma subestação com geração
fotovoltaica e grupo gerador-motor em edifício
comercial conectado à rede da ENEL-GO**

Pedro Mariano Netto



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Uberlândia
2023

Pedro Mariano Netto

**Projeto de uma subestação com geração
fotovoltaica e grupo gerador-motor em edifício
comercial conectado à rede da ENEL-GO**

Trabalho apresentado como requisito parcial
de avaliação na disciplina Trabalho de
Conclusão de Curso de Engenharia Elétrica
da Universidade Federal de Uberlândia

Área de concentração: Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Thales Lima Oliveira

Uberlândia

2023

*Dedico este trabalho a minha família, aos meus pais em especial,
e a todos os meus amigos que fizeram e fazem parte dessa minha jornada.*

Agradecimentos

Gostaria de, primeiramente agradecer ao meu pai, Vitor, por ter sido um espelho para mim, e a minha mãe Taline, por me ensinar a acreditar em mim, e aos dois por sempre batalharem pela nossa família. Sem vocês dois nada disso seria possível.

Ao professor Dr. Thales Lima Oliveira pela oportunidade de ter desenvolvido um projeto em conjunto, pela disponibilidade e a atenção.

Aos meus amigos que me deram todo o apoio que precisei, por toda prontidão e pelas noites em claro.

A minha companheira de vida, que tenho o privilégio de tê-la ao meu lado, sempre me incentivando e acreditando sempre em mim.

“Agora não há tempo para pensar o que você não tem. Pense no que pode fazer com o que tem.”

(Ernest Hemingway)

Resumo

A partir da publicação da resolução normativa 482, em 2012, pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), foram estabelecidas condições gerais para que produtores menores de energia elétrica pudessem se conectar a rede de distribuição, para que posteriormente esses pudessem usufruir do sistema de compensação, abrindo espaço para que o consumidor pudesse gerar sua própria energia de fontes renováveis. Com essa possibilidade aberta, expandiu-se muito os sistemas de geração fotovoltaica, tornando a energia elétrica um pouco mais acessível, o que acarretou no aumento dessas instalações, que devem ser conectadas em sistemas de média e alta tensões, conforme a resolução 414 da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). Para viabilizar esse tipo de conexão no sistema, é necessária a implantação de subestações de energia elétrica. Diante do exposto, este trabalho se trata de um projeto de uma subestação, conectado ao nível de média tensão da rede de distribuição, e a instalação dentro do sistema de compensação de créditos, alimentado por uma unidade geradora fotovoltaica, conectada em conjunto com o grupo gerador-motor. Também será incluído projeto de proteção dos equipamentos dessa subestação elétrica, item de suma importância para a segurança dos usuários desta instalação e para o funcionamento saudável do sistema de distribuição. O projeto foi necessário para adequar a subestação a sua nova rotina de funcionamento, com duas outras fontes de geração. Projeto este desenvolvido de acordo com todas as normas de regulamentação que regem o assunto e em conformidade com o estado da arte da literatura.

Palavras-chave: Subestação, usina, energia fotovoltaica, proteção e gerador.

Abstract

Following the publication of regulatory resolution 482 by the National Electric Energy Agency (ANEEL) in 2012, general conditions were established for smaller electricity producers to connect to the distribution network, allowing them to take advantage of the compensation system and enabling the consumer to generate their own renewable energy. This opened up space for a significant expansion of photovoltaic generation systems, making electricity more accessible and resulting in an increase in these installations, which must be connected to medium and high voltage systems according to resolution 414 from ANEEL. To make this type of connection possible, the implementation of electrical substations is necessary. Given the above, this work is a project for a substation connected to the medium voltage level of the distribution network and installed within the credit compensation system, powered by a photovoltaic generator unit connected in conjunction with a generator-motor group. The protection project for the equipment in this electrical substation is also included, an item of utmost importance for the safety of those served by this installation and for the healthy operation of the distribution system. The project was necessary to adapt the substation to its new operating routine with two other sources of generation. The project was developed in accordance with all regulatory norms that govern the subject and in compliance with the state of the art in the literature.

Keywords: Electric substation, power plant, photovoltaic energy, protection and power generator.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Fluxograma do sistema elétrico de potência	24
Figura 2 – Subestação abrigada em estrutura de alvenaria	24
Figura 3 – Subestação ao ar livre em estrutura de alvenaria	25
Figura 4 – Subestação aérea	25
Figura 5 – Subestação blindada	26
Figura 6 – TC do tipo enrolado e TC do tipo barra	28
Figura 7 – Transformador de potencial indutivo	29
Figura 8 – Ligações entre fases e fase e neutro	29
Figura 9 – Tipos de ligação de transformadores	31
Figura 10 – Terminais muflas	35
Figura 11 – Diagrama fasorial relé 67	40
Figura 12 – Painel fotovoltaico	43
Figura 13 – Módulos conectados em série	44
Figura 14 – Módulos conectados em paralelo	44
Figura 15 – Caixa de conexão	45
Figura 16 – Fluxograma ligação da rede	45
Figura 17 – Fluxograma inversores	46
Figura 18 – Fluxograma sistema elétrico de potência simulado no PSP-UFU com destaque ao resultado do fluxo de potência	48
Figura 19 – Transformador	51
Figura 20 – Parâmetros adotados na simulação do transformador	52
Figura 21 – Dados de placa do gerador	53
Figura 22 – Dados de placa do gerador	53
Figura 23 – Constantes típicas de máquinas síncronas	54
Figura 24 – Dados gerais do transformador	54
Figura 25 – Dados de falta do gerador	55
Figura 26 – Imagem de satélite das posições aproximadas do transformador e do grupo gerador.	55

Figura 27 – Secção nominal dos condutores	57
Figura 28 – Resistencia e reatancia dos condutores	58
Figura 29 – Parâmetros gerais da linha 1	59
Figura 30 – Parâmetros de falta para a linha 1	59
Figura 31 – Parâmetros gerais da linha 2	60
Figura 32 – Parâmetros de falta para a linha 2	60
Figura 33 – Parâmetros gerais da representação da rede de distribuição	61
Figura 34 – Parâmetros gerais de falta da representação da rede de distribuição	61
Figura 35 – Dados de medição	62
Figura 36 – Parametrização da carga da instalação	62
Figura 37 – Simulação no PSP-UFU com destaque às correntes de falta trifásicas e monofásicas calculadas.	63
Figura 38 – Relé 7SR5111-1AA11-0AA0	64
Figura 39 – Diagrama fasorial da função 67 de fase para o transformador	67
Figura 40 – Diagrama fasorial da função 67 de neutro para o transformador	68
Figura 41 – Diagrama fasorial da função 67 de fase para o gerador	71
Figura 42 – Diagrama fasorial da função 67 de neutro para o gerador	72
Figura 43 – Coordenograma da proteção do transformador	73

Lista de tabelas

Tabela 1 – Relação de correntes de TC's para projeto	28
Tabela 2 – Ponto ANSI e duração máxima por intervalo de impedância	32
Tabela 3 – Equipamentos de proteção	36
Tabela 4 – Valores definidos para cada tipo de curva de tempo inverso	38
Tabela 5 – Dados de placa do gerador	52

Lista de siglas

CC Corrente Contínua

CA Corrente Alternada

DPS Dispositivo de Proteção contra Surtos

NBR Norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas

NOTC *Normal Operation Cell Temperature*

PSP-UFU Plataforma de Sistemas de Potência da Universidade Federal de Uberlândia

PRODIST Procedimento de Distribuição

PERS Programa de Energia Renovável Social

SIN Sistema Interligado Nacional

STC *Standart Test Condition*

SCEE Sistema de Compensação de Energia Elétrica

TC Transformador de Corrente

TP Transformador de Potencial

Sumário

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Objetivos	20
1.1.1	Objetivos Gerais	20
1.1.2	Objetivos específicos	20
1.2	Metodologia do trabalho	21
1.2.1	Estrutura do trabalho	21
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1	Subestações	23
2.2	Equipamentos de uma subestação	26
2.2.1	Para-raios	26
2.2.2	Disjuntores	27
2.2.3	Transformador de Corrente	27
2.2.4	Transformador de Potencial	28
2.2.5	Transformador de Potência	30
2.2.6	Barramentos	32
2.2.7	Chave seccionadora	34
2.2.8	Muflas terminais	34
2.3	Sistema de Medição	35
2.4	Proteção	36
2.4.1	Relé de sobrecorrente (50/51)	37
2.4.2	Relé direcional de sobrecorrente (67)	39
2.4.3	Relé de subtensão (27)	40
2.4.4	Relés de sobretensão (59)	41
2.4.5	Relé de frequência (81)	41
2.5	Aterramento	41
2.6	Geração fotovoltaica	42
2.6.1	Equipamentos de um sistema de geração fotovoltaica	42

2.6.2	Marco Legal	45
3	METODOLOGIA	47
3.1	Projeto da subestação	47
3.1.1	Projeto de proteção	48
3.2	Projeto fotovoltaico	48
4	RESULTADOS	51
4.1	Simulação do circuito da subestação	51
4.1.1	Cabos para conexão do sistema	54
4.2	Proteção do Transformador	63
4.2.1	Unidade de sobrecorrente temporizada de fase (51)	64
4.2.2	Unidade de sobrecorrente instantânea de fase (50)	65
4.2.3	Unidade de sobrecorrente temporizada de neutro (51)	65
4.2.4	Unidade de sobrecorrente instantânea de neutro (50)	66
4.2.5	Unidade direcional de corrente (67)	66
4.2.6	Unidade direcional de corrente de neutro (67)	67
4.3	Proteção do gerador	68
4.3.1	Unidade de sobrecorrente temporizada de fase (51)	68
4.3.2	Unidade de sobrecorrente instantânea de fase (50)	69
4.3.3	Unidade de sobrecorrente temporizada de neutro (51)	70
4.3.4	Unidade de sobrecorrente instantânea de neutro (50)	70
4.3.5	Unidade direcional de corrente (67)	70
4.3.6	Unidade direcional de corrente de neutro (67)	71
4.3.7	Coordenograma do Transformador	72
5	CONCLUSÃO	75
	REFERÊNCIAS	77
	ANEXOS	79
ANEXO A	– DIAGRAMA UNIFILAR DA USINA FOTOVOLTAICA	81
ANEXO B	– CATÁLOGO DO RELÉ DE PROTEÇÃO	83
ANEXO C	– TABELA ANSI	87

Introdução

A história do ser humano é marcada pela sua constante evolução, a própria espécie humana, como é caracterizada hoje, é fruto de vários processos evolutivos e adaptativos que moldaram a espécie humana e seus costumes. De forma análoga a vida em sociedade com se é vivida agora, globalizada e bastante dependente da tecnologia, só conseguiu chegar a esse nível após a utilização de energia. Em um primeiro momento utilizou-se de energia mecânica para gerar outras formas de energia mecânica, depois passou-se de energia química para energia mecânica, esse foi um grande passo para a industrialização e início do mundo moderno, onde de forma direta e com grandes níveis de perda.

Com a chegada da segunda revolução industrial e da energia elétrica nos meios de produção, a curva de desenvolvimento do mundo passou a crescer de forma exponencial, expondo um universo de possibilidades e um horizonte que jamais alguém pudesse imaginar.

As indústrias cresceram, a expectativa de vida aumentou, veio a terceira revolução industrial, a quarta revolução industrial já está presente na vida cotidiana e seus benefícios são mais que óbvios, tudo isso graças ao avanço da energia elétrica sobre a sociedade, que a cada dia que se passa é mais dependente e demanda mais energia. Essa demanda crescente de energia elétrica teve como consequência a busca por mais e melhores meios de geração de energia.

Atualmente, a energia elétrica é amplamente acessível para grande parte da população brasileira, porém possui suas barreiras e uma delas é o custo da energia, e uma forma de mitigar esse problema é a implementação do sistema de geração distribuída, que utiliza-se de uma fonte infinita, o sol, esse tipo de geração além de diminuir os custos da energia no país contribui para o aumento da capacidade geral de fornecimento de energia no país, afetando diretamente para o seu crescimento econômico. Um ponto a se ter atenção, no entanto, é a questão da proteção elétrica do sistema elétrico brasileiro, mas que pode ser resolvido de forma simples e responsável, quando feito e usado de forma correta.

Outro ponto a ser observado é a forma de acesso da instalação a rede de distribuição ou transmissão. Para se manter o serviço de distribuição e transmissão em parâmetros

saudáveis para todos os usuários e para consumidores com demandas de potência mais elevadas, faz-se necessário que estes estejam conectados, porém isolados eletricamente do sistema, para maior proteção e qualidade do fornecimento de energia e isso é possível através do uso de subestações, em sua maioria, abaixadoras, necessárias em instalações de média e alta tensões.

É nesse contexto em que o presente trabalho é justificado, visto que a integração de diferentes fontes de energia por meio de uma subestação é realizada. Para isso, foi desenvolvido um projeto de subestação atendendo as normas vigentes e o estado na arte para especificação de equipamentos e parametrização da proteção.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos Gerais

O objetivo desse trabalho é a realização de um projeto de subestação elétrica para atender uma instalação comercial, alimentada em média tensão, com a inserção de uma unidade geradora fotovoltaica, instalada em um hotel, além de um grupo motor-gerador. O projeto elétrico da usina fotovoltaica já foi fornecido por uma empresa terceira, com uma capacidade instalada de 60,00 kWp, dentro da modalidade de geração junto a carga, onde a carga gerada será consumida no mesmo local que é produzida, ou seja, a energia gerada será consumida pelas instalações do hotel em questão. Este sistema será conectado à rede de distribuição do estado de Goiás, sob concessão da Enel, companhia responsável pela distribuição de energia elétrica no estado.

Para que o objetivo desse trabalho seja atingido, a seguir será exposto um panorama geral de um projeto de usina fotovoltaica, a título de contextualização, e mais detalhadamente um projeto de uma subestação de energia elétrica conforme a demanda da unidade a ser beneficiada, considerando o sistema de geração fotovoltaico, a alimentação do sistema de distribuição, o sistema de alimentação via gerador a diesel e as normas de regulamentação necessárias para o projeto.

1.1.2 Objetivos específicos

- ❑ Cálculo das correntes de curto circuito nos diferentes estágios da instalação, através do software Plataforma de Sistemas de Potência da Universidade Federal de Uberlândia (PSP-UFU);
- ❑ Estudo da proteção dos elementos da subestação;
- ❑ Escolha dos elementos de proteção baseados no estudo realizado e nos equipamentos existentes na instalação;
- ❑ Coordenação levando em consideração a geração fotovoltaica e do grupo gerador.

1.2 Metodologia do trabalho

Como exposto anteriormente, o trabalho irá tratar do projeto de uma subestação elétrica de uma instalação de média tensão em funcionamento conjunto com um sistema de geração fotovoltaico na configuração de autoconsumo remoto. Dando-se a necessidade de contextualização sobre subestações, painéis fotovoltaicos, geradores e a conexão destes subsistemas para um funcionamento eficiente e seguro como os sistemas de medição, proteção e aterramento. Destaca-se que o foco deste trabalho é no projeto da subestação elétrica de média tensão e seus equipamentos elétricos (transformador, gerador, para-raios, chaves), mas sendo necessária uma apresentação/contextualização do projeto fotovoltaico já estabelecido na instalação comercial em foco.

Devido à impossibilidade de obtenção dos dados da concessionária em tempo hábil, foi necessário estudar, estimar e simular a instalação, a fim de se obter todos os parâmetros iniciais necessários para o projeto.

1.2.1 Estrutura do trabalho

Para alcançar os objetivos propostos, além do presente capítulo introdutório, esse trabalho se encontra assim estruturado:

CAPÍTULO 2 – Fundamentação Teórica: São explanadas o referencial bibliográfico, normas vigentes e marcos necessários para o desenvolvimento do trabalho.

CAPÍTULO 3 – Metodologia: É apresentado o escopo geral do projeto e a metodologia de trabalho para a construção do projeto da subestação com geração fotovoltaica e grupo gerador-motor.

CAPÍTULO 4 – Projeto e Resultados: Nesse capítulo são calculados os principais parâmetros necessários para nortear a especificação dos equipamento, assim como a parametrização do sistema de proteção de acordo com a fundamentação teórica e metodologias apresentados nos capítulos anteriores.

CAPÍTULO 5 – Conclusões: Finalmente, o capítulo final, de caráter conclusivo, é destinado a sintetizar o trabalho realizado até então, destacando o conhecimento adquirido com esse projeto. São ainda destacados alguns itens que poderão ser contemplados em trabalhos futuros.

Fundamentação Teórica

Como exposto anteriormente, o trabalho irá tratar do projeto de uma subestação elétrica de uma instalação de média tensão em funcionamento conjunto com um sistema de geração fotovoltaico. Dando-se a necessidade de contextualização sobre subestações, painéis fotovoltaicos, geradores e a conexão destes subsistemas para um funcionamento eficiente e seguro. Destaca-se que o foco deste trabalho é no projeto da subestação elétrica de média tensão e seus equipamentos elétricos mas sendo necessária uma apresentação/contextualização do projeto fotovoltaico já estabelecido na instalação comercial em foco.

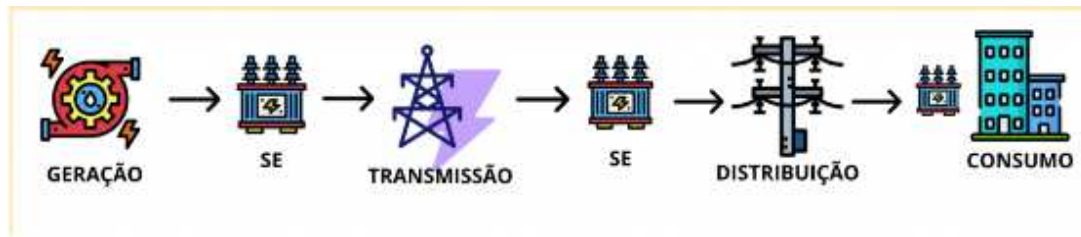
2.1 Subestações

Segundo o Módulo 1 do Procedimento de Distribuição (PRODIST), em (ANEEL,2021), subestações elétricas, segundo o Prodist, em seu primeiro módulo, são partes do sistema de potência que compreendem os dispositivos de manobra, controle, proteção, transformação e medição de grandezas elétricas, sendo as mais comuns tensão e corrente. As subestações estão presentes em todos os níveis de tensão do sistema elétrico, desde a ultra alta tensão a baixa tensão e sempre com o objetivo de proporcionar que a energia elétrica chegue da unidade geradora a unidade consumidora em níveis adequados para o seu uso, mantendo a segurança do sistema e de seus usuários.

