



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

SAMUEL DA SILVEIRA

ESTUDO DE PROTEÇÃO DA REDE ELÉTRICA DO CAMPUS DO PICI DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ COM INTEGRAÇÃO DE UMA USINA
FOTOVOLTAICA

FORTALEZA

2022

SAMUEL DA SILVEIRA

ESTUDO DE PROTEÇÃO DA REDE ELÉTRICA DO CAMPUS DO PICI DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ COM INTEGRAÇÃO DE UMA USINA
FOTOVOLTAICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do
Centro de Tecnologia da Universidade Federal
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do
grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Raimundo Furtado
Sampaio

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S591e Silveira, Samuel da.
Estudo de proteção da rede elétrica do Campus do Pici da Universidade Federal do Ceará com integração de uma usina fotovoltaica / Samuel da Silveira. – 2022.
99 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2022.
Orientação: Prof. Dr. Raimundo Furtado Sampaio.
1. Geração distribuída. 2. Usina fotovoltaica. 3. Curto-circuito. 4. Proteção. 5. Coordenação. I. Título.
CDD 621.3
-

SAMUEL DA SILVEIRA

ESTUDO DE PROTEÇÃO DA REDE ELÉTRICA DO CAMPUS DO PICI DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ COM INTEGRAÇÃO DE UMA USINA
FOTOVOLTAICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do
Centro de Tecnologia da Universidade Federal
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do
grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Raimundo Furtado Sampaio (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Me. Lucas Silveira Melo
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

À minha avó Dalva.

A todos os meus familiares.

A todos os meus amigos.

AGRADECIMENTOS

A Deus por me sustentar nessa árdua caminhada, me dando forças para não desanimar nos momentos difíceis e me mantendo firme na fé mesmo em meio às tribulações.

À minha avó Dalva que vem me criando desde sempre com todo o zelo e amor, não me deixando faltar o essencial para o físico para o e espiritual, que me colocou no caminho da fé e me deu todo auxílio necessário para que pudesse focar nos meus objetivos.

A todos os meus familiares que me apoiaram em casa, colaborando para que eu tivesse o conforto necessário para realizar minhas obrigações acadêmicas.

Aos meus amigos que sempre me apoiaram, me dando conselhos, apoio emocional, dicas acadêmicas e profissionais e que sempre estiveram ao meu lado nos bons e maus momentos.

Ao professor Dr. Raimundo Furtado Sampaio pela orientação, pelos ensinamentos e pelo apoio durante as disciplinas que cursei com ele principalmente durante a elaboração deste Trabalho Final de Curso.

Aos professores Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho e Me. Lucas Silveira Melo, membros da banca examinadora que, com sua experiência e conhecimento, contribuíram valiosamente com este trabalho e com minha formação nesta etapa final da graduação.

Ao Doutorando em Engenharia Elétrica, Ednardo Moreira Rodrigues, e seu assistente, Alan Batista de Oliveira, aluno de graduação em Engenharia Elétrica, pela adequação do *template* utilizado neste trabalho para que o mesmo ficasse de acordo com as normas da biblioteca da Universidade Federal do Ceará (UFC).

Aos bibliotecários da Universidade Federal do Ceará: Francisco Edvander Pires Santos, Juliana Soares Lima, Izabel Lima dos Santos, Kalline Yasmin Soares Feitosa e Eliene Maria Vieira de Moura, pela revisão e discussão da formatação utilizada neste *template*.

Ao aluno Thiago Nascimento do curso de ciência da computação da Universidade Estadual do Ceará que elaborou o *template* do qual este trabalho foi adaptado para Universidade Federal do Ceará.

“Ninguém é suficientemente perfeito, que não possa aprender com o outro e, ninguém é totalmente destituído de valores que não possa ensinar algo ao seu irmão.”

(São Francisco de Assis)

RESUMO

O uso das unidades de Geração Distribuída (GD) vem crescendo bastante nos últimos anos. A inclusão destas unidades aos sistemas elétricos de potência necessitam ser avaliadas a partir dos estudos de fluxo de carga, curto-circuito e proteção, tendo em vista que podem afetar no correto funcionamento dos mesmos. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo apresentar o estudo das proteções da subestação, da rede de distribuição e do ponto de conexão de uma Usina Fotovoltaica (UFV) de 2,5 MVA hipoteticamente instalada na rede elétrica do sistema de distribuição do campus do Pici da Universidade Federal do Ceará (UFC). Para tal, foi realizado um levantamento dos dados do sistema para em seguida ser realizado, com o auxílio do *software MathCAD*, o estudo de curto-circuito do sistema sem a UFV. Foi realizada uma simulação no *software EasyPower* para a obtenção dos dados de curto-circuito do sistema com a inclusão da UFV. Com base nos dados e resultados obtidos dos cálculos e simulações de curto-circuito, foi realizado o estudo de proteção do sistema de distribuição do campus do Pici com e sem a presença da UFV. Como resultado dos estudos realizados, foi assegurada a coordenação entre os relés e religadores do sistema para ambos os casos de estudo, além de ser observado que, mesmo com a inclusão da UFV ao sistema de distribuição do campus do Pici, não há necessidade de alterações nos ajustes de proteção dos equipamentos do sistema.

Palavras-chave: Geração Distribuída. Usina Fotovoltaica. Curto-Circuito. Proteção. Coordenação.

ABSTRACT

The use of Distributed Generation (DG) units has grown significantly in recent years. The inclusion of these units in electrical power systems needs to be evaluated from the power flow, short circuit and protection studies, considering that they can affect their correct functioning. In this context, this work aims to present the study of the protections of the substation, the distribution network and the connection point of a Photovoltaic (PV) Plant of 2.5 MVA hypothetically installed in the electrical network of the distribution system of the Pici campus of the Federal University of Ceará. To this end, a survey of the system data was carried out to then, with the help of the MathCAD software, conduct the short circuit study of the system without the PV plant. A simulation was performed in the EasyPower software to obtain the system's short circuit data with the inclusion of the PV plant. Based on the data and the results obtained from the short circuit calculations and simulations, the Pici campus' distribution system protection study was performed with and without the PV plant. As a result of the conducted studies, coordination was ensured between the system's relays and reclosers to both case studies, in addition to observing that, even with the inclusion of the PV plant in the distribution of the Pici campus, there is no need to change the protection settings of the system equipment.

Keywords: Distributed generation. Photovoltaic Plant. Short circuit. Protection. Coordination.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de cálculo de grandezas em p.u.	20
Figura 2 – Modelo para cálculo do curto-circuito trifásico.	21
Figura 3 – Modelo para cálculo do curto-circuito bifásico.	22
Figura 4 – Modelo para cálculo do curto-circuito monofásico.	22
Figura 5 – Exemplo de coordenação.	24
Figura 6 – Diagrama do sistema de distribuição do Campus do Pici	26
Figura 7 – Impedâncias dos barramentos da subestação do Campus do Pici da UFC	27
Figura 8 – Impedâncias dos cabos da Rede de Distribuição Primária	30
Figura 9 – Diagrama da Usina Fotovoltaica	32
Figura 10 – Coordenograma de fase dos equipamentos do lado de alta tensão da subestação	46
Figura 11 – Coordenograma de neutro dos equipamentos do lado de alta tensão da subestação	47
Figura 12 – Coordenograma de fase dos equipamentos do lado de média tensão da subestação	48
Figura 13 – Coordenograma de neutro dos equipamentos do lado de média tensão da subestação	48
Figura 14 – Coordenograma de fase dos equipamentos da rede de distribuição ligados ao tronco do alimentador 21L1	50
Figura 15 – Coordenograma de neutro dos equipamentos da rede de distribuição ligados ao tronco do alimentador 21L1	51
Figura 16 – Coordenograma de fase dos equipamentos da rede de distribuição ligados ao tronco do alimentador 21L2	51
Figura 17 – Coordenograma de neutro dos equipamentos da rede de distribuição ligados ao tronco do alimentador 21L2	52
Figura 18 – Coordenograma de fase dos equipamentos da rede de distribuição ligados ao tronco do alimentador 21L3	52
Figura 19 – Coordenograma de neutro dos equipamentos da rede de distribuição ligados ao tronco do alimentador 21L3	53
Figura 20 – Coordenograma de fase dos equipamentos do lado de alta tensão da subestação com inclusão da UFV.	55

