



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
FACULDADE DE ARQUITETURA, ENGENHARIA E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

RENAN PONCE LEITE

ESTUDO DE PROTEÇÃO DE UMA USINA FOTOVOLTAICA EM DIGSILENT.

CUIABÁ – MT
JUNHO, 2023

RENAN PONCE LEITE

ESTUDO DE PROTEÇÃO DE UMA USINA FOTOVOLTAICA EM DIGISILENT.

Trabalho Final de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Mato Grosso, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador:
Prof. Dr. Carlos Enrique Portugal Poma

CUIABÁ – MT

JUNHO, 2023

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

L533e Leite, Renan Ponce.

Estudo de proteção de uma usina fotovoltaica em dicsilent [recurso eletrônico] / Renan Ponce Leite. -- Dados eletrônicos (1 arquivo : 83 f., il. color., pdf). -- 2023.

Orientador: Carlos Enrique Portugal Poma.
TCC (graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Mato Grosso,
Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia, Cuiabá, 2023.

Modo de acesso: World Wide Web: <https://bdm.ufmt.br>.

Inclui bibliografia.

1. DIGSILENT PowerFactory; Estudo de Proteção; Usina Fotovoltaica. I. Poma, Carlos Enrique Portugal, *orientador*. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.

ESTUDO DE PROTEÇÃO DE UMA USINA FOTOVOLTAICA EM DIGISILENT.

RENAN PONCE LEITE

Trabalho Final de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Mato Grosso, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

APROVADO PELA BANCA EXAMINADORA

Cuiabá, 02 de junho de 2023.

Banca Examinadora:

Dr. Carlos Enrique Portugal Poma
Orientador

Dr. Rogério Lúcio Lima
Membro da Banca Examinadora

Dr. Antônio Eduardo Ceolin Momesso
Membro da Banca Examinadora

CUIABÁ – MT

JUNHO, 2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO

DESPACHO

Processo nº 23108.037298/2023-13

Interessado: RENAN PONCE LEITE

FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA MONOGRAFIA:

ESTUDO DE PROTEÇÃO DE UMA USINA FOTOVOLTAICA EM DIGISILENT.

ALUNO: RENAN PONCE LEITE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia da Universidade Federal de Mato Grosso, como requisito para a obtenção de grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 05 de junho de 2023.

Nota: **8,65**

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Carlos Enrique Portugal Poma

Prof. Dr. Rogério Lúcio Lima

Prof. Dr. Antônio Eduardo Ceolin Momesso



Documento assinado eletronicamente por **CARLOS ENRIQUE PORTUGAL POMA, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 07/06/2023, às 18:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **ROGERIO LUCIO LIMA, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 07/06/2023, às 19:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **ANTONIO EDUARDO CEOLIN MOMESSO, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 07/06/2023, às 21:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufmt.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5848741** e o código CRC **1653C1FD**.

RESUMO

A geração fotovoltaica no Brasil tem crescido significativamente nos últimos anos, sendo a fonte renovável que mais cresceu no País. Segundo a EPE (Empresa de Pesquisa Energética), em 2020, a micro e minigeração distribuída atingiram 9.810 GWh, com uma potência instalada de 8.965 MW. Destaque para a fonte solar fotovoltaica, com 9.019 GWh e 8.771 MW de geração e potência instalada respectivamente, e representando uma importante alternativa para diversificar a matriz energética brasileira.

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) em sua resolução normativa de nº 1000/2021, assegura que o consumidor brasileiro pode gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis. Assim, nos últimos anos o número de sistemas fotovoltaicos instalados no território brasileiro tem crescido consideravelmente, devido à crescente demanda por energia. Fica claro ao observar os números no período do segundo semestre de 2022, que as usinas fotovoltaicas aparecem como o segundo maior número de usinas em construções, ficando somente atrás das usinas eólicas, Expansão da Matriz Elétrica Brasileira Fevereiro/2023 da ANEEL (2023). No entanto, a conexão desses sistemas de geração distribuída à rede elétrica apresenta desafios, como variações de tensão e níveis de curto-circuito. Para isso, é necessário garantir que, em caso de falhas ou distúrbios, esses sistemas sejam isolados da rede elétrica. O estudo de proteção desempenha um papel crucial nesse processo.

O estudo de proteção é uma análise técnica realizada para determinar a estratégias de proteções a serem tomadas, envolvendo a análise e o dimensionamento dos equipamentos de proteção, procurando garantir que estejam configurados corretamente e possam detectar e isolar falhas de maneira eficiente e com a maior rapidez assegurando e trazendo confiabilidade do sistema elétrico, minimizando o risco de falhas. Além de considerar aspectos como coordenação e seletividade, para que somente a parte do sistema afetada seja desligada em caso de falhas, minimizando o impacto sobre os demais consumidores. O uso de *software* para simulações de falhas oferece uma visão detalhada do comportamento do sistema elétrico em situações anormais.

O presente trabalho pretende verificar e validar os dados apresentados no estudo de proteção realizado na fazenda Colorado, localizado no município de Diamantino, Mato Grosso. as análises serão por meio do DIGSILENT, qual possibilitara a modelagem e o estudos pertinente a proteção, visando sempre estar conforme as normas locais.

Palavras-chave: DIgSILENT PowerFactory; Estudo de Proteção; Usina Fotovoltaica.

ABSTRACT

Photovoltaic generation in Brazil has grown significantly in recent years, being the renewable source that grew the most in the country. According to EPE (Empresa de Pesquisa Energética), in 2020, distributed micro and mini-generation reached 9,810 GWh, with an installed capacity of 8,965 MW. Highlight for the photovoltaic solar source, with 9,019 GWh and 8,771 MW of generation and installed capacity respectively, and representing an important alternative to diversify the Brazilian energy matrix.

According to the National Electric Energy Agency (ANEEL) in its normative resolution No. 1000/2021, it ensures that the Brazilian consumer can generate their own electricity from renewable sources. Thus, in recent years, the number of photovoltaic systems installed in Brazil has grown considerably, due to the growing demand for energy. It is clear when observing the numbers in the period of the second half of 2022, that photovoltaic plants appear as the second largest number of plants under construction, second only to wind power plants, *Expansão da Matriz Elétrica Brasileira February/2023* by ANEEL (2023). However, connecting these distributed generation systems to the power grid presents challenges such as voltage variations and short circuit levels. For this, it is necessary to ensure that, in the event of failures or disturbances, these systems are isolated from the electrical network. The study of protection plays a crucial role in this process.

The protection study is a technical analysis carried out to determine the protection strategies to be taken, involving the analysis and dimensioning of the protection equipment, seeking to ensure that they are correctly configured and can detect and isolate failures efficiently and quickly. ensuring and bringing reliability to the electrical system, minimizing the risk of failures. In addition to considering aspects such as coordination and selectivity, so that only the affected part of the system is turned off in the event of failures, minimizing the impact on other consumers. The use of software for fault simulations offers a detailed view of the behavior of the electrical system in abnormal situations.

The present work intends to verify and validate the data presented in the protection study carried out at the Colorado farm, located in the municipality of Diamantino, Mato Grosso. the analyzes will be through DIGSILENT, which will allow the modeling and studies relevant to protection, always aiming to comply with local regulations.

Keywords: DIGSILENT PowerFactory; Protection Study; Photovoltaic Plant.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Curvas características – Muito Inversa.....	22
Figura 2: Relé de Neutro	23
Figura 3: Fluxograma do método implementado	33
Figura 4: Diagrama unifilar	35
Figura 5: Equivalente de Thevenni seguência positiva.....	36
Figura 6: Equivalente de Thevenni seg (-)	37
Figura 7: Curto-Circuito trifásico	38
Figura 8: Curto- Circuito Monofásico	38
Figura 9: Fluxo de Potência.....	39
Figura 10: Dados da função 50 implementados	41
Figura 11: Tempo de abertura da função 50.....	41
Figura 12: Relé Operando para função 50.....	42
Figura 13: Relatório da função 50	42
Figura 14: Oscilograma função 50	43
Figura 15: Dados da função 51 implementados	44
Figura 16: Relé Operando para 51.....	45
Figura 17: Tempo de abertura da função 51	45
Figura 18: Relatório da Função 51	45
Figura 19: Oscilograma da Função 51.....	46
Figura 20: Dados da função 50N implementados	46
Figura 21: Relé Operando para 50N.....	47
Figura 22: Tempo de abertura da função 50N.....	48
Figura 23: Relatório da Função 50N	48
Figura 24: Oscilograma da Função 50N.....	48
Figura 25: Dados implementados da função 51N	50
Figura 26: Tempo de atuação da função 51N.....	50
Figura 27: Relatório da Função 51N	50
Figura 28: Oscilograma da função 51N.....	51
Figura 29: Relé operando para a Função 51N	51
Figura 30: Dados implementados da função 27	53
Figura 31: Tempo de abertura da função 27.....	53
Figura 32: Relé Operando para 27.....	54

Figura 33: Dados implementados da função 59	55
Figura 34: Tempo de abertura da função 59	55
Figura 35: Operação do relé na função 59.....	56
Figura 36: Dados implementados da função 81U, para 66 Hz.....	56
Figura 37: Dados implementados da função 81U, para 62 Hz.....	57
Figura 38: Dados implementados da função 81U, para 58,5 Hz.....	57
Figura 39: Dados implementados da função 81U, para 56,5 Hz.....	58
Figura 40: Operação da função 81U.....	58
Figura 41: Oscilograma da função 81U.....	59
Figura 42: Atuação da função 81U.....	59
Figura 43: Osilograma da função 81O	60
Figura 44: Atuação da função 81O.....	60

LISTA DE TABELA

Tabela 1: Recomendações da Energisa para sub/sobre tensão	31
Tabela 2: Recomendações da Energisa para sub/sobre frequência	31
Tabela 3: resumo dos ajustes da Função 81U/O.....	61
Tabela 4: resumo dos ajustes da Função 27 e 59.....	61
Tabela 5: resumo dos ajustes da Função 50/51/50N e 51N.....	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
TC	Transformador de Corrente
I_n	Corrente Nominal
V_n	Tensão Nominal
I_{cc}	Corrente de Curto-Circuito
ρ	Resistividade do Cobre
I_p	Corrente Primária do Transformador de Corrente
Z	Impedância
S	Potência Aparente
RTC	Relação de Transformação do TC
I_{utf}	Corrente de Tape da Unidade Temporizada
Kf	Sobrecarga Admissível
I_c	Corrente Nominal do Equipamento ou Circuito
M	Múltiplo da Corrente de Acionamento
I_s	Corrente de Acionamento
NDU	Norma de Distribuição Unificado
ANSI	American National Standards Institute

LISTA DE SÍMBOLOS

s	segundos
ms	milisegundos
I	corrente
V	tensão
A	Ampere
kV	kilovolts
MW	Megawatts

SUMÁRIO

1	Introdução.....	18
1.1	Problemática	19
1.2	Justificativa	19
1.3	Objetivos.....	19
1.3.1	Objetivo Geral	19
1.3.2	Objetivos Específicos	20
2	Fundamentos do Sistema de Proteção	21
2.1	Proteção de Sobrecorrente de fase	21
2.2	Sobrecorrente de neutro.	23
2.3	Proteção de Subtensão e Sobretensão.	24
2.4	Proteção de Subfrequência e Sobrefrequência.....	24
2.5	Transformador de Corrente.....	25
2.5.1	Dimensionamento dos TCs.....	26
2.6	A corrente de Inrush	28
2.7	O ajuste da corrente de atuação da função 50.....	28
2.8	O ajuste da corrente de atuação da função 51 temporizada de fase.....	29
2.9	Ajuste da Corrente de Atuação para a Função 51 Temporizada de Neutro.....	30
2.10	Ajuste das unidades de subtensão / sobretensão	30
2.11	Unidade de sub/sobre frequência	31
3	Metodologia.....	32
4	Simulação Computacional.....	34
4.1	Dados coletados para realização da simulação.	34
5	Resultados e Análises	36
5.1	Equivalente de Thevenin.	36
5.1.1	Corrente de Curto-Circuito Trifásica (Fase-Fase)	36
5.1.2	Corrente de Curto-Circuito Monofásica (Fase-Terra)	37

5.1.3	Fluxo de Carga.....	39
5.2	Inrush de fase.....	39
5.3	Inrush de fase residual.....	39
5.4	Dimensionamento do TC.....	40
5.5	Valores obtidos para a função 50.....	40
5.6	Valores obtidos para a função 51.....	43
5.7	Valores obtidos para a função 50N.....	46
5.8	Valores obtidos para a função 51N.....	49
5.9	Valores obtidos para a função 67/67N.....	52
5.10	Valores obtidos para a função 25.....	52
5.11	Valores obtidos para a função 27.....	52
5.12	Valores obtidos para a função 59.....	54
5.13	Valores obtidos para a função 81 U/O.....	56
6	Resumo das funções.....	61
7	Considerações Finais.....	62
	REFERÊNCIAS.....	63
	APÊNDICE.....	64
	Anexo.....	68

1 Introdução

Nos últimos anos houve um aumento significativo na adoção de pautas ambientais por empresas de diversos setores. Isso pode ser atribuído a maior conscientização sobre as mudanças climáticas e seus impactos negativos. Assim, a energia eólica e solar têm sido cada vez mais utilizadas como fontes renováveis e sustentáveis.

A geração de energia fotovoltaica tem se mostrado uma oportunidade interessante para o setor agrário. A instalação de sistemas de energia solar em fazendas permite que os agricultores aproveitem a terra disponível e gerem energia limpa para suas operações. Além de reduzir custos operacionais gerando energia suficiente para suprir suas necessidades e em alguns casos, até mesmo vender o excedente de energia, trazendo benefícios tanto para o setor agrário quanto para a diversificação da matriz elétrica brasileira.

A Fazenda Colorado, localizada no município de Diamantino, no estado de Mato Grosso, é um exemplo de como a geração de energia fotovoltaica pode ser integrada às atividades agrícolas. Ao instalar painéis solares em suas instalações, a fazenda pode reduzir seus custos com energia elétrica e contribuir para a preservação do meio ambiente.

A geração será composta por 12 inversores de 200 KVA, totalizando 2,4 MVA e conectados a eles 5664 módulos. Este empreendimento se enquadra como minigeração conforme a NDU-015 (2022). Definido pela ANEEL se enquadra em minigeração toda central geradora de energia elétrica renovável ou de cogeração qualificada que não se classifica como microgeração distribuída e que possua potência instalada, em corrente alternada, maior que 75 kW, menor ou igual a 5 MW para as fontes despacháveis e menor ou igual a 3 MW para as fontes não despacháveis.

Para a instalação de um sistema de minigeração fotovoltaica conectada à rede elétrica da concessionária, é necessário apresentar um estudo de proteção para a concessionária de energia, no caso a Energisa. O estudo de proteção é um documento técnico que detalha as medidas de proteção adotadas no sistema de geração fotovoltaica, a fim de garantir a segurança e a integridade da rede elétrica. Esse estudo inclui informações sobre os equipamentos de proteção utilizados, como dispositivos de proteção contra sobretensão, dispositivos de proteção contra curto-circuito e dispositivos de proteção contra ilhamento, portanto, é crucial realizar estudos de proteção elétrica de alta qualidade, considerando as características específicas do

sistema elétrico, para garantir a segurança, a confiabilidade e o desempenho adequado do sistema.

1.1 Problemática

A ANEEL e o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) são órgãos reguladores e fiscalizadores no setor elétrico brasileiro. Eles têm a responsabilidade de estabelecer as regras e os requisitos técnicos para a proteção e controle dos equipamentos de geração, bem como sua interação com a rede elétrica.

A realização de estudos de proteção é uma parte essencial do processo de conexão de empreendimentos de geração ao sistema elétrico. Um estudo de proteção mal realizado, seja por erros de dimensionamento, configuração inadequada dos dispositivos de proteção ou falhas na análise de coordenação, pode resultar em prejuízos tanto para a concessionária responsável pela operação do sistema elétrico quanto para o empreendimento de geração. Isso pode incluir interrupções prolongadas do fornecimento de energia, danos a equipamentos, riscos de segurança e impactos financeiros significativos.

1.2 Justificativa

É fundamental que os estudos de proteção sejam conduzidos de forma precisa e detalhada, levando em consideração os requisitos regulatórios e técnicos estabelecidos pelos órgãos fiscais, a fim de garantir a operação segura e eficiente dos empreendimentos de geração e a integração adequada com a rede elétrica.

1.3 Objetivos

Este trabalho visa realizar uma revisão do estudo de proteção da fazenda Colorado, utilizando-se do *software* DIgSILENT e suas ferramentas de simulações, promovendo possíveis eventos de falhas, possibilitando a análise do desempenho das proteções bem como a verificação da veracidade do estudo, sempre embasado em base teórica e regulamentar.

1.3.1 Objetivo Geral

Analisar a minigeração instalada na fazenda Colorado através do *software* DIgSILENT PowerFactory.

1.3.2 Objetivos Específicos

- a) Modelar e simular o sistema da minigeração;
- b) Realizar estudo de proteção das funções 50/51, 50N/51N, 27/59, 81U/O;
- c) Avaliar a proteção da Central Geradora Fotovoltaica (UFV);

2 Fundamentos do Sistema de Proteção

2.1 Proteção de Sobrecorrente de fase

Quando ocorre um curto-circuito ou outra falha elétrica, a corrente elétrica pode aumentar para níveis perigosos e causar danos ao sistema elétrico, incluindo equipamentos, circuitos e linhas de transmissão. A proteção de sobrecorrente tem a finalidade de assegurar a integridade dos equipamentos elétricos e circuitos dos danos causados por correntes elétricas excessivas. Nesse sentido, os relés monitoram as condições elétricas do sistema para detectar quando ocorrer falhas, enviando um sinal para a abertura do disjuntor, isolando-o e mantendo o restante do sistema em operação normal.

A American National Standards Institute (ANSI), instituiu uma padronização da nomenclatura das funções de proteções elétricas. A função de sobrecorrente de fase ficou estabelecida como função 50 e função 51. A proteção 50 atua imediatamente, quando a corrente excede o limite pré-definido, por isso ela é conhecida como proteção de sobrecorrente instantânea, a proteção 51 possui um atraso programável antes de atuar, portanto esta é conhecida como a proteção de sobrecorrente temporizada. Essas proteções são essenciais para proteger as pessoas envolvidas e os equipamentos elétricos.

A característica dos relés de sobrecorrente é representada pelas suas curvas tempo versus corrente. A norma International Electrotechnical Commission (IEC) prevê curvas característica, sendo elas a normal inversa, muito inversa e extremamente inversa. As curvas de atuação são chamadas assim devido ao seu declínio em relação ao tempo. Neste trabalho utilizaremos a curva muito inversa, já que a mesma apresenta propriedades úteis em situações onde é necessário fornecer uma resposta rápida as correntes de curto-circuito de alta magnitude, enquanto também permite temporariamente que correntes mais baixas percorram o sistema antes que o dispositivo de proteção atue. Isso ajuda a evitar desligamentos desnecessários do sistema.

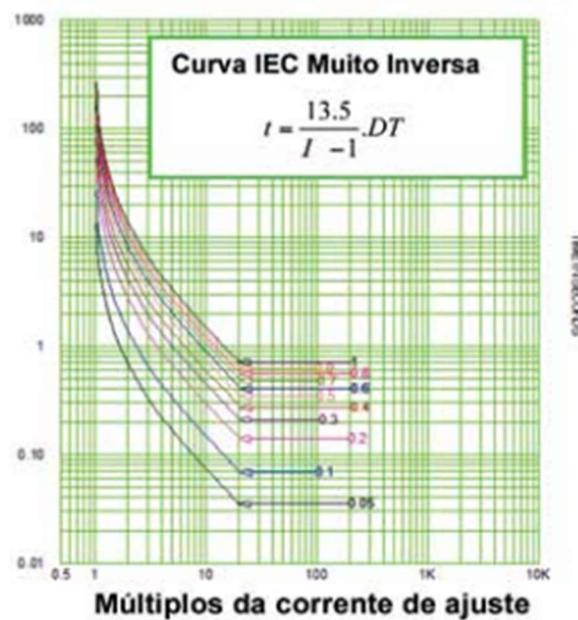


Figura 1: Curvas características – Muito Inversa.

Fonte: Revista o Setor Elétrico

Através da Equação 1, pode obter dias de tempo, seus ajustes permitem obter o tempo da atuação do relé para atender às necessidades de proteção e coordenação do sistema elétrico.

$$T = \frac{13,5}{\left(\frac{I_{ma}}{I_s}\right) - 1} * T_{ms} \quad (1)$$

Onde:

I_{ma} – Sobrecorrente Máxima Admitida.

I_s - Corrente de Acionamento.

T_{ms} – Multiplicador de tempo ou dial de tempo

De forma geral, a unidade de sobrecorrente de um relé de fase é configurada com um valor pré-ajustado chamado pick-up que é o termo genérico designado para a menor corrente que é possível atrair o êmbolo ou alavanca, ou seja, fazer o relé operar. Quando a corrente medida pelo relé excede esse valor pré-ajustado, o relé é acionado para iniciar a ação de proteção.

2.2 Sobrecorrente de neutro.

Para esta função a ANSI padronizou a nomenclatura em 50N e 51N. Assim como na função anterior a função 50N representa a função de atuação instantânea, bem como a função 51N representa a função de atuação temporizado, elas são acompanhadas por um N indicando que estas são reservadas ao condutor de neutro.

A proteção de sobrecorrente de neutro é um tipo específico de proteção utilizado em circuitos elétricos com múltiplas cargas conectadas por um condutor comum. Em sistemas elétricos equilibrados, a corrente nesse condutor deve ser ínfima ou inexistente. Porém, em casos de falhas, como curtos-circuitos ou problemas nos equipamentos conectados, pode ocorrer uma sobrecorrente nesse condutor compartilhado. A proteção de sobrecorrente específica é responsável por detectar esse excesso de corrente e interromper o circuito, evitando danos.