Portanto, ao longo de todo o percurso da energia elétrica, mostrado na figura 1, desde a geração, transmissão, distribuição e consumo, poderão existir diversas subestações elétricas, visto que cada componente do sistema de distribuição, transmissão e geração operam com tensões diferentes.

As subestações, segundo Aprender Eétrica (2021), também podem ser classificadas pela função que exercem no Sistema Interligado Nacional (SIN), da geração a transmissão, sendo as mais comuns são as subestações elevadoras, que elevam o nível da tensão gerada nas usinas a níveis adequados para a transmissão, com um maior aproveitamento. As abaixadoras são subestações geralmente encontradas já próximas ao sistema de distribui-

Figura 1 – Fluxograma do sistema elétrico de potência



Fonte: ENERGÊS, 2022

ção, mais próximas às cargas, onde diminuem o nível de tensão, evitando inconvenientes à população.

As subestações de distribuição diminuem a tensão do nível de distribuição primária, entre 13,8 kV e 34,5 kV, para os níveis utilizados por consumidores e caso sejam consumidores com grandes demandas, este vai possuir a sua subestação. Também existem subestações de manobra, que interligam circuitos de mesmo nível de tensão, sendo responsáveis por adicionar ou retirar partes do sistema de serviço. Já as subestações conversoras são responsáveis pela conversão de frequência na rede e são mais utilizadas em sistemas de transmissão de corrente contínua, fazendo a conversão de corrente contínua para alternada e vice-versa.

Uma subestação elétrica, também é classificada quanto à condição de sua instalação com relação a sua exposição ao tempo ou proteção dele, podendo ser abrigadas, ao tempo, aéreas e blindadas. (ENERGES,2021)

As subestações abrigadas, segundo Energês (2021), são aquelas em que seus componentes são abrigados dentro de uma estrutura que os proteja das intempéries, geralmente essas estruturas são feitas em alvenaria, como mostra a figura 2.

Figura 2 – Subestação abrigada em estrutura de alvenaria



Fonte: ENERGÊS, 2022

Já as subestações expostas ao tempo, segundo (ENERGES,2021), não tem proteção

às intempéries, e portanto exigem equipamentos mais robustos, com um grau de proteção apropriado para enfrentar chuvas e poeira, por exemplo, além de demandarem manutenções mais frequentes. A figura 3 mostra um exemplo de subestação ao ar livre.

Figura 3 – Subestação ao ar livre em estrutura de alvenaria



Fonte: ENERGÊS, 2022

Subestações aéreas, ou simplificadas, como mostra a figura 4, são classificadas assim por possuírem um transformador instalado em um poste e em geral, essas subestações são empregadas a empreendimentos menores, com demandas menores. (ENERGES,2021)

Figura 4 – Subestação aérea



Fonte: ENERGÊS, 2022

Segundo Energês (2021), subestações blindadas (figura 5) são aquelas em que seus componentes ficam instalados dentro de estruturas metálicas, e podem ser também abrigadas e ao ar livre, fornecendo proteção extra aos equipamentos e ao ambiente ao redor, pois dificultam o acesso. A blindagem nesse tipo de subestação também é importante para reduzir efeitos de curto-circuito, contendo a propagação de arcos elétricos ou até combustão de equipamentos.

Figura 5 – Subestação blindada



Fonte: ENERGÊS, 2022

Além de sua instalação e função, segundo Aprender Elétrica (2021), as subestações são classificadas pelo seu nível de tensão, indo da baixa tensão (até 1 kV), tensão de distribuição ou média tensão (1 kV a 36,2 kV), alta tensão (36,2 kV a 138 kV), extra alta tensão (138 kV a 500 kV) e ultra alta tensão (acima de 500 kV).

Tendo em vista todos estes tópicos, pode-se concluir que existem vários tipos de subestações, para várias aplicações e o tipo mais adequado é escolhido pelo projetista de acordo com o seu uso e exigências do projeto. Porém existem equipamentos mais comuns entre alguns tipos de subestação, que serão apresentados a seguir.

2.2 Equipamentos de uma subestação

2.2.1 Para-raios

Em uma subestação, os para-raios, segundo Aprender Elétrica (2021), são dispositivos responsáveis pela segurança das instalações, que em situações normais, funcionam como um isolador e na ocorrência de sobretensões ele fornece um caminho mais curto e menos danoso para a corrente e assim reduzindo a amplitude da tensão. Estes são responsáveis por atuar em elevações súbitas da tensão na instalação, sejam provenientes de manobras no sistema ou descargas atmosféricas. Em subestações esses são comumente empregados nas entradas das linhas de transmissão, entrada de alimentadores, no barramento e nos lados de alta e baixa dos transformadores.

Outro ponto muito importante é a especificação da Norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR) 14039 que exige que para-raios de resistência não linear sejam aterrados com a ligação mais curta possível.

Os para-raios são compostos de resistências não lineares, conectados, ou não, a centelhadores em série, a depender de sua classe de proteção e construção. Para subestações de média tensão, os para-raios mais utilizados atualmente são os de óxido de zinco sem

centelhadores, com classe de distribuição de 10 kA a 5 kA, para corrente de descarga nominal.

2.2.2 Disjuntores

Segundo Aprender Elétrica (2021), São equipamentos empregados em todo o sistema elétrico, desde a baixa a alta tensão, em que são responsáveis pela interrupção de corrente elétrica de um circuito em todas as condições possíveis, normais e anormais para o sistema. A função do disjuntor é provavelmente a mais crítica de uma subestação, pois além de energizar e desenergizar circuitos, interromper falhas e efetuar desligamentos intencionais, ele deve desempenhar essas funções de maneira extremamente confiável, para impedir danos aos demais equipamentos da subestação.

Os disjuntores podem ser utilizados de forma individual, fazendo a proteção eletromecânica do sistema, onde este atuará de acordo com o campo eletromagnético da passagem da corrente pelo dispositivo, apesar de não ser muito usada. Uma prática mais comum e mais exata para a atuação de um disjuntor é a associação com um relé, que pode ser eletromecânico ou controlado por um microprocessador, que permite várias configurações de tempo, intensidade, permanência, frequência, entre outros, deixando a aplicação mais confiável.

O meio isolante dos disjuntores também é muito importante na hora da escolha do equipamento, e existem vários métodos de isolamento, a serem escolhidos com base nos dados e necessidades do projeto. Os meios de isolamento mais comuns são a óleo (já pouco usado), ar comprimido, vácuo ou o gás hexafluoreto de enxofre (SF_6). Por exigirem uma atuação muito rápida, também possuem dispositivos de acúmulo de energia, como mola ou pistão.

2.2.3 Transformador de Corrente

Em Aprender Elétrica (2021), Transformador de Corrente (TC) é um dos elementos de transformação de uma subestação e podem ser equipamentos monofásicos de dois circuitos, o primário e o secundário, que são eletricamente isolados, magneticamente acoplados e são conectados em série com os demais equipamentos. A função do TC é reduzir o valor da corrente do circuito a fim de oferecer níveis de corrente compatíveis com os sistemas de medição e proteção, geralmente o nível de corrente fornecido é de 1 A ou 5 A.

Existem vários tipos de construção de TCs, e algumas são mostradas na figura 6 mas uma coisa em comum entre eles é a relação de espiras do primário para o secundário muito alta, devido a grande diferença entre os níveis de corrente.

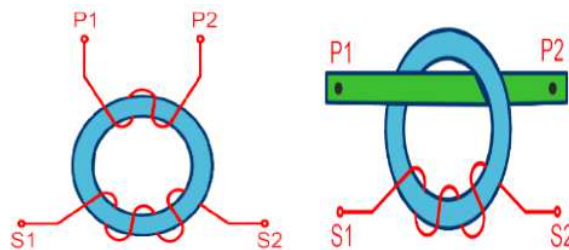
Os TCs, segundo Filho (2011), também são divididos em transformadores de medição e de proteção, sendo que a maior diferença entre eles é a sua classe de exatidão, que é maior no TC de medição.

Tabela 1 – Relação de correntes de TC's para projeto

I_p	Relação	I_p	Relação
5	1:1	60	12:1
10	2:1	75	15:1
15	3:1	100	20:1
20	4:1	125	25:1
25	5:1	150	30:1
30	6:1	200	40:1
40	8:1	250	50:1
50	10:1	300	60:1

Fonte: FILHO, 2011

Figura 6 – TC do tipo enrolado e TC do tipo barra

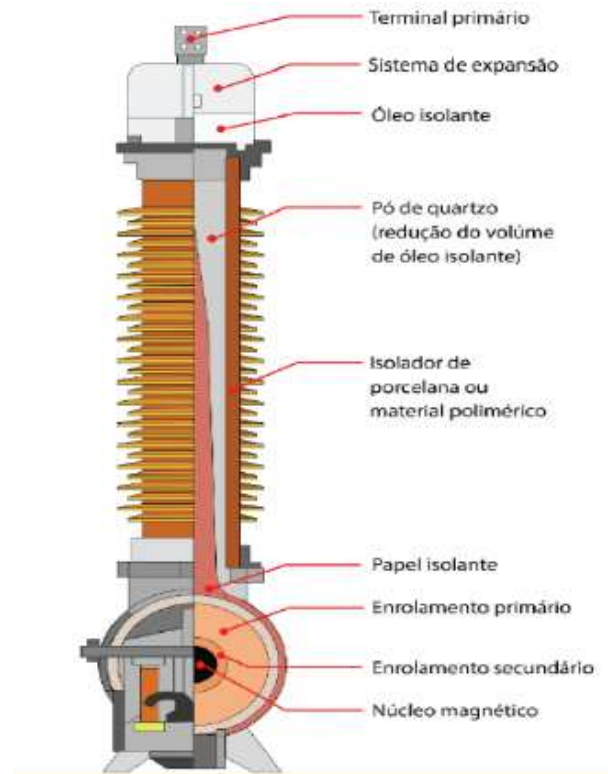


Fonte: APRENDER ELÉTRICA, 2021

2.2.4 Transformador de Potencial

Os transformadores de potencial, segundo Aprender Elétrica (2021), assim como os transformadores de corrente que são aplicados nos circuitos de medição e proteção, e adequam os valores de tensão para esses circuitos. O Transformador de Potencial (TP) também é de suma importância para manter os parâmetros da onda de tensão, porém em uma amplitude viável para os equipamentos alimentados por ele. Eles também isolam eletricamente o circuito de média ou alta tensão dos circuitos de medição e proteção e são fabricados para alimentar equipamentos de alta impedância e são conectados em paralelo ao circuito.

Figura 7 – Transformador de potencial indutivo



Fonte: APRENDER ELÉTRICA, 2021

Em sua construção mais comum, conforme a figura 7, os transformadores de potencial indutivos, e mais utilizados em sistemas de até 138 kV, possuem um número elevado de espiras no primário e reduzido no secundário, ao contrário do transformador de corrente. Assim, o nível de tensão medido no secundário de um TP é padronizado, em 115 V ou $115/\sqrt{3}$ V, para o qual os equipamentos de proteção e medição são feitos, na figura 8 pode-se ver alguns níveis de transformação desse equipamento.

Figura 8 – Ligações entre fases e fase e neutro

Ligação entre fases		Ligação entre fase e neutro			
Tensão primária nominal (V)	Relação nominal	Tensão primária nominal (V)	Relação nominal (V)		
			115/3	115/√3	115
115	1:1	-	-	-	-
230	2:1	-	-	-	-
460	4:1	-	-	-	-
2300	20:1	2300/√3	36:1	20:1	12:1
4025	35:1	4025/√3	60:1	35:1	20:1
4600	40:1	4600/√3	72:1	40:1	24:1
6900	60:1	6900/√3	105:1	60:1	35:1
8050	70:1	8050/√3	120:1	70:1	40:1
11500	100:1	11500/√3	180:1	100:1	60:1
13800	120:1	13800/√3	210:1	120:1	70:1
23000	200:1	23000/√3	360:1	200:1	120:1

Fonte: GONÇALVES, 2012

2.2.5 Transformador de Potência

Os transformadores de potência são considerados os elementos mais importantes de uma subestação, devido a sua utilidade e ao seu custo. Sua função é passar energia elétrica de um circuito para outro transformando tensões e correntes em circuitos de corrente alternada, também modificando os valores das impedâncias de um circuito elétrico. O transformador conecta dois circuitos, eletricamente isolados e magneticamente acoplados através de um núcleo ferromagnético, por onde passa o fluxo magnético, gerado pela passagem de corrente nas espiras do lado primário do transformador. A variação do fluxo induz tensão e corrente no secundário do transformador em níveis diferentes ou até o mesmo do primário, a depender da relação de transformação. Eles são utilizados para elevar ou abaixar a tensão e corrente de um circuito, ou para uma instalação na rede de distribuição, isolando as duas partes, podendo não haver alteração no nível de tensão entre as partes acopladas.

Existem várias aplicações para um transformador e várias construções diferentes para eles, segundo Aprender Elétrica (2021), a ser escolhida de acordo com a utilização do transformador. Um transformador possui pelo menos dois enrolamentos, o primário onde se dá a entrada da potência fornecida para o equipamento e o secundário, que fornece a saída de potência do equipamento. O secundário pode comportar mais de um enrolamento sendo usado para sistemas auxiliares da subestação.

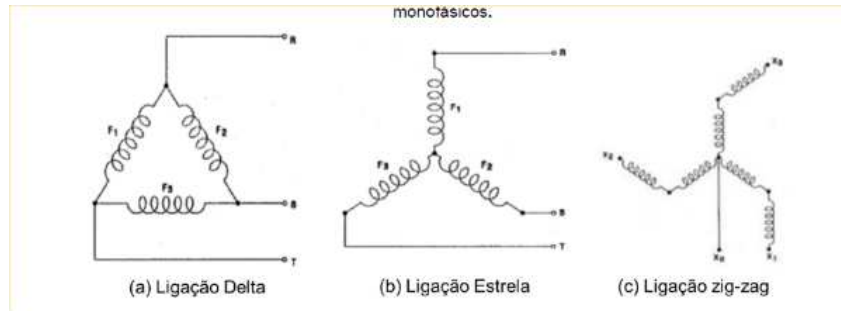
Existem também os autotransformadores, que não são isolados entre os circuitos primários e secundários, sendo acoplados eletricamente e magneticamente. Os autotransformadores são mais utilizados em aplicações de baixa tensão, devido ao seu tamanho e custo reduzidos.

Outro aspecto construtivo muito importante em alguns transformadores, segundo Aprender Elétrica (2021), é a segmentação dos enrolamentos, formados por *Taps* de comutação, que podem ser manuseados de forma automática ou manual, de acordo com a aplicação. A comutação dos taps possibilitam os ajustes das grandezas elétricas no secundário do transformador alterando a relação de transformação do equipamento. Eles são bastante utilizados em variações indesejadas do circuito de alimentação, e essas variações podem ser atenuadas pela comutação dos taps, para adequar o fornecimento aos padrões exigidos.

Os transformadores trifásicos, segundo Gonçalves (2012), podem ter diferentes tipos de ligações, no lado primário e no secundário. Estes podem ser ligados em delta, estrela ou zig-zag, como mostra a figura 9, e a combinação entre elas possibilita diferentes tensões disponíveis no secundário do transformador, além da possibilidade de um quarto condutor, o neutro. A ligação em estrela possibilita a adição de um neutro no sistema, que pode ou não ser aterrado, e dois valores de tensão disponíveis: a tensão entre fases e entre uma fase e um neutro. A ligação em delta fornece apenas os três condutores de fase para o sistema, possibilitando apenas um nível de tensão, porém diferentes níveis de corrente entre as

fases. Já a ligação em zig-zag, que lembra a ligação em estrela, porém seus enrolamentos são bipartidos e a ligação é feita por essas “metades” dos enrolamentos, defasadas, que acabam formando um novo enrolamento.

Figura 9 – Tipos de ligação de transformadores



Fonte: GONÇALVES, 2012

O projeto de dimensionamento de um transformador, segundo Aprender Elétrica (2021), deve-se levar em conta a tensão no circuito primário, de entrada, no secundário e outros circuitos, caso existam. O projetista também deverá levar em consideração a impedância percentual do transformador que influenciará nas perdas do transformador.

Outra aplicação para o transformador é de aterramento, que fornece um ponto de referência, de aterramento em sistemas conectados em delta.

Para um projeto ou análise de sistemas elétricos, os transformadores possuem algumas grandezas que são de grande importância. A primeira delas é a corrente nominal, que é obtida pela potência aparente e a tensão no barramento, por meio da equação 2:

$$I_N = \frac{S}{V \times \sqrt{3}} \quad (1)$$

Sendo:

- I_N (A) – Corrente nominal;
- S (VA) – Potência aparente;
- V (V) – Tensão entre fases

Além da corrente nominal, deve-se considerar a corrente transitória, gerada pelo transformador independente da sua aplicação. Conhecida como corrente de *inrush* ou de magnetização. Em transformadores a óleo e com isolamento em epóxi, que são limitados a uma potência de até 2 MVA, pode-se considerar a seguinte equação, segundo (CELG,2016):

$$I_{mag} = 8 \times I_N \quad (2)$$

- I_{mag} (A) – Corrente de magnetização ou *inrush*;

□ I_N (A) – Corrente nominal.

E caso a instalação possua mais de um transformador, a maior corrente de magnetização deve ser considerada, somada às correntes nominais dos outros transformadores, segundo (CELG,2016).

Outro tipo de corrente muito importante para sistemas com transformadores é a corrente máxima suportada pelo transformador. Esta é denominada de ponto ANSI e pode ser calculada tanto para fase e neutro, considerando um transformador estrela triângulo aterrado, como mostram as equações a seguir:

Para corrente de fase:

$$I_{ANSI} = \frac{100}{Z\%} \times I_N \quad (3)$$

Para corrente de neutro:

$$I_{N-ANSI} = 0,58 \times \frac{100}{Z\%} \times I_N \quad (4)$$

Em que:

- I_{ANSI} (A) – Ponto ANSI de fase;
- I_N (A) – Corrente nominal;
- $Z\%$ - Impedância percentual;
- I_{N-ANSI} (A) – Ponto ANSI de neutro.

Contudo, pode-se adotar a tabela 2 para que, de forma simplificada, se crie uma relação para lançar em diagramas de coordenação e seletividade.