Figura 21 – Coordenograma de neutro dos equipamentos do lado de alta tensão da subestação com inclusão da UFV.	56
Figura 22 – Coordenograma de fase dos equipamentos do lado de média tensão da subestação com inclusão da UFV.	56
Figura 23 – Coordenograma de neutro dos equipamentos do lado de média tensão da subestação com inclusão da UFV.	57
Figura 24 – Coordenograma de fase dos equipamentos da rede de distribuição ligados ao tronco do alimentador 21L1 com inclusão da UFV.	59
Figura 25 – Coordenograma de neutro dos equipamentos da rede de distribuição ligados ao tronco do alimentador 21L1 com inclusão da UFV.	59
Figura 26 – Coordenograma de fase dos equipamentos da rede de distribuição ligados ao tronco do alimentador 21L2 com inclusão da UFV.	60
Figura 27 – Coordenograma de neutro dos equipamentos da rede de distribuição ligados ao tronco do alimentador 21L2 com inclusão da UFV.	60
Figura 28 – Coordenograma de fase dos equipamentos da rede de distribuição ligados ao tronco do alimentador 21L3 com inclusão da UFV.	61
Figura 29 – Coordenograma de neutro dos equipamentos da rede de distribuição ligados ao tronco do alimentador 21L3 com inclusão da UFV.	61
Figura 30 – Coordenograma de fase do relé da UFV integrado aos equipamentos ligados ao tronco do alimentador 21L1.	63
Figura 31 – Coordenograma de neutro do relé da UFV integrado aos equipamentos ligados ao tronco do alimentador 21L1.	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Códigos de funções de proteção.	23
Tabela 2 – Parâmetros de ajuste do relé associado ao disjuntor 12L9 da subestação Pici	27
Tabela 3 – Dados dos elementos e equipamentos da subestação do campus do Pici. . .	28
Tabela 4 – Dados dos transformadores de potência da subestação do campus do Pici da UFC	28
Tabela 5 – Dados dos relés da subestação	29
Tabela 6 – Dados dos religadores da rede de distribuição	29
Tabela 7 – Correntes de carga e Comprimentos dos trechos	30
Tabela 8 – Impedâncias em p.u. de sequências positiva e zero dos trechos da rede de distribuição	31
Tabela 9 – Correntes passantes nos equipamentos do sistema de distribuição do campus do Pici	32
Tabela 10 – Dados de base do sistema	35
Tabela 11 – Curto-circuitos passantes nos elementos e equipamentos do sistema de distri- buição do campus do Pici	37
Tabela 12 – Dimensionamento dos Transformador de Corrente (TC)s do sistema.	37
Tabela 13 – Curto-circuitos passantes nos elementos e equipamentos do sistema de distri- buição do campus do Pici com inclusão da UFV.	38
Tabela 14 – Dimensionamento dos TCs do sistema com inclusão da UFV.	39
Tabela 15 – Critérios para estudo das proteções	39
Tabela 16 – Valores das constantes α e β para a curva Muito Inversa	39
Tabela 17 – Dados de ajuste do 12F1.	44
Tabela 18 – Dados de ajuste do 11T1 e do 11T2.	44
Tabela 19 – Dados de ajuste do R1.	45
Tabela 20 – Ajuste da função 79.	45
Tabela 21 – Dados de ajuste do R2 e do R3.	46
Tabela 22 – Dados de ajuste do R4.	49
Tabela 23 – Dados de ajuste do R5.	49
Tabela 24 – Dados de ajuste do R6.	49
Tabela 25 – Dados de ajuste do R9 com a inclusão da UFV à rede de distribuição.	50
Tabela 26 – Dados de ajuste do 12F1 com a inclusão da UFV à rede de distribuição. . .	54

Tabela 27 – Dados de ajuste de 11T1 e 11T2 com a inclusão da UFV à rede de distribuição.	54
Tabela 28 – Dados de ajuste do R1 com a inclusão da UFV à rede de distribuição.	54
Tabela 29 – Dados de ajuste de R2 e R3 com a inclusão da UFV à rede de distribuição. . .	55
Tabela 30 – Dados de ajuste do R4 com a inclusão da UFV à rede de distribuição.	57
Tabela 31 – Dados de ajuste do R5 com a inclusão da UFV à rede de distribuição.	58
Tabela 32 – Dados de ajuste do R6 com a inclusão da UFV à rede de distribuição.	58
Tabela 33 – Dados de ajuste do R9 com a inclusão da UFV à rede de distribuição.	58
Tabela 34 – Dados de ajuste do relé associado ao disjuntor da UFV.	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

GD	Geração Distribuída
UFV	Usina Fotovoltaica
UFC	Universidade Federal do Ceará
TC	Transformador de Corrente
SEP	Sistema Elétrico de Potência
TP	Transformador de Potencial
RTC	Relação de Transformação de Corrente
RTP	Relação de Transformação de Potencial
ANSI	<i>American National Standards Institute</i> / Instituto Nacional Americano de Padronização
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i> / Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
PCI	Pici
MGY	Maguary
LDAT	Linha de Distribuição de Alta Tensão
OAP	Ordem de Ajuste de Proteção
MI	Muito Inversa
ANAFAS	software de Análise de Falhas Simultâneas
NF	normalmente fechado
NA	normalmente aberto
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
RTT	Relação de Transformação de Tensão
SCADA	<i>Supervisory Control And Data Acquisition</i> / Sistema de Aquisição de Controle de Dados
ATP	<i>Alternative Transient Program</i> / Programa Transitório Alternativo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Justificativa	17
1.2	Objetivos	18
1.2.1	<i>Objetivo Geral</i>	18
1.2.2	<i>Objetivos específicos</i>	18
1.3	Estrutura do trabalho	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	Curto-circuito	20
2.1.1	<i>Representação em por unidade (p.u.)</i>	20
2.1.2	<i>Componentes simétricas</i>	20
2.2	Curto-circuitos em sistema de distribuição radial	21
2.2.0.1	<i>Curto-circuito trifásico</i>	21
2.2.0.2	<i>Curto-circuito bifásico</i>	21
2.2.0.3	<i>Curto-circuito monofásico</i>	22
2.3	Proteção	22
2.3.1	<i>Transformador de Corrente</i>	23
2.3.2	<i>Transformador de Potencial</i>	23
2.4	Funções de proteção	23
2.4.0.1	<i>Sobrecorrente</i>	24
2.4.0.2	<i>Desequilíbrio de corrente direcional</i>	25
2.4.0.3	<i>Desequilíbrio por quebra de condutor</i>	25
2.4.0.4	<i>Religamento</i>	25
2.5	Considerações Finais	25
3	ESTUDOS DE CURTO-CIRCUITO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DO CAMPUS DO PICI COM INTEGRAÇÃO DE UMA USINA FOTOVOLTAICA	26
3.1	Sistema de distribuição do Campus do Pici	26
3.1.1	<i>Apresentação dos dados do sistema</i>	27
3.1.2	<i>Subestação</i>	27
3.1.2.1	<i>Apresentação dos dados da subestação</i>	28