“O relé apresenta 3 Transformador de Corrente (TCs) em paralelo formam um filtro onde só passam as componentes de sequência zero. Portanto, o traço cheio da Figura 2. corresponde a uma réplica da terra, ou seja, por este circuito (trecho) passa somente a sequência zero proveniente do sistema, já referida ao circuito secundário dos TCs” (kindermann, 2012, p.118)

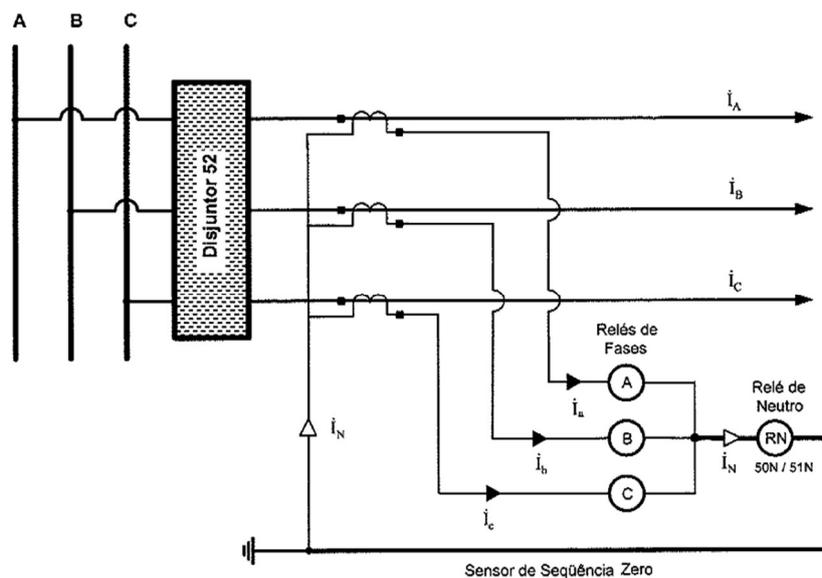


Figura 2: Relé de Neutro

Assim toda a corrente que escoar para a terra tem seu reflexo no relé de neutro. O relé se torna sensível apenas as correntes de sequência zero, fundamental na detecção de curtos monofásicos.

2.3 Proteção de Subtensão e Sobretensão.

As proteções de subtensão e sobretensão são medidas importantes para proteger sistemas elétricos contra condições anormais de tensão. Essas proteções evitam danos a equipamentos elétricos e garante o seu funcionamento adequado. Para estas funções a ANSI padronizou a nomenclatura em 27 e 59, sub tensão e sobre tensão respectivamente.

A proteção de subtensão opera quando a tensão cai abaixo de um valor pré-definido. Isso é crucial para evitar danos aos equipamentos. Tensões muito baixas podem causar mau funcionamento ou até mesmo desligamento dos equipamentos. Por outro lado, a função de sobretensão monitora a tensão em um sistema elétrico e atua quando a tensão excede um limite superior ao pré-estabelecido. Essa proteção é essencial para evitar danos aos equipamentos e proteger os sistemas elétricos em situações de tensão excessiva.

Os valores de ajuste de subtensão e sobretensão podem variar dependendo das normas e regulamentos estabelecidos pela distribuidora de energia local. No caso da Energisa adota-se $0,8V_n$ para subtensão e $1,1V_n$ para sobretensão. Tais valores representam uma prática comum, onde V_n é a tensão nominal do sistema elétrico. É importante ressaltar que esses valores podem variar segundo as normas específicas da distribuidora local.

2.4 Proteção de Subfrequência e Sobre frequência.

A proteção de sobre frequência e sub frequência é uma função de proteção utilizada em sistemas elétricos para monitorar e controlar a frequência da rede. Para esta função a ANSI padronizou a nomenclatura 81, o U na nomenclatura designa a sobre frequência e por sua vez O designa a sub frequência (Under/Over).

A proteção de sobre frequência é projetada para detectar e responder a um aumento anormal na frequência do sistema elétrico. Isso pode ocorrer devido a eventos como desconexão de carga ou falhas no sistema. Por outro lado, a proteção de sub frequência é responsável por detectar e responder a uma diminuição anormal na frequência do sistema elétrico. Isso pode ocorrer devido a eventos como falhas de geração de energia. Ambas as funções são utilizadas para

disparar alarmes, desligar equipamentos ou tomar outras medidas para restaurar a frequência adequada e evitar maiores danos ao sistema.

2.5 Transformador de Corrente.

Os TCs, se caracterizam por serem um dispositivo que ao ter sua bobina excitada por uma corrente elétrica no enrolamento primário impõe uma corrente proporcional à relação de espiras no enrolamento secundário do TC. Devido a esta característica o seu emprego no sistema elétrico de potência se faz necessário. O mesmo permite a medição precisa de correntes Elevadas de forma segura e conveniente em diversas situações, desde da geração de energia elétrica, em equipamentos de acionamento de cargas, medição e proteção.

Em seu livro Geraldo Kindermann, apresenta que os TCs devem reproduzir no seu secundário uma corrente que é uma réplica em escala da corrente do primário do sistema elétrico, possibilitando trabalhar com níveis menores de corrente. A maioria dos tipos de transformador de corrente possuem uma classificação secundária padrão de 5 Ampere, sendo a relação de transformação do TC expressas como uma razão da corrente nominal primaria pela corrente nominal secundária. (Kindermann, 2012)

Segundo a NBR 6856 da ABNT, as correntes primárias do TC são de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 800, 1000, 1200, 1500, 2000, 2500, 3000, 4000, 5000, 6000 e 8000A. Essa variedade de correntes primárias permite que os TCs sejam utilizados em uma ampla gama de aplicações em diferentes sistemas elétricos.

A corrente de regime permanente é a corrente elétrica que um dispositivo ou equipamento elétrico opera normalmente durante sua operação contínua e projetada. A corrente de regime permanente é um parâmetro importante a ser considerado no projeto e dimensionamento de sistemas elétricos. Ela é determinada com base nas características do equipamento e nas demandas de carga esperadas. É importante selecionar dispositivos de proteção, como disjuntores, fusíveis e relés, que possam suportar a corrente de regime permanente.

O critério de curto-circuito busca entender qual será a máxima corrente de curto-circuito que passa no primário do TC. Quando a corrente no primário do transformador é muito alta o núcleo magnético do transformador fica completamente magnetizado. Quando isso acontece o TC não é capaz de medir a corrente corretamente, o que levará a erros e falhas na proteção do

sistema elétrico. Podemos obter a maior corrente de curto-circuito através de um estudo específico nas instalações.

Para evitar que ocorra a saturação é utilizando um fator de sobrecorrente, definido como múltiplo da corrente nominal do TC. Tal fator previne que o TC não sofra saturação por correntes maiores do que a nominal durante a ocorrência do defeito.

2.5.1 Dimensionamento dos TCs.

a) Critério de carga nominal da transformação.

Para encontrar o TC que será usado no sistema, deve-se encontrar a corrente de regime permanente e a corrente de curto-circuito. Encontrando as duas, pode-se definir qual será a relação do TC a ser utilizado no sistema.

Devido a corrente nominal ser determinada pela carga da instalação, utiliza-se do somatório das correntes nominais de cada transformador. Para calcular a corrente nominal que irá percorrer no local da medição, utilizando-se da Equação 2.

$$I_n = \frac{S_t}{\sqrt{3} * V_n} \quad (2)$$

A onde:

S_t = Somatório das potências nominais dos transformadores

I_n = corrente nominal

V_n = tensão nominal

Através da obtenção da corrente nominal do sistema, pode-se definir o valor inicial da relação de transformação do TC.

b) Critério de curto-circuito

A corrente curto-circuito pode ser obtida através do equivalente de Thevenin. O equivalente de Thevenin é uma técnica comumente utilizada na análise de circuitos elétricos, para simplificar uma parte do circuito em uma única fonte de tensão em série com uma

resistência equivalente, que representa o comportamento desse circuito em relação a um ponto específico, possibilitando a verificação de corrente de curto-circuito no ponto especificado.

$$I_{p_{nominal\ TC}} = \frac{I_{cc}}{FS} \quad (3)$$

$I_{p_{nominal\ TC}}$ – Corrente primária do transformador de corrente.

I_{cc} – Corrente de curto-circuito.

FS – Fator de sobrecorrente

As precisões do Transformador de Corrente para proteção são de 2,5%, 5% ou 10%. O valor mais comumente utilizado é o de 10%. Exemplo para um TC com classe de exatidão de 10% o valor máximo de corrente de curto-circuito permitido no primário do TC é 10 vezes a corrente nominal do TC. Os valores máximos das correntes simétricas de curto-circuito que podem passar pelo primário do TC para que o seu erro seja mantido na faixa dos 10%.

A ABNT 6856 prevê um $FS = 20$. O fator FS , garante, a princípio, que o TC não sofrerá saturação durante a ocorrência do defeito. Se a condição da Equação 3 for respeitada, o erro no secundário do TC será igual ou inferior aos 10%.

$$I_{cc} \leq I_{p_{nominal\ TC}} * 20 \quad (4)$$

É necessário realizar uma análise das Equações 2 e 3 para a escolha do TC.

c) Operação dentro da saturação do TC.

Através deste critério podemos prever como será o comportamento do TC quando ocorrer a saturação. Neste item é realizado a somatório das cargas conectadas no secundário. A carga no secundário do TC será composta pela resistência dos cabos que ligam o TC ao relé, a resistência da bobina de corrente do relé e a resistência da bobina do TC.

$$Z_{carga\ do\ TC} = Z_{secundário\ do\ TC} + 2 * \rho_{cobre} \frac{l}{S_{cobre}} + \sum Z_{relés} \quad (5)$$

A impedância da carga influencia na precisão das medições de corrente realizadas pelo TC. A corrente medida no secundário do TC é proporcional à corrente primária e inversamente proporcional à impedância da carga. Portanto, uma carga de baixa impedância resulta em uma

menor queda de tensão no secundário do TC, conseqüentemente, em uma medição de corrente mais precisa.

2.6 A corrente de Inrush

A corrente de Inrush é uma corrente transitória que ocorre no momento da energização de um transformador. Ela é uma corrente de curta duração e geralmente é mais alta do que a corrente nominal do dispositivo. A corrente de Inrush ocorre devido à magnetização inicial dos núcleos de transformadores e dentre outros motivos. Embora a corrente de Inrush seja transitória, sua magnitude inicial pode ser significativamente maior do que a corrente nominal do equipamento. Portanto, é importante selecionar dispositivos de proteção capazes de lidar com essas correntes mais elevadas. As Equações (6) e (7) calcula a corrente de Inrush de fase e o Inrush de fase residual, essencial no dimensionamento correto dos dispositivos de proteção.

$$I_{MAGtotal} = \text{MaiorImag} + \sum In \text{ demais trafos} \quad (6)$$

MaiorImag = (8 – 10 para trafos com isolação a óleo) * In do maior trafo

In = Corrente nominal dos trafos

Para a Inrush de fase residual:

$$I_{Inrush_{fase (real)}} = \frac{I_{MAGtotal} * I_{3\phi}}{I_{MAGtotal} + I_{3\phi}} \quad (7)$$

$I_{3\phi}$ = Corrente de curto circuito trifásico

2.7 O ajuste da corrente de atuação da função 50

$$Pickup_{50} = 1,2 \times Inrush_{Total} \quad (8)$$

O pick-up é para um corrente especial, ou seja, a menor de todas as correntes que deixam o relé no limiar de operação. (kindermann, 2012, p.67)

No secundário:

$$Pickup_{50F} = \frac{1,2 \times Inrush_{Total}}{RTC} \quad (9)$$

2.8 O ajuste da corrente de atuação da função 51 temporizada de fase.

“Os ajustes dessa unidade devem satisfazer às condições descritas a seguir:

O relé não deve operar para a condição de carga máxima admitida.

- Na condição de operação, todo equipamento, em geral, pode ser carregado acima de sua capacidade nominal por alguns instantes, dependendo da sua condição inicial antes da sobrecarga.

A partir da condição requerida, seleciona-se a corrente de tape consoante a Equação (10).

$$I_{utf} = \frac{K_f \times I_c}{RTC} \quad (10)$$

I_{utf} – corrente de tape da unidade temporizada, em A.

K_f – valor da sobrecarga admissível, cujo valor deve variar entre 1,2 e 1,5.

I_c – corrente nominal do equipamento ou corrente do circuito a ser protegido, em A.

- O relé deve operar de acordo com a curva de temporização para o múltiplo da corrente ajustada.

A determinação do tempo de ajuste do relé é função do plano de coordenação previsto. No entanto, deve-se manter uma diferença mínima de 0,4 s entre os tempos de operação de dois relés funcionando em cascata. Esse tempo é resultado das seguintes premissas:

Tempo próprio de operação do disjuntor: $\cong 0,13$ s.

Tolerância do fabricante do disjuntor: $\cong 0,10$ s.

Tempo de segurança do projeto: $\cong 0,17$ s.

- A corrente de acionamento deve ser, no máximo, igual à corrente térmica do transformador de corrente.
- Dessa forma, fica resguardada a integridade deste equipamento quanto aos efeitos térmicos. O relé deve operar para a menor corrente de curto-circuito do trecho protegido pelo disjuntor.” (Mamede, 2013, p.163)

Quando o relé é acionado, a função de temporização é habilitada por meio de um contador de tempo. Essa função é usada para garantir que o relé não seja desativado prematuramente em caso de flutuações na corrente elétrica. O contador de tempo integra os valores medidos de corrente elétrica, determinando o tempo de atuação necessário para que a proteção seja efetiva.

2.9 Ajuste da Corrente de Atuação para a Função 51 Temporizada de Neutro.

“As principais condições para ajuste da unidade temporizada de neutro são:

- A corrente de acionamento da unidade temporizada do relé de sobrecorrente de neutro deve ser superior à corrente de desequilíbrio do sistema.

Em geral, permite-se que o valor dessa corrente de desequilíbrio oscile entre 10 e 30% no máximo da capacidade nominal do transformador. Dessa forma, a corrente do relé deve ser ajustada entre esses valores, a fim de evitar uma interrupção desnecessária do transformador. Logo, a corrente de ajuste pode ser dada pela Equação (11).” (Mamede, 2013, p.163)

$$I_{atn} = \frac{k_n * Int}{RTC} \quad (11)$$

I_{atn} – corrente de ajuste do tape da unidade temporizada de neutro.

K_n – fator de desequilíbrio de corrente admissível que pode variar entre 0,10 e 0,30.

Int – corrente nominal do transformador, em A.

RTC – relação de transformação de corrente do transformador de corrente da proteção.

As correntes de sequência zero são detectadas no circuito secundário dos TCs, que é sensível apenas a esse componente de corrente. Toda corrente do sistema elétrico que escoar pelo terra tem o seu reflexo no relé de neutro, sendo assim, o relé de neutro é capaz de detectar a presença de um curto-circuito que envolva o terra.

2.10 Ajuste das unidades de subtensão / sobretensão

Os ajustes desta unidade seguiram as recomendações da concessionária local (Enegisa-MT) do empreendimento, norma esta que recomenda:

Tabela 1: Recomendações da Energisa para sub/sobre tensão

Ajuste recomendados para as proteções de subtensão e sobretensão instaladas no ponto de conexão	
subtensão (27)	sobretensão (59)
80% de $V_n(3F)$ - 10 segundos	110% de $V_n(3F)$ - 10 segundos

Fonte: NDU-015,2022. Energisa

2.11 Unidade de sub/sobre frequência

A norma NDU-015 também recomenda os valores das funções 81 U/O.

Tabela 2: Recomendações da Energisa para sub/sobre frequência

Ajuste recomendados para as proteções de frequência instaladas no ponto de conexão	
subtensão (81U)	sobretensão (81O)
58,5 Hertz - 10 segundos	62 Hertz - 30 segundos
56,5 Hertz - instantânea	66,0 Hertz - instantânea

Fonte: NDU-015,2022. Energisa

3 Metodologia

A metodologia empregada pode ser dividida em cinco passos:

- I. Conferência dos dados do estudo de proteção realizado.
- II. Montagem do sistema reduzido no DIgSilent PowerFactory.
- III. Realização dos Cálculos Teóricos.
- IV. Implementação do Relé.
- V. Análise dos Dados Obtidos da Simulação.

Os cinco passos mencionados mostram uma sequência lógica de atividades para se obter resultados confiáveis na análise da proteção.

No primeiro passo é importante conferir a qualidade dos dados coletados no estudo de proteção realizado anteriormente, a fim de garantir que as informações utilizadas na modelagem do sistema são confiáveis.

O segundo passo foi a montagem do sistema elétrico reduzido no *software* DIGSILENT.

No terceiro passo, são realizados os cálculos teóricos. Dimensionamento do TC, corrente de Inrush, corrente de pick-up e os devidos ajustes das funções.

O quarto passo consiste na implementação do relé, TC e TP, utilizando a fundamentação teórica necessária para a escolha adequada desses dispositivos.

Finalmente, no quinto passo, é realizada uma análise dos dados obtidos a partir da simulação, a fim de verificar se os mesmos são valores previstos no estudo de proteção. Essa análise comparativa é importante para validar o estudo de proteção e para avaliar a eficácia da proteção do sistema. Na figura (3) é apresentado o fluxograma dos passos já mencionado.

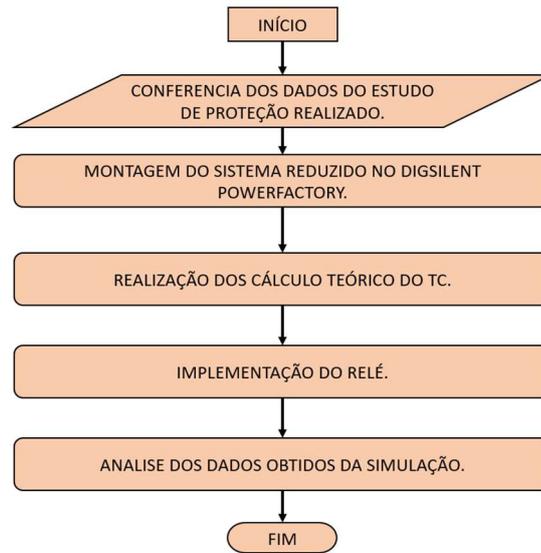


Figura 3: Fluxograma do método implementado

Fonte: autor

4 Simulação Computacional

O Manual do usuário DIgSILENT (2012), refere ao PowerFactory como sendo um aplicativo de *software* de análise de sistema de energia para uso na análise de geração, transmissão, distribuição e sistemas industriais. Abrange toda a gama de funcionalidades, desde recursos padrão até aplicações altamente sofisticadas e avançadas, incluindo energia eólica, geração distribuída, simulação em tempo real e monitoramento de desempenho para teste e supervisão do sistema.

O DIgSILENT PowerFactory é um *software* que possibilita a modelagem de redes elétricas, análise de fluxo de carga, estudos de curto-circuito e estudo de proteção. O ambiente de simulações fornecerá informações valiosas sobre o desempenho da proteção, quando o sistema opera sobre falha, assim como outros aspectos importantes, motivando o uso do mesmo.

4.1 Dados coletados para realização da simulação.

Os dados a seguir foram utilizados para a representação do sistema elétrico da UFV.

- Diagrama unifilar da subestação
- Nível de curto-circuito da Barra EMT-063014
- Dados dos transformadores
- Dados da geração

Dados estes que consta no estudo realizado, possibilitando a implementação no *software*.

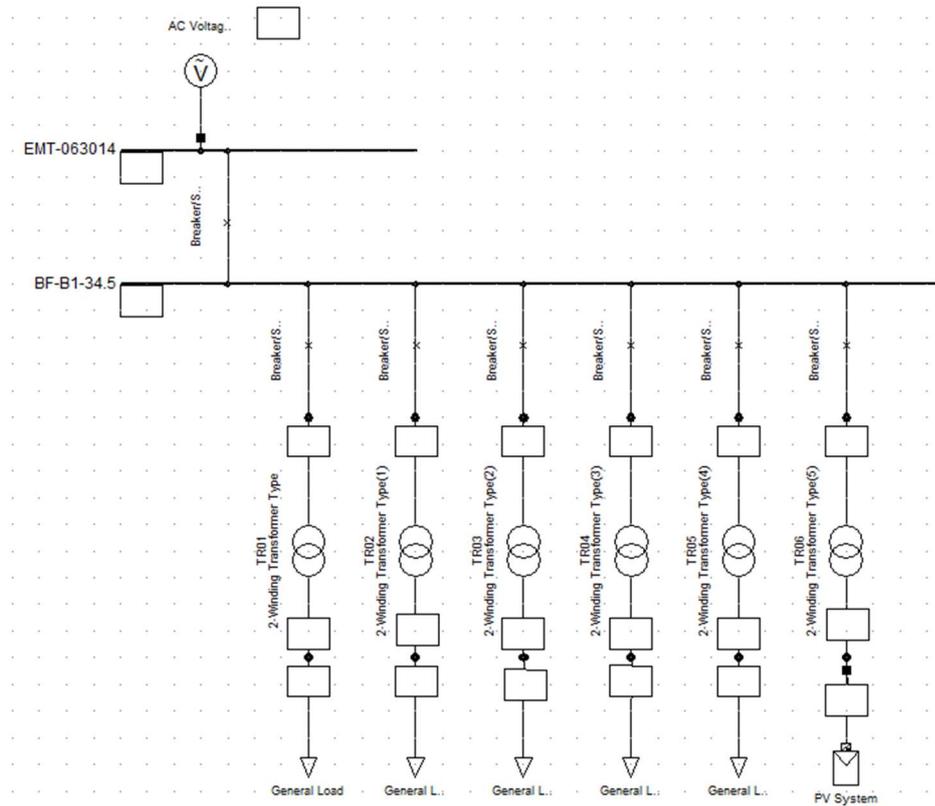


Figura 4: Diagrama unifilar

Fonte: autor

Vale ressaltar que o relé escolhido corresponde ao mesmo utilizado no estudo de proteção. Isso é importante para garantir a consistência e a validade dos resultados obtidos no estudo. O relé selecionado é o modelo SEL 751-5A da fabricante Schweitzer. O SEL-751 é um relé multifuncional de proteção, controle e monitoramento de sistemas elétricos. Ele é amplamente utilizado na indústria de energia e é conhecido por sua confiabilidade e desempenho.

5 Resultados e Análises

5.1 Equivalente de Thevenin.

No estudo apresenta um relatório da impedância de curto-circuito da barra de entrada e o valor base da potência. Informações obtidas juntamente a concessionária local. Essas informações são fundamentais para projetar e dimensionar corretamente os sistemas de proteção elétrica.