Tabela 2 – Ponto ANSI e duração máxima por intervalo de impedância

Z(%)	Ponto ANSI (A)	Tempo máx. de duração (s)
Até 4	25 x I_n	2
Até 5	20 x I_n	3
Até 6	16,6 x I_n	4
Até 7	14,3 x I_n	5

Fonte: CEMIG, 2020

2.2.6 Barramentos

Os barramentos, são responsáveis por realizar a conexão dos equipamentos, dos condutores e interligar circuitos. Os barramentos podem ser rígidos ou flexíveis. Os barramentos

flexíveis são feitos de condutores maleáveis, geralmente pela união de cabos. Já os barramentos rígidos podem ter diversos formatos, como vergalhões de secção circular e maciço, ou tubulares, também de secção circular, barras chatas maciças ou em diferentes perfis, como U, V e C. Estes podem ser encontrados em cobre ou alumínio, podendo conter algum tipo de pintura ou isolamento.(LEITE, 2018)

Para o dimensionamento correto de um barramento, segundo Fonseca (2018), é necessário levar em consideração os esforços elétricos, mecânicos e térmicos que nele serão empregados e a corrente nominal de operação do barramento. A avaliação dos efeitos térmicos provocados no barramento pela corrente simétrica em determinado período, pode ser obtido através da equação 5:

$$A = K \times I_{cc} \times \sqrt{t} \quad (5)$$

Em que:

- A (mm^2) – área da seção transversal mínima do barramento;
- K – constante referente às características físicas do material utilizado, podendo ser 7 para o cobre ou 11,2 para o alumínio;
- I_{CC} (kA) – corrente de curto-circuito simétrica nominal;
- t (s) – tempo de circulação da corrente de curto-circuito

Os efeitos dinâmicos e a corrente de curto-circuito assimétrica, de forma simplificada, podem ser obtidos por meio das equações 6 e 7:

$$F_{barra} = \frac{0,0204 \times I_k^2 \times l}{d} \quad (6)$$

$$I_k = 2,5 \times I_{cc} \quad (7)$$

Sendo:

- F_{barra} (kgf) – É a força exercida na barra quando circula a corrente assimétrica;
- I_k (kA) – Corrente de curto-circuito assimétrica;
- L (cm) – Comprimento da barra;
- d (cm) – distância entre os condutores das fases.

Outro cálculo que deve ser feito, é do inercial e o conjugado de flexão da barra. Onde se diz que o conjugado de flexão máximo não pode passar de 3.000 kgf/cm^2 para barramentos de cobre.(LEITE, 2018)

$$W_b = \frac{a^2 \times e}{6000} \quad (8)$$

$$M_b = \frac{F_{barra} \times l}{12 \times W_b} \quad (9)$$

Em que:

- W_b (cm^3) – Momento de inércia da barra;
- a (cm) – É a altura da barra;
- e (cm) – É a espessura da barra;
- M_b (kgf/cm^2) – É o conjugado de flexão da barra;
- l (cm) – É o comprimento da barra.

2.2.7 Chave seccionadora

As chaves seccionadoras são um dos elementos do sistema de uma subestação. Elas são utilizadas para isolar e conectar partes do sistema, tanto para manutenção, quanto para apenas isolar por algum outro motivo. Por isso, elas possuem como princípio de funcionamento uma resistência à passagem de corrente muito baixa quando fechadas e isolação completa quando abertas, seja pelo ar ou por algum outro meio.

Existem três tipos principais de chaves: chaves seccionadoras, chaves de aterramento e chaves de aterramento rápido. As chaves seccionadoras são destinadas apenas a seccionar os sistemas, isolando ou ligando sistemas ou equipamentos. As chaves de aterramento e aterramento rápido são utilizadas para realizar o aterramento de pontos de um sistema, dando mais segurança para a operação do sistema que está aterrando. A chave de aterramento rápido tem o diferencial de fazer essas manobras mais rapidamente e podem ser utilizadas para provocar faltas intencionais e proteger alguns equipamento de sobretensões ou geradores de auto excitação (APRENDER ELÉTRICA, 2021).

Quando se usa uma chave seccionadora em um projeto, deve-se considerar a tensão nominal do sistema, a corrente nominal e a capacidade de interrupção dos elementos de proteção do sistema na ocorrência de uma falha. Assim, as especificações deverão ser semelhantes e baseadas nas do disjuntor, devendo pelo menos suportar as correntes e tensões nominais e de curto-circuito do disjuntor do sistema (APRENDER ELÉTRICA, 2021).

2.2.8 Muflas terminais

As muflas terminais, ilustradas na figura 10, são dispositivos usados para isolar um sistema. Estas são usadas para isolar cabos seccionados ou conectados a barramentos,

outros cabos ou equipamentos. As mufas singelas são utilizadas em cabos unipolares e para cabos multipolares, são utilizadas as mufas trifásicas. Elas podem ser classificadas quanto a sua aplicação, interna ou externa, as mufas internas são lisas e devem ser protegidas do tempo, já as mufas externas possuem saias isolantes e podem ser usadas expostas às intempéries, como sol, calor, chuva e poeira. O tamanho das mufas pode alterar de acordo com o nível de tensão no sistema e de acordo com as variações térmicas causadas pela circulação de corrente, sempre garantindo a isolamento elétrica e impedindo a ocorrência de arcos elétricos. (DA SILVA, 2013)

Figura 10 – Terminais mufas



Fonte: SAMPAIO, 2020

2.3 Sistema de Medição

A medição pode ser feita na baixa, média e alta tensão, a depender do fornecimento e regulação da empresa responsável pela subestação. Para a média tensão, geralmente as medidas são feitas no lado de alta do transformador, porém algumas distribuidoras permitem a medição no lado de baixa tensão do transformador do cliente, mas nesse caso é adicionado um fator de perda no transformador, para compensar parte das perdas no transformador. (CREDER, 2014)

Existe a medição por meio de um conjunto polimérico, contendo um TC e um TP, instalado em postes, possibilitando a medição na média tensão, ocupando menos espaço. (ENEL, 2021)

Esse tipo de medição viabiliza uma instalação mais simples e mais barata de uma subestação, que é basicamente um transformador em um poste, onde a proteção e o seccionamento são feitos por elos fusíveis em média tensão. Um ponto importante é

checar a viabilidade desse tipo de instalação junto a concessionária, pois não é adotada por todas e depende do regulamento interno da concessionária.

Os elementos de medição devem ser instalados em locais de fácil acesso nas subestações, orientados para a via pública e no limite da propriedade. Geralmente as caixas de medição e display são de responsabilidade de compra e instalação, dos clientes. Os cabos são fornecidos e instalados pela concessionária. (ENEL, 2021)

Por fim, a instalação dos medidores para acompanhamento particular são de responsabilidade do proprietário da instalação e para a medição de faturamento, a responsabilidade da instalação é da concessionária, porém os custos são repassados ao proprietário. (ANEEL, 2021)

2.4 Proteção

A finalidade dos sistemas de proteção é proteger e conservar os usuários, operadores e equipamentos do sistema elétrico, de forma precisa, confiável e visando a continuidade da operação e qualidade do sistema elétrico. O sistema de proteção de uma instalação elétrica é desenvolvido de acordo com a sua aplicação, o que torna esse um projeto muito específico para cada tipo de instalação. Na tabela 3 são indicados os elementos de proteção recomendados para o nível de potência instalada.

Para instalações elétricas que contém sistemas de geração distribuída, o PRODIST, em seu terceiro módulo, diz que pelo menos os seguintes equipamentos devem estar presentes:

Tabela 3 – Equipamentos de proteção

Equipamento	Potência instalada (kW)		
	<10	10 a 500	>500
Elemento de desconexão	Sim	Sim	Sim
Elemento de interrupção	Sim	Sim	Sim
Transformador de acoplamento	Não	Sim	Sim
Proteção de sub e sobretensão	Sim	Sim	Sim
Proteção de sub e sobrefrequência	Sim	Sim	Sim
Proteção contra desequilíbrios de corrente	Não	Não	Sim
Proteção contra desbalanço de tensão	Não	Não	Sim
Sobrecorrente direcional	Não	Não	Sim
Sobrecorrente com restrição de tensão	Não	Não	Sim

Fonte: PRODIST - MÓLUDO 3, 2017

Os elementos de desconexão tem função de seccionar o sistema para a isolação, de parte do dele e de equipamentos, viabilizando manutenções e reparos. O elemento de interrupção tem que ser um equipamento que atue no seccionamento do sistema com carga e de forma automática, com o objetivo de descontinuar correntes de curto-circuito e sobrecarga, por exemplo. Ambas as funções descritas acima podem ser encontradas em um

único equipamento, como disjuntores, chaves fusíveis ou religadores, mas é recomendado que essas funções estejam em equipamentos separados, visto que pode ser que algum desses necessite de algum reparo ou até substituição e assim uma das funções seria prejudicada.

Os transformadores de corrente e de potencial, em um projeto de proteção, são importantes para alterar os níveis de corrente e tensão para níveis que os relés consigam fazer a leitura de forma segura e viável, além de fazer a isolação galvânica do circuito de proteção e do circuito da subestação (APRENDER ELÉTRICA, 2021).

Os relés são dispositivos que monitoram, juntamente com os disjuntores, e atuam no sistema de proteção, identificando falhas ou situações anormais, possivelmente danosas, para a operação do sistema, isolando parte do sistema com o intuito de cessar esses eventos. Vale lembrar que atualmente existem relés do tipo eletromecânico, eletrônico ou microprocessados. Diante disso, os relés apresentados a seguir podem ser dispositivos dedicados somente a sua função ou caso sejam microprocessados, eles podem realizar todas as funções descritas abaixo no mesmo dispositivo.

2.4.1 Relé de sobrecorrente (50/51)

Os relés de sobrecorrente são dedicados a monitorar correntes que passam no sistema, verificando o valor medido com o valor parametrizado. Quando a corrente medida é menor que o valor parametrizado, o relé não atua, não envia sinal de *trip* para o disjuntor, caso contrário, ele envia esse sinal e o disjuntor atua fazendo a abertura do sistema (FILHO, 2011).

Esse tipo de relé pode ser classificado quanto a sua forma de atuação, que são: instantânea, temporizada com tempo definido e temporizada com tempo inverso. No caso do relé que atua de forma instantânea, assim que é detectada a corrente acima do valor parametrizado, o relé atua imediatamente, sendo a magnitude da corrente a única variável considerada. Já os relés temporizados, além da amplitude da corrente, também é considerado o tempo em que ela circula no sistema. Estes relés podem ser usados para a proteção de fases ou neutro e a numeração adotada para eles na tabela ANSI é 50F ou 50N, para a proteção instantânea de fase e neutro respectivamente, e 51F e 51N para a proteção temporizada de fase e neutro, respectivamente (FILHO, 2011).

O comportamento do relé de sobrecorrente temporizado com o tempo definido é baseado na quantidade de tempo que o sistema pode tolerar uma corrente acima de sua corrente padrão, é claro que em um certo nível de sobrecorrente. Já o relé de sobrecorrente de tempo inverso se comporta conforme a equação (10), onde o limiar de atuação se baseia na magnitude e tempo que a corrente de sobrecarga circula, levando em conta essas duas variáveis (FILHO, 2011).

$$T = \frac{K}{\left(\frac{I}{I_S}\right)^\alpha - 1} \times TMS \quad (10)$$

- T (s) – Tempo;
- I (A) – Corrente do circuito;
- I_s (A) – Corrente de sensibilização da proteção;
- TMS – Multiplicador de tempo, podendo ser adotado valores entre 0,1 e 2, de acordo com [Filho, 2011];
- K e α – são fatores relativos à inclinação das curvas.

As variáveis ‘K’ e ‘ α ’ são relacionados a inclinação da curva do relé, e podem ser classificados como mostra a tabela (4):

Tabela 4 – Valores definidos para cada tipo de curva de tempo inverso

Tipo de Curva	K	α
Normalmente inversa	0,14	0,02
Muito inversa	13,5	1
Extremamente inversa	80	2
Inversa longo	80	1

Fonte: FILHO, 2011

Além de outros fatores a serem considerados para essa função, deve-se considerar a corrente nominal e a sobrecarga admissível para a unidade temporizada, como mostra a equação (11). Já na unidade instantânea, usamos como base os valores de curto-circuito do barramento. Porém o ajuste pode partir da corrente de magnetização do transformador, como mostra a equação 12. (FILHO, 2011)

$$\frac{I_{Pnom} \times FC}{RTC} \leq I_{PickupTemp} \quad (11)$$

$$I_{PickupInst} = \frac{I_{INRUSH} \times 1,05}{RTC} \quad (12)$$

Em que:

- RTC – É a relação de transformação dos transformadores de corrente;
- FC – Fator de carga admitido;
- I_{Pnom} (A) – Corrente nominal primária;
- $I_{PickupTemp}$ (A) – Corrente para sensibilizar a proteção, referida ao secundário do TC;
- $I_{PickupInst}$ (A) – Corrente para sensibilizar a proteção, referida ao secundário do TC;

□ I_{INRUSH} (A) – Corrente de I_{INRUSH} (magnetização).

O ajuste para as unidades instantâneas e temporizadas no neutro, representadoas pela equação (13) seguem, sendo até um terço do ajuste da fase.

$$I_{Pickup} = \frac{I_{Pickup(fase)}}{3} \quad (13)$$

Em que:

□ I_{Pickup} (A) – Corrente ajustada para proteção de neutro, referida ao secundário do TC;

□ $I_{Pickup(fase)}$ (A) – Corrente para sensibilizar a proteção ajustada para proteção de fase, referida ao secundário do TC.

2.4.2 Relé direcional de sobrecorrente (67)

Um relé direcional proporciona maior seletividade e confiabilidade em um sistema de proteção, através da sensibilidade da direção que se deseja ler a corrente no sistema. Assim, são necessárias informações de corrente e tensão, para que o sentido possa ser identificado corretamente o sentido de atuação do relé. Esse tipo de relé é muito comum em sistemas com geração distribuída, onde há a alteração do sentido do fluxo de potência conforme o consumo e a geração (FILHO, 2011).

O funcionamento dos relés 67, é similar ao funcionamento dos relés de sobrecorrente (50/51), só que são orientados para um sentido de atuação e não em ambos os sentidos. Para que seja possível distinguir o sentido de atuação, é necessária uma grandeza de referência, podendo ser a tensão da fase, de sequência zero, para o neutro, ou tensões com um defasamento de 30° , 60° ou 90° da fase a ser protegida. Com uma tensão de referência de 90° , tem-se o seguinte diagrama:

No diagrama acima ficam claras as áreas de atuação do relé, na corrente fasorial de ajuste da função 67. A reta de limiar de operação marca a condição mínima para a atuação do relé, sempre após a corrente de ajuste e perpendicular a ela, como mostra a figura 11. Porém para verificar a atuação do relé se deve verificar a condição através da equação (14) a seguir:

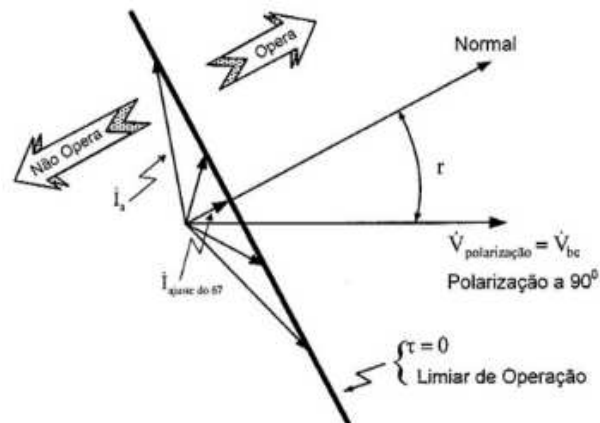
$$I_a \times \cos(r - \theta) \leq I_{ajuste} \quad (14)$$

Em que:

□ I_a (A) - É a corrente da fase A;

□ θ (Graus) – É o ângulo formado entre a corrente e a tensão de polarização da fase A;

Figura 11 – Diagrama fasorial relé 67



Fonte: FILHO, 2011

- I_{ajuste} (A) – É o módulo da corrente de ajuste;
- $R(^{\circ})$ – É o ângulo da corrente de ajuste.

Com o relé ajustado, é possível fazer a proteção de forma seletiva e confiável, considerando que a corrente de um eventual curto-circuito na instalação será diferente da corrente de um curto-circuito na rede de distribuição, uma vez que o gerador da instalação não tem a mesma capacidade de fornecimento da rede (FILHO, 2011).

2.4.3 Relé de subtensão (27)

A aplicação desse tipo de relé se dá para o controle de tensão em níveis adequados para o funcionamento dos equipamentos, este dispositivo monitora a tensão do sistema até valores abaixo do nominal, sendo possível realizar o ajuste para 90% em unidades temporizadas e até 80% em unidades instantâneas. A atuação temporizada segue a equação a seguir:

$$T = \frac{K}{\left(2 - \frac{V}{V_{aj}}\right)^a - 1} \times TMS \quad (15)$$

Em que:

- T (s) – Tempo;
- V (V) – Tensão do sistema;
- V_{aj} (V) – Tensão de ajuste da proteção;
- TMS – Multiplicador de tempo;
- k e a – Fatores referentes a inclinação da curva.

2.4.4 Relés de sobretensão (59)

O funcionamento desse tipo de relé, segundo Filho (2011), é bem similar ao do relé de subtensão, só que limitando os níveis superiores de tensão, que para unidades temporizadas são de 115% da tensão nominal e para unidades instantâneas são de 120% da tensão nominal. A operação temporizada segue a seguinte equação:

$$T = \frac{K}{\left(\frac{V}{V_{aj}}\right)^a - 1} \times TMS \quad (16)$$

Em que:

- T (s) – Tempo;
- V (V) – Tensão do sistema;
- V_{aj} (V) – Tensão de ajuste da proteção;
- TMS – Multiplicador de tempo;
- K e a – Fatores referentes a inclinação da curva.

2.4.5 Relé de frequência (81)

Os relés de frequência monitoram o sistema, visto que há uma grande variação entre carga e geração, o que no excesso de geração leva a um aumento da frequência, e na falta de geração ocasiona uma diminuição da frequência. Essa variação pode ocasionar problemas na distribuição de energia elétrica, causando danos a equipamentos ou até apagões. Esse tipo de relé atua quando a frequência se desvia dos valores normais por um determinado tempo ou magnitude (FILHO,2011).

2.5 Aterramento

Definimos aterramento, seguindo a definição da NBR 15751 de 2013, como uma ligação intencional entre uma parte elétrica condutora e a terra por meio de um condutor elétrico, tendo como finalidade a dispersão de correntes. Essa dispersão eventualmente isola partes não condutoras, mas que por ventura possam apresentar fuga de corrente ou eletricidade estática. Além de proteger o sistema para correntes indesejadas oriundas de descargas elétricas da atmosfera ou a chaveamento do próprio sistema, estes elementos de proteção são conhecidos como pára-raios e Dispositivo de Proteção contra Surtos (DPS) (NBR 15751, 2013).