3.1.3	<i>Rede de Distribuição Primária</i>	29
3.1.3.1	<i>Apresentação dos dados da rede de distribuição</i>	29
3.2	Integração da UFV à rede de distribuição do campus do Pici	32
3.2.1	<i>Apresentação dos dados da UFV</i>	33
3.3	Estudo de curto-circuito	33
3.3.1	<i>Estudo de curto-circuito sem a UFV</i>	34
3.3.1.1	<i>Cálculo das impedâncias acumuladas</i>	34
3.3.1.2	<i>Valores de base do sistema</i>	35
3.3.1.3	<i>Equações e valores calculados de curto-circuito</i>	36
3.3.1.4	<i>Dimensionamento dos transformadores de corrente</i>	37
3.3.2	<i>Estudo de curto-circuito com inclusão da UFV</i>	38
3.3.2.1	<i>Resultados de simulação de curto-circuito</i>	38
3.3.2.2	<i>Dimensionamento dos TCs com a inclusão da UFV</i>	38
3.4	CrITÉRIOS e equações para estudo das proteções	39
3.4.1	<i>CrITÉRIOS para estudo das proteções</i>	39
3.4.2	<i>Equações para estudo das proteções</i>	40
3.4.2.1	<i>Funções de sobrecorrente instantânea e temporizada de fase (50/51) e neutro (50N/51N)</i>	40
3.4.2.2	<i>Função de sobrecorrente do neutro do transformador (51G)</i>	42
3.4.2.3	<i>Função de desequilíbrio de corrente direcional ($46 - I_2$)</i>	42
3.4.2.4	<i>Função de desequilíbrio por quebra de condutor ($46 - I_2/I_1$)</i>	42
3.5	Considerações finais	42
4	ESTUDOS DE PROTEÇÃO DO CAMPUS DO PICI COM INTEGRAÇÃO DE UMA UFV	43
4.1	Estudo de proteção do sistema de distribuição sem UFV	43
4.1.1	<i>Estudo de proteção da subestação</i>	43
4.1.1.1	<i>Relé associado ao disjuntor 12F1</i>	43
4.1.1.2	<i>Relés associados aos disjuntores 11T1 e 11T2</i>	44
4.1.1.3	<i>Relé de sobrecorrente do neutro do transformador</i>	45
4.1.1.4	<i>Religador R1(21L1)</i>	45
4.1.1.5	<i>Religadores R2(21L2) e R3(21L3)</i>	46
4.1.1.6	<i>Coordenogramas da subestação</i>	46

4.1.2	<i>Estudo de proteção da rede de distribuição</i>	49
4.1.2.1	<i>Religador R4</i>	49
4.1.2.2	<i>Religador R5</i>	49
4.1.2.3	<i>Religador R6</i>	49
4.1.2.4	<i>Religador R9</i>	50
4.1.2.5	<i>Coordenogramas da rede de distribuição</i>	50
4.2	Estudo de proteção do sistema de distribuição com UFV	53
4.2.1	<i>Estudo de proteção da subestação</i>	53
4.2.1.1	<i>Relé associado ao disjuntor 12F1 com UFV</i>	53
4.2.1.2	<i>Relés associados aos disjuntores 11T1 e 11T2 com UFV</i>	54
4.2.1.3	<i>Relé de sobrecorrente do neutro do transformador com UFV</i>	54
4.2.1.4	<i>Religador R1(21L1) com UFV</i>	54
4.2.1.5	<i>Religadores R2(21L2) e R3(21L3) com UFV</i>	55
4.2.1.6	<i>Coordenogramas da subestação com inclusão da UFV</i>	55
4.2.2	<i>Estudo de proteção da rede de distribuição com inclusão da UFV</i>	57
4.2.2.1	<i>Religador R4 com UFV</i>	57
4.2.2.2	<i>Religador R5 com UFV</i>	58
4.2.2.3	<i>Religador R6 com UFV</i>	58
4.2.2.4	<i>Religador R9 com UFV</i>	58
4.2.2.5	<i>Coordenogramas da rede de distribuição com inclusão da UFV</i>	58
4.2.3	<i>Estudo de proteção da UFV</i>	62
4.2.3.1	<i>Relé associado ao disjuntor da UFV</i>	62
4.2.3.2	<i>Coordenogramas da integração da UFV ao tronco do alimentador 21L1</i> . . .	62
4.3	Considerações finais	64
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS . . .	65
5.1	Conclusões	65
5.2	Sugestões de Trabalhos futuros	66
	REFERÊNCIAS	67
	APÊNDICES	69
	APÊNDICE A – CÁLCULOS MATHCAD	69

1 INTRODUÇÃO

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) está sujeito a contratemplos inesperados, como falhas em seus componentes, que podem resultar em interrupções no fornecimento de energia elétrica (MAMEDE FILHO, 2013).

A mais comum das falhas que ocorre nos sistemas de potência é o curto-circuito, que provoca circulação de correntes elevadas por todos os componentes energizados do sistema, causando distúrbios de tensão em todo o sistema elétrico, o que pode resultar em danos irreparáveis ao sistema e às cargas (MAMEDE FILHO, 2013).

O sistema de proteção tem como principal função garantir que toda uma parcela de um sistema de potência, na ocorrência de uma anormalidade, seja desconectada da rede elétrica, garantido o isolamento dessa parcela comprometida (MAMEDE FILHO, 2013).

As anormalidades que podem ocorrer no sistema de potência, também conhecidas como faltas, podem ser transitórias ou permanentes. Na ocorrência de faltas transitórias é possível reestabelecer o fornecimento de energia elétrica por meio do uso de religadores, porém as faltas permanentes não se solucionam tão facilmente, sendo necessária a intervenção de profissionais para o reestabelecimento do fornecimento de energia elétrica ao trecho afetado do sistema (LOPES, 2011).

Nos últimos anos tem sido cada vez mais comum a conexão de unidades de Geração Distribuída (GD) aos sistemas de potência. Essas mudanças no sistema trazem consigo o desafio de estudar novas formas de eliminar as falhas que possam vir a surgir no sistema. Isso requer uma análise dos impactos que essas conexões causarão no sistema, para averiguar se há a necessidade de realizar alguma alteração na filosofia de proteção ou não (OLIVEIRA, 2019).

1.1 Justificativa

No campus do Pici são desenvolvidos, além das atividades básicas, como aulas teóricas e reuniões, aulas práticas e muitos projetos de pesquisa e desenvolvimento, os quais podem acabar sendo significativamente prejudicados na ocorrência de uma falta de suprimento de energia elétrica.

Alguns desses projetos necessitam de suprimento de energia elétrica de forma continuada para que não haja prejuízo no estudo. Tendo em vista a importância da necessidade de manter o suprimento de energia elétrica dentro do campus do Pici da Universidade Federal do

Ceará (UFC), entende-se a necessidade de um projeto de proteção para garantir que seja retirado o menor número possível de cargas do sistema.

Ao realizar a inclusão de uma unidade de GD a este sistema de potência, o comportamento do sistema de proteção pode ser afetado, podendo ocorrer a atuação indevida do sistema de proteção ou até mesmo a não atuação do mesmo, diminuindo assim, a confiabilidade do sistema de proteção.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral apresentar o estudo de proteção de um sistema de distribuição de um campus universitário com a integração de uma Usina Fotovoltaica (UFV) de 2,5 MVA.

1.2.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral apresentado, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Levantar dados do sistema de distribuição do campus do Pici e da UFV;
- Com o auxílio do *software MathCAD*, realizar os cálculos do estudo de proteção do sistema de distribuição do campus do Pici, gerando os coordenogramas do estudo;
- Com o auxílio do *software EasyPower*, realizar a simulação do sistema elétrico do campus do Pici com a inclusão da UFV a fim de obter os dados de curto-circuito do novo sistema;
- Com o auxílio do *software MathCAD*, realizar os cálculos do estudo de proteção do sistema com a integração da UFV, gerando os coordenogramas do estudo.