5.1.1 Corrente de Curto-Circuito Trifásica (Fase-Fase)

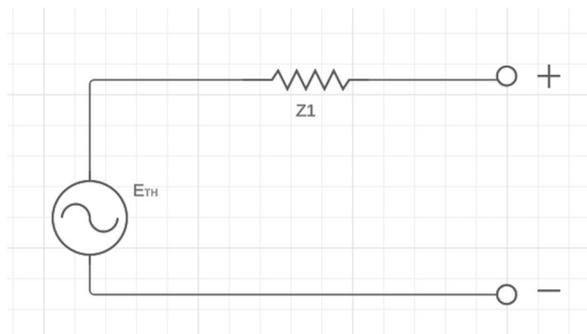


Figura 5: Equivalente de Thevenin sequência positiva

Fonte: autor

$$I_{base} = \frac{100MVA}{\sqrt{3} * 34.5KV} = 1673.479A$$

$$Z_{base} = \frac{(34.5KV)^2}{100MVA} = 11.9025\Omega$$

$$I_{a1} = \frac{Eth}{Z1} = \frac{1pu}{4.7947 + j5.5402} = 0.1364L - 49.13 \quad (12)$$

I_{a1} = Corrente que percorre o circuito

$Z1$ = Impedância de sequência positiva

E_{th} = Fonte de Thevenin

Para encontrar o valor “real” multiplicamos o valor base pelo valor em pu:

$$I_a = I_{a1} * I_{base} = 228,40L - 49.13$$

5.1.2 Corrente de Curto-Circuito Monofásica (Fase-Terra)

CIRCUITO

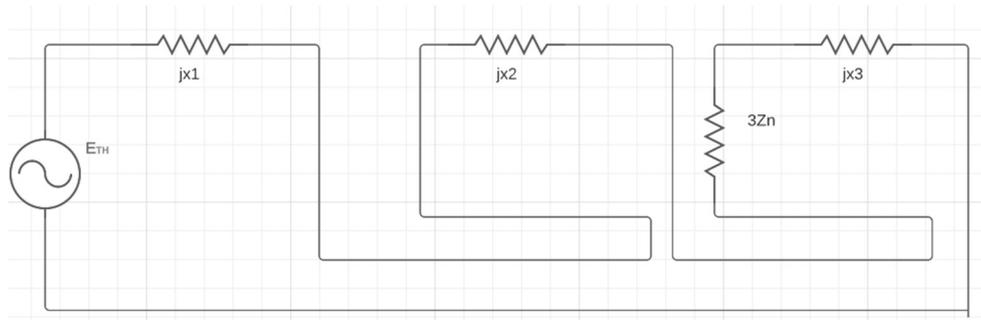


Figura 6: Equivalente de Thevenni seguência negativa

Fonte: autor

$$I_{a1} = \frac{Eth}{Z1} = \frac{1pu}{2 * (4.7947 + j5.5402) + 6.6626 + j65.9420} = 2.621 * 10^2 L - 64.78$$

$$I_a = I_{a1} * I_{base} = 131.60 L - 64.78 \quad (13)$$

Os valores corresponderão ao apresentado no estudo de proteção bem como nas simulações realizadas no *software*. Nas Figuras 7 e 8 é apresentado, respectivamente a simulação de um curto circuito trifásico e monofásico, no ponto especificado.

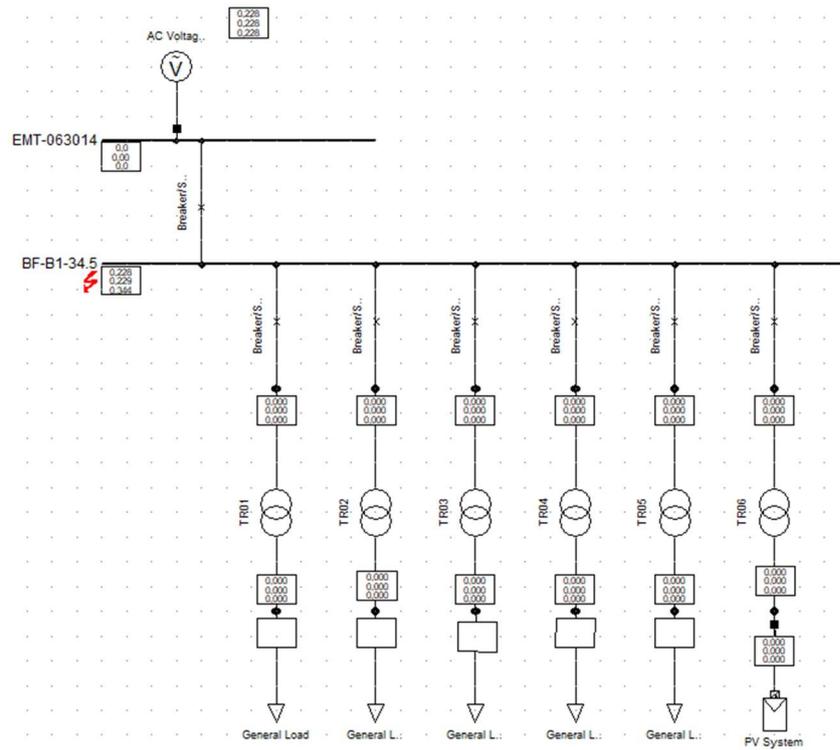


Figura 7: Curto-Circuito trifásico

Fonte: autor

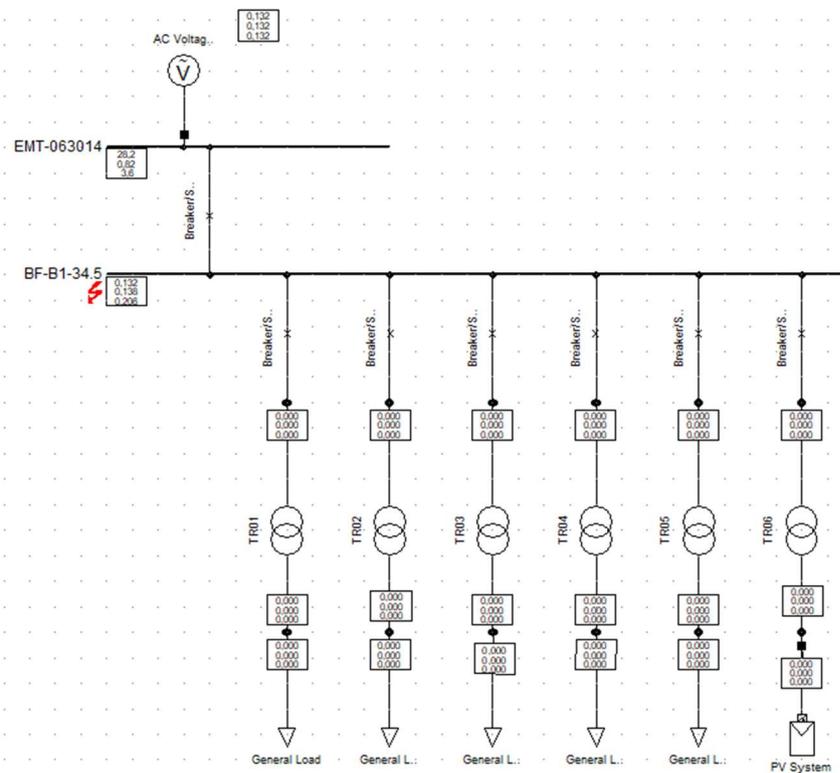


Figura 8: Curto- Circuito Monofásico

Fonte: autor

5.1.3 Fluxo de Carga.

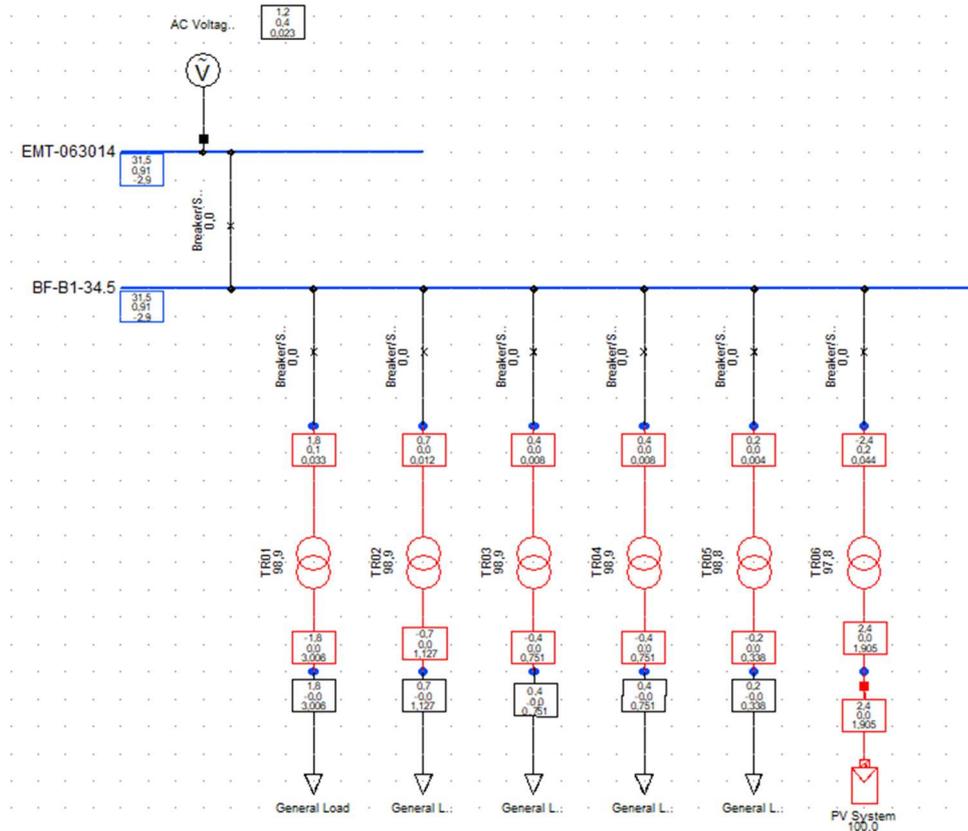


Figura 9: Fluxo de Potência

Na Figura 9, notamos os transformadores operando próximo de sua capacidade máxima projetada, para isso ajustamos os valores das cargas em 90% da potência nominal dos transformadores. Além da geração estar correspondendo aos 2,4MVA.

5.2 Inrush de fase

$$In_T = \frac{S}{V_n * \sqrt{3}}$$

$$Inrush_{Total\ fase} = 10 * In_{Tr6} + In_{Tr1} + In_{Tr2} + In_{Tr3} + In_{Tr4} + In_{Tr5} = 518,3$$

$$Inrush_{fase\ real} = \frac{Inrush_{fase} * I_{3\phi}}{Inrush_{fase} + I_{3\phi}} = 158,53 \quad (13)$$

5.3 Inrush de fase residual

$$Inrush_{residual\ real} = 20\% * Inrush_{fase\ real} = 0,2 * 158,54\ A = 1,71\ A \quad (14)$$

5.4 Dimensionamento do TC.

Seguindo a Equação (2):

$$I_n = \frac{2000 + 750 + 500 + 500 + 225 + 2700}{\sqrt{3} * 34.5}$$

$$I_n = 111.7A$$

Seguindo a Equação (3):

$$20 = \frac{228,4}{I_{p_{nominalTC}}}$$

Assim temos que $I_{p_{nominalTC}} = 11,42$

No estudo, é utilizado um transformador de corrente (TC) com uma relação de transformação de 100/5, este RTC apresenta uma relação mais próxima do TC existente. Assim, este TC ficou responsável por reduzir a corrente do circuito principal em uma proporção de 100 para 5, tornando-a adequada para a medição e proteção do sistema. Além disto, o estudo apresenta uma análise do comportamento do TC em caso de saturação. Informações que estão apresentadas no Apêndice.

5.5 Valores obtidos para a função 50.

Considerando:

$$I_{rushTotal} = 158,54 A$$

Logo, adotaremos:

$$Pickup_{50F} = 1,2 \times 158,54 = 190,25 A$$

Será utilizada a Equação (9) para o calcularmos o ajuste da função 50. Assim temos que:

$$Pickup_{50F} = \frac{190,25}{RTC}$$

O valor obtido da corrente de $Pickup_{50} = 9,52$

Nas Figuras 10 é demonstrado a implementação dos valores obtidos na função 50 do Relé. Posteriormente foi instaurado um evento de curto-circuito na barra BF-B1-34.5, a onde a proteção sobrecorrente operou de maneira esperada, assim como podemos observar com a Figura 11, tal evento provocou envio do sinal para o *trip* do relé. A Figuras 12 apresenta o diagrama do sistema com a operação do relé. Já a Figuras 13 demonstram os dados gerados no console do *software* onde podemos ver o tempo de atuação dos relés e onde eles estão conectados. Por fim na Figura 14 apresentado o oscilograma do sistema gerados pelo *software* onde está sendo monitorada a corrente secundaria dos TCs.

Figura 10: Dados da função 50 implementados

Fonte: autor

```
DIgSI/pc1 - (t=032:927 ms) -----
DIgSI/pc1 - (t=032:927 ms) 'Grid\EMT-063014\Cub_2\Relé.ElmRelay':
DIgSI/pc1 - (t=032:927 ms) Relay is tripping. 'Open' signal is sent to the connected breaker(s).
DIgSI/pc1 - (t=032:927 ms) -----
```

Figura 1111: Tempo de abertura da função 50

Fonte: autor

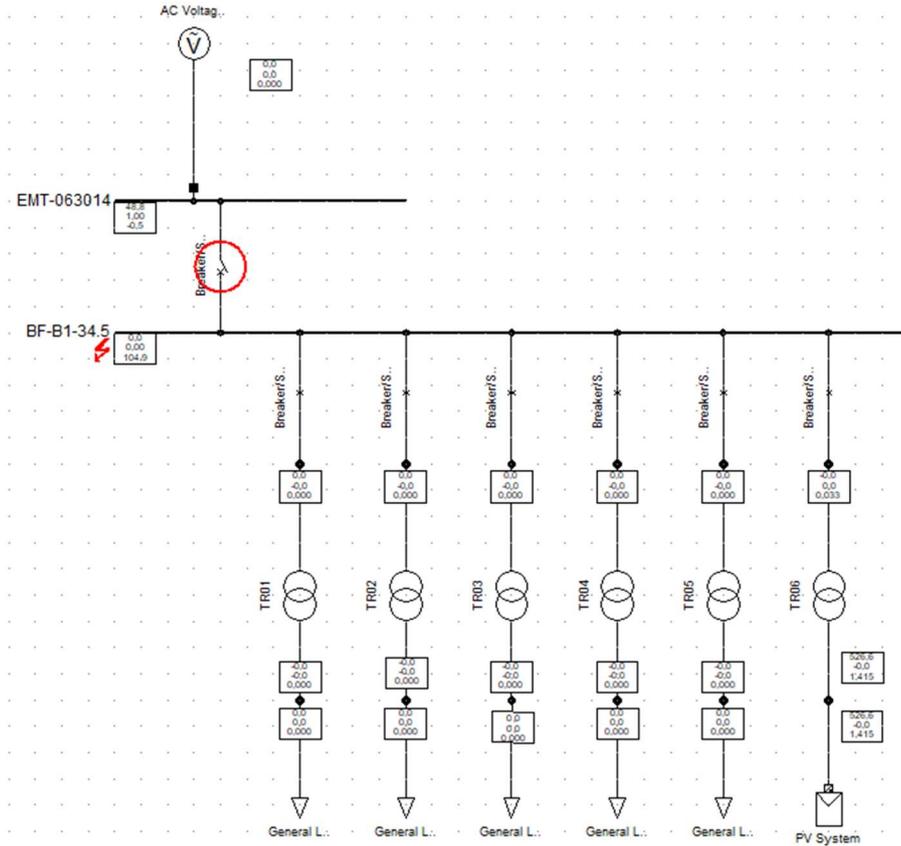


Figura 12: Relé Operando para função 50

Fonte: autor

Relay	Branch	Terminal	/Station	Type	Tripping Times
Rele		EMT-063014	/	SEL 751-5A	
50P1	(IEC: I>> ANSI: 50)			Currents A : 11,420 sec.A B : 11,420 sec.A C : 11,420 sec.A	228,40 pri.A 228,40 pri.A 228,40 pri.A
50P2	(IEC: I>> ANSI: 50)			Currents A : 11,420 sec.A B : 11,420 sec.A C : 11,420 sec.A	228,40 pri.A 228,40 pri.A 228,40 pri.A
50P3	(IEC: I>> ANSI: 50)			Currents A : 11,420 sec.A B : 11,420 sec.A C : 11,420 sec.A	228,40 pri.A 228,40 pri.A 228,40 pri.A
50P4	(IEC: I>> ANSI: 50)			Currents A : 11,420 sec.A B : 11,420 sec.A C : 11,420 sec.A	228,40 pri.A 228,40 pri.A 228,40 pri.A

Figura 13: Relatório da função 50

Fonte: autor

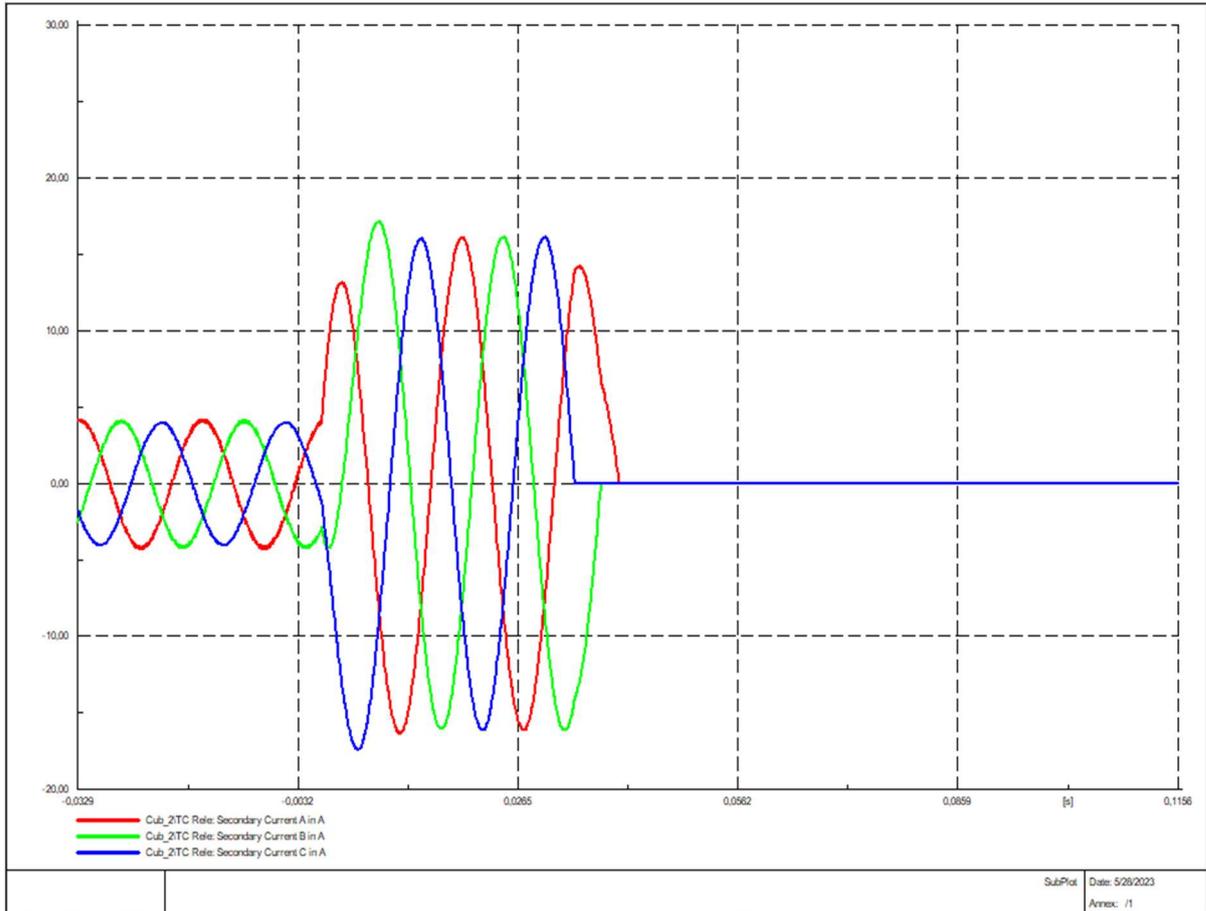


Figura 14: Oscilograma função 50

Fonte: autor

5.6 Valores obtidos para a função 51

Conforme a Equação 1 e 10:

$$I_{utf} = \frac{K_f \times I_c}{RTC}$$

Segundo o estudo, o ajuste do pick-up da sobrecorrente de fase será ajustado em 125% da demanda contratada, considerando $f_p = 0,92$.

$$I_{utf} = \frac{1,25 \times 43,65}{\frac{100}{20}} \approx 2,73$$

O seu multiplicador de tempo.

$$T = \frac{13,5}{\left(\frac{I_m}{I_S}\right) - 1} * T_{ms}$$

Primeiramente encontramos Dial de Tempo que deverá ser menor que o tempo da atuação da proteção de entrada garantindo a seletividade entre as proteções da concessionária e do empreendimento, para isso a concessionária disponibiliza dado da sua proteção da sua proteção, como dial de tempo, curva característica e corrente de pick-up, através da equação característica obteve-se o valor de 1,14. Utilizamos deste valor e substituir na equação 1 para encontramos um valor de $T_{ms} = 0.08ms$, este é o nosso dial tempo que basicamente este valor demonstrar o juste do tempo de atuação do relé.

Nas Figuras 15 é demonstrado a implementação dos valores obtidos na função 51 do Relé como também e adicionada a curva característica da função temporizada. Posteriormente foi instaurado um evento de curto-circuito na barra BF-B1-34.5, a onde a proteção sobrecorrente operou de maneira esperada, permitindo que o curto durar aproximadamente por 0,35 ms antes de sua atuação. A Figuras 16 apresenta o diagrama do sistema com a operação do relé. Podemos observar com a Figura 17 que tal evento provocou envio do sinal para o trip do relé. A Figuras 18 demonstram os dados gerados no console do *software* onde podemos ver o tempo de atuação dos relés e onde eles estão conectados. Por fim, na Figura 19 apresentado o oscilograma do sistema gerados pelo *software* onde está sendo monitorada a corrente secundaria dos TCs, fica nítido que a corrente perdurou por mais tempo antes de ser cessada.