É importante salientar que para o projeto deve-se levar em conta todas as correntes do sistema, dimensões físicas da instalação, pedologia do ambiente (principalmente as características físico-químicas). Outro fator importante é que após a dispersão de uma

corrente elevada no solo, devido a implicação de gradiente do solo, podem surgir fenômenos como a tensão de toque, que é a diferença potencial entre o equipamento e o solo, além da tensão que passo, sendo a diferença de potencial em diferentes pontos do solo.

Dessa forma as concessionárias de energia exigem o cumprimento de especificações técnicas para a aprovação dos projetos, devido a importância do subsistema. Para tanto a Enel, concessionária de energia da localidade do projeto, exige que a instalação de aterramento esteja de acordo com as NBR's 14039 e 13571. Ambas sendo responsáveis pelo dimensionamento, como quantidade de eletrodos, secção transversal mínima, comprimento do eletrodo, tamanho da área a ser abrangida e etc.

2.6 Geração fotovoltaica

Os sistemas de geração fotovoltaica estão ficando cada vez mais acessíveis e por sua vez mais comuns, devido a sua facilidade de instalação, investimento em tecnologias e políticas de subsídio, isenção de impostos e financiamentos. O grande benefício desse tipo de geração é a sua fonte, inesgotável, abundante e gratuita, o sol. A crescente popularização desse tipo de tecnologia e oportunidade, além de descentralizar a produção de energia, contribuem com o sistema de geração do país, que ainda não consegue suprir toda demanda do país, além de, claro, ajudar a diminuir os custos da energia elétrica (RN 482, 2012).

Como será tratado no documento, um sistema de minigeração distribuída, segundo a resolução normativa N^o 482, de 17 de abril de 2012, e demais revisões, sistemas de entre 75 e 5000 kVA, são considerados sistemas de minigeração distribuída.

Essa resolução garante a instalação de sistemas de geração fotovoltaica conectadas a rede de distribuição da concessionária da região, que permite que o usuário usufrua do sistema de compensação de energia, onde a energia ativa injetada na rede por unidade consumidora com micro ou minigeração distribuída é cedida à distribuidora local, em forma de empréstimo gratuito, e posteriormente é compensada com o consumo de energia elétrica ativa da unidade consumidora e de demais unidades beneficiárias de mesma titularidade e dentro da mesma área de concessão, também garantindo o autoconsumo remoto (RN 482, 2012).

2.6.1 Equipamentos de um sistema de geração fotovoltaica

Um sistema de geração fotovoltaica é composto basicamente por módulos fotovoltaicos, inversores de frequência e elementos de proteção CC e CA, além de cabos e conectores. Tais elementos serão brevemente descritos a seguir:

2.6.1.1 Módulos fotovoltaicos

Módulo fotovoltaico é um conjunto de células fotovoltaicas conectadas em arranjos para a produção de corrente e tensão em escala utilizável.

As células fotovoltaicas de Silícios de forma individual possuem uma baixa tensão de saída na ordem de 0,5 a 0,8 V. Logo, para obter uma tensão de operação satisfatória é necessário a conexão das células em série, resultando na soma das tensões individuais de cada célula, porém como as células são muito frágeis é necessário a construção de placas para sua proteção resultando em um módulo fotovoltaico demonstrado na figura (12) (PINHO, 2014).

Figura 12 – Painel fotovoltaico



Fonte: PORTAL SOLAR, 2023

As características elétricas dos módulos, segundo Pinho (2014), são obtidas através de ensaios *Standart Test Condition* (STC) e *Normal Operation Cell Temperature* (NOTC), onde estes são realizados em condições específicas de irradiância, temperatura e pressão, para determinação dos principais parâmetros elétricos, sendo eles:

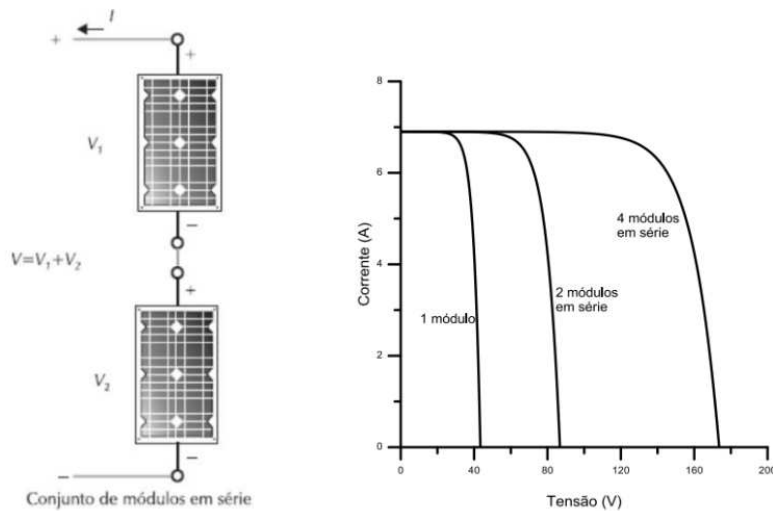
- ❑ Corrente de Curto-Circuito (I_{sc})
- ❑ Tensão de Circuito-Aberto (V_{oc})
- ❑ Potencia máxima (P_m)
- ❑ Corrente de potência máxima (I_{mp})
- ❑ Tensão de potência máxima (V_{mp})

Em termos de projeto, os módulos fotovoltaicos são ligados entre si, com a finalidade de gerar um aumento na capacidade elétrica, logo estes podem ser conectados através de ligação em série ou em paralelo, segundo (PINHO, 2014).

Os módulos conectados em série tem a denominação de *string*. Nesta configuração as tensões dos modulos são somadas e a corrente é limitada pela célula de menor corrente. O modelo da ligação *string* é demonstrado na figura 13.

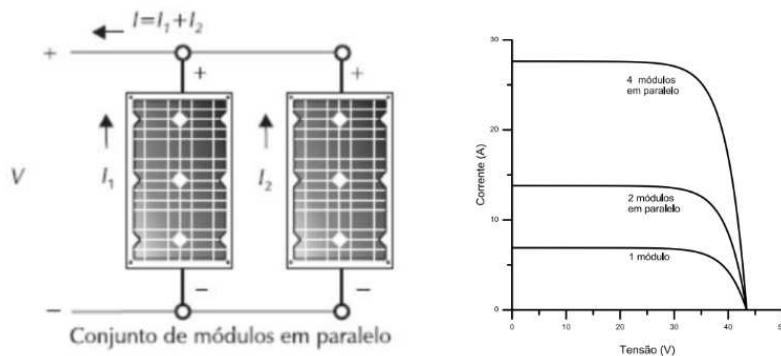
Para a conexão em paralelo ocorre a soma das correntes e a tensão é mantida constante, este modelo de ligação é representado pela figura 14.

Figura 13 – Módulos conectados em série



Fonte: PINHO, 2014

Figura 14 – Módulos conectados em paralelo



Fonte: PINHO, 2014

2.6.1.2 Caixa de conexão

A caixa de conexão do módulo geralmente é encontrada na parte posterior do mesmo, nesta caixa é alojado os diodos de desvio (*by-pass*), que tem como função evitar a formação de pontos quentes no módulo, esta tem a função de conectar os módulos fotovoltaicos, na figura 15, é possível observar uma caixa de conexão de um módulo de 60 células, onde cada diodo de desvio está conectado a 20 células em séries. (PINHO,2104)

2.6.1.3 Inversor

Os inversores são aparelhos responsáveis por realizar a conversão do sinal Corrente Contínua (CC) do conjunto de módulos fotovoltaicos em um sinal elétrico Corrente Al-

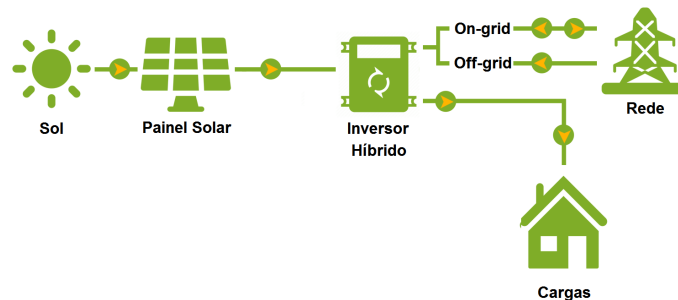
Figura 15 – Caixa de conexão



Fonte: PINHO, 2014

ternada (CA) da linha de distribuição da concessionária de energia, fazendo os ajustes de frequência e tensão de saída. A representação do sistema conectado a rede de distribuição é mostrado na figura 16 e os tipos diferentes de inversores são apresentados na figura 17.

Figura 16 – Fluxograma ligação da rede



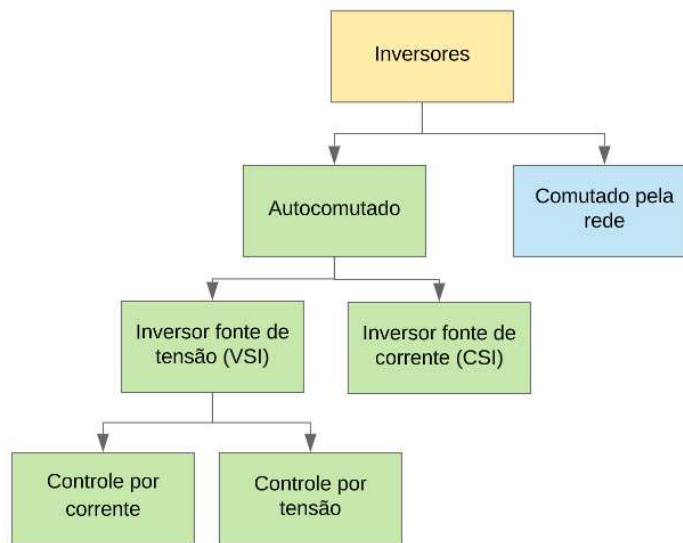
Fonte: ENERGY SHOP, 2023

2.6.2 Marco Legal

A Lei N^o 14.300, “Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS); altera as Leis n^{os} 10.848, de 15 de março de 2004, e 9.427, de 26 de dezembro de 1996; e dá outras providências.” (BRASIL, 2022)

No dia 6 de janeiro de 2022, foi sancionada a lei de número 14.300, que com dois vetos, um sendo a possibilidade de construção de inúmeras usinas de micro e minigeração em reservatórios ou qualquer superfície de lâmina de água em hidrelétricas. O segundo veto foi na tentativa de enquadrar os projetos de geração distribuída em programas como inclusão em fundos de investimentos, que geram créditos aos investidores do projeto. Apesar de que os vetos ainda serão revisados, a lei já está em vigor.

Figura 17 – Fluxograma inversores



Fonte: Autor

A lei do marco legal da microgeração não resolução revoga a normativa 482 de 2012, porém por ser de maior importância a RN, ela sobrepõe todas as disposições na lei que vão em desacordo com a lei, como a classificação de minigeração distribuída fotovoltaica de até 5 MVA para 3 MVA, englobando todo tipo de geração de energia elétrica proveniente de fontes não controladas pelo ONS (Operador Nacional do Sistema), onde a energia produzida é injetada diretamente na rede, por meio do seu consumo primário.

Outra mudança significativa no sistema de compensação de créditos foi que antes do marco, o consumidor conectado a baixa tensão, além de pagar a taxa mínima de disponibilidade, usava a sua geração para abater na fatura todo o consumo do mês, ou seja, caso a sua geração fosse equivalente ao seu consumo, sua fatura de energia seria zerada, porém ainda pagava a taxa mínima de disponibilidade para pagar, gerando uma dupla taxação. Com a nova lei em vigor, o consumidor abate o seu consumo subtraído da taxa de disponibilidade, que é convertida em crédito.

Metodologia

Este trabalho foi realizado em forma de um estudo de caso em uma instalação de um hotel, onde foram coletados alguns dados em campo, outros estimados com base no referencial teórico e outros obtidos em projetos de terceiros.

Como exposto anteriormente, o trabalho irá tratar do projeto de uma subestação elétrica de uma instalação de média tensão em funcionamento conjunto com um sistema de geração fotovoltaico na configuração de autoconsumo remoto. Dando-se a necessidade de contextualização sobre subestações, painéis fotovoltaicos, geradores e a conexão destes subsistemas para um funcionamento eficiente e seguro dos sistemas de medição, proteção e aterramento. Destaca-se que o foco deste trabalho é no projeto da subestação elétrica de média tensão e seus equipamentos elétricos (transformador, gerador, para-raios, chaves.), mas sendo necessária uma apresentação/contextualização do projeto fotovoltaico.

Devido à impossibilidade de obtenção dos dados da concessionária em tempo hábil, foi necessário estudar, estimar e simular a instalação, a fim de se obter todos os parâmetros iniciais necessários para o projeto.

3.1 Projeto da subestação

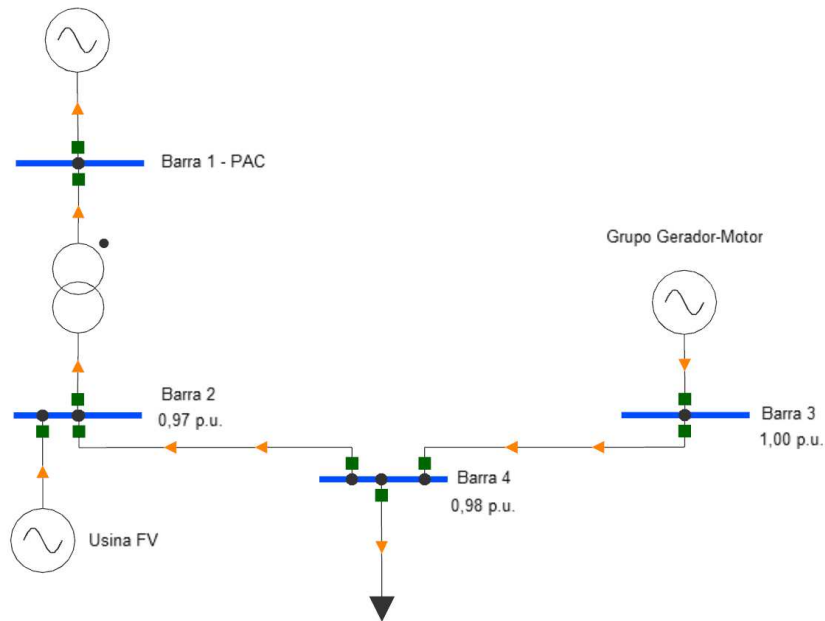
Primeiramente fez-se um estudo em campo, para coleta dos dados dos equipamentos existentes na instalação, como os do transformador e os do grupo gerador a diesel.

Devido a falta de acesso ao transformador, que fica no alto de um poste de distribuição de energia, foi possível obter apenas a sua potência aparente, então foram feitos estudos para estimar dados de impedância, tipo de conexão e defasagem.

O grupo gerador, por se tratar de um gerador de pequeno porte, não fornecia dados de placa das impedâncias da máquina, então essas também foram estimadas com base no seguinte material.

Após a obtenção de todos os dados necessários, foi escolhido o software PSP-UFU para realizar a simulação, figura 18, e obter outros dados necessários.

Figura 18 – Fluxograma sistema elétrico de potência simulado no PSP-UFU com destaque ao resultado do fluxo de potência



Fonte: Autor

3.1.1 Projeto de proteção

Para o projeto de proteção, devido a demora no fornecimento dos dados de curto-circuito na entrada do transformador da instalação, utilizou-se dos dados obtidos na simulação citada no item acima, onde foi possível obter as corrente de curto-circuito no transformador e no grupo gerador a diesel. A partir da obtenção dos dados pela simulação, foi elaborado o projeto de proteção da subestação. Lembrando que para o transformador da instalação, que tem contato com a rede de distribuição, que já possui o seu esquema de proteção, vê-se a necessidade de coordenação da proteção do transformador com o elo fusível na rede, que na caso dessa instalação é o fusível 8K. Essa coordenação é necessária para que o elo fusível não se rompa sem necessidade.

3.2 Projeto fotovoltaico

A instalação comercial avlo deste estudo foi recentemente munida de uma usina fotovoltaica, de microgeração, na modalidade de autocosumo remoto com compensação de créditos gerados. O projeto teve como potência instalada em painéis, 89,925 kW e potência total instalada de inversores de 60,00 kWp. Foram instaladas 165 painéis da marca CANADIAN, modelo CS6W-545MS, com capacidade de geração de 545 Wp e um inversor de frequência SOLIS - GROWATT do modelo MAC60KTL3-x LV, com potência de pico AC de 60 kWp. O diagrama unifilar do projeto se encontra no Anexo A.

Em posse dessas informações pode-se fazer o projeto da subestação e da proteção de seus itens.

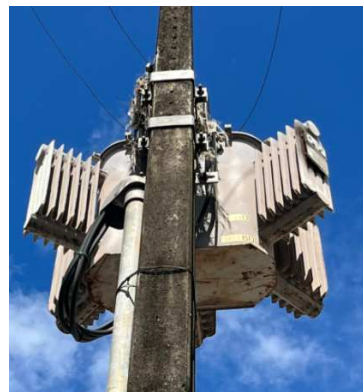
Projeto e Resultados

Neste tópico serão apresentados os resultados de um estudo de caso para uma subestação de energia elétrica instalada no estado de Goiás, que atende um hotel na cidade de Catalão, onde além do transformador, tem-se um grupo gerador a diesel, que fornece energia para a instalação em horário de pico e faltas. Além da subestação, também será instalada uma unidade de geração fotovoltaica com capacidade instalada de 157,08 kWp, na modalidade de compensação, porém o projeto será fornecido por uma empresa terceira e será instalada de forma que não tenha impacto nos estudos e projetos de proteção dos itens da subestação.

4.1 Simulação do circuito da subestação

Primeiramente foi feita uma visita em campo para coleta das informações disponíveis na instalação, o primeiro item a ser analisado foi o transformador.

Figura 19 – Transformador



Fonte: Autor

Os únicos dados disponíveis com facilidade e segurança foram a sua potência aparente, níveis de tensão no primário e secundário além da análise visual, onde se pode constatar

que se trata de um transformador, mostrado na figura 19, resfriado a óleo e adotando sua conexão como delta estrela aterrado.

Através de De Souza (2021), tem-se a corrente presumida na saída do transformador e através desses dados chega-se a uma impedância percentual de 5,2%, sendo possível obter as impedâncias de sequência positiva, negativa e zero, no transformador:

$$S_b = 1 \text{ MVA} \quad (17)$$

$$Z_{b-380V} = \frac{380^2}{1000000} = 0,144 \ \Omega \quad (18)$$

$$X_{tr1} = X_{tr2} = X_{tr0} = \frac{1}{0,15} \times 0,052 = 0,346 \text{ p.u.} \quad (19)$$

sendo os parâmetros adotados, apresentados na figura 20.