1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. No Capítulo 1 são apresentados a justificativa, os objetivos e a estrutura do trabalho.

No Capítulo 2 é apresentada uma fundamentação teórica sobre conceitos referentes aos estudos de curto-circuito, proteção e coordenação. É feita uma explanação sobre as funções de proteção estudadas neste trabalho.

No Capítulo 3 são apresentados os dados do sistema elétrico do campus do Pici da UFC e da UFV a ser integrada ao sistema. São apresentadas ainda as equações que são utilizadas durante o estudo. Com base nestes dados e equações são feitos os estudos de curto-circuito do sistema de distribuição do campus. São apresentados também os dados de curto-circuito obtidos em simulação. Todos esses dados servem de base para os estudos de proteção apresentados em seguida.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados dos estudos de proteção do sistema de distribuição do campus do Pici sem a inclusão da UFV e em seguida, com a integração da UFV ao sistema. São apresentados também neste capítulo, os coordenogramas das proteções de sobrecorrente dos equipamentos do sistema em ambos os casos.

Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as considerações finais, compostas por um resumo de todo o trabalho, pelas conclusões tiradas dos resultados obtidos e por sugestões de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são abordados conceitos relacionados a curto-circuito e a proteção em sistemas elétricos de potência, com ênfase em sistemas de distribuição de energia elétrica.

2.1 Curto-circuito

Nesta seção são apresentados conceitos referentes ao estudo de curto-circuitos com ênfase em sistemas de distribuição.

2.1.1 Representação em por unidade (p.u.)

A representação de grandezas elétricas em p.u. é mundialmente adotada por se mostrar mais simples. Essa forma de representação exige a definição de valores de base para o sistema (KINDERMANN, 1997).

Para converter os valores das grandezas elétricas para p.u. basta dividir o valor da grandeza na unidade convencional pelo valor de base correspondente, como mostrado no exemplo da Figura 1 (GOMES, 2012).

Figura 1 – Exemplo de cálculo de grandezas em p.u.

Cálculo das Grandezas em PU

⑥

- Tensão em PU: $v = \frac{V}{V_{base}} (pu - V)$
- Potência em PU: $s = \frac{S}{S_{base}} (pu - VA)$
- Impedância em PU: $z = \frac{Z}{Z_{base}} = Z \cdot \frac{S_{base}}{V_{base}^2} (pu - \Omega)$
- Corrente em PU: $i = \frac{I}{I_{base}} = I \cdot \frac{V_{base}}{S_{base}} (pu - A)$

Fonte: (GOMES, 2012)

2.1.2 Componentes simétricas

Os curto-circuitos geram desbalanceamentos nos sistemas de potência, o que dificulta cálculos e simulações. Para contornar este problema foi formulada uma ferramenta analítica que consiste na decomposição das correntes trifásicas desequilibradas em três grupos. Cada um

destes grupos é composto por três fasores balanceados chamados de componentes simétricas de sequência positiva, negativa e zero (KINDERMANN, 1997).

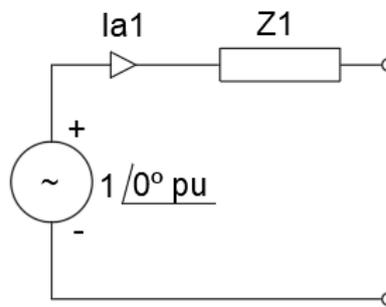
2.2 Curto-circuitos em sistema de distribuição radial

As impedâncias utilizadas no estudo de curto-circuito são calculadas a partir do ponto de curto-circuito, por meio do equivalente de Thévenin de todo o sistema elétrico. A soma das impedâncias de todo o sistema é a impedância acumulada, ou impedância de Thévenin (KINDERMANN, 1997).

2.2.0.1 Curto-circuito trifásico

Como as correntes de curto-circuito trifásico (3ϕ) são balanceadas, é considerado somente o modelo de sequência positiva (KINDERMANN, 1997). Este modelo é mostrado na Figura 2. A Equação 3.18 é obtida a partir da análise deste circuito.

Figura 2 – Modelo para cálculo do curto-circuito trifásico.

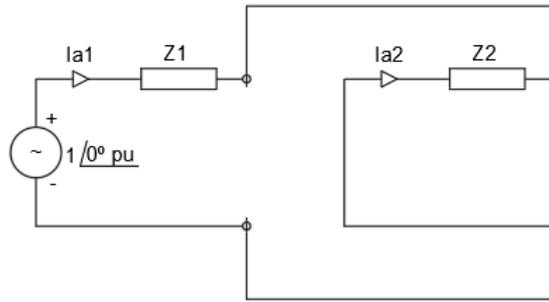


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

2.2.0.2 Curto-circuito bifásico

Como os sistemas de distribuição geralmente ficam longe das geradoras, pode-se considerar que as impedâncias de sequência positiva e negativa são iguais ($Z1 = Z2$). Assim, para o curto-circuito bifásico (2ϕ), os modelos de sequência positiva e negativa são colocados em paralelo (KINDERMANN, 1997). O modelo resultante é mostrado na Figura 3. A Equação 3.19 é obtida a partir da análise deste circuito.

Figura 3 – Modelo para cálculo do curto-circuito bifásico.

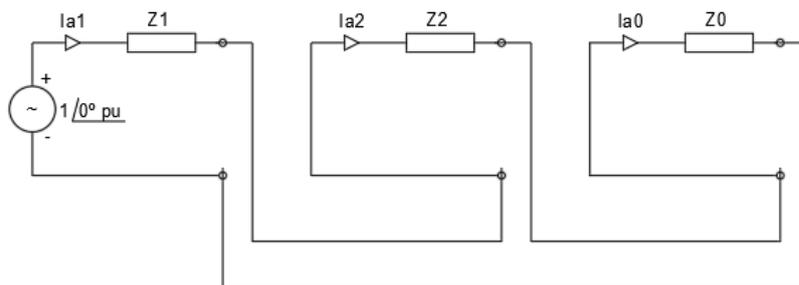


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

2.2.0.3 Curto-circuito monofásico

Para o cálculo das correntes de curto-circuito monofásico (1ϕ) são utilizados os modelos de seqüências positiva, negativa e zero em serie, como mostrado na Figura 4. A Equação 3.20 é obtida a partir da análise deste circuito.

Figura 4 – Modelo para cálculo do curto-circuito monofásico.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

2.3 Proteção

Os relés de proteção são sensores colocados estrategicamente ao longo do sistema que recebem sinais de tensão e corrente do sistema e comparam com valores pré-definidos. O relé atua por meio da energização de uma bobina que causa a abertura de um disjuntor que está conectado ao sistema (KINDERMANN, 2005).

Os relés não suportam os níveis de tensão e corrente de um SEP. Portanto, é necessário utilizar transformadores de instrumentos. São eles o Transformador de Corrente (TC) e o Transformador de Potencial (TP) (KINDERMANN, 2005).

2.3.1 Transformador de Corrente

É um equipamento utilizado para reduzir elevados níveis de corrente a níveis utilizados para proteção, controle e medição. A corrente é reduzida a um valor proporcional dado pela Relação de Transformação de Corrente (RTC), que é calculada por meio da razão da corrente do enrolamento primário pela corrente do enrolamento secundário, como mostra a equação 2.1 (KINDERMANN, 2005).

$$RTC = \frac{I_{prim}}{I_{sec}} \quad (2.1)$$

2.3.2 Transformador de Potencial

É um equipamento utilizado para reduzir elevados níveis de tensão a níveis utilizados para proteção, controle e medição. A tensão é reduzida a um valor proporcional dado pela Relação de Transformação de Potencial (RTP), que é calculada por meio da razão da tensão do enrolamento primário pela tensão do enrolamento secundário. como mostra a equação 2.2 (KINDERMANN, 2005).

$$RTP = \frac{V_{prim}}{V_{sec}} \quad (2.2)$$

2.4 Funções de proteção

Nesta seção são apresentadas principais características das funções de proteção utilizadas neste trabalho. Os códigos das funções de proteção foram estabelecidos pelo *American National Standards Institute* / Instituto Nacional Americano de Padronização (ANSI) e pelo *Institute of Electrical and Electronic Engineers* / Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE) através da norma ANSI/IEEE C37.2 (2008). Na Tabela 1 são apresentados os códigos das funções de proteção utilizadas neste trabalho de acordo com a tabela de códigos ANSI.