Figura 15: Dados da função 51 implementados

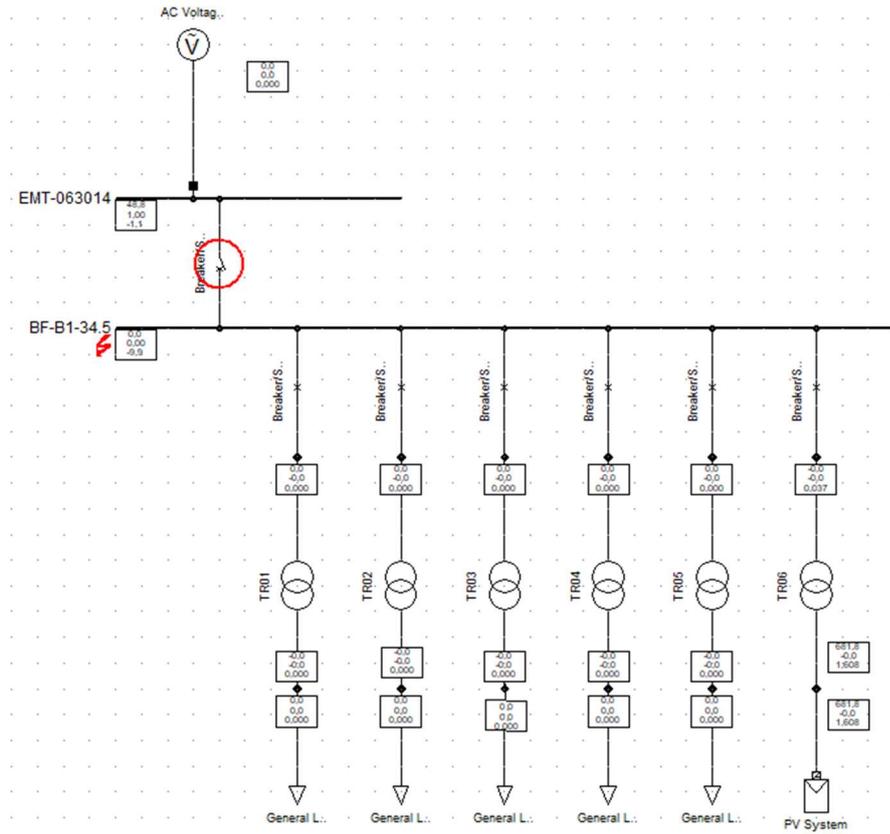


Figura 16: Relé Operando para 51

Fonte: autor

```

DIGSI/pcl - (τ=342:342 ms) -----
DIGSI/pcl - (τ=342:342 ms) 'Grid\EMT-063014\Cub_2\Rele.ElmRelay':
DIGSI/pcl - (τ=342:342 ms) Relay is tripping. 'Open' signal is sent to the connected breaker(s).
DIGSI/pcl - (τ=342:342 ms) -----
    
```

Figura 17: Tempo de abertura da função 51

Fonte: autor

Relay	Branch	Terminal	/Station	Type	Tripping Times
Rele		EMT-063014	/	SEL 751-5A	0,339 s
51P1	(IEC: I>t ANSI: 51)			Currents A : 11,420 sec.A	228,40 pri.A
				B : 11,420 sec.A	228,40 pri.A
				C : 11,420 sec.A	228,40 pri.A
51P2	(IEC: I>t ANSI: 51)			Currents A : 11,420 sec.A	228,40 pri.A
				B : 11,420 sec.A	228,40 pri.A
				C : 11,420 sec.A	228,40 pri.A

Figura 18: Relatório da Função 51

Fonte: autor

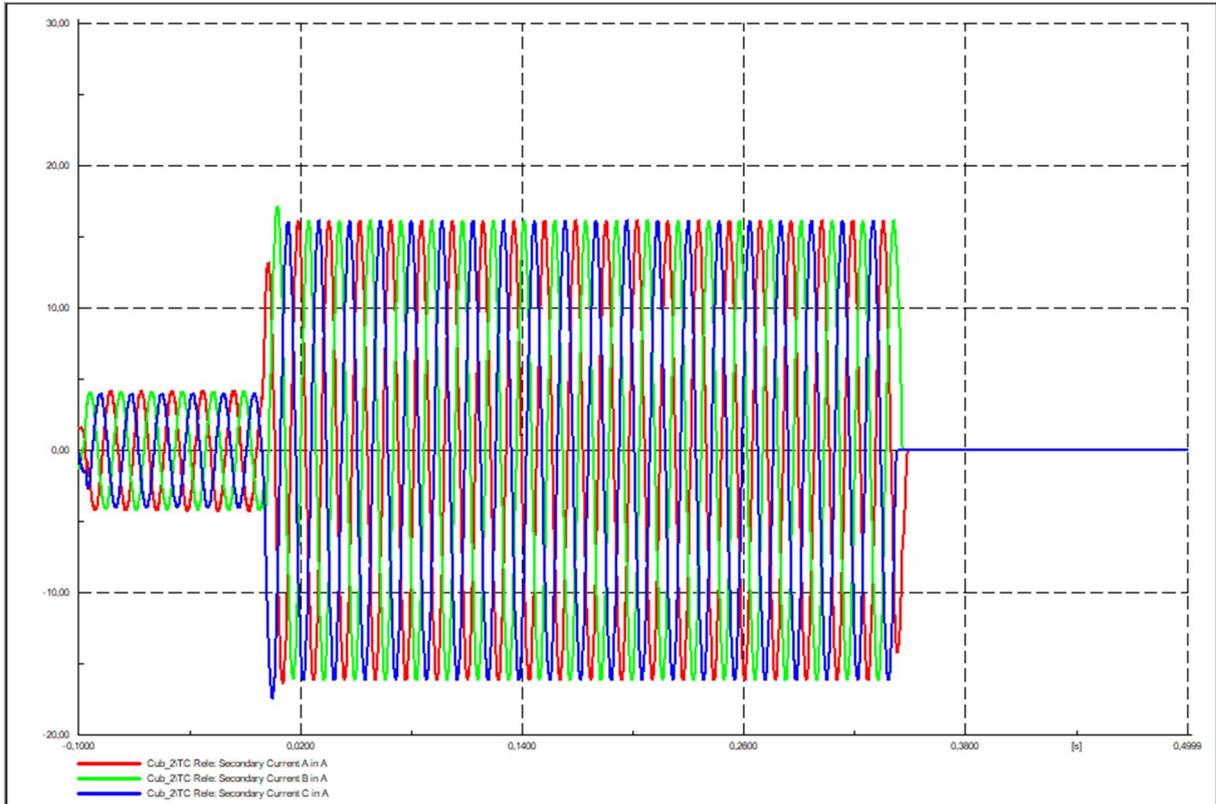


Figura 19: Oscilograma da Função 51

Fonte: autor

5.7 Valores obtidos para a função 50N

Para o cálculo da unidade instantânea de neutro/residual será igual a 20% da unidade instantânea de fase. O valor obtido da corrente de $Pickup_{50F} = 1,9025$.

Instantaneous Overcurrent - Grid\EMT-063014\Cub_2\Rele\50G1.Relloc

Basic Data	IEC Symbol: IE>>	ANSI Symbol: 50N	OK
Tripping Times	Measure Type: Earth Current (3*I0)		Cancel
Blocking	Name: 50G1		Relay
Description	Type: ... ray\Schweitzer\SEL 751\SEL 751-5A\50G1		
	<input type="checkbox"/> Out of Service		
	Tripping Direction: None		
	Pickup Current: 1,91 sec.A 0,382 p.u. 38,2 pri.A		
	Time Setting: 0,00 s		
	Total Time: 0,02 s		

Figura 20: Dados da função 50N implementados

Fonte: autor

Nas Figuras 20 é demonstrado a implementação dos valores obtidos na função 50N do Relé. Posteriormente foi instaurado um evento de curto-circuito monofásico na barra BF-B1-34.5. A Figuras 21 apresenta o diagrama do sistema com a operação do relé, a onde a proteção sobrecorrente operou de maneira esperada, assim como podemos observar com a Figura 22, tal evento provocou envio do sinal para o trip do relé. A Figura 23 demonstram os dados gerados no console a partir da ferramenta *calculate* do *software* onde, podemos ver o tempo de atuação dos relés e onde eles estão conectados. Por fim na Figura 24 apresentado o oscilograma do sistema gerados pelo *software* onde está sendo monitorada a corrente secundária dos TCs, a onde apresenta a variação de uma das fases, característico de um curto monofásico. Através da Figura 24 é fácil notar que o relé cessou o curto rapidamente.

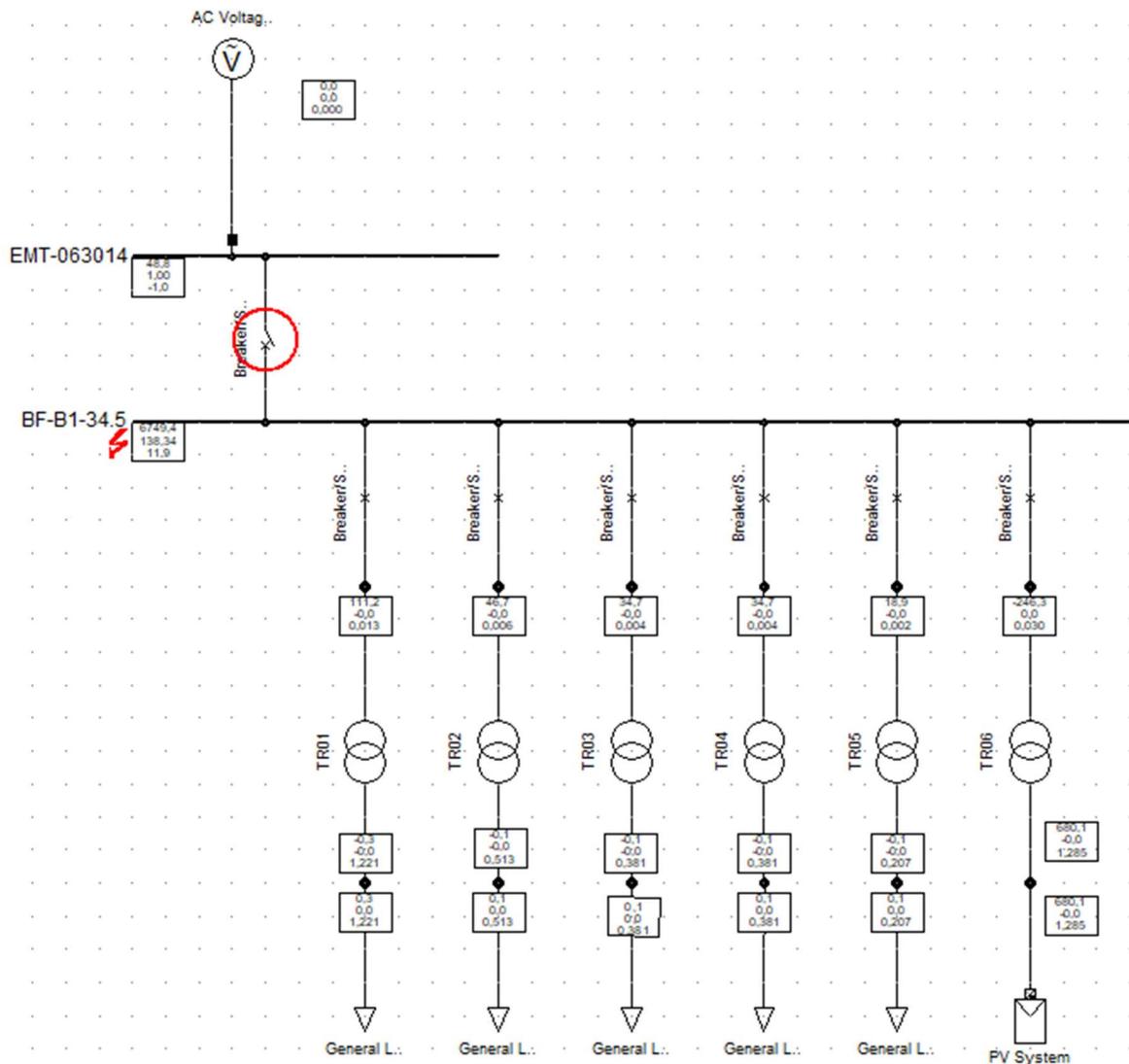


Figura 21: Relé Operando para 50N

```

DIgSI/pc1 - (t=066:181 ms) -----
DIgSI/pc1 - (t=066:181 ms) 'Grid\EMT-063014\Cub_2\Rele.ElmRelay':
DIgSI/pc1 - (t=066:181 ms) Relay is tripping. 'Open' signal is sent to the connected breaker(s).
DIgSI/pc1 - (t=066:181 ms) -----
    
```

Figura 22: Tempo de abertura da função 50N

Fonte: autor

Relay	Branch	Terminal	/Station	Type	Tripping Times
Rele		EMT-063014	/	SEL 751-5A	0,020 s
50G1	(IEC: IE>> ANSI: 50N)			Currents 6,580 sec.A 131,61 pri.A	0,020 s
50G2	(IEC: IE>> ANSI: 50N)			Currents 6,580 sec.A 131,61 pri.A	0,020 s
50G3	(IEC: IE>> ANSI: 50N)			Currents 6,580 sec.A 131,61 pri.A	0,020 s
50G4	(IEC: IE>> ANSI: 50N)			Currents 6,580 sec.A 131,61 pri.A	0,020 s

Figura 23: Relatório da Função 50N

Fonte: autor

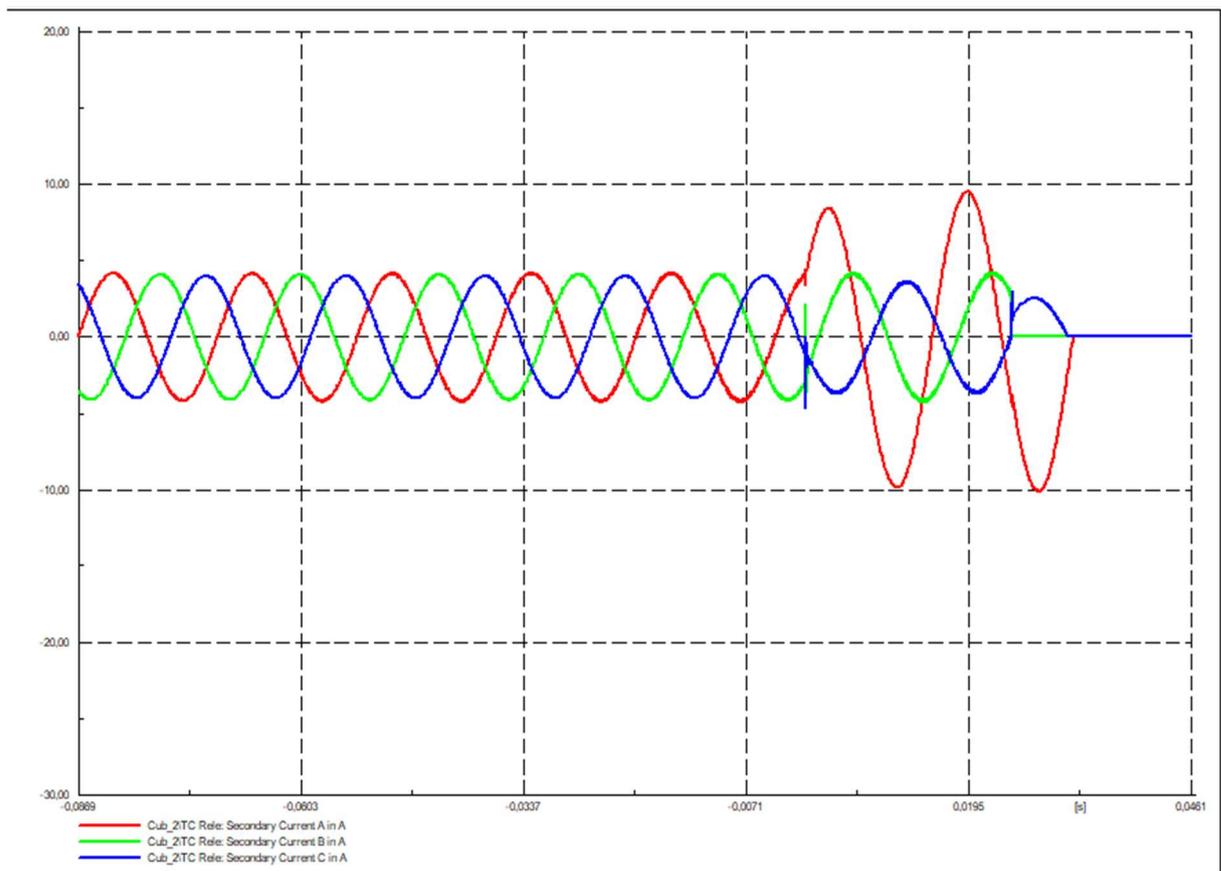


Figura 24: Oscilograma da Função 50N

Fonte: autor

5.8 Valores obtidos para a função 51N

Conforme a Equação 1 e 11:

$$I_{atn} = \frac{k_n * I_c}{RTC}$$

Segundo o estudo, o ajuste do pick-up da sobrecorrente de neutro temporizada será ajustado em 20% do ajuste de fase.

$$I_{utf} = \frac{0,20 * 54,55}{\frac{100}{20}} \approx 0,55$$

O seu multiplicador de tempo

$$T = \frac{13,5}{\left(\frac{I_{ma}}{I_s}\right) - 1} * T_{ms}$$

Primeiramente encontramos o dial tempo que deverá ser menor que 5,36, valor este encontrado através das informações cedidas pela concessionária de sua proteção. Este tempo é obtido em relação à atuação da proteção de entrada, conforme a atuação da proteção de entrada em caso de curto-circuito monofásico.

Obtemos um T_{ms} :

$$T_{entrada} = \frac{13,5}{\frac{228,4}{54,6} - 1} * T_{ms}$$

$$T_{ms} = 0,35$$

Nas Figuras 25 é demonstrado a implementação dos valores obtidos na função 51 do Relé como também e adicionada a curva característica da função temporizada. Posteriormente foi instaurado um evento de curto-circuito na barra BF-B1-34.5, a onde a proteção sobrecorrente operou de maneira esperada, permitindo que o curto durar aproximadamente por um período antes de sua atuação. Podemos observar com a Figura 26 que tal evento provocou envio do sinal para o trip do relé. A Figuras 27 demonstram os dados gerados no console do *software* onde podemos ver o tempo de atuação dos relés e onde eles estão conectados. Por fim, na Figura 28 apresentado o oscilograma do sistema gerados pelo *software* onde está sendo

monitorada a corrente secundária dos TCs, fica nítido que a corrente perdurou por mais tempo antes de ser cessada. A Figuras 29 apresenta o diagrama do sistema com a operação do relé.

Time Overcurrent - Grid\EMT-063014\Cub_2\Rele\51G1.RelToc

Basic Data	IEC Symbol: IE>t	ANSI Symbol: 51N	OK
Tripping Times	Measure Type: Earth Current (3'I0)		Cancel
Blocking	Name: 51G1		Relay
Description	Type: ...rary\Schweitzer\SEL 751\SEL 751-5A\51G1		Calculate
	<input type="checkbox"/> Out of Service	<input type="checkbox"/> Reset Characteristic	
	Tripping Direction: None		
	Characteristic: C2 - IEC Class B (Very Inverse)		
	Current Setting: 0,55 sec.A	0,11 p.u.	11, pri.A
	<input checked="" type="checkbox"/> Enable TCC modifiers		
	Time Dial: 0,35		
	Time Adder: 0,00 s		
	Min. Response Time: 0,00 s		

Figura 25: Dados implementados da função 51N

Fonte: autor

```
DIgSI/pc1 - (t=543:044 ms) -----
DIgSI/pc1 - (t=543:044 ms) 'Grid\EMT-063014\Cub_2\Rele.ElmRelay':
DIgSI/pc1 - (t=543:044 ms) Relay is tripping. 'Open' signal is sent to the connected breaker(s).
DIgSI/pc1 - (t=543:044 ms) -----
```

Figura 26: Tempo de atuação da função 51N

Fonte: autor

Relay	Branch	Terminal	/Station	Type	Tripping Times
Rele		EMT-063014	/	SEL 751-5A	0,431 s
51G1	(IEC: IE>t	ANSI: 51N)		Currents	6,580 sec.A
51G2	(IEC: I>t	ANSI: 51N)		Currents	6,580 sec.A

Figura 27: Relatório da Função 51N

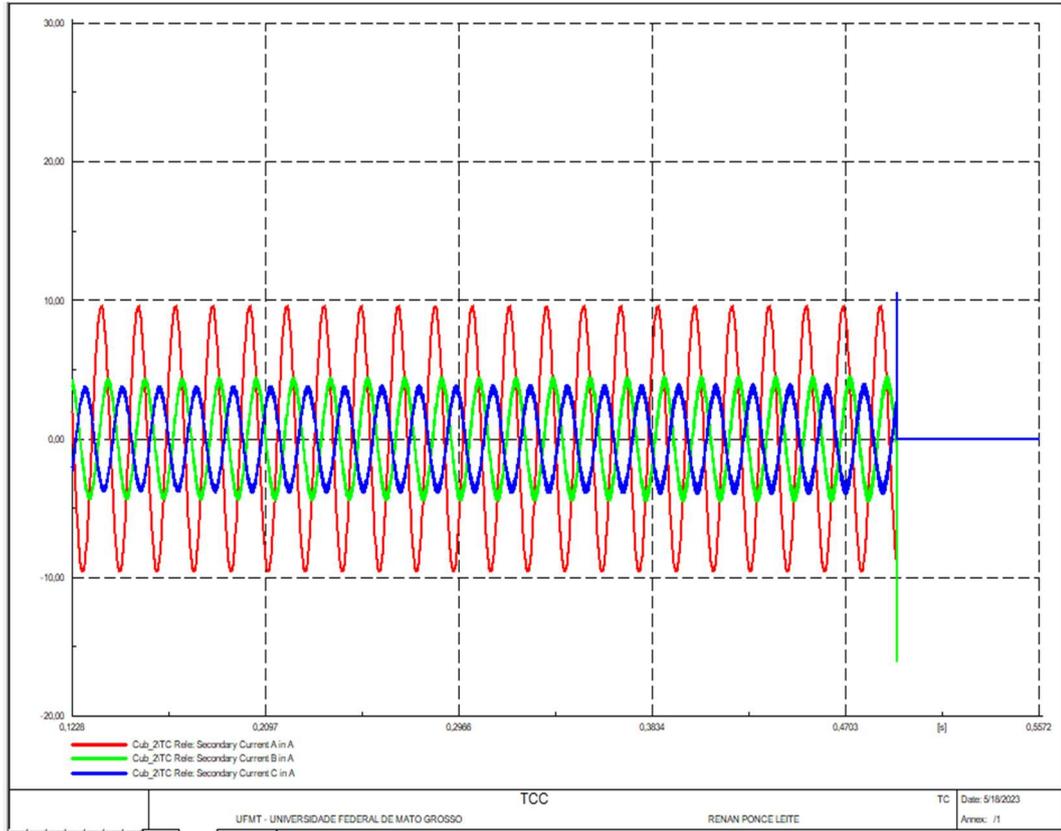


Figura 28: Oscilograma da função 51N

Fonte: autor

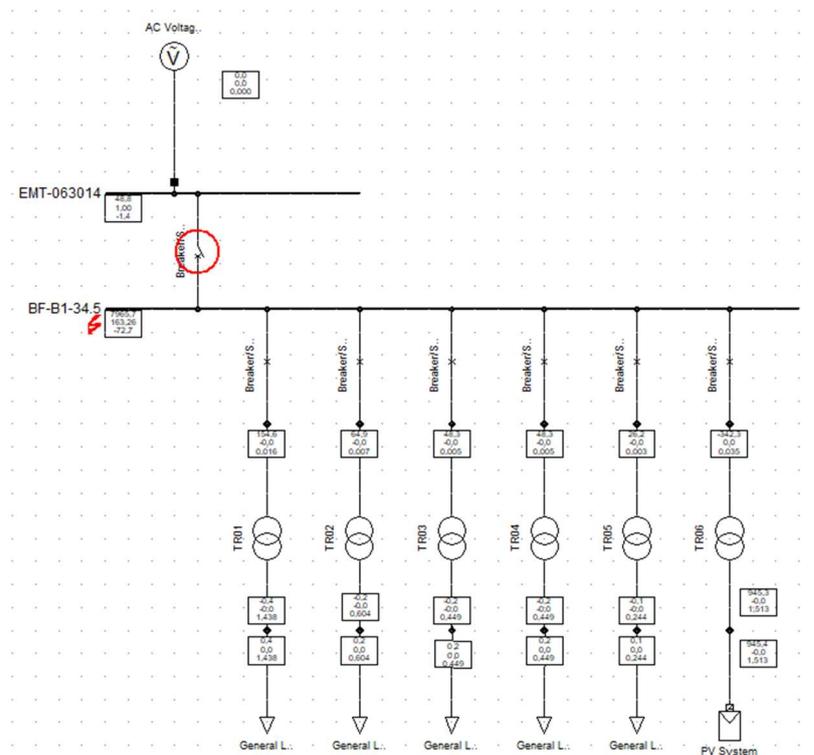


Figura 29: Relé Operando para 51N

Fonte: autor

5.9 Valores obtidos para a função 67/67N

Segundo o estudo, afirmar que a contribuição de corrente de curto-circuito para o sistema, não é significativo a ponto de causar danos maiores ao próprio sistema.

$$(N^{\circ}_{inversor} * I_{n_{inversor}}) * I_{cc_{modulos}} = I_{max_{geração}} \quad (15)$$

$$(12 * 152,2) * 1,068 = 1950,56 A$$

$I_{max_{geração}}$ = corrente de curto-circuito máxima da geração

$N^{\circ}_{inversor}$ = Numero de inversores

$I_{n_{inversor}}$ = Corrente nominal dos inversores

$I_{cc_{modulos}}$ = Curto circuito do painel solar

Já que o curto circuito do painel solar utilizado é de 1,068x a corrente de máxima potência (Ponto de operação do painel) do mesmo, dessa forma extrapolando esse fator para a corrente nominal dos inversores. Valores estes que pode ser encontrado no *datasheet* do inversor e dos módulos, no apêndice trás as devidas informações dos componentes.