Figura 20 – Parâmetros adotados na simulação do transformador

Fonte: Autor

Para o gerador, também foram inicialmente utilizados os dados de placa disponíveis, como mostram as imagens 21 e 22.

Tabela 5 – Dados de placa do gerador

Marca	Modelo	Potência (kVA)	Tensão (V)	Corrente (A)	Frequência (Hz)	Rotação (RPM)
Cramaco	G2R	150	380	227	60	1800

Fonte: Autor

Figura 21 – Dados de placa do gerador



Fonte: Autor

Figura 22 – Dados de placa do gerador



Fonte: Autor

Com o fator de potência do equipamento foi possível calcular as potências ativas e reativas do gerador. Também foram estimados os dados de reatância subtransitória de eixo na sequência positiva, negativa e zero, através de Kimbark (1959), grifados na imagem 23.

Em seguida as dimensões foram convertidas para o sistema por unidade com os dados de base específicos, como é mostrado abaixo:

$$S_b = 1MVA \quad (20)$$

$$Z_{b-380V} = \frac{380^2}{1000000} = 0,144 \Omega \quad (21)$$

$$X_{g1} = X_{g2} = \frac{1}{0,15} \times 0,07 = 0,46\bar{6} p.u. \quad (22)$$

$$X_{g0} = \frac{1}{0,15} \times 0,01 = 0,06\bar{6} p.u. \quad (23)$$

Em posse destes dados, foi possível parametrizar o gerador corretamente para a simulação do sistema, como mostra a figura 24 e foi parametrizado a sua situação para a falta, na figura 25.

Figura 23 – Constantes típicas de máquinas síncronas

Table 6.1. Typical Synchronous Machine Constants

	Turbo-generators (solid rotor)			Water-Wheel Generators (with dampers)†			Synchronous Condensers			Synchronous Motors (general purpose)		
	Low	Avg.	High	Low	Avg.	High	Low	Avg.	High	Low	Avg.	High
Reactances in pu												
x_d	0.95	1.10	1.45	0.60	1.15	1.45	1.50	1.80	2.20	0.80	1.20	1.50
x_q	0.92	1.08	1.42	0.40	0.75	1.00	0.95	1.15	1.40	0.60	0.90	1.10
x_d'	0.12	0.23	0.28	0.20	0.37	0.50‡	0.30	0.40	0.60	0.25	0.35	0.45
x_q'	0.12	0.23	0.28	0.40	0.75	1.00	0.95	1.15	1.40	0.60	0.90	1.10
x_d''	0.07	0.12	0.17	0.13	0.24	0.35	0.18	0.25	0.38	0.20	0.30	0.40
x_q''	0.10	0.15	0.20	0.23	0.34	0.45	0.23	0.30	0.43	0.30	0.40	0.50
x_p	0.07	0.14	0.21	0.17	0.32	0.40	0.23	0.34	0.45			
x_2	0.07	0.12	0.17	0.13	0.24	0.35	0.17	0.24	0.37	0.25	0.35	0.45
x_0^*	0.01		0.10	0.02		0.21	0.03		0.15	0.04		0.27
Resistances in pu												
r_a (dc)	0.0015		0.005	0.003		0.020	0.002		0.015			
r (ac)	0.003		0.008	0.003		0.015	0.004		0.010			
r_2	0.025		0.045	0.012		0.200	0.025		0.070			
Time constants in seconds												
T_{do}	2.8	5.6	9.2	1.5	5.6	9.5	6.0	9.0	11.5			
T_d'	0.4	1.1	1.8	0.5	1.8	3.3	1.2	2.0	2.8			
$T_d'' = T_q''$	0.02	0.035	0.05	0.01	0.035	0.05	0.02	0.035	0.05			
T_a	0.04	0.16	0.35	0.03	0.15	0.25	0.1	0.17	0.3			

Source: Kimbark [19]. Used with permission of the publisher.
 x_0^* varies from about 0.15 to 0.60 of x_d'' , depending upon winding pitch.
 †For water-wheel generators without damper windings, x_0 is as listed and
 $x_d'' = 0.85x_d'$, $x_q'' = x_q' - x_q$, $x_2 = (x_d' + x_q)/2$
 ‡For curves showing the normal value of x_d' of water-wheel-driven generators as a function of kilovolt-ampere rating and speed, see [50].

Fonte: KIMBARK, 1956

Figura 24 – Dados gerais do transformador

Fonte: Autor

4.1.1 Cabos para conexão do sistema

O cabeamento da subestação foi dividido em duas linhas de transmissão de energia, sendo uma do barramento do secundário do transformador ao barramento de carga e a outra metade do barramento de carga até o barramento do grupo gerador. Para estimar o

Figura 25 – Dados de falta do gerador

The image shows a software dialog box titled 'Gerador' with a close button (X) in the top right corner. It has two tabs: 'Geral' and 'Falta', with 'Falta' selected. The dialog is divided into several sections for inputting fault data:

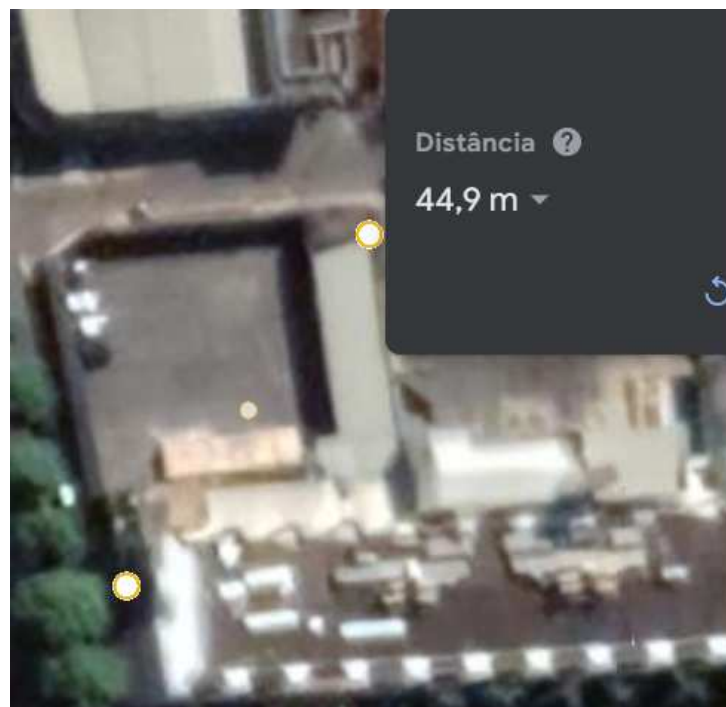
- Impedâncias de sequência (p.u.):**
 - Resistência positiva (R_1): 0,0
 - Reatância positiva (X_1): 0,4666667
 - Resistência negativa (R_2): 0,0
 - Reatância negativa (X_2): 0,4666667
 - Resistência zero (R_0): 0,0
 - Reatância zero (X_0): 0,0666667
- Resistência de aterramento (p.u.):** 0,0
- Reatância de aterramento (p.u.):** 0,0
- Neutro aterrado

At the bottom, there are three buttons: 'Estabilidade', 'OK', and 'Cancelar'.

Fonte: Autor

comprimento de cada um dos trechos, foi medida a distância aproximada do transformador ao grupo gerador pela ferramenta *Google Earth*, como mostrado na figura 26.

Figura 26 – Imagem de satélite das posições aproximadas do transformador e do grupo gerador.



Fonte: Autor

Como é possível observar, a distância em linha reta dos dois elementos é de aproximadamente 45 metros, porém, foi adicionado 20% a mais no comprimento dos cabos, considerando curvas e obstáculos desviados na instalação, totalizando 54 metros no total. Como o trecho foi dividido em duas partes, como citado anteriormente, cada trecho ficou com um comprimento de 27 metros. Considerando a corrente nominal do gerador, igual a do secundário do transformador iguais a 227 A (esses dados serão afirmados através das demonstrações a seguir), foi escolhido um cabo com 4 condutores de secção transversal de 70 mm^2 e um condutor terra de 35 mm^2 . Tais parâmetros foram escolhidos de acordo com a corrente nominal dos equipamentos, que na figura 27, se encontram na segunda coluna. Localizando-se o maior valor imediatamente superior ao da corrente nominal, foram escolhidos os valores acima.

Figura 27 – Secção nominal dos condutores

Seção Nominal mm ²	Métodos de Referência definidos na tabela 11						
	Cabos Multipolares		Cabos Unipolares				
	Dois condutores carregados	Três condutores carregados	Dois condutores carregados, justapostos	Três condutores carregados, em triângulo	Três condutores carregados, no mesmo plano		
	E	E	F	F	Justapostos	Espaçados	
				F	G	G	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Cobre							
0,5	13	12	13	10	10	15	12
0,75	17	15	17	13	14	19	16
1	21	18	21	16	17	23	19
1,5	26	23	27	21	22	30	25
2,5	36	32	37	29	30	41	35
4	49	42	50	40	42	56	48
6	63	54	65	53	55	73	63
10	86	75	90	74	77	101	88
16	115	100	121	101	105	137	120
25	149	127	161	135	141	182	161
35	185	158	200	169	176	226	201
50	225	192	242	207	216	275	246
70	289	246	310	268	279	353	318
95	352	298	377	328	342	430	389
120	410	346	437	383	400	500	454
150	473	399	504	444	464	577	527
185	542	456	575	510	533	661	605
240	641	538	679	607	634	781	719
300	741	621	783	703	736	902	833
400	892	745	940	823	868	1085	1008
500	1030	859	1083	946	998	1253	1169
630	1196	995	1254	1088	1151	1454	1362
800	1396	1159	1460	1252	1328	1696	1595
1000	1613	1336	1683	1420	1511	1958	1849

Fonte: NAMBEI, 2022

Após a escolha da área da seção transversal do cabo, de acordo com a corrente nominal dos equipamentos, foram coletados os dados de resistência e reatância dos condutores, mostrados na figura 28 e parametrizados dentro da ferramenta de simulação como mostram as figuras 29, 30, 31 e 32.

Figura 28 – Resistencia e reatancia dos condutores

TABELA B – RESISTÊNCIAS ELÉTRICAS E REATÂNCIAS INDUTIVAS DE FIOS E CABOS ISOLADOS EM PVC, HEPR E XLPE AO AR LIVRE (VALORES EM Ω / KM)											
Seção (mm ²)	Rcc (A)	Condutores Isolados – Cabos Unipolares ao Ar Livre (B)									
		Circuitos FF / NN									
		S = de		S = 2 de		S = 10 cm		S = 20 cm		Trifólio	
Rca	XL	Rca	XL	Rca	XL	Rca	XL	Rca	XL		
1.5	12.1	14.48	0.16	14.48	0.21	14.48	0.39	14.48	0.44	14.48	0.16
2.5	7.41	8.87	0.15	8.87	0.2	8.87	0.37	8.87	0.42	8.87	0.15
4	4.61	5.52	0.14	5.52	0.2	5.52	0.35	5.52	0.40	5.52	0.14
6	3.08	3.69	0.13	3.69	0.19	3.69	0.33	3.69	0.39	3.69	0.14
10	1.83	2.19	0.13	2.19	0.18	2.19	0.32	2.19	0.37	2.19	0.13
16	1.15	1.38	0.12	1.38	0.17	1.38	0.30	1.38	0.35	1.38	0.12
25	0.73	0.87	0.12	0.87	0.17	0.87	0.28	0.87	0.34	0.87	0.12
35	0.52	0.63	0.11	0.63	0.17	0.63	0.27	0.63	0.32	0.63	0.11
50	0.39	0.46	0.11	0.46	0.16	0.46	0.26	0.46	0.31	0.46	0.11
70	0.27	0.32	0.10	0.32	0.16	0.32	0.25	0.32	0.30	0.32	0.10
95	0.19	0.23	0.10	0.23	0.16	0.23	0.24	0.23	0.29	0.23	0.10
120	0.15	0.19	0.10	0.18	0.15	0.18	0.23	0.19	0.28	0.19	0.10
150	0.12	0.15	0.10	0.15	0.15	0.15	0.22	0.15	0.27	0.15	0.10
185	0.099	0.12	0.10	0.12	0.15	0.12	0.21	0.12	0.26	0.12	0.10
240	0.075	0.09	0.10	0.09	0.15	0.09	0.20	0.09	0.25	0.09	0.10
300	0.060	0.08	0.10	0.07	0.15	0.07	0.19	0.08	0.24	0.08	0.10
400	0.047	0.06	0.10	0.06	0.15	0.06	0.18	0.06	0.23	0.06	0.10
500	0.037	0.05	0.10	0.05	0.15	0.05	0.17	0.05	0.23	0.05	0.10
630	0.028	0.04	0.09	0.04	0.15	0.04	0.16	0.04	0.22	0.04	0.09
800	0.022	0.04	0.09	0.03	0.14	0.03	0.15	0.04	0.20	0.04	0.09
1000	0.018	0.03	0.09	0.03	0.14	0.03	0.14	0.03	0.19	0.03	0.09

Fonte: NAMBEI, 2022

Após a obtenção dos dados de impedância por quilômetro, foram feitas as conversões para p.u. baseadas nas unidades de base do sistema, e encontradas nas sequências positiva, negativa e zero, demonstrados a seguir. Lembrando que os valores de S_b e Z_{b-380V} foram demonstrados nas equações (17) e (18) e que o comprimento do trecho do cabo foi adicionado ao cálculo:

$$X_{LT1} = X_{LT2} = \frac{0,03 \times 0,027}{0,144} = 0,0056 \text{ p.u.} \quad (24)$$

$$X_{LT0} = 2,5 \times X_{LT1} = 0,140 \text{ p.u.} \quad (25)$$

$$R_{LT1} = R_{LT2} = \frac{0,96 \times 0,027}{0,144} = 0,1795 \text{ p.u.} \quad (26)$$

$$X_{LT0} = 2,5 \times X_{LT1} = 0,448 \text{ p.u.} \quad (27)$$

Sendo que esses parâmetros serão adotados em ambos os trechos de transmissão da subestação, a configuração das linhas foram:

Figura 29 – Parâmetros gerais da linha 1

Nome: Linha 1

Tensão nominal: 380,0 V

Potência nominal: 150,0 kVA

Resistência (R): 0,1795 p.u.

Reatância indutiva (Xl): 0,005609 p.u.

Susceptância capacitiva (B): 0,0 p.u.

Comprimento da linha: 0,027 km

Utilizar a potência nominal como base

Estabilidade OK Cancelar

Fonte: Autor

Figura 30 – Parâmetros de falta para a linha 1

Impedâncias de sequência zero (p.u.)

Resistência (R_0): 0,4488

Reatância indutiva (X_0): 0,144

Susceptância capacitiva (B_0): 0,0

Estabilidade OK Cancelar

Fonte: Autor

A rede de distribuição foi nomeada como “gerador infinito” no software PSP-UFU, porém foi estipulada, através de, De Souza (2021), o seu valor de potência de curto-circuito trifásico igual a $S_{cc-3\phi} = 2,35 \text{ MVA}$ e de curto-circuito monofásico igual a $S_{cc-1\phi} = 0,95 \text{ MVA}$. Tais valores adotados são muito maiores do que a do grupo gerador e muito maior que a carga demandada pelo consumidor. Estes são representados nas figuras 33 e 34.

Por fim, a carga foi parametrizada de acordo com a demanda contratada pelo estabe-

Figura 31 – Parâmetros gerais da linha 2

Linha

Geral **Falta**

Nome
Linha 2

Tensão nominal
380,0 V

Potência nominal
150,0 kVA

Resistência (R)
0,1795 p.u.

Reatância indutiva (Xl)
0,005609 p.u.

Susceptância capacitiva (B)
0,0 p.u.

Comprimento da linha
0,027 km

Utilizar a potência nominal como base

Estabilidade OK Cancelar

Fonte: Autor

Figura 32 – Parâmetros de falta para a linha 2

Linha

Geral **Falta**

Impedâncias de sequência zero (p.u.)

Resistência (R₀)
0,4488

Reatância indutiva (X₀)
0,14024

Susceptância capacitiva (B₀)
0,0

Estabilidade OK Cancelar

Fonte: Autor

lecimento, que na tarifa verde, possui uma demanda contratada de 85 kW, como mostra a figura 35, demanda e dados de medição da tarifa de energia do cliente e portanto a carga foi parametrizada, como mostra a figura 36:

Após a parametrização de todos os elementos da instalação, foi feita a simulação do fluxo de carga e de curto-circuito na barra 2, ligada ao secundário do transformador e na barra 3 ligada no grupo gerador.

Devido a atuação do grupo gerador, pode-se ver, na figura 37, que o fluxo de potência

Figura 33 – Parâmetros gerais da representação da rede de distribuição

Gerador

Gerador

Nome
Gerador Infinito

Potência nominal
100,0 MVA

Potência ativa
-0,0310441134947 MW

Potência reativa
0,077424307391 MVAr

Potência reativa máx
9999,0 MVAr

Potência reativa min
-9999,0 MVAr

Utilizar potência nominal da máquina como base

Estabilidade OK Cancelar

Fonte: Autor

Figura 34 – Parâmetros gerais de falta da representação da rede de distribuição

Gerador

Gerador

Impedâncias de sequência (p.u.)

Resistência positiva (R_1)
0,3

Reatância positiva (X_1)
0,3

Resistência negativa (R_2)
0,3

Reatância negativa (X_2)
0,3

Resistência zero (R_0)
0,75

Reatância zero (X_0)
0,75

Resistência de aterramento (p.u.)
0,0

Reatância de aterramento (p.u.)
0,0

Neutro aterrado

Estabilidade OK Cancelar

Fonte: Autor

caminha em direção a rede de distribuição, injetando potência na rede de distribuição, assim como a unidade geradora fotovoltaica.

Já para o estudo de proteção, os dados mais importantes são as correntes de curto-circuito, que determinarão a coordenação e a escolha dos equipamentos de proteção.

Figura 35 – Dados de medição

DADOS DA MEDIÇÃO					
MÊS DE REFERÊNCIA	01/2022			DEMANDA	85
DATA DA LEITURA ATUAL	01/01/2022	Nº MEDIDOR KWh/KW			
DATA DA LEITURA ANTERIOR	01/12/2021	Nº MEDIDOR KVarh/Qh			
DATA DA PRÓXIMA LEITURA	01/02/2022	Nº MEDIDOR ELETRÔNICO	11958008-0	NÚMERO	CUSD C 6192/2018
DATA DA APRESENTAÇÃO	11/01/2022	FM	140	TIPO	CUSD CATIVO
NÚMERO DE DIAS	31	IND PERDA	0%	VALIDADE	08/04/2022
MÉDIA/DIAS	654,2652				

Fonte: Autor

Figura 36 – Parametrização da carga da instalação

The image shows a software window titled "Carga" with a close button (X) in the top right corner. The window has two tabs: "Geral" and "Estabilidade", with "Estabilidade" currently selected. Inside the window, there is a text field for "Nome" containing "Carga 1". Below this, there are two input fields: "Potência ativa" with the value "85,0" and a unit dropdown set to "kW", and "Potência reativa" with the value "51,0" and a unit dropdown set to "kVAr". Underneath, there is a dropdown menu for "Tipo de carga (fluxo de carga)" with "Constant power" selected. At the bottom of the window, there are three buttons: "Chaveamento", "OK", and "Cancelar".