Tabela 1 – Códigos de funções de proteção.

Código ANSI	Função de Proteção
50/50N - 51/51N	Sobrecorrente instantânea e temporizada de fase/de neutro
51NS	Sobrecorrente temporizada de neutro sensível
51G	Sobrecorrente de terra
46 - I2	Desequilíbrio de corrente direcional
46 - I2/I1	Desequilíbrio de corrente por quebra de condutor
79	Religamento

Fonte: adaptado de Sampaio (2020a)

2.4.0.1 Sobrecorrente

A função de sobrecorrente proporciona a atuação do relé quando a corrente que passa por ele ultrapassa um valor pré-definido (KINDERMANN, 2005).

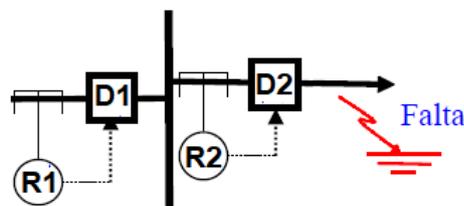
A função de sobrecorrente instantânea (50/50N) não apresenta retardo intencional na atuação do relé. O retardo existente é proveniente as características construtivas do relé (MAMEDE FILHO, 2013).

O ajuste da função 50/50N em subestações deve levar em conta também a corrente de *inrush*, ou corrente de magnetização do transformador. Ela atinge um pico de 8 a 12 vezes o valor da corrente nominal do transformador, portanto a corrente de *pickup* da função de sobrecorrente instantânea não deve atuar para este valor (KINDERMANN, 2006).

Com a função de sobrecorrente temporizada (51/51N) pode-se ajustar o retardo da atuação do relé. Os relés que possuem essa função são caracterizados por curvas de temporização. Para cada tipo de curva, a norma IEC 60255 (1976) padroniza os valores das constantes utilizadas no cálculo dos tempos de operação e do *dial* de tempo (MAMEDE FILHO, 2013).

Os relés de sobrecorrente temporizada devem coordenar os tempos de atuação de forma a removerem somente a parte defeituosa do sistema. Para exemplificar pode-se observar a Figura 5.

Figura 5 – Exemplo de coordenação.



Fonte: adaptado de Sampaio (2020a)

Observando a Figura 5 nota-se que, na ocorrência uma falta após o disjuntor D2, o relé R2 mandará o comando para abrir D2. Assim, R1 não deve atuar, pois caso isso ocorra, D1 abrirá e eliminará todo o barramento. O tempo entre a atuação de R2 e a atuação de R1 é chamado de margem de coordenação. Ela é definida como a diferença entre o tempo de operação de um relé e o tempo de operação do relé a montante ou a jusante dele (SAMPAIO, 2020a).

O ajuste da função de neutro sensível (51NS) é geralmente dado pela escolha de uma corrente de *pickup* superior a um valor mínimo da corrente de desequilíbrio da rede elétrica, contudo pode-se utilizar valores de *pickup* entre 15 e 18 A, com um tempo de atuação de 60

segundos (SAMPAIO, 2019).

O ajuste da função 51G é determinado utilizando a corrente de *pickup* da função 51N e aplicando um fator de segurança definido em projeto (SAMPAIO, 2019).

2.4.0.2 *Desequilíbrio de corrente direcional*

Esta função faz com que o relé atue quando circular por ele uma corrente de sequência negativa. O valor de ajuste dessa função geralmente é um valor um pouco superior à corrente de carga máxima passante pelo disjuntor, com um tempo de operação de 60 segundos (SAMPAIO, 2019).

2.4.0.3 *Desequilíbrio por quebra de condutor*

O ajuste desta função se dá aplicando um aumento de 30% na corrente de carga máxima, como mostra a Equação 3.36, com tempo de operação de 70 segundos (SAMPAIO, 2019).

2.4.0.4 *Religamento*

Esta função é utilizada em religadores para que, na ocorrência da atuação do religador devido às funções de sobrecorrente, a função de religamento atue iniciando o ciclo de religamento. Para reduzir interrupções no fornecimento de energia elétrica, é usado um ciclo rápido. Se a falha persistir, inicia-se o ciclo longo. Pode-se ainda utilizar um terceiro ciclo, contudo deve ser feita uma análise das consequências que isso traria ao sistema. (MAMEDE FILHO, 2013).

Uma forma comum de configurar esta função é utilizar um religamento instantâneo, como inibição da função instantânea após a primeira abertura, e tempo morto de 10 segundos (SAMPAIO, 2019).

2.5 **Considerações Finais**

Neste capítulo foram mostrados conceitos relacionados a curto-circuito e a proteção de sistemas elétricos de potência com foco nas funções de proteção usadas neste trabalho.

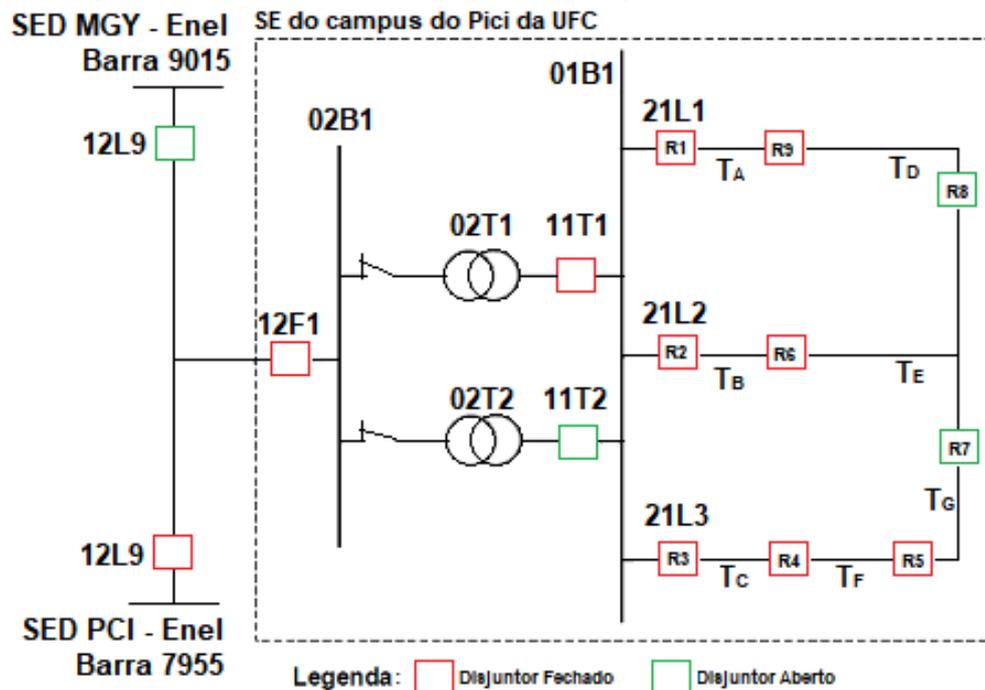
3 ESTUDOS DE CURTO-CIRCUITO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DO CAMPUS DO PICI COM INTEGRAÇÃO DE UMA USINA FOTOVOLTAICA

Neste capítulo são apresentadas as principais características da subestação do campus do Pici, da rede de distribuição de 13,8 kV e de uma planta fotovoltaica de 2,5 MVA integrada à rede de distribuição de 13,8 kV. No capítulo é apresentado o estudo de curto-circuito sem a UFV e com a inclusão da UFV. São mostrados também os dados e as equações utilizados nos cálculos dos ajustes de proteção. Os cálculos foram realizados no *software MathCAD*. Os detalhes dos cálculos são apresentados no Apêndice A. Como os religadores R7 e R8 estão sendo considerados abertos, o estudo foi realizado sem a análise de contingência.