Mesmo desconsiderando o valor da impedância dos transformadores e refletindo esse valor para a barra de 34,5kV da UFV, essa contribuição representaria uma corrente de 45,23 A na barra de 34,5kV.

5.10 Valores obtidos para a função 25

Conforme a NDU-015 O Check de sincronismo será realizado pelos inversores.

5.11 Valores obtidos para a função 27

Os TPs utilizados nesta função possui uma RTP de 34500/115V.

Conforme a Tabela 1, 80% de 34.5kV corresponderá a uma tensão no primário de até 27,6kV e que por sua vez refletido no secundário encontramos 92V.

Nas Figuras 30 é demonstrado a implementação dos valores recomendados pela concessionária. Para a simulação da subtensão, foi programa a entrada de uma carga na barra BF-B1-34.5. a proteção respondeu dentro do valor esperado. Na Figura 31 apresenta a atuação

do relé mediante ao evento, enviando o sinal para o trip do relé após um determinado período em que o fenômeno subtensão não se normalizou, observa-se também que o relé operou dentro dos 10s previstos pela concessionária. A Figuras 32 apresenta o diagrama do sistema com a operação do relé.

Figura 28: Dados implementados da função 27

Fonte: autor

```

DIgSI/info -----
DIgSI/info - Element '@%AC Voltage Source' is local reference in separated area of '→ EMT-063014'
DIgSI/info - Element '@%AC Voltage Source' is reference in 60,0 Hz-system
DIgSI/info - (t=-01:000 s) Initial conditions calculated.
DIgSI/pcl -----
DIgSI/pcl - (t=000:000 ms) 'Grid\BF-B1-34.5\Cub_23\Switch.StaSwitch':
DIgSI/pcl - (t=000:000 ms) Circuit-Breaker Action: 'Close' - 'All Phases'.
DIgSI/info - (t=000:000 ms) Element '@%AC Voltage Source' is local reference in separated area of '→ EMT-063014'
DIgSI/info - (t=000:000 ms) Element '@%AC Voltage Source' is reference in 60,0 Hz-system
DIgSI/pcl -----
DIgSI/pcl - (t=10:039 s) 'Grid\EMT-063014\Cub_2\Rele.ElmRelay':
DIgSI/pcl - (t=10:039 s) Relay is tripping. 'Open' signal is sent to the connected breaker(s).
DIgSI/pcl -----
DIgSI/pcl - (t=10:039 s) 'Grid\Breaker/Switch.ElmCoup':
DIgSI/pcl - (t=10:039 s) Circuit-Breaker Action: 'Open' - 'All Phases'.
DIgSI/info - (t=10:041 s) Element '@%AC Voltage Source' is local reference in separated area of '→ EMT-063014'
DIgSI/info - (t=10:041 s) Element '@%AC Voltage Source' is reference in 60,0 Hz-system
DIgSI/info - (t=10:042 s) Element '@%AC Voltage Source' is local reference in separated area of '→ EMT-063014'
DIgSI/info - (t=10:042 s) Element '@%AC Voltage Source' is reference in 60,0 Hz-system

```

Figura 29: Tempo de abertura da função 27

Fonte: autor

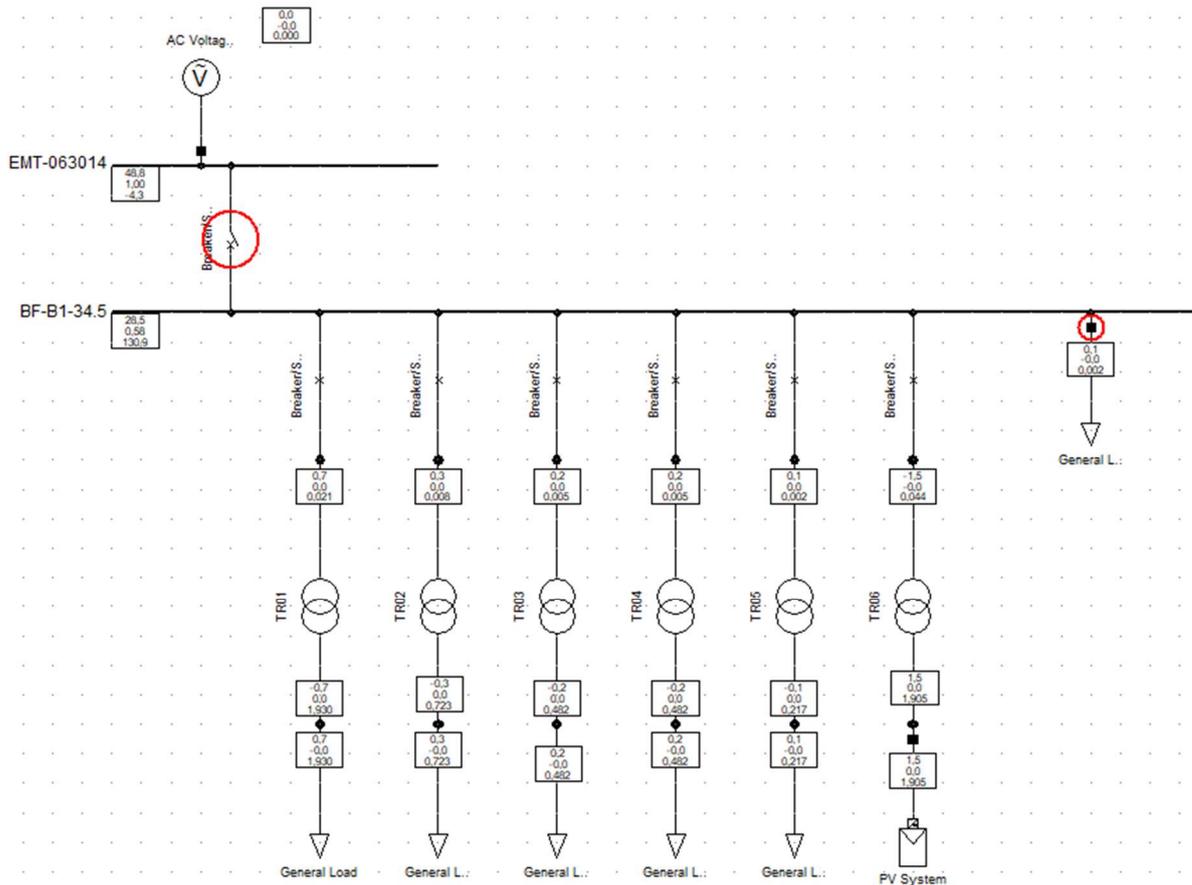


Figura 30: Relé Operando para 27

Fonte: autor

5.12 Valores obtidos para a função 59

Segundo a Tabela 2 o ajuste recomendado para a atuação de sobretensão deve corresponder a 110% da tensão nominal, assim encontramos um valor de 126,5V já refletido no secundário do TC, para que o mesmo atue.

Para ocorrer o fenômeno da sobretensão o valor de ajuste da tensão foi alterado de 126,5 no secundário para 123V, já que mesmo removendo todas as cargas o máxima Tensão encontrado na barra BF-B1-34,5 foi de 37600 ficando abaixo do valor de operação do relé. Na Figura 33 é demonstrado a implementação dos valores recomendados pela concessionária, foi programa a retirada das cargas presentes nos trafos TR1 e TR2 e TR4 na barra BF-B1-34.5, a retirada dos trafos correu após 1s da simulação. A proteção respondeu dentro do valor esperado. Na Figura 34 apresenta a atuação do relé mediante ao evento, enviando o sinal para o trip do

relé após um determinado período em que o fenômeno sobtensão não se normalizou. Podemos notar que o relé operou dentro dos 10s previstos pela concessionária. A Figuras 35 apresenta o diagrama do sistema com a operação do relé.

Under-/Overvoltage - Grid\EMT-063014\Cub_2\Relé\59P1.RelUlim

Basic Data	IEC Symbol:	U>	ANSI Symbol:	59
Description	Function:	OvervoltageMeasure	Type:	Voltage (3ph)
	Name:	59P1		
	Type:	...rary\Schweitzer\SEL 751\SEL 751-5A\59P1		
	<input checked="" type="checkbox"/> Out of Service			
	Pickup Voltage:	0,84	p.u.	123, sec.V 36900, pri.V
	Time Delay:	10,0	s	
	Total Time:	10,02 s		

Figura 31: Dados implementados da função 59

Fonte: autor

```

DIgSI/pc1 - (t=01:000 s) -----
DIgSI/pc1 - (t=01:000 s) 'Grid\Breaker/Switch(1).ElmCoup':
DIgSI/pc1 - (t=01:000 s) Circuit-Breaker Action: 'Open' - 'All Phases'.
DIgSI/pc1 - (t=01:000 s) -----
DIgSI/pc1 - (t=01:000 s) 'Grid\Breaker/Switch(4).ElmCoup':
DIgSI/pc1 - (t=01:000 s) Circuit-Breaker Action: 'Open' - 'All Phases'.
DIgSI/pc1 - (t=01:000 s) -----
DIgSI/pc1 - (t=01:000 s) 'Grid\Breaker/Switch(5).ElmCoup':
DIgSI/pc1 - (t=01:000 s) Circuit-Breaker Action: 'Open' - 'All Phases'.
DIgSI/info - (t=01:000 s) Element '@%AC Voltage Source' is local reference in separated area of '→EMT-063014'
DIgSI/wrng - (t=01:000 s) 3 area(s) are unsupplied.
DIgSI/info - (t=01:000 s) Grid split into 4 isolated areas
DIgSI/info - (t=01:000 s) Element '@%AC Voltage Source' is reference in 60,0 Hz-system
DIgSI/info - (t=01:000 s) Element '@%AC Voltage Source' is local reference in separated area of '→EMT-063014'
DIgSI/wrng - (t=01:000 s) 3 area(s) are unsupplied.
DIgSI/info - (t=01:000 s) Grid split into 4 isolated areas
DIgSI/info - (t=01:000 s) Element '@%AC Voltage Source' is reference in 60,0 Hz-system
DIgSI/info - (t=01:001 s) Element '@%AC Voltage Source' is local reference in separated area of '→EMT-063014'
DIgSI/wrng - (t=01:001 s) 3 area(s) are unsupplied.
DIgSI/info - (t=01:001 s) Grid split into 4 isolated areas
DIgSI/info - (t=01:001 s) Element '@%AC Voltage Source' is reference in 60,0 Hz-system
DIgSI/info - (t=01:001 s) Element '@%AC Voltage Source' is local reference in separated area of '→EMT-063014'
DIgSI/wrng - (t=01:001 s) 3 area(s) are unsupplied.
DIgSI/info - (t=01:001 s) Grid split into 4 isolated areas
DIgSI/info - (t=01:001 s) Element '@%AC Voltage Source' is reference in 60,0 Hz-system
DIgSI/pc1 - (t=11:022 s) -----
DIgSI/pc1 - (t=11:022 s) 'Grid\EMT-063014\Cub_2\Relé.ElmRelay':
DIgSI/pc1 - (t=11:022 s) Relay is tripping. 'Open' signal is sent to the connected breaker(s).
DIgSI/pc1 - (t=11:022 s) -----

```

Figura 32: Tempo de abertura da função 59

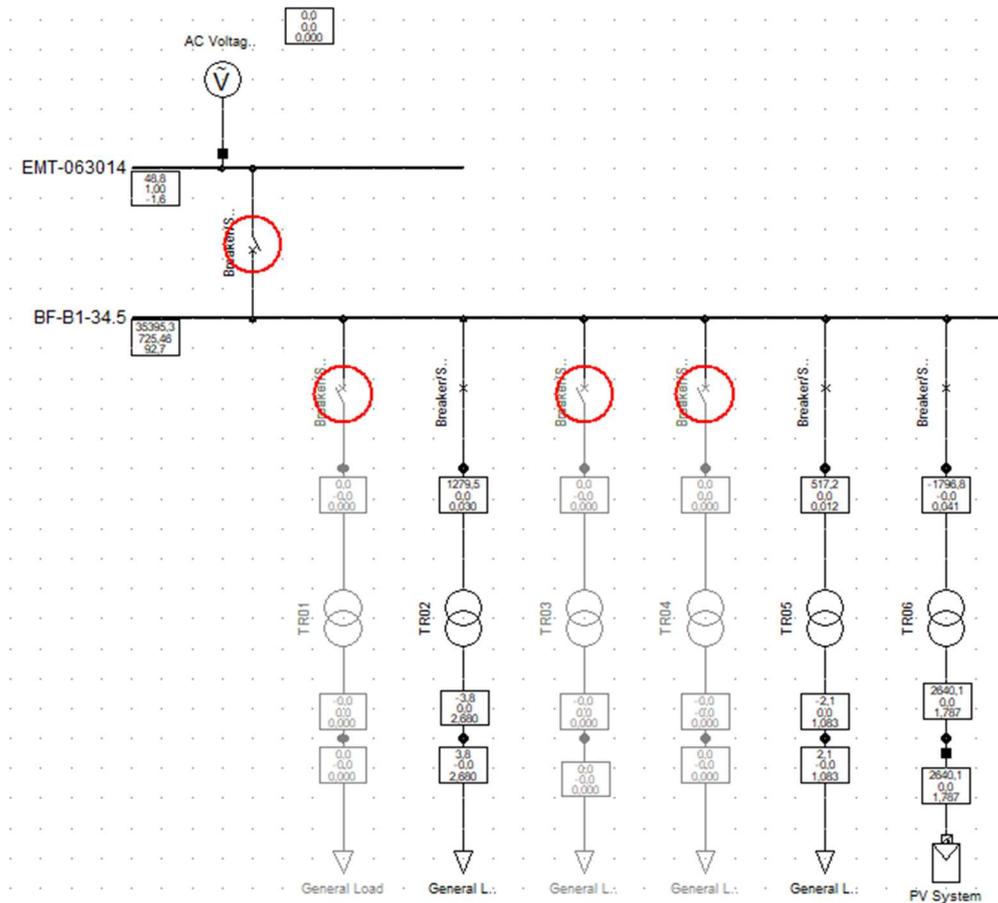


Figura 33: Operação do relé na função 59

Fonte: autor

5.13 Valores obtidos para a função 81 U/O

Frequency - Grid\EMT-063014\Cub_2\Relé\81D1.RelFrg

Basic Data	Type: Instantaneous	OK
Description	Name: 81D1	Cancel
	Type: ... rary\Schweitzer\SEL 751\SEL 751-5A\81D1	Relay
	<input type="checkbox"/> Out of Service	
	Settings	
	Frequency: 66.00 Hz	
	Time Delay: 0.00 s	

Figura 34: Dados implementados da função 81U, para 66 Hz.

Fonte: autor

Frequency - Grid\EMT-063014\Cub_2\Rele\81D2.RelFrq

Type: **Instantaneous**

Name: 81D2

Type: ... rary\Schweitzer\SEL 751\SEL 751-5A\81D2

Out of Service

Settings

Frequency: 62.00 Hz

Time Delay: 30.00 s

Buttons: OK, Cancel, Relay

Figura 35: Dados implementados da função 81U, para 62 Hz.

Fonte: autor

Frequency - Grid\EMT-063014\Cub_2\Rele\81D3.RelFrq

Type: **Instantaneous**

Name: 81D3

Type: ... rary\Schweitzer\SEL 751\SEL 751-5A\81D3

Out of Service

Settings

Frequency: 58.50 Hz

Time Delay: 10.00 s

Buttons: OK, Cancel, Relay

Figura 36: Dados implementados da função 81U, para 58,5 Hz.

Fonte: autor

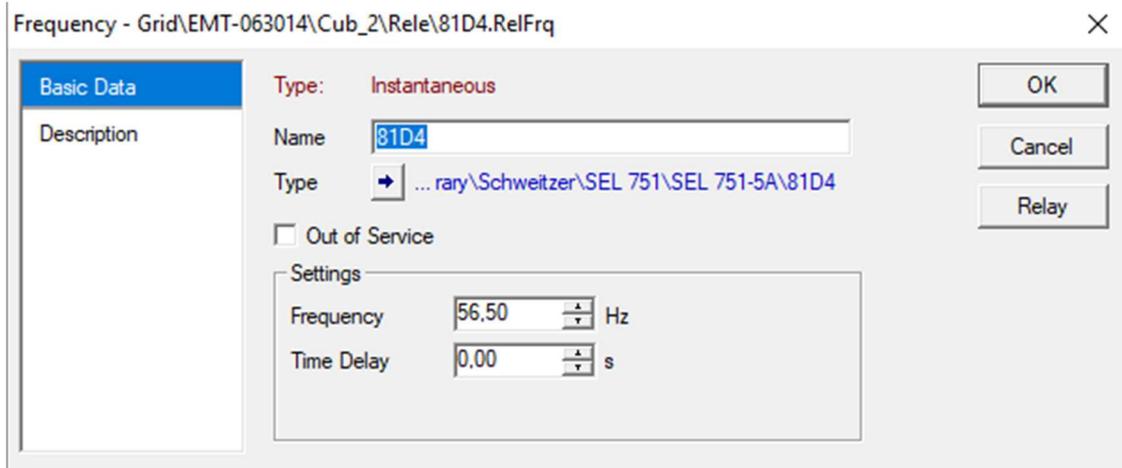


Figura 37: Dados implementados da função 81U, para 56,5 Hz.

Fonte: autor

Para a simulação de sobre frequência, primeiramente realizamos a abertura da fonte quando o sistema já está em operação. Para a simulação de sub frequência, foi variada a tensão.