Fonte: Autor

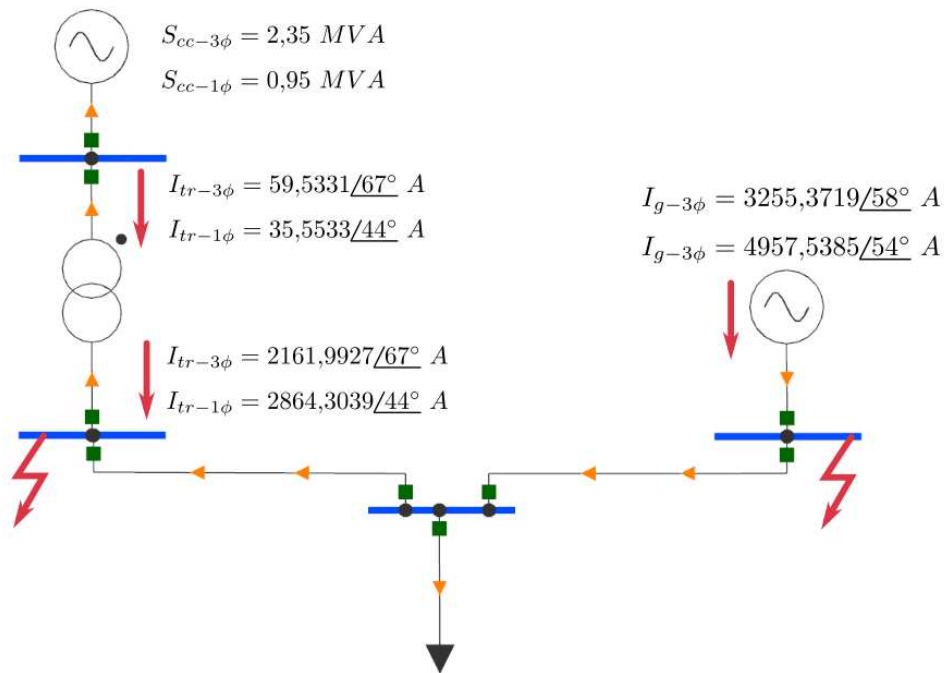
As correntes de curto-circuito foram medidas provocando um curto franco na barra de interesse, no caso do transformador, o curto foi provocado no lado de baixa, no secundário do transformador e foram obtidos os seguintes dados:

- $I_{cc1\phi} = 2161,992/\underline{67^\circ}$ A
- $I_{cc2\phi} = 1917,590/\underline{5^\circ}$ A
- $I_{cc3\phi} = 2864,304/\underline{44^\circ}$ A

Para o grupo gerador, foi provocado um curto-circuito na barra de saída de sua potência, e os dados obtidos foram os seguintes:

- $I_{cc3\phi} = 3255,371/\underline{58^\circ}$ A
- $I_{cc2\phi} = 2820,146/\underline{28^\circ}$ A
- $I_{cc1\phi} = 4957,538/\underline{54^\circ}$ A

Figura 37 – Simulação no PSP-UFU com destaque às correntes de falta trifásicas e monofásicas calculadas.



Fonte: Autor

Em posse dos dados acima, foi possível realizar o estudo da proteção do transformador e do gerador da subestação.

4.2 Proteção do Transformador

O transformador particular que está instalado no poste de distribuição é um trifásico de 150 kVA a óleo, 60 Hz, delta-estrela aterrado e com uma impedância percentual de 5,3%.

O relé escolhido para fazer parte do sistema de proteção da subestação foi o relé SIEMENS, modelo 7SR5111-1AA11-0AA0, mostrado na figura 38, cujas funções atendem a demanda da subestação, além de conseguir trabalhar de acordo com os níveis de corrente e tensão empregados. Informações disponíveis no Anexo B.

Pode-se calcular a corrente nominal no enrolamento secundário, conforme a equação abaixo:

$$I_n \text{ transformador} = \frac{150 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 380} = 227,90 \text{ A} \quad (28)$$

A título de coordenação da proteção, que será realizada posteriormente nesse estudo, conforme a tabela abaixo, pode-se estimar o ponto ANSI do transformador:

$$F_s = 20 - \text{Fator de sobrecorrente};$$

Figura 38 – Relé 7SR5111-1AA11-0AA0



Fonte: SIEMENS, 2023

$k_p = 1,3$ - Fator de sobrecarga.

Cálculo do RTC:

Para corrente nominal:

$$I_{tc} > I_n \quad (29)$$

Logo, $I_{tc} > 227,90$ ou $250 \cdot 5$ (50:1). (FILHO, 2011)

Para a corrente de curto-circuito I_{cc} :

$$I_{tc} > \frac{I_{cc1\phi}}{FS} \rightarrow I_{tc} > \frac{2864,30}{20} = 143,22 \quad (30)$$

Concluindo então que a corrente nominal é maior que a corrente de curto-circuito.

Cálculo para RTP:

$$RTP = \frac{380/\sqrt{3}}{115/\sqrt{3}} = 3,30 \quad (31)$$

4.2.1 Unidade de sobrecorrente temporizada de fase (51)

Esta função de proteção responde à corrente que passa pelo elemento do sistema a ser protegido quando o valor dessa corrente ultrapassa o valor de ajuste.

O relé não deve operar apenas com a carga máxima, devendo operar de acordo com a curva de temporização.

A sobrecarga admissível (K_f) deve estar entre 1,2 e 1,5, será considerado 1,3 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2017). Sendo assim:

$$I_{tf} = \frac{K_f \times I_n}{RTC} \rightarrow I_{tf} = \frac{1,3 \times 227,90}{50} = 5,93 \text{ A} \quad (32)$$

$$M = \frac{I_{cc3\phi}}{I_{tf} \times RTC} = \frac{2161,99}{50 \times 5,93} = 7,29 \quad (33)$$

Para a correta coordenação com o fusível 8K presente à jusante do relé 51, o tempo de atuação é de 0,1 s. Isso se deve ao fato de 0,3 s ser o tempo de atuação do fusível 8K, o tempo é de 0,2 s o tempo de coordenação. Portanto o tempo de ajuste da função 51 será:

$$TMS = 0,1 \times \left(\frac{7,29 - 1}{13,5} \right) = 0,047 \text{ s} \quad (34)$$

4.2.2 Unidade de sobrecorrente instantânea de fase (50)

De acordo com a simulação, temos que $I_{cc2\phi} = 1917,59 \text{ A}$. Logo, a corrente de curto-circuito assimétrico pode ser calculada, usando um fator de assimetria de 1,2, por:

$$I_{cca} = F_{assim} \times I_{cc2\phi} = 1,2 \times 1917,59 = 2301,10 \text{ A} \quad (35)$$

$$F < \frac{I_{cca}}{I_{at}^F} \rightarrow F < \frac{2301,10}{50 \times 5,93} \rightarrow F < 7,76 \quad (36)$$

De acordo com (FILHO, 2013), deve ser usado um fator de ajuste de 60 a 90% do valor calculado. Utilizando o fator de ajuste de 64%, temos que $F = 5$. Logo:

$$I_t^F = 5 \times 5,93 = 29,65 \text{ A} \quad (37)$$

Portanto:

$$I_{inst} = 29,65 \times 50 = 1482,5 \text{ A} \quad (38)$$

4.2.3 Unidade de sobrecorrente temporizada de neutro (51)

A corrente de curto-circuito nesse trecho é a resultante de um defeito monopolar à terra com elevada impedância. O fator de desequilíbrio (kn) deve estar entre 0,1 e 0,3. Portanto será usado 0,2. O cálculo de ajuste de neutro é calculado pela equação (39).

$kn = 0,2$ - Fator de desequilíbrio

$$I_t^N = \frac{0,2 \times 227,90}{50} = 0,912 \text{ A} \quad (39)$$

$$M = \frac{I_{cc1\phi}}{I_{at}^N} = \frac{2864,30}{45,58} = 62,841 \quad (40)$$

$$TMS = 0,1 \times \left(\frac{62,84 - 1}{13,5} \right) = 0,455 \text{ s} \quad (41)$$

4.2.4 Unidade de sobrecorrente instantânea de neutro (50)

Como na proteção de fase, é usado um fator de assimetria :

$$F_{ass} = 1,2$$

Logo:

$$I_{cca} = 1,2 \times 2864,30 = 3437,160 \text{ A} \quad (42)$$

$$F < \frac{3.437.160}{0,912 \times 50} = 75,376 \quad (43)$$

Para um fator de ajuste 79%, $F = 60$.

$$I_i^N = 60 \times 0,912 = 54,720 \text{ A} \quad (44)$$

Portanto a corrente de acionamento instantânea será $50 \times 54,720 = 2736 \text{ A}$

4.2.5 Unidade direcional de corrente (67)

Para essa etapa é necessário ter o ângulo da corrente de falta, e esse ângulo, foi fornecido pela simulação da falta e que o relé trabalhará em conectado em quadratura com o TP.

$$I_{cc3\phi} = 2161,99 / \underline{67^\circ} \text{ A} \quad (45)$$

A função direcional deve ser coordenada com a função temporizada de sobrecorrente de fase, portanto, será utilizado uma seletividade temporal de 0,1 s, como já foi explicada.

$$I_{tf} = \frac{1,3 \times 227,90}{50} = 5,93 \text{ A} \quad (46)$$

Calculando-se o múltiplo a ser inserido no relé:

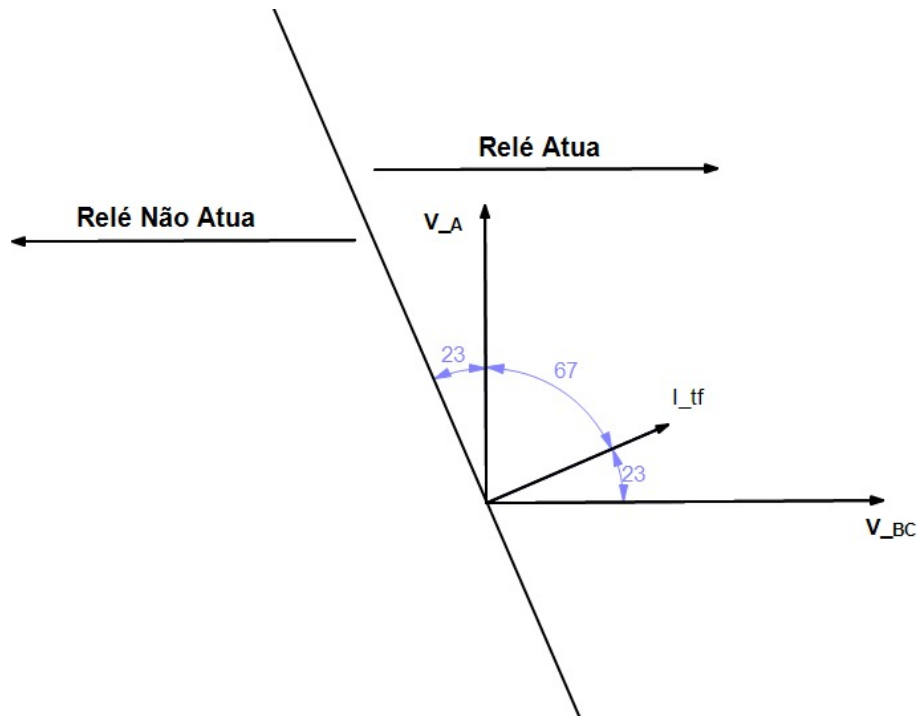
$$M = \frac{2161,99}{50 \times 5,93} = 296,5 \text{ A} \quad (47)$$

Considerando ainda a curva muito inversa, o dial de tempo será

$$TMS = 0,1 \times \left(\frac{7,292 - 1}{13,5} \right) = 0,047 \text{ s} \quad (48)$$

Na figura 39 observa-se a representação do diagrama fasorial de atuação do relé direcional.

Figura 39 – Diagrama fasorial da função 67 de fase para o transformador



Fonte: Autor

4.2.6 Unidade direcional de corrente de neutro (67)

Para essa etapa é necessário ter o ângulo da corrente de falta fase-terra, e esse ângulo, foi fornecido pela simulação da falta

$$I_{cc1\phi} = 2864,30/44^\circ \text{ A} \quad (49)$$

A função direcional deve ser coordenada com a função temporizada de sobrecorrente de fase, portanto, será utilizado uma seletividade temporal de 0,1 s, como já foi explicada

$$I_{tf} = \frac{1,3 \times 227,90}{50} = 5,93 \text{ A} \quad (50)$$

Calculando-se o múltiplo a ser inserido no relé:

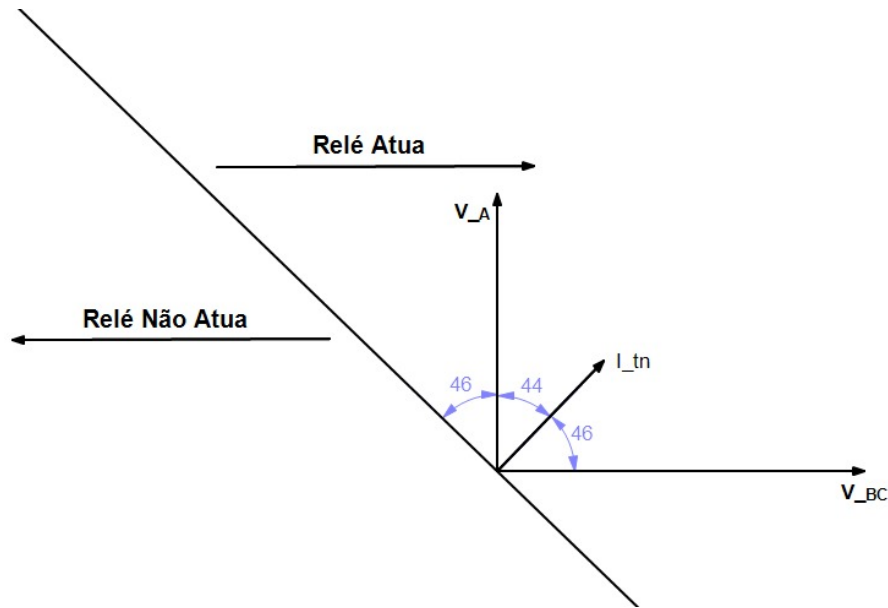
$$M = \frac{2864,30}{296,5} = 9,660 \quad (51)$$

Considerando ainda a curva muito inversa, o dial de tempo será

$$TMS = 0,1 \times \left(\frac{9,660 - 1}{13,5} \right) = 0,064 \text{ s} \quad (52)$$

Na figura 40 observa-se a representação do diagrama fasorial de atuação do relé direcional.

Figura 40 – Diagrama fasorial da função 67 de neutro para o transformador



Fonte: Autor

4.3 Proteção do gerador

Para fazer a proteção do grupo gerador a diesel, o relé SIEMENS, modelo 7SR5111-1AA11-0AA0, cujas funções atendem a demanda da subestação, além de conseguir trabalhar de acordo com os níveis de corrente e tensão empregados. Informações disponíveis no anexo B.

Tem-se disponíveis os seguintes dados:

$$\square I_{cc3\phi} = 3255,371/\underline{58^\circ} \text{ A}$$

$$\square I_{cc2\phi} = 2820,146/\underline{28^\circ} \text{ A}$$

$$\square I_{cc1\phi} = 4957,538/\underline{54^\circ} \text{ A}$$

$$\square I_n = \frac{150 \times 10^3}{\sqrt{30} \times 380} = 227,90 \text{ A}$$

4.3.1 Unidade de sobrecorrente temporizada de fase (51)

Esta função de proteção responde à corrente que passa pelo elemento do sistema a ser protegido quando o valor dessa corrente ultrapassa o valor de ajuste. O relé não deve operar apenas com a carga máxima, O relé deve operar de acordo com a curva de temporização. No caso do grupo gerador, que fica isolado da rede de distribuição, foi adotado um tempo de coordenação de 0,5s. A sobrecarga admissível (Kf) deve estar entre

1,2 e 1,5, será considerado 1,3 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2017). Sendo assim:

$$I_{tc} > \frac{4957,538}{20} = 247,87 \rightarrow 50 : 1 \quad (53)$$

Após a confirmação do RTC, o mesmo utilizado na proteção do transformador,

$$I_{tf} = \frac{1,3 \times 227,90}{50} = 5,93 \text{ s} \quad (54)$$

Foi calculada a corrente de acionamento no relé e será calculada a corrente no enrolamento primário do transformador de corrente.

$$I_{ta}^F = 5,93 \times 50 = 296,5 \text{ A} \quad (55)$$

$$M = \frac{I_{cc3\phi}}{I_{ta}^F} = \frac{3255,371}{296,5} = 10,98 \quad (56)$$

O dial de tempo para uma curva muito inversa e com tempo de coordenação de 0,5 s será:

$$TMS = 0,5 \left(\frac{10,98 - 1}{13,5} \right) = 0,37 \text{ s} \quad (57)$$

4.3.2 Unidade de sobrecorrente instantânea de fase (50)

A corrente mínima de acionamento deve ser inferior à menor corrente assimétrica de curto-circuito no trecho protegido pelo disjuntor. É usado um fator de assimetria de 1,2. A corrente de curto-circuito assimétrica então é calculada pela equação (58).

$$I_{cca} = 1,2 \times 2820,146 = 3384,176 \text{ A} \quad (58)$$

$$I_{at}^f = 5,93 \times 50 = 296,5 \text{ A} \quad (59)$$

$$F < \frac{3.384,18}{296,5} = 11,414 \quad (60)$$

Com um fator de ajuste de 70%, $F = 8$ e então calcula-se a corrente de sensibilização do relé

$$I_{if} = 8 \times 5,93 = 47,44 \text{ A} \quad (61)$$

Logo:

$$I_{af} = 47,44 \times 50 = 2372 \text{ A} \quad (62)$$

4.3.3 Unidade de sobrecorrente temporizada de neutro (51)

O fator de desequilíbrio (Kn) deve estar entre 0,1 e 0,3. Portando será usado 0,2. O cálculo de ajuste de neutro é calculado pela equação (63).

$$I_{tr} = \frac{0,2 \times 227,90}{50} = 0,912 \text{ A} \quad (63)$$

A corrente de acionamento temporizado de neutro será:

$$I_{ta} = 50 \times 0,912 = 45,58 \text{ A} \quad (64)$$

Calculando o múltiplo inserido no relé:

$$M = \frac{3255,37}{45,58} = 71,42 \quad (65)$$

O dial de tempo para uma curva muito inversa e com tempo de coordenação de 0,5 s será:

$$TMS = 0,5 \times \left(\frac{71,42 - 1}{13,5} \right) = 2,61 \text{ s} \quad (66)$$

4.3.4 Unidade de sobrecorrente instantânea de neutro (50)

Como na proteção de fase, é usado um fator de assimetria:

$$F_{ass} = 1,2$$

A corrente utilizada será a corrente da falta monofásica

$$I_{cc1\phi} = 4957,58 \text{ A}$$

$$I_{cca} = 1,2 \times 4957,58 = 5949,09 \quad (67)$$

$$I_n^F = 45,58 \quad (68)$$

$$F < \frac{5949,09}{45,58} = 130,52 \quad (69)$$

Para um fator de ajuste de 84%, logo $F = 110$ e assim, tem-se a corrente de acionamento instantânea.

$$I_{in} = 110 \times 0,912 = 101,2 \text{ A} \quad (70)$$

$$I_{acio \text{ Inst}} = RTC \times I_{in} = 50 \times 11,2 = 5060 \text{ A} \quad (71)$$

4.3.5 Unidade direcional de corrente (67)

Para essa etapa é necessário ter o ângulo da corrente de falta, e esse ângulo, foi fornecido pela simulação da falta. Utilizando o valor informado anteriormente de $I_{cc3\phi}$, em especial o seu ângulo de fase.