3.1 Sistema de distribuição do Campus do Pici

Na Figura 6 é apresentado o sistema elétrico do campus do Pici. O referido sistema elétrico é composto por uma subestação 69-13,8 kV e por uma rede de distribuição com topologia radial em 13,8 kV composta por três alimentadores. Conforme pode ser observado na Figura 6, a subestação do campus é alimentada por uma derivação que é feita na linha de distribuição de alta tensão da Enel que interliga a subestação Pici (PCI) à subestação Maguary (MGY).

Figura 6 – Diagrama do sistema de distribuição do Campus do Pici



Fonte: Carneiro (2021, com adaptações).

3.1.1 Apresentação dos dados do sistema

A subestação é alimentada pela derivação feita na Linha de Distribuição de Alta Tensão (LDAT) entre as subestações PCI e MGY. Conforme pode ser observado na Figura 6, o disjuntor 12L9 da subestação MGY é considerado aberto na análise de coordenação deste trabalho. Portanto, considera-se que o disjuntor 12L9 da subestação PCI é o único disjuntor que está a montante do disjuntor de entrada da subestação do campus do Pici (12F1) na análise de coordenação. Os parâmetros das funções de sobrecorrente temporizada (51/51N) do relé associado ao disjuntor 12L9 da subestação PCI foram retirados da Ordem de Ajuste de Proteção (OAP), fornecida pela Enel, e são apresentados na Tabela 2. A curva da norma IEC 60255 utilizada neste relé é a Muito Inversa (MI).

Tabela 2 – Parâmetros de ajuste do relé associado ao disjuntor 12L9 da subestação Pici

Função de proteção	I_{ajuste}	I_{pickup}	Dial
51	4,46	1070,4	0,1
51N	0,42	100,8	0,55

Fonte: acervo da Enel.

Os dados de impedância dos barramentos de alta e média tensão da subestação do Campus do Pici foram obtidos do relatório gerado em outubro de 2018 pelo software de Análise de Falhas Simultâneas (ANAFAS), fornecido pela Enel. Os dados são apresentados na Figura 7.

Figura 7 – Impedâncias dos barramentos da subestação do Campus do Pici da UFC

IDENTIFICAÇÃO		SEQUÊNCIA POSITIVA		SEQUÊNCIA ZERO		
NUM.	NOME	R(%)	X(%)	R(%)	X(%)	
9784	UFC	69	0.4165140647	5.3189830272	0.3009369205	13.0709994923
9785	UFC-I	13.8	0.4165140647	145.1289830272	0.0000000000	139.8100000000

Fonte: acervo da Enel.

Estes dados são utilizados para o estudo das proteções do relé associado ao disjuntor 12F1 e para cálculos de curto-circuito nas barras da subestação do campus do Pici da UFC.

3.1.2 Subestação

O Campus do Pici da UFC é suprido por uma subestação de 69-13,8 kV, composta de um vão de entrada de linha, um barramento de 69 kV, dois transformadores (sendo um reserva) de 5,00/6,25 MVA, um barramento de 13,8 kV, um disjuntor entre cada transformador

e o barramento de 13,8 kV e três vãos de saída de alimentadores de distribuição em 13,8 kV. As descrições e características dos elementos e equipamentos da subestação descritos acima e mostrados na Figura 6 são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Dados dos elementos e equipamentos da subestação do campus do Pici.

Código operacional	Descrição	Características
12F1	Disjuntor na entrada da subestação do campus do Pici	Tensão de 69kV
02B1	Barramento de 69 kV da subestação do campus do Pici	Tensão de 69kV
02T1	Transformador 69-13,8 kV	Potência 5,00/6,25 MVA
02T2	Transformador 69-13,8 kV	Potência 5,00/6,25 MVA
11T1	Disjuntor do lado de média tensão do transformador 02T1	Tensão de 13,8 kV
11T2	Disjuntor do lado de média tensão do transformador 02T2	Tensão de 13,8 kV
01B1	Barramento de 13,8 kV da subestação do campus do pici	Tensão de 13,8 kV
21L1	Religador de saída de alimentador do sistema de distribuição do campus do Pici	Tensão de 13,8 kV
21L2	Religador de saída de alimentador do sistema de distribuição do campus do Pici	Tensão de 13,8 kV
21L3	Religador de saída de alimentador do sistema de distribuição do campus do Pici	Tensão de 13,8 kV

Fonte: (SAMPAIO, 2019).

3.1.2.1 Apresentação dos dados da subestação

A subestação do campus do Pici da UFC possui dois transformadores que não estão em operação simultânea, portanto neste estudo é considerado o funcionamento de apenas um deles e seus dados encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4 – Dados dos transformadores de potência da subestação do campus do Pici da UFC

Tensão primário (V_{Tr_p})	69 kV
Tensão secundário (V_{Tr_s})	13,8 kV
Potência ONAN (S_{ONAN})	5 MVA
Potência ONAF (S_{ONAF})	6,25 MVA

Fonte: (SAMPAIO, 2020b).

A cada equipamento de proteção da subestação (disjuntores e religadores) está associado um relé. Os relés utilizados na subestação do campus do Pici são do modelo SEL-751. Para cada tipo de *bay*, o relé é de um tipo diferente e possui diferentes funções de proteção

ativas. Na Tabela 5 são apresentados os dados referentes aos relés da subestação. As funções de proteção estudadas em cada *bay* são funções tipicamente configuradas para os mesmos (SAMPAIO, 2020c).

Tabela 5 – Dados dos relés da subestação

<i>Bay</i>	Relé	Funções Ativas	Curva IEC (51/51N)	Múltiplo máximo (51/51N)	Dial de tempo máximo
12F1	Sobrecorrente	50, 50N, 51 e 51N	M.I.	30	1,5
02T1 e 02T2	Sobrecorrente de neutro do transformador	51G	-	30	1,5
11T1 e 11T2	Sobrecorrente	50, 50N, 51 e 51N	M.I.	30	1,5
21L1, 21L2 e 21L3	Sobrecorrente	50, 50N, 51, 51N, 51NS, 46(I2), 46(I2/I1) e 79	M.I.	30	1,5

Fonte: (SAMPAIO, 2020c).

3.1.3 Rede de Distribuição Primária

A distribuição em média tensão do Campus do Pici da UFC é feita por meio de três alimentadores e possui topologia radial com recurso, conforme pode ser observado na Figura 6. Ao longo da rede de distribuição estão dispostos seis religadores. Dentre os seis, quatro estão em estado normalmente fechado (NF) e dois estão em estado normalmente aberto (NA), como pode ser visto na Figura 6. Portanto, só são considerados neste trabalho os religadores em estado NF.

3.1.3.1 Apresentação dos dados da rede de distribuição

Os dados dos religadores em estado NF da rede de distribuição são apresentados na Tabela 6

Tabela 6 – Dados dos religadores da rede de distribuição

Religador	Funções Ativas	Curva IEC (51/51N)	Múltiplo máximo (51/51N)	Dial de tempo máximo
R4, R5, R6 e R9	50, 50N, 51, 51N e 79	M.I.	30	1,5

Fonte: (SAMPAIO, 2020c).

Nos troncos de alimentadores são adotados, para este estudo, condutores de alumínio com alma de aço de 266,8 MCM. A corrente máxima suportada por este condutor é de 470 A e os dados de impedância do mesmo são apresentados na Figura 8.