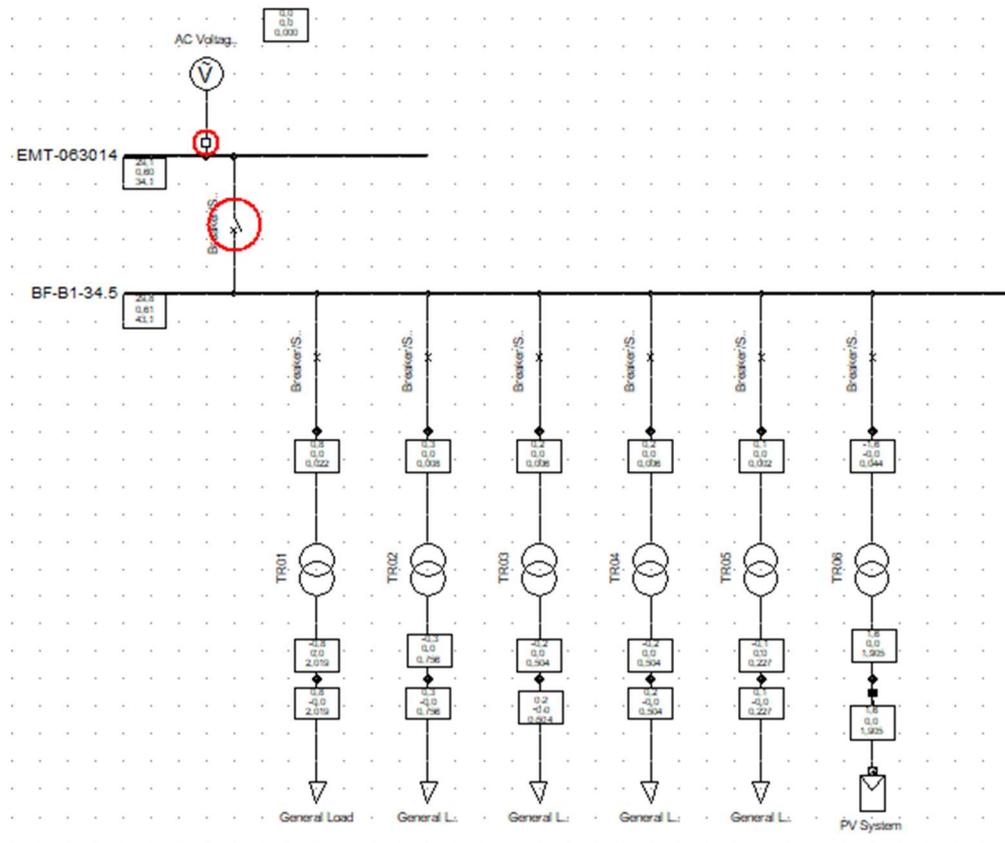


Figura 38: Operação da função 81U

Fonte: autor

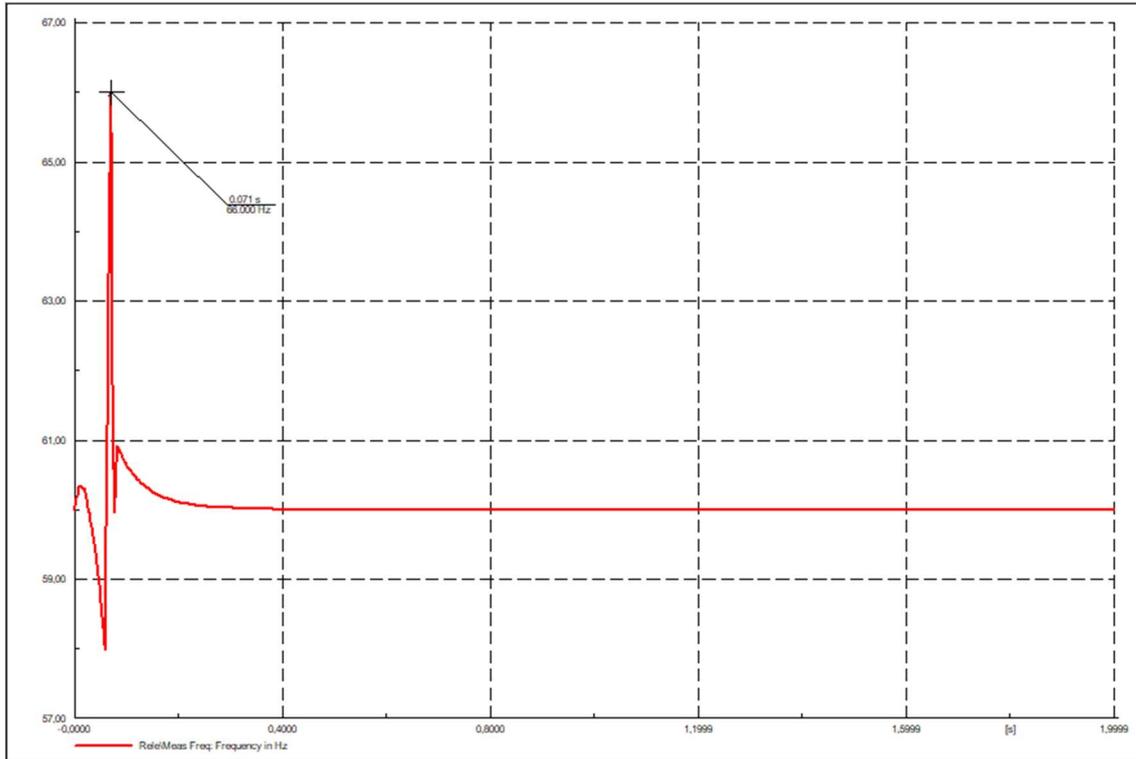


Figura 39: Oscilograma da função 81U

Fonte: autor

```

DIgSI/pcl - (t=071:475 ms) -----
DIgSI/pcl - (t=071:475 ms) 'Grid\EMT-063014\Cub_2\Rele.ElmRelay':
DIgSI/pcl - (t=071:475 ms) Relay is tripping. 'Open' signal is sent to the connected breaker(s).
DIgSI/pcl - (t=071:475 ms) -----

```

Figura 40: Atuação da função 81U

Fonte: autor

Na Figura 41 apresenta que ocorreu um sobrefrequência no instante 0,071 ao mesmo tempo que ocorreu operação do relé representado na Figura 42. Demonstrando assim a operação do relé mediante ao fenômeno de sobrefrequência.

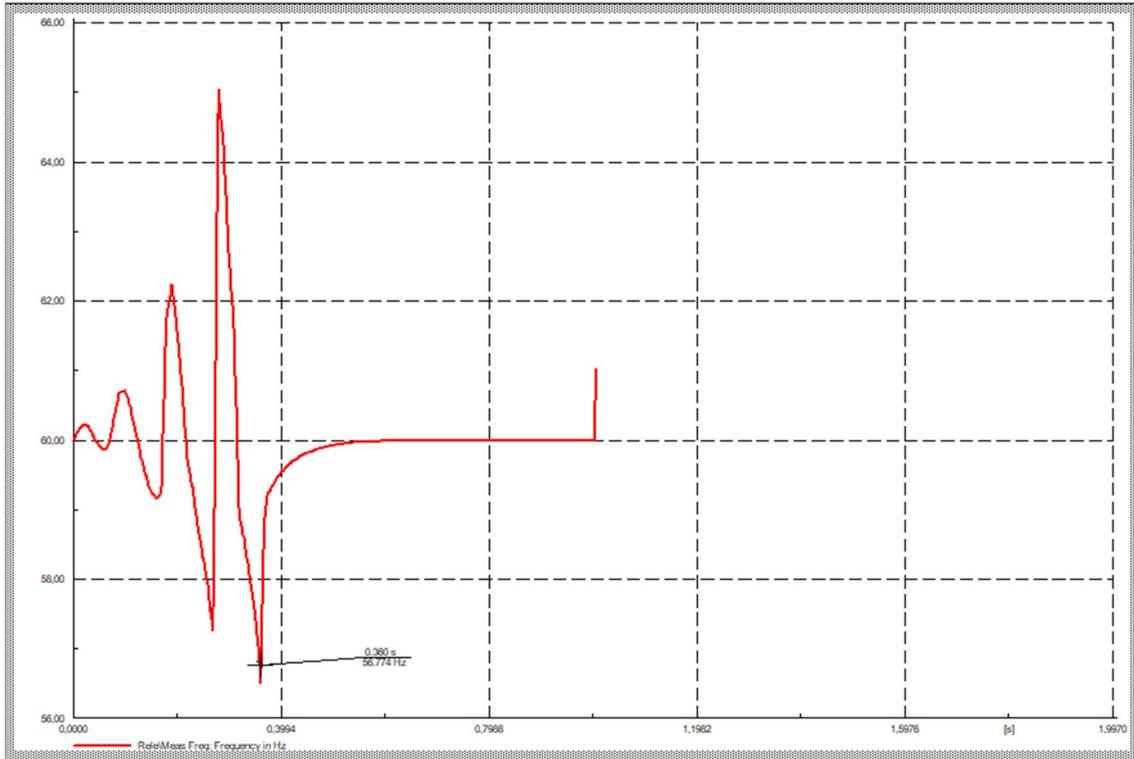


Figura 41: Osilograma da função 81O

Fonte: autor

```
DIgSI/pcl - (t=361:602 ms) -----
DIgSI/pcl - (t=361:602 ms) 'Grid\EMT-063014\Cub_2\Rele.ElmRelay':
DIgSI/pcl - (t=361:602 ms) Relay is tripping. 'Open' signal is sent to the connected breaker(s).
DIgSI/pcl - (t=361:602 ms) -----
```

Figura 42: Atuação da função 81O

Fonte: autor

Na Figura 43 apresenta que ocorreu um subfrequência no instante 0,360 ao mesmo tempo que ocorreu operação do relé representado na Figura 44. Demonstrando assim a operação do relé mediante ao fenômeno de subfrequência.

6 Resumo das funções

Tabela 3: resumo dos ajustes da Função 81U/O

Dispositivo de Proteção	Fabricante	Modelo	Estágio (abs(f))	Frequência [Hz]	Tempo	Característica
Relé	Schweitzer	SEL 751-5A	81D1	66	0	Preciso
			81D2	62	30	Preciso
			81D3	58,5	10	Preciso
			81D4	56,5	0	Preciso

Fonte: Digsilent PowerFactory

Tabela 4: resumo dos ajustes da Função 27 e 59

Dispositivo de Proteção	Fabricante	Modelo	Estágio (Phase)	Tensão Pri. [pri.V]	Tensão Sec. [sec.V]	Tempo	Característica
Rele	Schweitzer	SEL 751-5A	27P1	27450	91,5	10	Preciso
			59P1	36900	123	10	Preciso

Fonte: Digsilent PowerFactory

Tabela 5: resumo dos ajustes da Função 50/51/50N e 51N

Fabricante	Modelo	Estágio (Fase)	Atual [pri. A]	Corrente [seg. A]	Atual [p.u.]	Hora	Característica	Direcional
Schweitzer	SEL 751-5A	51P1	55	2,73	0,55	0,08	C2 - IEC Classe B (VI)	Nenhum
		51P2	55	2,73	0,55	0,08	C2 - IEC Classe B (VI)	Nenhum
		50P1	190	9,52	1,9	0	Preciso	Nenhum
		50P2	190	9,52	1,9	0	Preciso	Nenhum
		50P3	190	9,52	1,9	0	Preciso	Nenhum
		50P4	190	9,52	1,9	0	Preciso	Nenhum
		51G1	11	0,55	0,11	0,35	C2 - IEC Classe B (VI)	Nenhum
		51G2	11	0,55	0,11	0,35	C2 - IEC Classe B (VI)	Nenhum
		50G1	38	1,91	0,38	0	Preciso	Nenhum
		50G2	38	1,91	0,38	0	Preciso	Nenhum
		50G3	38	1,91	0,38	0	Preciso	Nenhum

Fonte: Digsilent PowerFactory

7 Considerações Finais

É fundamental haver maior foco na operação e geração desses sistemas de minigeração, tanto do ponto de vista teórico quanto prático, para garantir a sua integração segura e eficiente ao Sistema Elétrico Nacional. Para isso, estudos de caso, como o da fazenda Colorado, podem ser úteis para entender melhor os desafios e soluções relacionados à operação desses sistemas, foi assim que surgiu a ideia de desenvolver o estudo baseando em uma usina real. Foi desenvolvido os estudos de fluxo de potência, curto-circuito, eventos de falhas e suas devidas proteções, apresentando baseamento teórico em relação ao que seria implementado em *software*. verificou-se da veracidade e validade dos dados apresentados no estudo de proteção. Apresentando um bom comportamento das funções de proteção, quando o sistema opera de formas anormais.

Fica claro a importância de *softwares* como o Digsilent PowerFactory que permite a modelagem detalhada do sistema elétrico e a simulação de condições de falha para avaliar a eficácia dos sistemas de proteção, além de garantir a segurança do empreendimento e dos trabalhadores, podendo auxiliar na redução do tempo, e o custo associados à solução de problemas no sistema elétrico.

REFERÊNCIAS

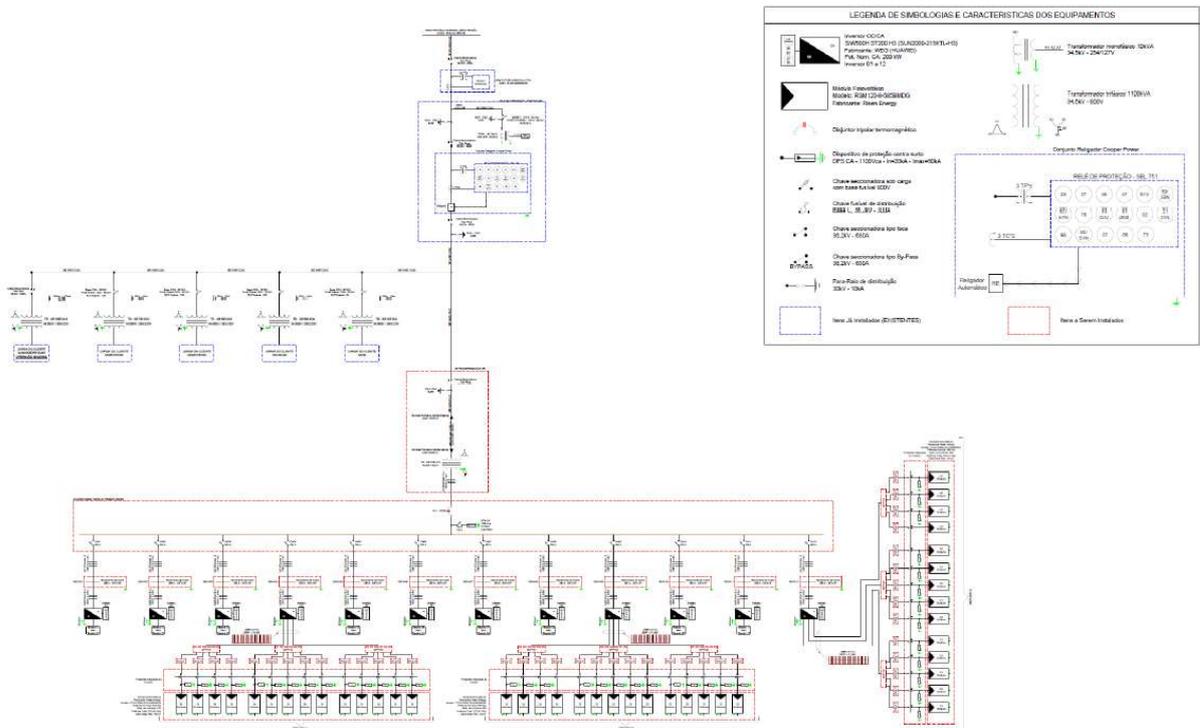
- [1] G. Kindermann, **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**, 3º ed., vol. 1, Florianópolis: Editora UFSC, 2012.
- [2] J. Mamede Filho e D. Ribeiro Mamede, **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**, Rio de Janeiro: LTC, 2013.
- [3] ABNT NBR 6856, **Transformador de corrente — Especificação e ensaios**, 2º ed., 2015.
- [4] **DIgSILENT PowerFactory Version 15.0 BETA, User Manual**, 1* Ed, Gomaringen/Germany: DIgSILENT GmbH, November, 2012.
- [5] V. Cezar Zorsi, **MODELAGEM DE RELÉS DE PROTEÇÃO EM DIGSILENT POWERFACTORY**. 2022. 48 f. TCC (graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Mato Grosso, Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia, Cuiabá, 2022.
- [6] **Critérios para a Conexão em Média Tensão de Acessantes de Geração Distribuída ao Sistema de Distribuição** - ENERGISA, C-GTCD-NRM/Nº157, 2018.

APÊNDICE

APÊNDICE A – Vista Aérea da Geração

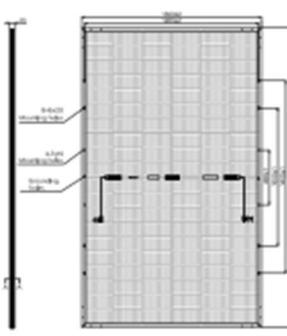


APÊNDICE B – Diagrama Unifilar



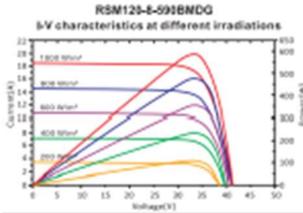
APÊNDICE C – Dados da Placa solar

Dimensions of PV Module Unit: mm



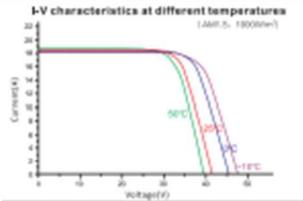

RSM120-E-590BMDG

I-V characteristics at different irradiances



I-V characteristics at different temperatures

(AMR.5, 1000W/m²)



Our Partners:

ELECTRICAL DATA (STC)

Model Number	RSM120-E-585BMDG	RSM120-E-590BMDG	RSM120-E-595BMDG	RSM120-E-595BMDG	RSM120-E-600BMDG
Rated Power in Watts-Pmax(Wp)	580	585	590	595	600
Open Circuit Voltage-Voc(V)	40,90	41,10	41,30	41,50	41,70
Short Circuit Current-Isc(A)	18,06	18,11	18,16	18,21	18,26
Maximum Power Voltage-Vmpp(V)	34,04	34,22	34,42	34,60	34,80
Maximum Power Current-Imp(A)	17,05	17,10	17,15	17,20	17,25
Module Efficiency (%) *	20,5	20,7	20,8	21,0	21,2

STC: Irradiance 1000 W/m², Cell Temperature 25°C, Air Mass AM1,5 according to EN 60904-3, Bifacial factor: 70%±5 * Module Efficiency (%) Round-off to the nearest number

Electrical characteristics with 10% rear side power gain

	638	644	649	655	660
Total Equivalent power-Pmax (Wp)	638	644	649	655	660
Open Circuit Voltage-Voc(V)	40,90	41,10	41,30	41,50	41,70
Short Circuit Current-Isc(A)	19,87	19,92	19,98	20,03	20,09
Maximum Power Voltage-Vmpp(V)	34,04	34,22	34,42	34,60	34,80
Maximum Power Current-Imp(A)	18,76	18,81	18,87	18,92	18,98

Rear side power gain: The additional gain from the rear side compared to the power of the front side at the standard test condition, it depends on mounting (structure, height, SR angle etc.) and albedo of the ground.

ELECTRICAL DATA (NMOT)

Model Number	RSM120-E-585BMDG	RSM120-E-590BMDG	RSM120-E-595BMDG	RSM120-E-595BMDG	RSM120-E-600BMDG
Maximum Power-Pmax (Wp)	439,5	443,1	447,0	450,7	454,6
Open Circuit Voltage-Voc(V)	38,04	38,22	38,41	38,60	38,78
Short Circuit Current-Isc(A)	14,81	14,85	14,89	14,93	14,97
Maximum Power Voltage-Vmpp (V)	31,59	31,76	31,94	32,11	32,29
Maximum Power Current-Imp (A)	13,91	13,95	13,99	14,04	14,08

NMOT: Irradiance at 800 W/m², Ambient Temperature 20°C, Wind Speed 1 m/s.

MECHANICAL DATA

Solar cells	Monocrystalline
Cell configuration	120 cells (6×10×6×10)
Module dimensions	2172×1303×35mm
Weight	35kg
Superstrate	High Transmission, Low Iron, Tempered ARC Glass
Substrate	Tempered Glass
Frame	Anodized Aluminium Alloy type 6005-T6, Silver Color
J-Box	Potted, IP68, 1500VDC, 3 Schottky bypass diodes
Cables	4,0mm² (12AWG), Positive(+)-350mm, Negative(-)-350mm (Connector included)
Connector	Risen Twinseal PV-SY02, IP68

TEMPERATURE & MAXIMUM RATINGS

Nominal Module Operating Temperature (NMOT)	44°C±2°C
Temperature Coefficient of Voc	-0,25%/°C
Temperature Coefficient of Isc	0,04%/°C
Temperature Coefficient of Pmax	-0,34%/°C
Operational Temperature	-40°C~+85°C
Maximum System Voltage	1500VDC
Max Series Fuse Rating	35A
Limiting Reverse Current	35A

PACKAGING CONFIGURATION

	40%(HQ)
Number of modules per container	527
Number of modules per pallet	31
Number of pallets per container	17
Packaging box dimensions (LxWxH) in mm	1350×1145×2310
Box gross weight[kg]	1130

CAUTION: READ SAFETY AND INSTALLATION INSTRUCTIONS BEFORE USING THE PRODUCT.
©2021 Risen Energy. All rights reserved. Specifications included in this datasheet are subject to change without notice.
THE POWER OF RISEN VALUE

APÊNDICE D – Dados de TC e TP

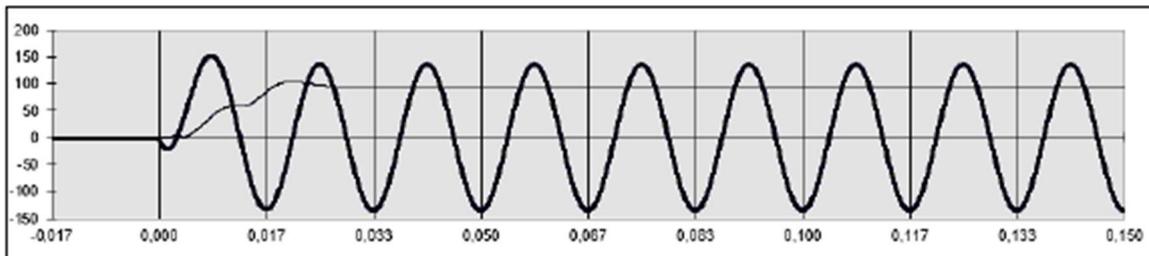
Tabela 3.6 - Transformadores de Corrente

DADOS TC	
Proteção	50/100/200/300/400/500/600-5

Tabela 3.7 - Dados de placa transformador de potencial

DADOS TRANSFORMADOR DE POTENCIAL 13,8 kV	
Relação Transformação	34500 R3:115R3

APÊNDICE E – Desempenho do TC em quanto a Saturação



APÊNDICE F – Principais Funções Segundo o Estudo.