A função direcional deve ser coordenada com a função temporizada de sobrecorrente de fase, portanto, será utilizado uma seletividade temporal de 0,5 s, como já foi explicada. Também vale lembrar que o TP está conectado em quadratura.

$$I_{tf} = \frac{1,3 \times 227,90}{50} = 5,93 \text{ A} \quad (72)$$

Calculando-se o múltiplo a ser inserido no relé:

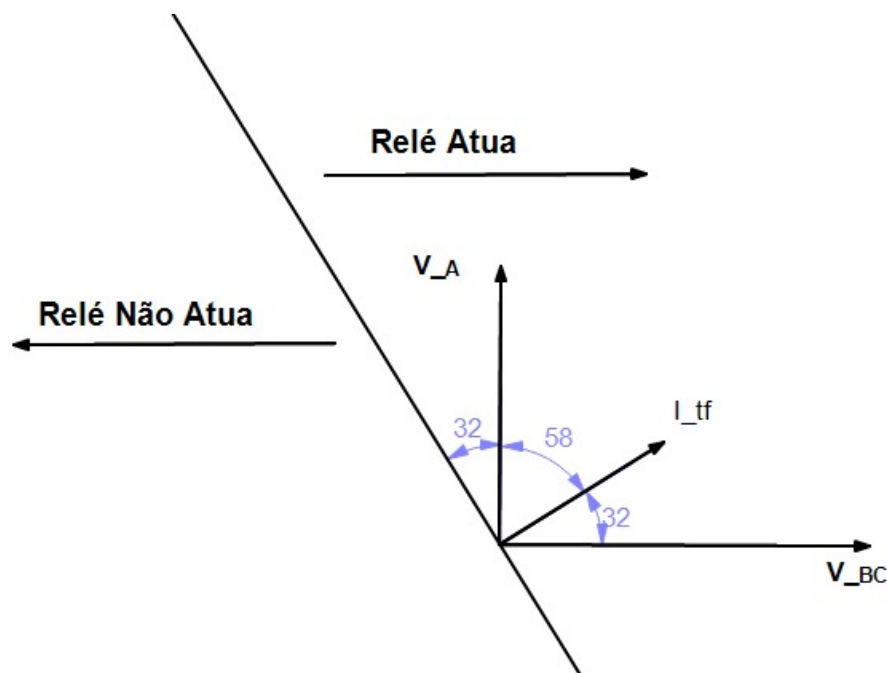
$$M = \frac{3255,37}{296,5} = 10,98 \quad (73)$$

Considerando ainda a curva muito inversa e um tempo de coordenação de 0,5 s, o dial de tempo será

$$TMS = 0,5 \times \left(\frac{10,98 - 1}{13,5} \right) = 0,370 \text{ s} \quad (74)$$

Na figura 41 observa-se a representação do diagrama fasorial de atuação do relé direcional.

Figura 41 – Diagrama fasorial da função 67 de fase para o gerador



Fonte: Autor

4.3.6 Unidade direcional de corrente de neutro (67)

Para essa etapa é necessário ter o ângulo da corrente de falta, e esse ângulo, foi fornecido pela simulação da falta.

Agora, utilizando o valor de $I_{cc1\phi}$, fornecida acima, em especial o seu ângulo de fase. A função direcional deve ser coordenada com a função temporizada de sobrecorrente de

fase, portanto, será utilizado uma seletividade temporal de 0,5 s, como já foi explicada

$$I_{tf} = \frac{1,3 \times 227,90}{50} = 5,93 \text{ A} \quad (75)$$

Calculando-se o múltiplo a ser inserido no relé:

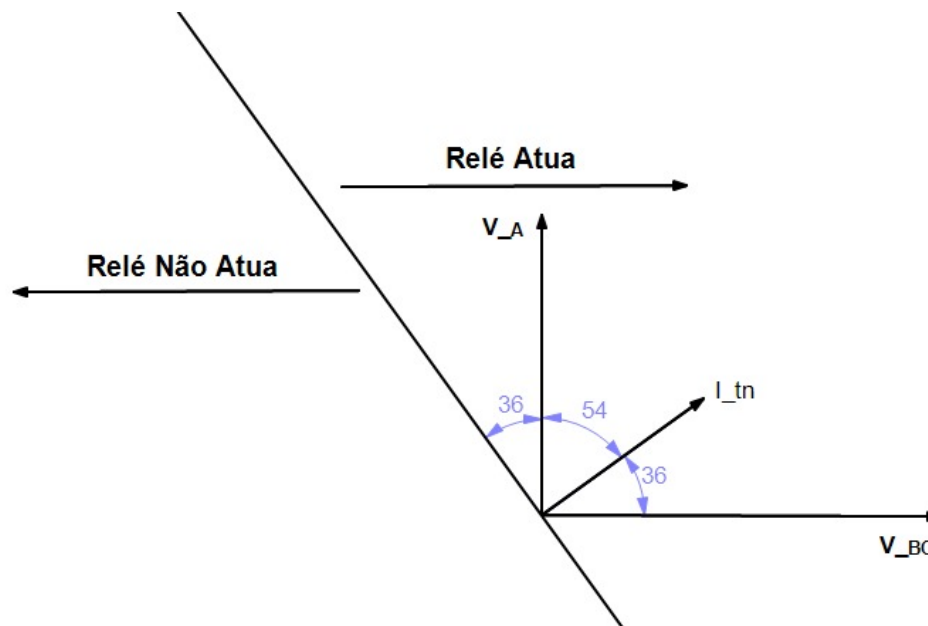
$$M = \frac{4957,53}{296,5} = 16,72 \quad (76)$$

Considerando ainda a curva muito inversa e um tempo de coordenação de 0,5 s, o dial de tempo será

$$TMS = 0,5 \times \left(\frac{16,720 - 1}{13,5} \right) = 0,582 \text{ s} \quad (77)$$

Na figura 42 observa-se a representação do diagrama fasorial de atuação do relé direcional.

Figura 42 – Diagrama fasorial da função 67 de neutro para o gerador



Fonte: Autor

4.3.7 Coordenograma do Transformador

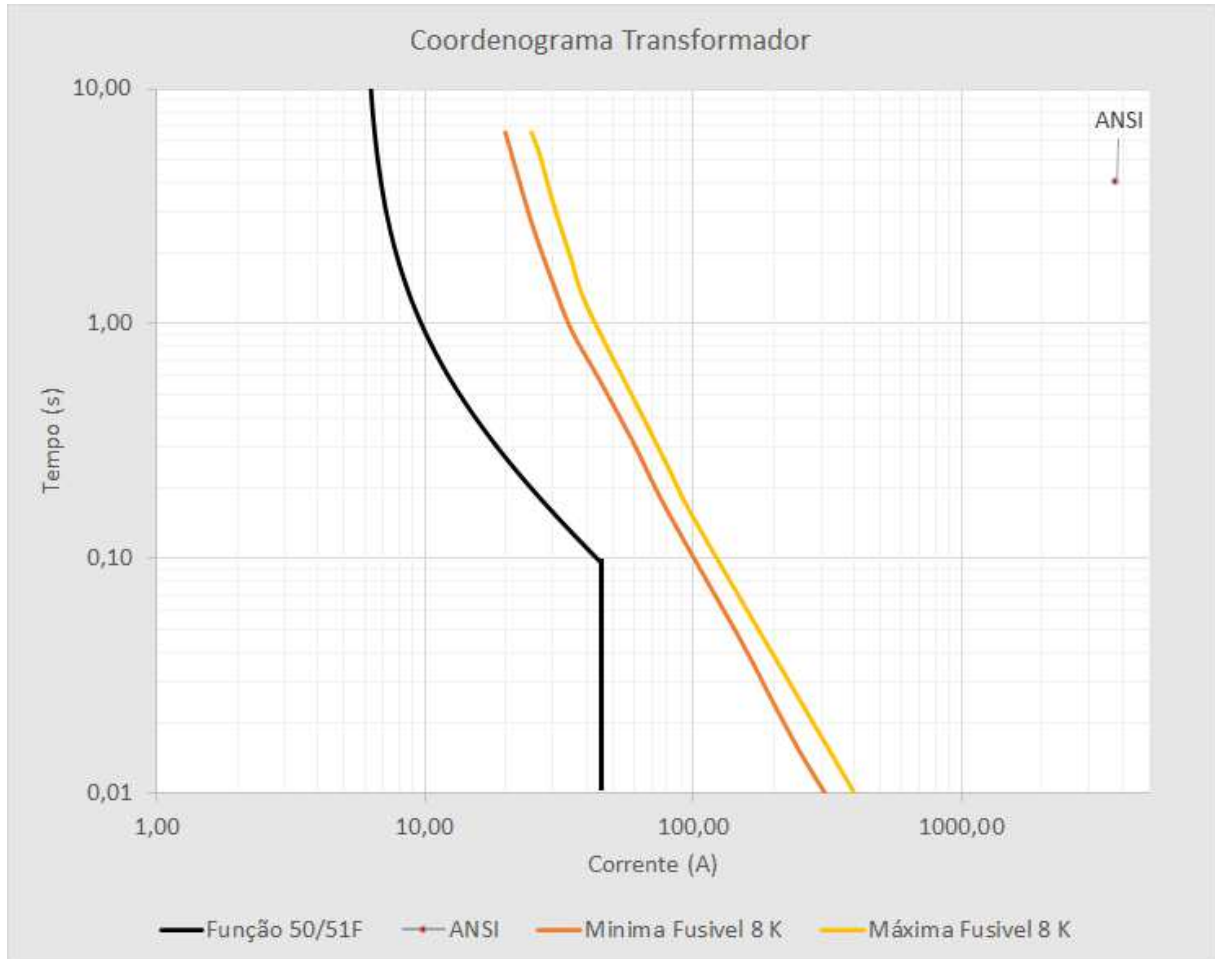
O ponto ANSI é calculado a partir da impedância percentual do transformador, pela equação (78) e corresponde ao máximo valor de corrente que um transformador pode suportar durante um período definido sem se danificar. Os valores de acordo com a impedancia do transformador são mostrados na tabela 2.

$$I_{ANSI} = \frac{100}{Z\%} \times I_n \text{ transformador} \quad (78)$$

$$I_{ANSI} = 4300 A \quad (79)$$

O coordenograma da proteção do transformador é apresentada na Figura 43.

Figura 43 – Coordenograma da proteção do transformador



Fonte: Autor

O coordenograma é um gráfico di-log tempo x corrente onde são plotadas as curvas IEC da proteção de sobrecorrente e pontos de interesse, como o ponto ANSI, para melhor visualização da proteção, coordenação e seletividade.

Os valores utilizados para a plotagem do gráfico foram retirados dos estudos apresentados anteriormente e de dados fornecidos por materiais de estudo e a concessionária de energia, que forneceu o dado do elo fusível (8K) que protege a instalação.

Pode-se observar que a coordenação é obtida e o relé é capaz de proteger o transformador e a instalação.

Conclusão

O estudo realizado neste documento se refere a um estudo de caso real de projeto de subestação e a proteção dos seus equipamentos. Subestação essa que pertence a uma instalação particular, na qual o projeto foi feito seguindo as normas vigentes no momento de confecção deste trabalho, reforçando conceitos de subestações e proteção de um sistema elétrico, exemplificando o estudo de proteção de uma subestação, provida de um grupo gerador a diesel e de um sistema de geração fotovoltaica.

Inicialmente foram apresentados os conceitos de uma subestação, detalhando a função e o funcionamento de cada um dos itens que a compõem, de maneira geral, depois foi apresentado um breve estudo sobre sistemas de medição de energia elétrica, aterramento, proteção de sistemas elétricos e geração fotovoltaica.

Com relação ao projeto da subestação, foi utilizado apenas o dado de potência aparente do transformador, sendo necessário a obtenção dos outros dados de forma dedutiva, com o devido embasamento teórico apresentado. Para o gerador estavam disponíveis mais dados de placa, mas ainda sim foi necessário obter alguns dados de forma dedutiva.

Após o projeto e simulação da subestação, foram obtidos os dados para realizar o estudo de proteção do transformador e do grupo gerador, uma vez que da concessionária obteve-se somente a curva do elo fusível. Em posse dos dados necessários foi feito o estudo e o coordenadograma da proteção do transformador, não sendo necessário o estudo de coordenação do grupo gerador, isolado da rede de distribuição.

Por fim, pode-se concluir que o estudo de caso atingiu o seu objetivo, aplicando conceitos de projetos de subestações, proteção, coordenação e seletividade em sistema real e já em funcionamento, a fim de garantir o pleno funcionamento da subestação, de forma segura.

Uma sugestão de um trabalho futuro para dar continuidade a este projeto seria a reestruturação das instalações da subestação, aproximando seus componentes, diminuindo o comprimento dos cabos que os conectam, assim como o tipo de armazenamento de seus componentes, a fim de facilitar manutenções e substituições. Outro ponto interessante a ser tratado é um estudo das instalações elétricas internas da estrutura, passando por uma

reorganização, documentalção e modernização.

Referências

1. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482, DE 17 DE ABRIL DE 2012. BRASÍLIA: [s.n.], 2018. 9 p. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>> Acesso em: 15 janeiro 2023.
2. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. PRODIST - Módulo 1. BRASÍLIA: [s.n.], 2018. 55 p. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_2.pdf> Acesso em: 15 janeiro 2023.
3. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. PRODIST - Módulo 3. BRASÍLIA: [s.n.], 2017. 74 p. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_2_2.pdf> . Acesso em: 15 janeiro 2023.
4. APRENDER ELÉTRICA. Subestações de Energia - Definições, Conceitos e Aplicações. São Paulo: Aprender Elétrica, 2021. 154 p.
5. BRASIL, LEI Nº 14.300, DE 6 DE JANEIRO DE 2022, no. N o 5. Brasília-DF, Brasil, 2022, pp. 4–6.
6. CREDER, H. INSTALAÇÕES ELÉTRICAS. 16^a. ed. RIO DE JANEIRO: Livros Técnicos e Científicos Editora, 2016.
7. CONTEUDISTA. O QUE VOCÊ PRECISA SABER SOBRE SUBESTAÇÕES EM MÉDIA TENSÃO. Disponível em: <<https://energes.com.br/o-que-voce-precisa-saber-sobre-subestacoes-em-media-tensao/>>. Acesso em: 8 fev. 2023.
8. Especificação Técnica no. 942. Disponível em: <<shorturl.at/dNX12>> Acesso em: 14 jan. 2023.
9. FILHO, J. M.; MAMEDE, D. R. PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA. Rio de Janeiro: LTC-Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2011.