Figura 8 – Impedâncias dos cabos da Rede de Distribuição Primária

Condutor	Impedância de Sequência Positiva (Ω/km)		Impedância de Sequência Zero (Ω/km)	
	R_1	X_1	R_0	X_0
CAA 266,8 MCM	0,2354	0,3850	0,4130	1,5520

Fonte: acervo da Enel.

Os valores de comprimento de cada trecho foram retirados do georreferenciamento da rede de distribuição primária do Campus do Pici da UFC, fruto do trabalho feito por Prata (2021). Os dados encontram-se na Tabela 7 junto aos valores de corrente de carga em cada trecho. Para este estudo foram adotados os dados de corrente de carga apresentados em Sampaio (2020b).

Tabela 7 – Correntes de carga e Comprimentos dos trechos

Trecho	Corrente por trecho (A)	Comprimento do trecho (km)
T_A	63,1868	0,823
T_B	57,7118	0,892
T_C	35,5727	0,874
T_D	36,8132	0,455
T_E	23,0382	0,029
T_F	32,1577	0,261
T_G	13,0196	0,495

Fonte: (SAMPAIO, 2020b) e (PRATA, 2021).

Os valores das impedâncias em p.u. de cada trecho são calculados utilizando os valores de impedância dos condutores apresentados na Figura 8, os valores de comprimento de cada trecho mostrados na Tabela 7 e a impedância de base do lado de média tensão (Z_{b_m}) na Equação 3.1 (GOMES, 2012).

$$Z_{\alpha T\beta} = R_{\alpha} \cdot \frac{Comp_{T\beta}}{Z_{b_m}} + j \cdot X_{\alpha} \cdot \frac{Comp_{T\beta}}{Z_{b_m}} \quad (3.1)$$

Onde,

- α pode ser 1 para sequência positiva (que aqui é considerado igual à negativa) ou 0 para sequência zero;
- β é o trecho em questão (de A a G);

- $Z_{\alpha T\beta}$ é a impedância de sequência α do trecho β ;
- R_{α} é a resistência de sequência α ;
- X_{α} é a reatância de sequência α ;
- $Comp_{T\beta}$ é o comprimento do trecho β ;
- j é o operador complexo.

Substituindo os valores correspondentes na Equação 3.1 obtêm-se os resultados mostrado na Tabela 8.

Tabela 8 – Impedâncias em p.u. de sequências positiva e zero dos trechos da rede de distribuição

	Z1	Z0
T_A	$0,1017 + j 0,1664$	$0,1785 + j 0,6707$
T_B	$0,1103 + j 0,1803$	$0,1934 + j 0,7269$
T_C	$0,108 + j 0,1767$	$0,1895 + j 0,7123$
T_D	$0,0562 + j 0,092$	$0,0987 + j 0,3708$
T_E	$0,0035846 + j 0,0058627$	$0,0062891 + j 0,0236$
T_F	$0,0323 + j 0,0528$	$0,0566 + j 0,2127$
T_G	$0,0612 + j 0,1001$	$0,1073 + j 0,4034$

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A partir dos valores de corrente em cada trecho da rede de distribuição da Tabela 7 e observando a Figura 6 foram determinadas as correntes de carga passantes em cada religador da rede de distribuição e em cada religador das saídas de alimentadores da subestação. A corrente passante pelo religador da saída de alimentador 21L1 é dada pela soma das correntes de carga dos trechos T_A e T_D . A corrente passante pelo religador da saída de alimentador 21L2 é dada pela soma das correntes de carga dos trechos T_B e T_E . A corrente passante pelo religador da saída de alimentador 21L3 é dada pela soma das correntes de carga dos trechos T_C , T_F e T_G . A corrente passante pelo religador R4 é dada pela soma das correntes de carga dos trechos T_F e T_G . A corrente passante pelo religador R5 é igual à corrente de carga do trecho T_G . A corrente passante pelo religador R6 é igual à corrente de carga do trecho T_E . A corrente passante pelo religador R9 é igual à corrente de carga do trecho T_D . Os resultados dos cálculos descritos acima são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Correntes passantes nos equipamentos do sistema de distribuição do campus do Pici

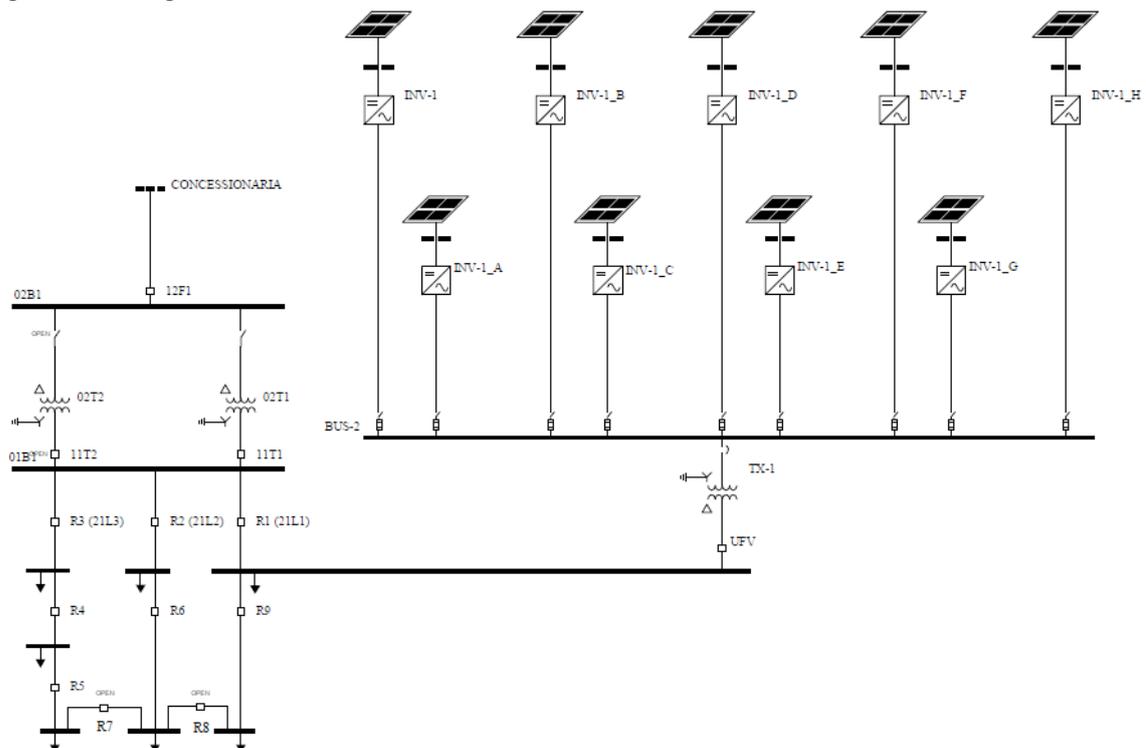
Equipamento	Corrente de carga (A)
R1	100,00
R2	80,75
R3	80,75
R4	45,1773
R5	13,0196
R6	23,0382
R9	36,8132

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

3.2 Integração da UFV à rede de distribuição do campus do Pici

Na Figura 9 é apresentado o diagrama do sistema de distribuição do campus do Pici da UFC com a integração de uma UFV hipotética. A potência instalada da UFV utilizada neste estudo é a mesma da usina apresentada em Oliveira (2019). A UFV é composta por 4676 módulos fotovoltaicos de 670 Wp e 9 inversores fotovoltaicos de 215 kVA, totalizando uma potência instalada de 3132,92 kWp ou, aproximadamente 2,5 MVA. Os estudos com a inclusão da UFV são realizados levando em conta que toda a carga do tronco do alimentador 21L1 é suprida pela UFV.