PROTEÇÃO PRINCIPAL		
Relé	Part Number	Funções Utilizadas
SEL751	NA	50/51, 50R/51R, 67/67N, 27, 59, 81

APÊNDICE G – Dados do Transformadores

TRANSFORMADOR 1	
PARÂMETROS	VALOR
POTENCIA NOMINAL (kVA)	2000
Tensões Nominais (kV)	34,5/0.380
Material isolante	óleo
Proteção	Chave Faca
Grupo de Ligação	Dyn1
Z (%)	6,5

TRANSFORMADOR 2	
PARÂMETROS	VALOR
POTENCIA NOMINAL (kVA)	750
Tensões Nominais (kV)	34,5/0.380
Material isolante	óleo
Proteção	12K
Grupo de Ligação	Dyn1
Z (%)	5,8

TRANSFORMADOR 3	
PARÂMETROS	VALOR
POTENCIA NOMINAL (kVA)	500
Tensões Nominais (kV)	34,5/0.381
Material isolante	óleo
Proteção	10k
Grupo de Ligação	Dyn2
Z (%)	5,2

TRANSFORMADOR 4	
PARÂMETROS	VALOR
POTENCIA NOMINAL (kVA)	500
Tensões Nominais (kV)	34,5/0.381
Material isolante	óleo
Proteção	10k
Grupo de Ligação	Dyn2
Z (%)	5,2

TRANSFORMADOR 5	
PARÂMETROS	VALOR
POTENCIA NOMINAL (kVA)	225
Tensões Nominais (kV)	34,5/0.382
Material isolante	óleo
Proteção	5H
Grupo de Ligação	Dyn3
Z (%)	4,3

TRANSFORMADOR 6	
PARÂMETROS	VALOR
POTENCIA NOMINAL (kVA)	2700
Tensões Nominais (kV)	34,5/0.382
Material isolante	óleo
Proteção	Chave Faca
Grupo de Ligação	Dyn3
Z (%)	7

APÊNDICE H – Dados dos Inversores

SUN2000-215KTL-H3
Technical Specifications

Efficiency	
Max. Efficiency	≥99.0%
European Efficiency	≥98.6%
Input	
Max. Input Voltage	1,500 V
Number of MPP Trackers	3
Max. Current per MPPT	100A/100A/100A
Max. PV Inputs per MPPT	4/5/5
Start Voltage	550 V
MPPT Operating Voltage Range	500 V ~ 1,500 V
Nominal Input Voltage	1,080 V
Output	
Nominal AC Active Power	200,000 W
Max. AC Apparent Power	215,000 VA
Max. AC Active Power (cosφ=1)	215,000 W
Nominal Output Voltage	800 V, 3W + PE
Rated AC Grid Frequency	50 Hz / 60 Hz
Nominal Output Current	144.4 A
Max. Output Current	155.2 A
Adjustable Power Factor Range	0.8 LG ... 0.8 LD
Max. Total Harmonic Distortion	< 3%
Protection	
Input-side Disconnection Device	Yes
Anti-Islanding Protection	Yes
AC Overcurrent Protection	Yes
DC Reverse-polarity Protection	Yes
PV-array String Fault Monitoring	Yes
DC Surge Arrester	Type II
AC Surge Arrester	Type II
DC Insulation Resistance Detection	Yes
Residual Current Monitoring Unit	Yes
Communication	
Display	LED Indicators, WLAN + APP
USB	Yes
MBUS	Yes
RS485	Yes
General	
Dimensions (W x H x D)	1,035 x 700 x 365 mm (40.7 x 27.6 x 14.4 inch)
Weight (with mounting plate)	≤86 kg (191.8 lb.)
Operating Temperature Range	-25°C ~ 60°C (-13°F ~ 140°F)
Cooling Method	Smart Air Cooling
Max. Operating Altitude without Derating	4,000 m (13,123 ft.)
Relative Humidity	0 ~ 100%
DC Connector	Staubli MC4 EVO2
AC Connector	Waterproof Connector + OT/DT Terminal
Protection Degree	IP66
Topology	Transformerless

Anexo

Anexo I – Como realizar inserir um transformador.

1. Passo

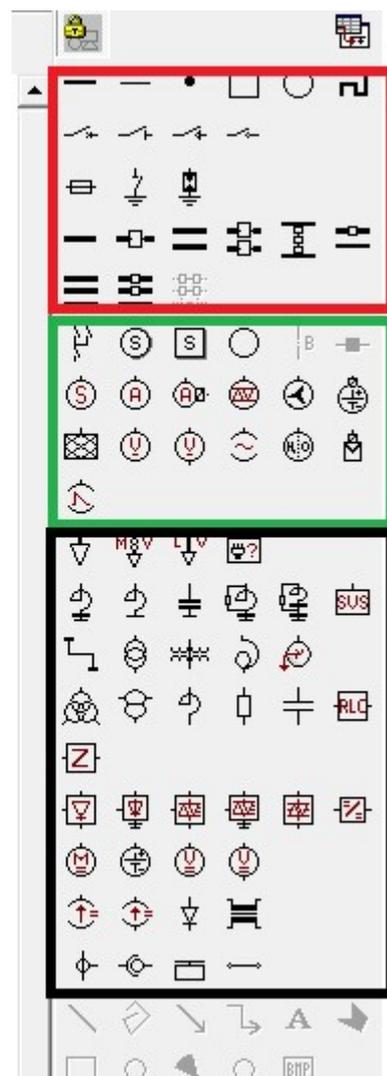
Na tela inicial, a barra de ferramentas localizada à direita contém os componentes para modelagem do sistema elétrico, seja para geração ou distribuição. Essa barra de ferramentas oferece uma variedade de opções e funcionalidades relacionadas ao sistema elétrico. Aqui estão alguns componentes comuns que você pode encontrar:

- Geradores.
- Transformadores.
- Linhas de Transmissão.
- Cargas.
- Chaves e Disjuntores.

Componentes de
Ligação

Componentes de
Geração

Componentes
Integrantes do
Sistema



Em Vermelho encontramos componentes de ligação, como a Barras, Disjuntores fusível, switch e entre outro.

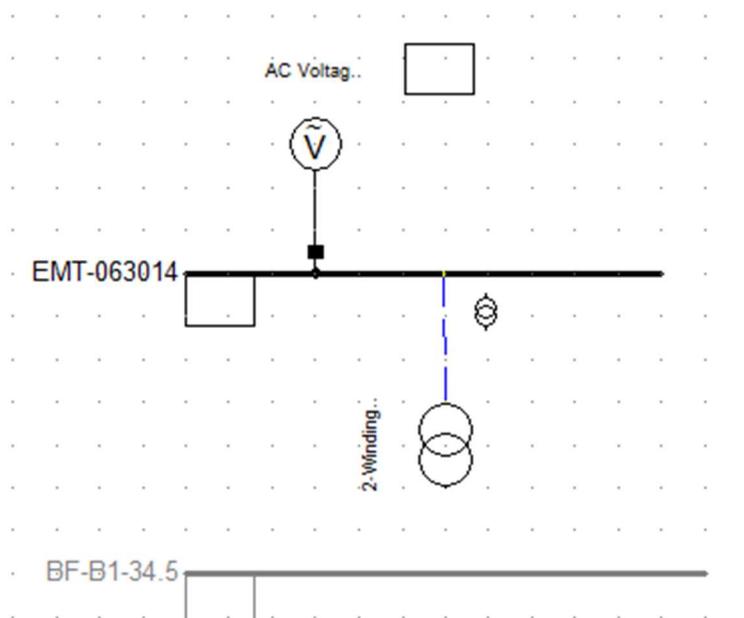
Em verde apresentam componentes como a maquinas síncronas, gerador estático, geração solar (PV system), fontes de Tensão, Fonte de Corrente e diversas outras gerações e entre outros.

Em preto apresentam componentes como Cargas, Reatores, Transformadores e entre outros.

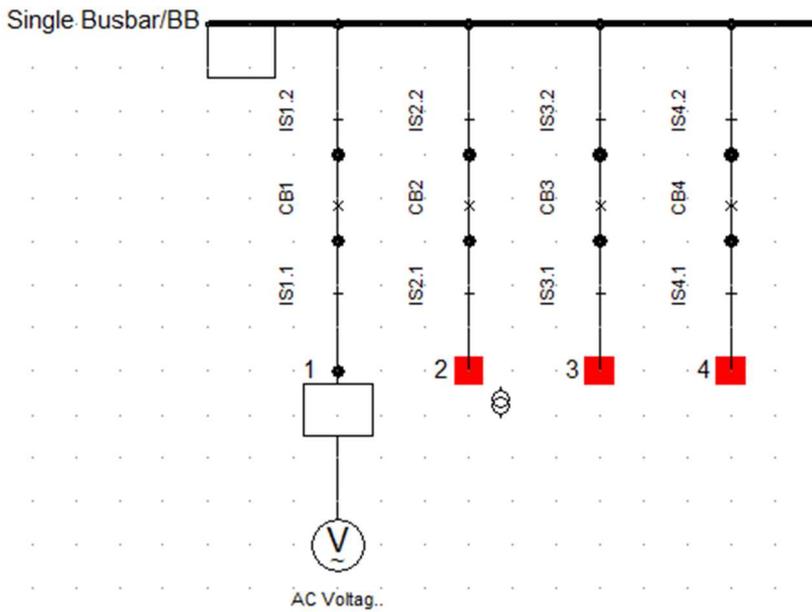
2. Passo

Na barra de ferramentas, localize o ícone do transformador.  Clique no ícone do transformador e, mantendo o botão do mouse pressionado, arraste o transformador para a área de trabalho. Você verá o ícone do transformador seguindo o movimento do cursor.

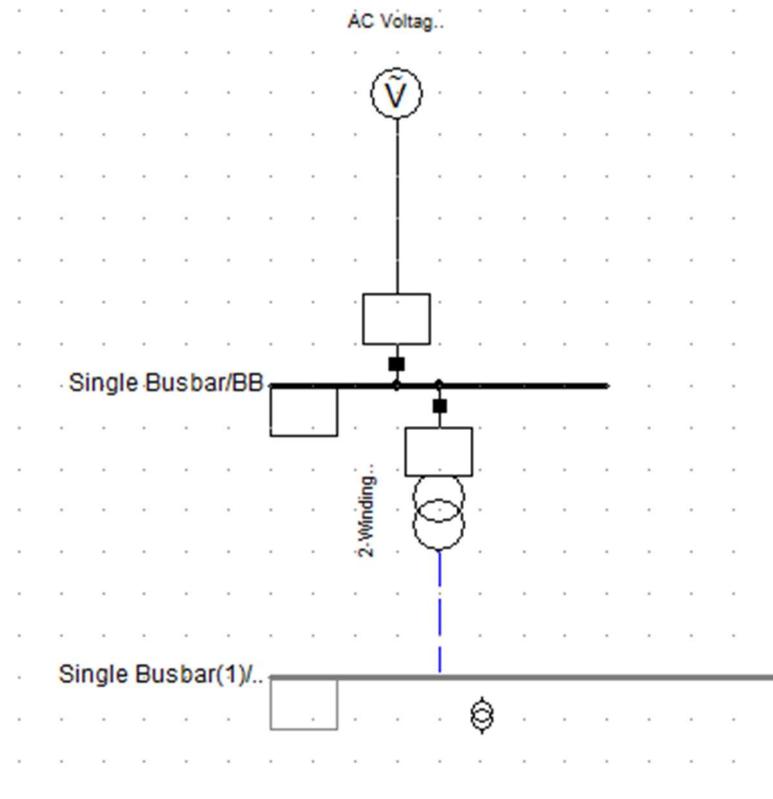
Posicione o transformador entre as barras que deseja conectá-lo. Ao mover o cursor sobre as barras, você pode notar uma linha azul que persegue o mouse fornecendo indicações visuais para mostrar que você está realizando a conexão do transformador com a barra.



Uma nova aba ou janela pode ser aberta para permitir a configuração e conexão do transformador com a barra.



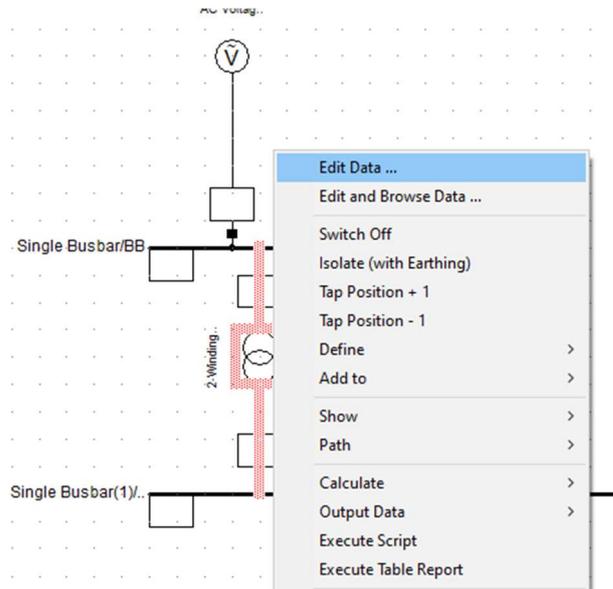
Clicamos em um dos terminais disponíveis, então está aba automaticamente irá fechar pra que então realize a conexão do secundário do transformador na outra barra.



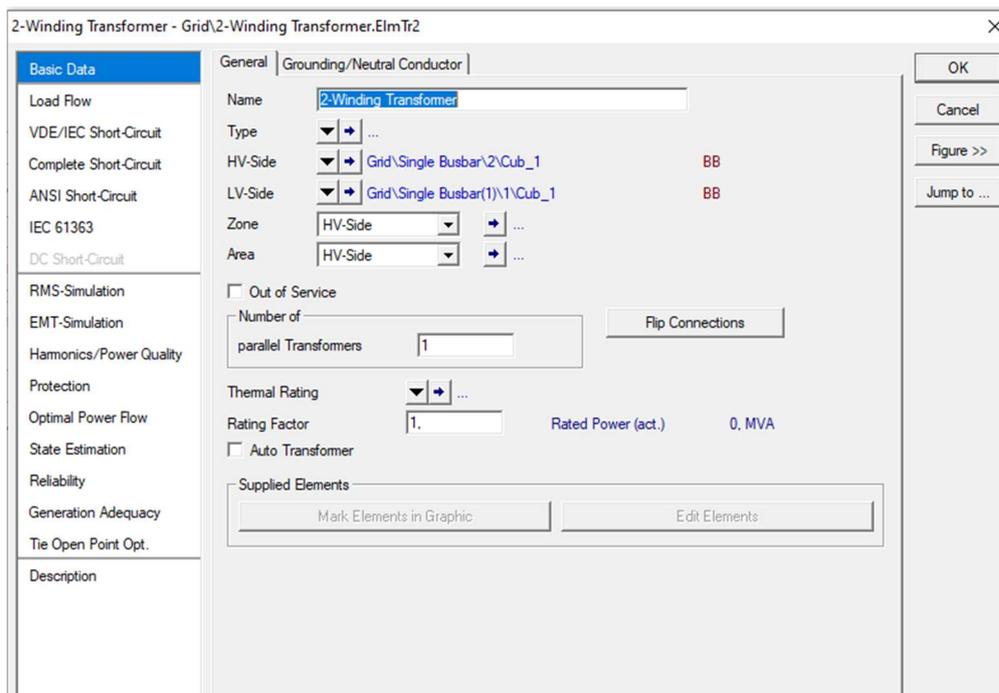
Novamente será aberta aba para assim realizar a conexão do transformador com a barra. Assim teremos o nosso transformador posicionado. É hora de configurar.

3. Passo

Ao clicar com o botão direito do mouse no transformador e abrir uma nova aba com várias opções, seguindo com a opção "Edit Data" (Editar Dados), você poderá acessar as configurações e informações detalhadas do transformador.



Uma nova tela surge, a onde podemos de fato inserirmos os dados do nosso transformador.



Na tela onde você verifica as informações padrões do transformador, é possível alterar o nome do transformador para facilitar sua localização durante uma simulação. Renomear o transformador pode ajudar a identificá-lo de forma mais clara e intuitiva.

Após realizar essa alteração, o transformador será renomeado com o novo nome escolhido. Isso tornará mais fácil encontrar e identificar o transformador durante a simulação ou análise do sistema elétrico.

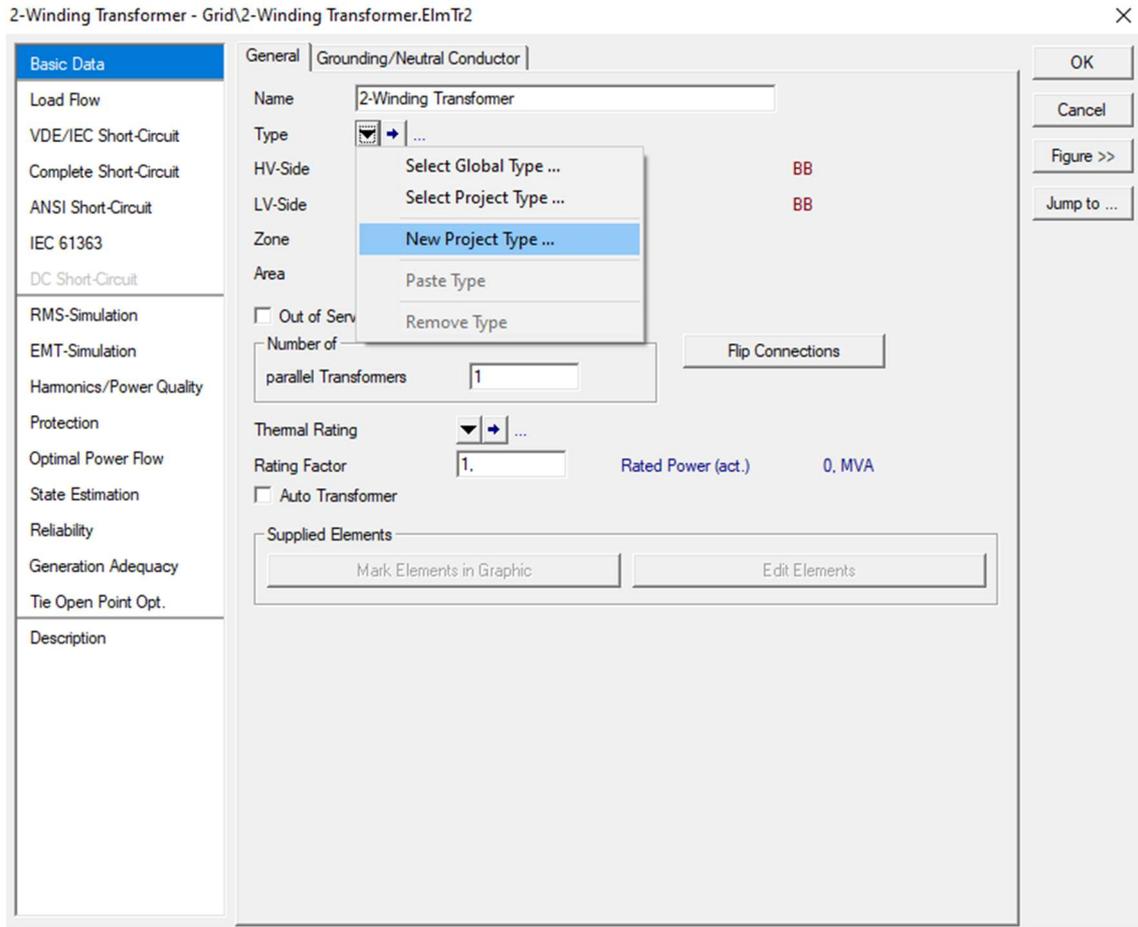
Clicando em Type, nas opções nas opções disponíveis, você terá algumas escolhas relacionadas ao tipo de transformador a ser utilizado.

Select Global Type (Selecionar Tipo Global): Nessa opção, você pode escolher usar os dados de um transformador existente na biblioteca do software DIGSILENT. Ao selecionar essa opção, você poderá escolher o tipo de transformador desejado na biblioteca e utilizar seus dados predefinidos.

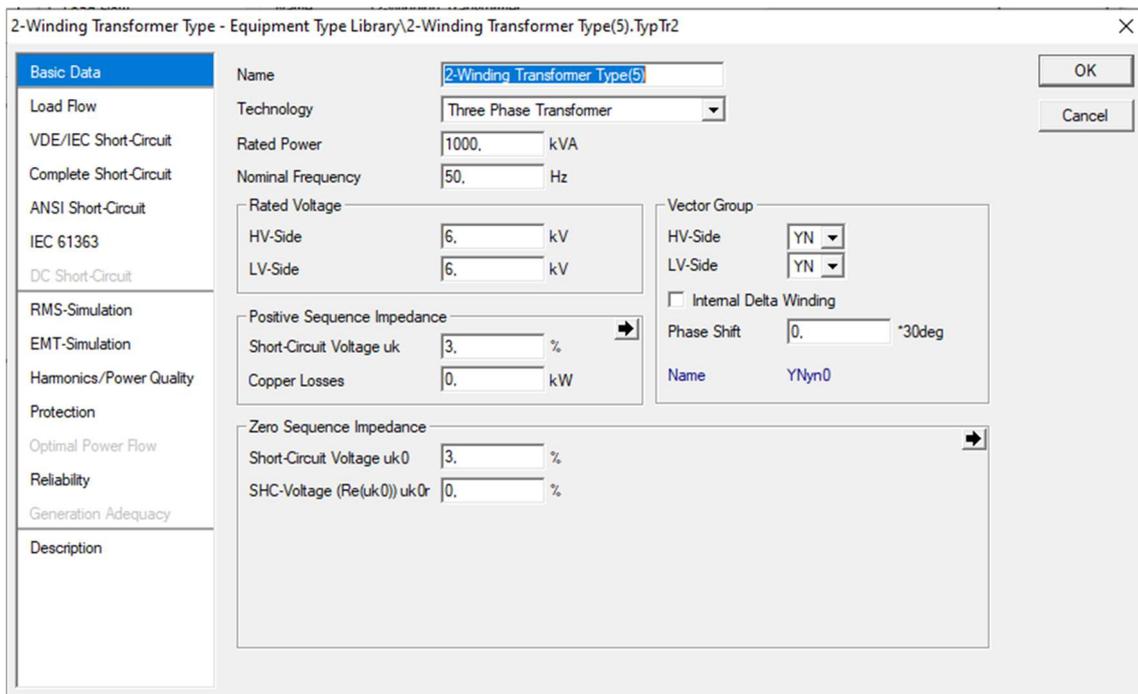
Select Project Type (Selecionar Tipo do Projeto): Nessa opção, você pode utilizar os dados de um transformador existente no seu projeto atual. Isso significa que você pode importar dados específicos para um transformador em seu projeto. Ao selecionar essa opção, você poderá escolher o tipo de transformador presente no projeto e utilizar seus dados configurados anteriormente.

New Project Type (Novo Tipo de Projeto): Se você escolher essa opção, poderá definir um novo tipo de transformador. Isso permite que você configure manualmente os parâmetros do transformador. Ao selecionar essa opção, você terá a oportunidade de definir todas as características do transformador de acordo com suas necessidades específicas.

Se você já possui um transformador predefinido na biblioteca ou no projeto, pode ser mais conveniente selecionar uma das primeiras opções. Por outro lado, se você deseja configurar um novo tipo de transformador com parâmetros personalizados, a opção "New Project Type" é a mais adequada.



Na opção New Project Type, abre-se uma nova tela.



Em Technology trás as informações dos condutores presentes.