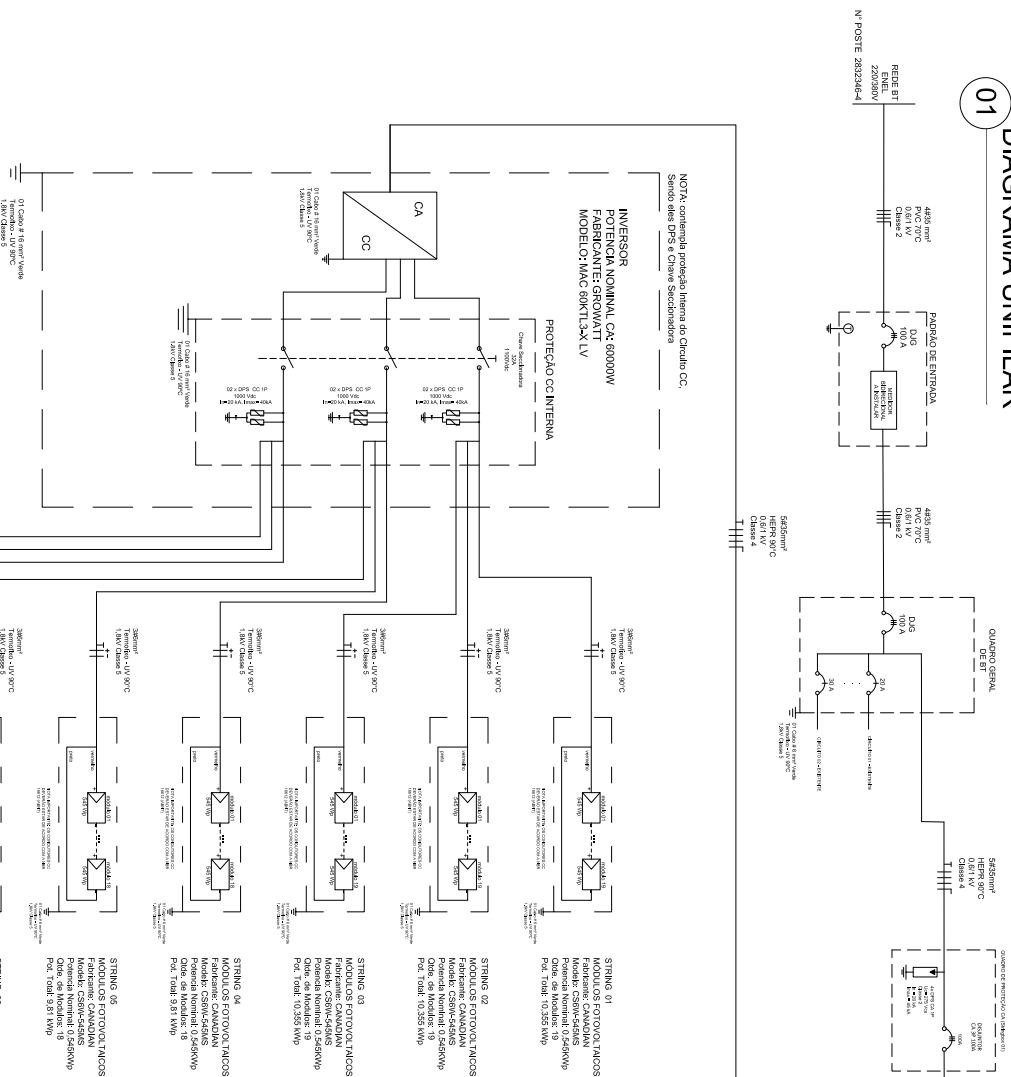
10. GONÇALVES, R. M. GUIA DE PROJETO PARA SUBESTAÇÃO DE ALTA TENSÃO. São Carlos: Universidade Federal de Uberlândia, 2012. Disponível em: <<http://repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10023349.pdf>> Acesso em: 28 dezembro 2022
11. Guia EM da NBR 5410. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://shorturl.at/grwT6>>. Acesso em: 24 jan. 2023.
12. Inversor Híbrido Off-Grid |. Disponível em: <<https://blog.energyshop.com.br/categorias/guia-da-energia-solar/inversor-hibrido-off-grid/>>. Acesso em: 24 jan. 2023.
13. LEITE, Rafael Martins et al. Projeto de um sistema elétrico industrial de baixa tensão utilizando o software doc. 2018.
14. OLIVEIRA, Thales L. Apostila de Proteção de Sistemas Elétricos. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. Itumbiara. 2021.
15. Passo a passo da fabricação do painel solar - Tudo sobre energia solar fotovoltaica. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/passa-a-passo-da-fabricacao-do-painel-solar.html>>. Acesso em: 24 jan. 2023
16. PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. MANUAL DE ENGENHARIA PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS. Rio de Janeiro: CEPTEL-CRESESB, 2014.
17. SA, CELG DISTRIBUIÇÃO. NTC 36-Norma Técnica CELG-Transformador de Potência-Especificação-Revisão 6. CELG Distribuição SA Goiânia, p. 89, 2015.
18. SAMPAIO, R. D. SUBESTAÇÕES DE ENERGIA ELÉTRICA: METOLOGIA E DIMENSIONAMENTO. MANAUS: [s.n.], 2020. 106 p.
19. SANTOS, F. M. SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO: HISTÓRICO, ESTRUTURA E ANÁLISE DE INVESTIMENTOS NO SETOR. Araranguá: Universidade Federal de Santa Catarina, 2015. 59 p.

Anexos

Diagrama Unifilar da Usina Fotovoltaica

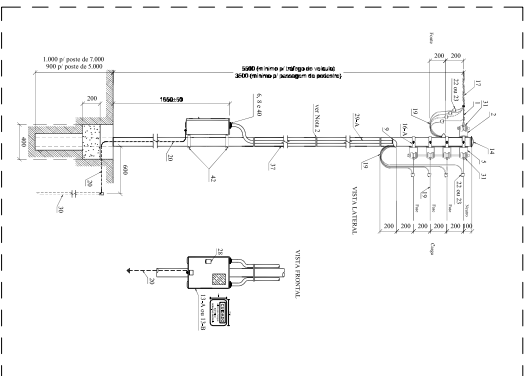
DIAGRAMA UNIFILAR

01

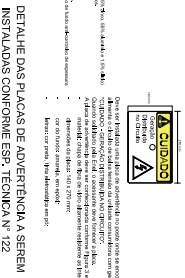


CONJUNTO DE MEDIÇÃO EXISTENTE

02



03 DETALHE DAS PLACAS DE ADVERTENCIA



DETALHE DAS PLACAS DE ADVERTENCIA A SEREM INSTALADAS CONFORME ESR, TÉCNICA N° 722

POTENCIA INSTALADA DE PAINÉIS 89925W
POTENCIA TOTAL INSTALADA INVERSORES 60.00KWp

Modelos e fornecedores de módulos: CANYAN, modelo GSW440S-1, 1,663 Modulos/fornecedor de strings: GROWATT, modelo GSRTV-400, 2, 50 Inversor placa solar: GROWATT, modelo MAC60KTL-3,3X LV, potência: AC 60,00 kWp, com as seguintes funções:
2.2.2 Sistema de proteção de ilha e desconexão;
2.4 Sistema de proteção anti-furto, com desligamento automático.



SITUAÇÃO DA UNIDADE CONSULINDRA

Latitude: -18,267343 Longitude: -48,154964

- ### NOTAS OBRIGATORIAS
- O fornecedor dos Inversores garante a desconexão da central geradora durante a manutenção do sistema de Concessionária ENEL;
 - Quando da solicitação de visita deverá ser apresentado o Relatório de Comissamento das Instalações de Conexão de acordo com os itens estabelecidos na ABNT NBR 16724, devidamente assinados pelo engenheiro/técnico responsável, indicando as características finais das instalações de conexão, os resultados dos ensaios e resultados dos testes e medições realizados;
 - Os Inversores deverão atender ao estabelecido na ABNT NBR IEC 62116 e Especificação Técnica n° 122 - ENEL;
 - O aterramento do sistema de geração deverá ser conectado ao sistema de aterramento da unidade consumidora;
 - Os Inversores deverão estar instalados em locais de fácil acesso, protegidos contra interferências de acordo com o seu grau de proteção (IP), que permitam facilmente a verificação de suas características técnicas durante o processo de fiscalização/conexão da G.D.
 - As instalações elétricas locais deverão estar em conformidade com a NR-10, Normas técnicas/segurança da ENEL e ABNT;
 - O projeto deverá atender todas as exigências da Especificação Técnica n° 122 - ENEL.

LEGENDA E ESPECIFICAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

- PLACA SOLAR COM CANYAN-GSW440S-1
- DESELMOTOR CA 3P 100A 220V-415V ST
- DPS CA 275VDC-400V ST
- INVERSOR DE FREQUENCIA 60000W GROWATT- MAC60KTL-3,3X LV
- Caixa CC, Fase, Neutro e Terra - Caixa 50mm³
- Caixa CC, Fase, Neutro e Terra - Caixa 50mm³

RESERVAÇÃO A DISTRIBUIDORA

QUADRO DE REVISÕES:	DATA	OBJETO	EMISSÃO

PROJETO DE GERAÇÃO DISTRIBUIDA (GD)

ANEXO **B**

Catálogo do Relé de Proteção



Figure similar

proteção direcional de sobrecorrente 7SR51 4 transf.I, 4 transf.V, 9 EB, 8 SB interface padrão: 1 x USB (frontal), RS485 (atrás) + 2 x interfaces RJ45 caixa S6

Detalhes do produto

número de teclas de função	7
número de LEDs	28

Funções do produto

tipo de captação de valor de medição / dos valores de medição de funcionamento / padrão	Si
tipo de captação de valor de medição / ampliado / valores mín./máx., valores médios	Si
função do produto / estatística de operação	Si
função do produto / monitorização do disjuntor	Si
equipamento do produto / editor de lógica	Si
função do produto / comando	Si
função do produto / gravação de falhas para sinais analógicos e digitais	Si
função do produto / gravador sequencial de eventos	Si
função do produto / monitorização	Si
número dos conjuntos de parâmetros	4
função do produto / comutação do conjunto de parâmetros	Si
função do produto / verificação do disjuntor	Si

Funções de proteção

função de proteção / disparo de 3 polos	Si
característica do produto / verificação de sincronismo (ANSI 25)	Si
função de proteção / proteção contra subtensão (ANSI 27)	Si
função de proteção / monitorização da potência orientada (ANSI 32)	Si
função de proteção / monitorização da potência de avanço (ANSI 32F)	Si
função de proteção / proteção de potência reversa (ANSI 32R)	Si
função de proteção / proteção contra subcorrente (ANSI 37)	Si
função de proteção / proteção contra carga inclinada (ANSI 46)	Si
função de proteção / sistema contrário da proteção temporizada contra sobrecorrentes (ANSI 46)	Si
função de proteção / monitorização do campo rotativo (ANSI 47)	Si
função de proteção / sistema contrário da proteção contra sobretensão (ANSI 47)	Si
função de proteção / proteção de sobrecarga térmica (ANSI 49)	Si

função de proteção / proteção temporizada contra sobrecorrentes independente (ANSI 50/50N)	Si
função de proteção / disparo rápido em caso de ligação com erro (ANSI SOFT)	Si
função de proteção / proteção contra arcos elétricos (ANSI AFD)	Si
função de proteção / proteção sensível da corrente de terra (ANSI 50Ns)	Si
função de proteção / proteção contra falhas do interruptor (ANSI 50BF)	Si
função de proteção / proteção temporizada contra sobrecorrentes dependente (ANSI 51/51N)	Si
função de proteção / comutação dinâmica do valor de resposta (ANSI 51C)	Si
função de proteção / proteção temporizada contra sobrecorrentes em função da tensão (ANSI 51V)	Si
função do produto / fator de potência (ANSI 55)	Si
função de proteção / proteção contra sobretensão (ANSI 59)	Si
função de proteção / sistema nulo da proteção contra sobretensão (ANSI 59N)	Si
função de proteção / proteção temporizada contra sobrecorrentes orientada, fases (ANSI 67)	Si
função de proteção / proteção orientada contra curto-circuito à terra (ANSI 67N)	Si
função de proteção / detecção de falhas de terra orientada e sensível para redes apagadas e isoladas (ANSI 67Ns)	Si
função de proteção / monitorização do circuito de disparo (ANSI 74TC)	Si
função do produto / religação automática (ANSI 79)	Si
função de proteção / proteção de frequência (ANSI 81)	Si
função de proteção / proteção contra alteração da frequência (ANSI 81R)	Si
função de proteção / proteção de salto vetorial	Si
função de proteção / bloqueio de ligação (ANSI 86)	Si
função de proteção / proteção diferencial de falha de terra (ANSI 87N)	Si
função de proteção / localizador de erros (ANSI FL)	Si
função do produto / detecção da corrente de ativação	Si
função de proteção / acoplamento externo	Si

Tensão de alimentação

tensão de alimentação / com CA	100 ... 230 V
tensão de alimentação / com CC	24 ... 250 V
tipo de tensão / da tensão de alimentação	CA/CC

Entradas / Saídas

número de entradas digitais / máximo	9
número de saídas digitais / incl. contacto de sinalização / máximo	8
número de entradas de tensão / máximo	4
número de entradas de corrente / máximo	4

Comunicação

componente do produto / interface de operação (na parte frontal)	Si
protocolo / é suportado / IEC 60870-5-103	Si
protocolo / é suportado / IEC 61850-8-1	Si
protocolo / é suportado / Modbus RTU-Slave	Si
protocolo / é suportado / DNP 3, de série	Si
protocolo / é suportado / PRP	Si
protocolo / é suportado / RSTP	Si
protocolo / é suportado / HSR	Si

Projeto mecânico

largura	153 mm
altura	177 mm
profundidade	217,5 mm
função do produto / configuração do hardware expansível	No

Condições ambientais

Outras informações

Information- and Downloadcenter (catalogues, leaflets,...)

<http://www.siemens.com/energy-automation>

Industry Mall (Online ordering system)

<https://mall.industry.siemens.com/mall/pt/pt/Catalog/product?mlfb=7SR5111-1AA11-0AA0>

Service&Support (Manuals, Certificates, Characteristics, FAQs,...)

<https://support.industry.siemens.com/cs/ww/pt/ps/7SR5111-1AA11-0AA0>

Image database (product images, 2D dimension drawings, 3D models, device circuit diagrams, ...)

http://www.automation.siemens.com/bilddb/cax_en.aspx?mlfb=7SR5111-1AA11-0AA0

Tender specifications

<http://www.siemens.com/specifications>

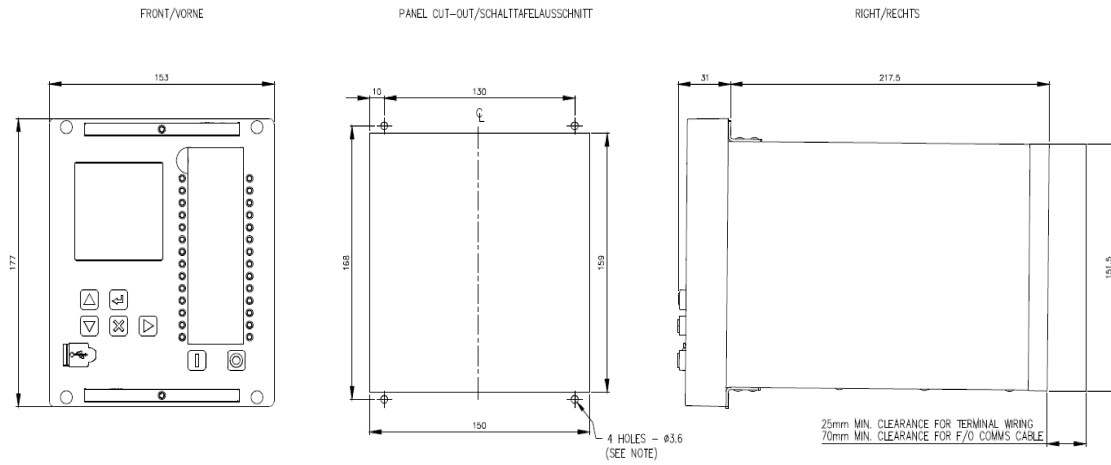


Tabela ANSI

Nr	Denominação
1	Elemento Principal
2	Relé de partida ou fechamento temporizado
3	Relé de verificação ou interbloqueio
4	Contator principal
5	Dispositivo de interrupção
6	Disjuntor de partida
7	Relé de taxa de variação
8	Dispositivo de desligamento da energia de controle
9	Dispositivo de reversão
10	Chave comutadora de sequência das unidades
11	Dispositivo multifunção
12	Dispositivo de sobrevelocidade
13	Dispositivo de rotação síncrona
14	Dispositivo de subvelocidade
15	Dispositivo de ajuste ou comparação de velocidade e/ou frequência
16	Dispositivo de comunicação de dados
17	Chave de derivação ou descarga
18	Dispositivo de aceleração ou desaceleração
19	Contator de transição partida-marcha
20	Válvula operada eletricamente
21	Relé de distância
22	Disjuntor equalizador
23	Dispositivo de controle de temperatura
24	Relé de sobreexcitação ou Volts por Hertz
25	Relé de verificação de Sincronismo ou Sincronização
26	Dispositivo térmico do equipamento
27	Relé de subtensão
28	Detector de chama
29	Contator de isolamento
30	Relé anunciador

31	Dispositivo de excitação
32	Relé direcional de potência
33	Chave de posicionamento
34	Dispositivo master de sequência
35	Dispositivo para operação das escovas ou curto-circuitar anéis coletores
36	Dispositivo de polaridade ou polarização
37	Relé de subcorrente ou subpotência
38	Dispositivo de proteção de mancal
39	Monitor de condições mecânicas
40	Relé de perda de excitação ou relé de perda de campo
41	Disjuntor ou chave de campo
42	Disjuntor / chave de operação normal
43	Dispositivo de transferência ou seleção manual
44	Relé de sequência de partida
45	Monitor de condições atmosféricas
46	Relé de reversão ou desbalanceamento de corrente
47	Relé de reversão ou desbalanceamento de tensão
48	Relé de sequência incompleta / partida longa
49	Relé térmico
50	Relé de sobrecorrente instantâneo
51	Relé de sobrecorrente temporizado
52	Disjuntor de corrente alternada
53	Relé para excitatriz ou gerador CC
54	Dispositivo de acoplamento
55	Relé de fator de potência
56	Relé de aplicação de campo
57	Dispositivo de aterramento ou curto-circuito
58	Relé de falha de retificação
59	Relé de sobretensão
60	Relé de balanço de corrente ou tensão
61	Sensor de densidade
62	Relé temporizador
63	Relé de pressão de gás (Buchholz)
64	Relé detetor de terra
65	Regulador
66	Relé de supervisão do número de partidas
67	Relé direcional de sobrecorrente
68	Relé de bloqueio por oscilação de potência
69	Dispositivo de controle permissivo
70	Reostato
71	Dispositivo de detecção de nível
72	Disjuntor de corrente contínua
73	Contator de resistência de carga
74	Relé de alarme
75	Mecanismo de mudança de posição
76	Relé de sobrecorrente CC
77	Dispositivo de telemedição
78	Relé de medição de ângulo de fase / proteção contra falta de sincronismo
79	Relé de religamento
80	Chave de fluxo

81	Relé de frequência (sub ou sobre)
82	Relé de religamento de carga de CC
83	Relé de seleção / transferência automática
84	Mecanismo de operação
85	Relé receptor de sinal de telecomunicação (teleproteção)
86	Relé auxiliar de bloqueio
87	Relé de proteção diferencial
88	Motor auxiliar ou motor gerador
89	Chave seccionadora
90	Dispositivo de regulação (regulador de tensão)
91	Relé direcional de tensão
92	Relé direcional de tensão e potência
93	Contator de variação de campo
94	Saídas digitais de alta velocidade para Trip
95	Usado para aplicações específicas
96	Relé auxiliar de bloqueio de barra
97 à 99	Usado para aplicações específicas
150	Indicador de falta à terra
AFD	Detector de arco voltaico
ARC	Religamento automático seletivo
CLK	Clock
DDR	Sistema dinâmico de armazenamento de perturbações
DFR	Sistema de armazenamento de faltas digital
ENV	Dados do ambiente
HIZ	Detector de faltas com alta impedância
HMI	Interface homem-máquina
HST	Histórico
LGC	Esquema lógico
LM	Monitoramento de linhas
MET	Medição de subestação
PDC	Concentrador de dados de fasores
PMU	Unidade de medição de fasores
PQM	Esquema de monitoramento de potência
RIO	Dispositivo remoto de I/Os
RTU	Unidade de terminal remoto / Concentrador de dados
SER	Sistema de armazenamento de eventos
SOTF	Fechamento sob falta
TCM	Esquema de monitoramento de trip
TD21	Proteção de distância de fase e terra baseada em grandezas incrementais
TD32	Elemento direcional baseado em grandezas incrementais
TW32	Elemento direcional baseado em ondas viajantes
TW87	Proteção diferencial de linhas baseada em ondas viajantes

Fonte: SEL, 2023