2-Winding Transformer Type - Equipment Type Library\2-Winding Transformer Type(5).TypTr2 *

Basic Data	Name	2-Winding Transformer Type(5)	OK
Load Flow	Technology	Three Phase Transformer	Cancel
VDE/IEC Short-Circuit	Rated Power	Single Wire Earth Return	
Complete Short-Circuit	Nominal Frequency	Single Phase Transformer	
ANSI Short-Circuit		Three Phase Transformer	
IEC 61363	Rated Voltage		
DC Short-Circuit	HV-Side	6. kV	
	LV-Side	6. kV	
RMS-Simulation	Vector Group		
EMT-Simulation	HV-Side	ZN	
Harmonics/Power Quality	LV-Side	YN	
Protection	Phase Shift	0. *30deg	
Optimal Power Flow	Name	ZNyn0	
Reliability	Positive Sequence Impedance		
Generation Adequacy	Short-Circuit Voltage uk	3. %	
Description	Copper Losses	0. kW	
	Zero Sequence Impedance		
	Short-Circuit Voltage uk0	3. %	
	SHC-Voltage (Re(uk0)) uk0r	0. %	

2-Winding Transformer - Grid\2-Winding Transformer.ElmTr2 *

2-Winding Transformer Type - Equipment Type Library\2-Winding Transformer Type(5).TypTr2 *

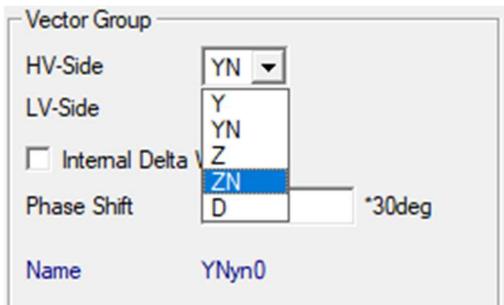
Basic Data	Name	2-Winding Transformer Type(5)	OK
Load Flow	Technology	Three Phase Transformer	Cancel
VDE/IEC Short-Circuit	Rated Power	1000. kVA	
Complete Short-Circuit	Nominal Frequency	50. Hz	
ANSI Short-Circuit	Rated Voltage		
IEC 61363	HV-Side	6. kV	
DC Short-Circuit	LV-Side	6. kV	
RMS-Simulation	Vector Group		
EMT-Simulation	HV-Side	ZN	
Harmonics/Power Quality	LV-Side	YN	
Protection	Phase Shift	0. *30deg	
Optimal Power Flow	Name	ZNyn0	
Reliability	Positive Sequence Impedance		
Generation Adequacy	Short-Circuit Voltage uk	3. %	
Description	Copper Losses	0. kW	
	Zero Sequence Impedance		
	Short-Circuit Voltage uk0	3. %	
	SHC-Voltage (Re(uk0)) uk0r	0. %	

Em Rated Power, adicionamos a potência de nosso transformador, atentar-se a unidade.

Em Nominal Frequency (Frequência Nominal): Por padrão, a frequência é definida como 50Hz. No entanto, se você estiver modelando um sistema elétrico brasileiro, a frequência nominal é de 60Hz. Portanto, você precisará alterar a frequência para garantir a compatibilidade com o sistema que está sendo modelado.

No quadro de Rated Voltage, Nesse quadro, você deve inserir os valores de tensão do primário e do secundário do transformador. Certifique-se de que essas tensões sejam compatíveis com as tensões das barras às quais o transformador está conectado.

Vector Group , neste quadro definimos grupo de ligação do primário e do secundário do transformador , na  irá apresentar as demais opções de conexão, como estrela/estrela aterrada, zig-zag/zig-zag aterrado e delta.



Vector Group

HV-Side YN

LV-Side Y
YN
Z
ZN
D

Internal Delta

Phase Shift *30deg

Name YNyn0

Nos quadros "Positive Sequence Impedance" (Impedância de Sequência Positiva) e "Zero Sequence Impedance" (Impedância de Sequência Zero), você deve inserir os dados da impedância do transformador.

4. Passo

Por fim clicamos em OK, para salvar novo modelo de transformador.

Exemplo:

Dados do transformador.

PARÂMETROS	VALOR
Potência Nominal (kVA)	2000
Tensões Nominais (kV)	34,5/0,380
Material isolante	óleo
Proteção	Chave Faca
Grupo de Ligação	Dyn1
Z (%)	6,50

Inserimos os dados do transformador

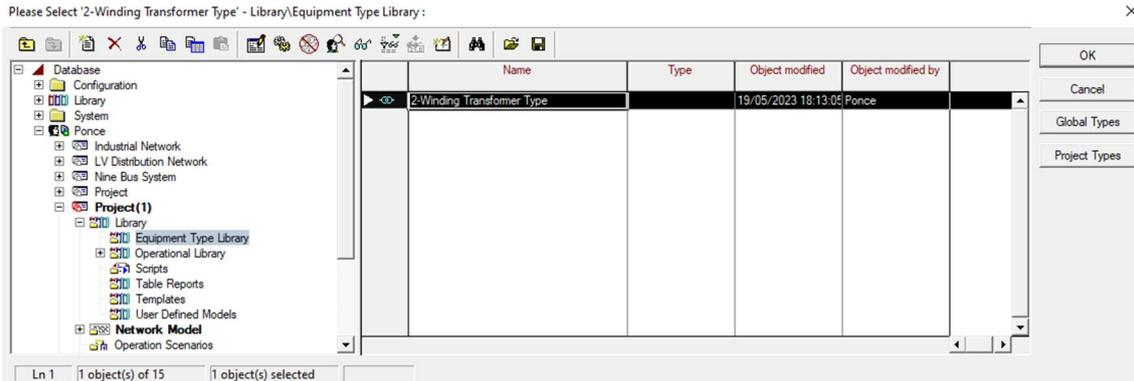
2-Winding Transformer Type - Equipment Type Library\2-Winding Transformer Type.TypeTr2

Basic Data	Name	2-Winding Transformer Type		OK
Load Flow	Technology	Three Phase Transformer		Cancel
VDE/IEC Short-Circuit	Rated Power	2000.	kVA	
Complete Short-Circuit	Nominal Frequency	60.	Hz	
ANSI Short-Circuit	Rated Voltage			Vector Group
IEC 61363	HV-Side	34,5	kV	HV-Side
DC Short-Circuit	LV-Side	0,38	kV	LV-Side
	Positive Sequence Impedance			Phase Shift
RMS-Simulation	Short-Circuit Voltage uk	6,5	%	0.
EMT-Simulation	Copper Losses	0.	kW	*30deg
Hamonics/Power Quality	Zero Sequence Impedance			Name
Protection	Short-Circuit Voltage uk0	6,5	%	Dyn0
Optimal Power Flow	SHC-Voltage (Re(uk0)) uk0r	0.	%	
Reliability				
Generation Adequacy				
Description				

2-Winding Transformer - Grid\2-Winding Transformer.ElmTr2

Basic Data	General	Grounding/Neutral Conductor	OK
Load Flow	Name	2-Winding Transformer	
VDE/IEC Short-Circuit	Type	...ent Type Library\2-Winding Transformer Type	
Complete Short-Circuit	HV-Side	Grid\Terminal\Cub_2	Terminal
ANSI Short-Circuit	LV-Side	Grid\Terminal(6)\Cub_1	Terminal(6)
IEC 61363	Zone	HV-Side	
DC Short-Circuit	Area	HV-Side	
	<input type="checkbox"/> Out of Service		
RMS-Simulation	Number of parallel Transformers	1	Flip Connections
EMT-Simulation	Thermal Rating		
Hamonics/Power Quality	Rating Factor	1.	Rated Power (act.) 2, MVA
Protection	Supplied Elements		
Optimal Power Flow	Mark Elements in Graphic		
State Estimation	Edit Elements		
Reliability			
Generation Adequacy			
Tie Open Point Opt.			
Description			

Vale lembra após darmos OK, o transformador será salvo em nossa biblioteca oque possibilitara a utilização de seus dados no decorrer da modelagem do sistema. Através de type → Select Project Type. Uma nova tela surgira com o transformador que foi implementado.



Selecionar e clicar em ok, garante que os dados do transformador anterior serão exportados para o transformador em questão.

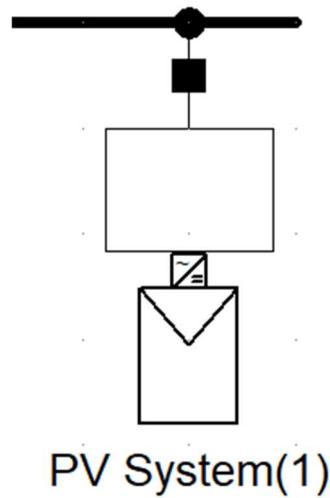
Anexo II – Inserir uma Geração fotovoltaica

1. passo

Na tela inicial encontramos uma barra de ferramenta localizado a direita, nesta encontramos os componentes para a modelagem do sistema elétrico. Seja para geração ou distribuição.



Utilizar o ícone de geração fotovoltaica (PV System) , você poderá adicionar um gerador solar ao seu sistema elétrico. Esse tipo de gerador é utilizado para representar a geração de energia a partir de painéis solares fotovoltaicos. Ao clicar no ícone do PV System e arrastá-lo para a área de trabalho, você poderá posicionar o gerador fotovoltaico em um local apropriado.



Fica claro que a geração fotovoltaica está passando por um inversor de corrente contínua (DC) para corrente alternada (AC).

2. passo

Com um duplo click, abre-se uma janela das configurações da geração fotovoltaica.

PV System - Grid\PV System(1).ElmPvsys

Basic Data | System Configuration | Zero Sequence/Neutral Conductor

Name: PV System(1)

Terminal: Grid\Single Busbar\4\Cub_1 BB

Zone: ...

Area: ...

Out of Service

Model: Active Power Input

Technology: 3PH

Number of Parallel Inverters: 1

Ratings

Nominal Apparent Power: 1. kVA

Power Factor: 0.8

Model: ...

OK

Cancel

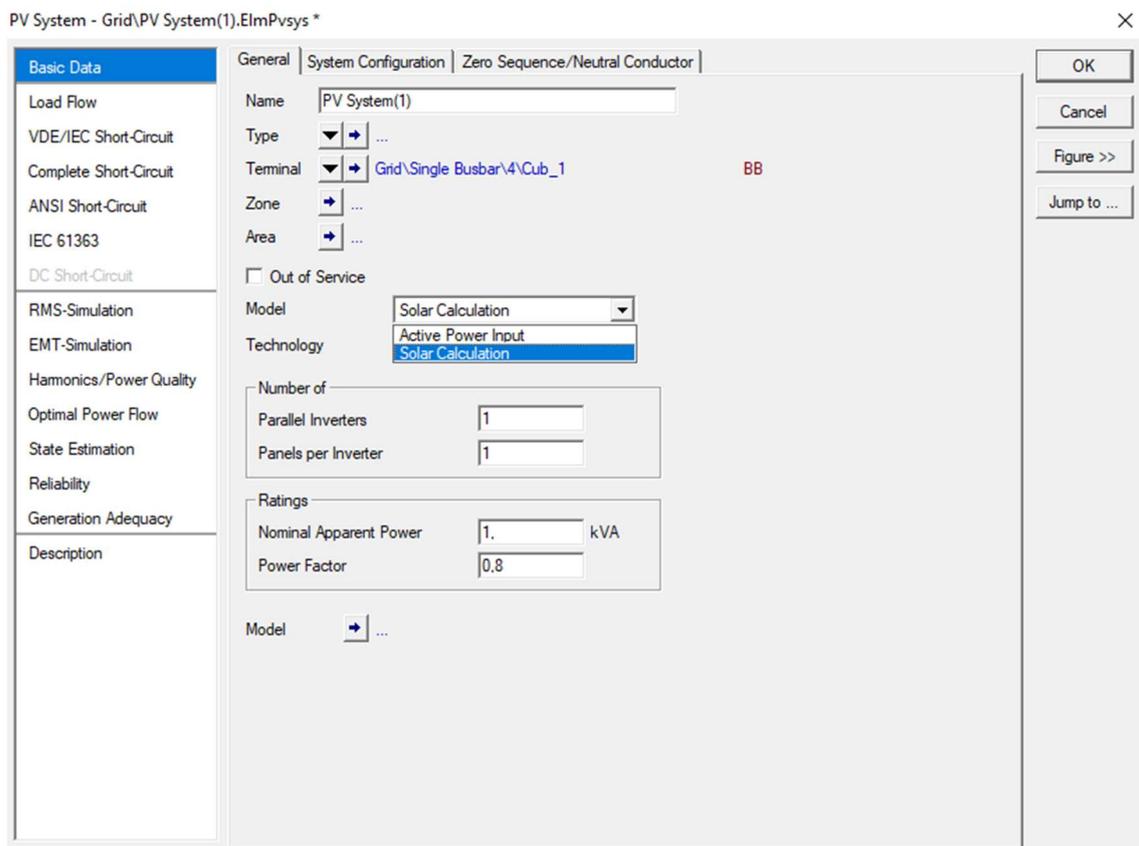
Figure >>

Jump to ...

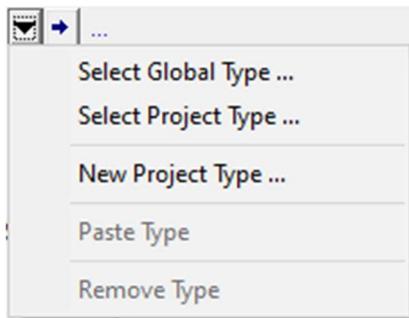
Em model podemos definir duas formas de se configurar a geração.

O modo "Active Power Input" (Entrada de Potência Ativa) e no modo "Solar Calculation" (Cálculo Solar), você tem diferentes opções para configurar a geração fotovoltaica, cada uma com suas vantagens e características específicas.

No modo "Active Power Input", você pode adicionar a geração fotovoltaica de forma mais simples, fornecendo apenas a potência aparente do gerador solar e o número de inversores. Essa opção é útil quando você não precisa levar em consideração os detalhes específicos.



A opção Type surge no topo da tela. Em  surge



- Select Global Type – Utiliza-se os dados de uma geração fotovoltaica existente na biblioteca do DIGSILENT.
- Select Project Type - Utiliza-se os dados de uma geração fotovoltaica existente em nosso projeto.
- New Project Type - Definimos um novo tipo de geração fotovoltaica.

No modo "Solar Calculation", você tem a opção de adicionar as características detalhadas do painel solar. Essa opção oferece um nível mais avançado de modelagem e permite que você leve em consideração as características específicas do seu sistema fotovoltaico. Através da opção New Project Type, podemos adicionar características da placa solar, trazendo para a simulação mais consistência.

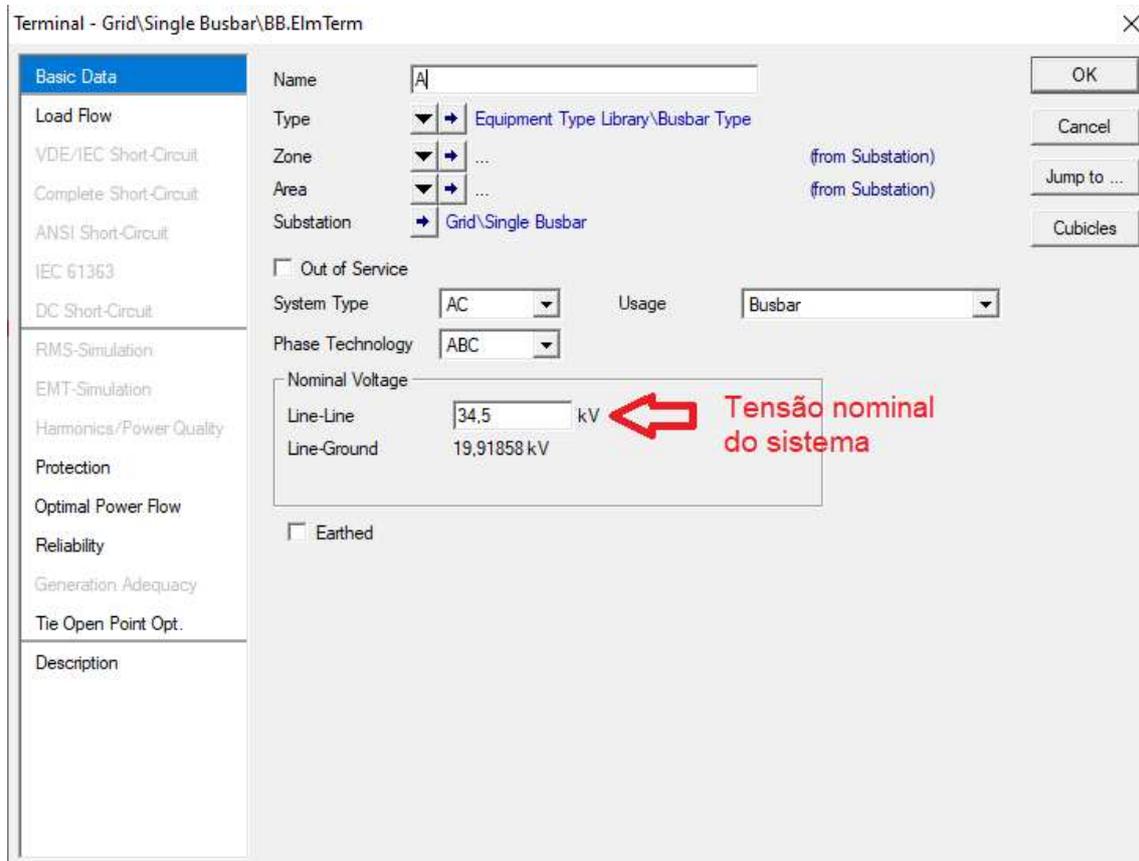
Anexo C – Inserir dado da impedância de Curto-Circuito na barra de entrada.

1. passo

Na barra de componentes implementamos a nossa barra de entrada através do ícone 

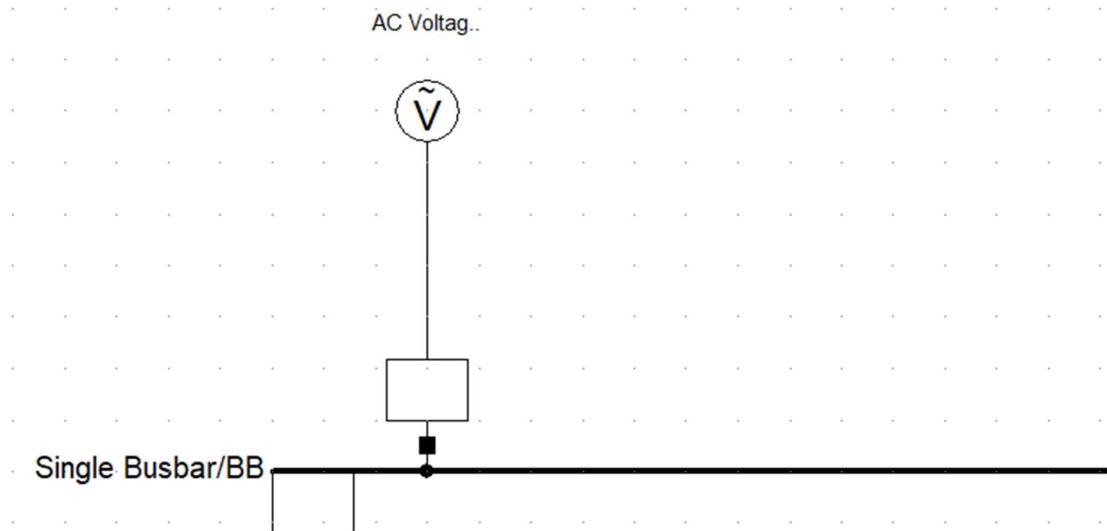


barra vem esbranquiçada, indicando que não está conectada a nenhuma fonte, é importante configurar corretamente suas propriedades para refletir as características do sistema elétrico e as especificações do atendimento pela concessionária.



2. Passo

Inserimos uma fonte de tensão ligada a esta barra. A fonte de tensão pode ser encontrada no ícone  AC Voltage Source.



Nas configurações da fonte de tensão:

The screenshot shows the configuration dialog for an AC Voltage Source. The dialog is titled "AC Voltage Source - Grid\AC Voltage Source.ElmVac". The "Basic Data" tab is selected in the left sidebar. The configuration parameters are as follows:

- Name: AC Voltage Source
- Terminal: Grid\Single Busbar\1\Cub_1
- Zone: ...
- Area: ...
- Out of Service:
- No. of Phases: 3
- Nominal Voltage:
 - Line-Line: 34,5 kV
 - Line-Ground: 19,91858 kV
 - Type: Voltage Source
- Model: ...

Buttons on the right include OK, Cancel, Figure >>, and Jump to ...

Após inserir o valor da tensão nominal do sistema na configuração da barra e definir o "Type" como "Voltage Source" (Fonte de Tensão), você pode prosseguir para a aba "Load

Flow" para configurar a impedância de curto-circuito. Estes dados podem ser obtidos juntamente a concessionaria.

3. Passo

Nesta etapa temos que ter em mente um equivalente de Thevenin. Adicionaremos os valores de impedância de curto-circuito para as três sequencias.

Exemplo:

Z1

PU base 100 MVA = 4,7947 +j 5,5402

OHMS = 57,0693 +j 65,9420

Z0

PU base 100 MVA = 6,6626 +j 23,4312

OHMS = 79,3018 +j 278,8904

AC Voltage Source - Grid\AC Voltage Source.ElmVac

Basic Data
Load Flow
 VDE/IEC Short-Circuit
 Complete Short-Circuit
 ANSI Short-Circuit
 IEC 61363
 DC Short-Circuit

RMS-Simulation
 EMT-Simulation
 Harmonics/Power Quality
 Optimal Power Flow
 Reliability
 Generation Adequacy

Description

Positive Sequence

Voltage, Magnitude p.u.
 External Controller ▼ ▸ ...
 Voltage, Angle deg
 External Controller ▼ ▸ ...
 Resistance, R1 Ohm
 Reactance, X1 Ohm

Zero Sequence

Voltage, Magnitude p.u.
 Voltage, Angle deg
 Resistance, R0 Ohm
 Reactance, X0 Ohm

Negative Sequence

Voltage, Magnitude p.u.
 Voltage, Angle deg
 Resistance, R2 Ohm
 Reactance, X2 Ohm

OK
 Cancel
 Figure >>
 Jump to ...

Anexo IV – Citação do Trabalho final de Curso de Vinicio Cezar

O trabalho apresentado por Vinicio Cezar Zorci (2022), apresenta em seu anexo detalhes de como importar a biblioteca de um relé, simulação EMT, como inserir TC e TP e Relés e de como parametrizar os componentes. Assim a apresentação deste anexo buscar trazer pontos não abordados, realizando uma complementação do que foi apresentado em seu TFC.