Figura 9 – Diagrama da Usina Fotovoltaica



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Como pode ser observado na Figura 9, a UFV é conectada à rede de distribuição do campus do Pici por meio de um barramento de 13,8 kV incluso logo após o religador R1 (21L1). Esta forma de conexão está de acordo com as diretrizes dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) - Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição.

3.2.1 Apresentação dos dados da UFV

O transformador de acoplamento utilizado para integrar a UFV à rede de distribuição do campus possui potência nominal igual à potência de geração da usina, ou seja, $S_{tr_{UFV}} = 2,5 \text{ MVA}$. A tensão de saída dos inversores é igual a 800 V, portanto o transformador de acoplamento é de 0,8-13,8 kV, portanto $V_{AT_{UFV}} = 13,8 \text{ kV}$ (OLIVEIRA, 2019).

O transformador tem conexão Delta (rede de distribuição) – Estrela aterrada (UFV) de forma que a geração do acessante não contribui com corrente de sequência zero ou de desequilíbrio, o que não impacta na coordenação e na sensibilidade das proteções de terra da concessionária (SILVA, 2022).

A corrente do lado de alta tensão do transformador da UFV é obtida pela razão entre a potência do transformador e a tensão do lado de alta tensão do transformador multiplicado por raiz de três, como mostra a Equação 3.2.

$$I_{AT_{UFV}} = \frac{S_{tr_{UFV}}}{\sqrt{3} \cdot V_{AT_{UFV}}} = 104,5924 \text{ A.} \quad (3.2)$$

A corrente de magnetização de fase (I_{mag_F}) para o transformador a seco da UFV é 11,6 vezes maior que a corrente nominal do lado de alta tensão, segundo o fabricante, como mostra a Equação 3.3.

$$I_{mag_F} = 11,6 \cdot I_{AT_{UFV}} = 1,2133 \text{ kA.} \quad (3.3)$$

A corrente de magnetização residual (I_{mag_N}) pode ser considerada como sendo 20% da corrente de magnetização de fase, como mostra a Equação 3.4.

$$I_{mag_N} = 0,2 \cdot I_{mag_F} = 242,6545 \text{ A.} \quad (3.4)$$

3.3 Estudo de curto-circuito

Nesta seção são apresentados os estudos de curto-circuito necessários para a realização dos estudos de coordenação das proteções. Inicialmente realizado com o sistema de

distribuição sem a UFV e em seguida com a inclusão da UFV.

3.3.1 Estudo de curto-circuito sem a UFV

Nesta subsecção são apresentados os cálculos das impedâncias acumuladas do sistema sem a UFV, os dados de base do sistema utilizados para o estudo de curto-circuito, as equações e os valores calculados de curto-circuito em cada componente do sistema e a o dimensionamento dos TCs associados a cada equipamento.

3.3.1.1 Cálculo das impedâncias acumuladas

As impedâncias acumuladas do disjuntor de entrada de linha da subestação são iguais às impedâncias da barra de alta tensão da subestação (02B1), ou seja $Z_{1_{12F1}} = Z_{1_{02B1}} = 0,00416 + j \cdot 0,05319$ e $Z_{0_{R1}} = Z_{0_{02B1}} = 0,003 + j \cdot 0,13071$.

As impedâncias acumuladas dos religadores das saídas de alimentadores são iguais às impedâncias acumuladas da barra de média tensão da subestação (01B1), ou seja, $Z_{1_{R1}} = Z_{1_{R2}} = Z_{1_{R3}} = Z_{1_{01B1}} = 0,00416 + j \cdot 1,4513$ e $Z_{0_{R1}} = Z_{0_{R2}} = Z_{0_{R3}} = Z_{0_{01B1}} = j \cdot 1,3981$

As impedâncias acumuladas até cada religador da rede de distribuição são calculadas a partir da soma das impedâncias da barra 01B1 com as impedâncias de cada trecho desde a barra 01B1 até o religador em questão. As impedâncias dos religadores da rede de distribuição são calculadas como mostrado na Equações de 3.5 a 3.12.

$$Z_{1_{R4}} = Z_{1_{01B1}} + Z_{1_{Tc}} = 0,1122 + j \cdot 1,628 \quad (3.5)$$

$$Z_{0_{R4}} = Z_{0_{01B1}} + Z_{0_{Tc}} = 0,1895 + j \cdot 2,1104 \quad (3.6)$$

$$Z_{1_{R5}} = Z_{1_{R4}} + Z_{1_{Tf}} = 0,1445 + j \cdot 1,6807 \quad (3.7)$$

$$Z_{0_{R5}} = Z_{0_{R4}} + Z_{0_{Tf}} = 0,2461 + j \cdot 2,3231 \quad (3.8)$$

$$Z_{1_{R6}} = Z_{1_{01B1}} + Z_{1_{Tb}} = 0,1144 + j \cdot 1,6316 \quad (3.9)$$

$$Z_{0_{R6}} = Z_{0_{01B1}} + Z_{0_{Tb}} = 0,1934 + j \cdot 2,125 \quad (3.10)$$

$$Z_{1_{R9}} = Z_{1_{01B1}} + Z_{1_{Ta}} = 0,1059 + j \cdot 1,6177 \quad (3.11)$$

$$Z_{0_{R9}} = Z_{0_{01B1}} + Z_{0_{Ta}} = 0,1785 + j \cdot 2,0688 \quad (3.12)$$

3.3.1.2 Valores de base do sistema

Para determinar os curto-circuitos são definidos valores de base para o sistema. Os valores de potência e tensões de base são apresentados na Tabela 10

Tabela 10 – Dados de base do sistema

Potência base	Tensão base (lado de alta tensão)	Tensão base (lado de média tensão)
$S_b = 100 \text{ MVA}$	$V_{b_AT} = 69 \text{ kV}$	$V_{b_MT} = 13,8 \text{ kV}$

Fonte: (SAMPAIO, 2019).

Além disso define-se a tensão em p.u. como $V_{pu} = 1$.

A corrente de base do lado de alta tensão é obtida pela razão entre a potência de base (S_b) e a tensão de base do lado de alta tensão (V_{b_AT}) multiplicado pela raiz quadrada de três, como apresentado na Equação 3.13.

$$I_{b_AT} = \frac{S_b}{\sqrt{3} \cdot V_{b_AT}} = 836,74 \text{ A} \quad (3.13)$$

A corrente de base do lado de média tensão é obtida pela razão entre a potência de base (S_b) e a tensão de base do lado de média tensão (V_{b_MT}) multiplicado pela raiz quadrada de três, como apresentado na Equação 3.14.

$$I_{b_MT} = \frac{S_b}{\sqrt{3} \cdot V_{b_MT}} = 4183,698 \text{ A} \quad (3.14)$$

A impedância de base do lado de alta tensão é obtida pela razão entre o quadrado da tensão de base do lado de alta tensão (V_{b_AT}) e a potência de base (S_b), como apresentado na Equação 3.15.

$$Z_{b_AT} = \frac{V_{b_AT}^2}{S_b} = 47,61 \text{ } \Omega \quad (3.15)$$

A impedância de base do lado de média tensão é obtida pela razão entre o quadrado da tensão de base do lado de média tensão (V_{b_MT}) e a potência de base (S_b), como apresentado na Equação 3.16.

$$Z_{b_MT} = \frac{V_{b_MT}^2}{S_b} = 1,9044 \text{ } \Omega \quad (3.16)$$

A Relação de Transformação de Tensão (RTT) é obtida pela razão entre a tensão do lado de alta tensão (V_{b_AT}) e a tensão do lado de média tensão (V_{b_MT}), cMTomo mostrado na

Equação 3.17.

$$RTT = \frac{V_{b_AT}}{V_{b_MT}} = 5 \quad (3.17)$$

3.3.1.3 Equações e valores calculados de curto-circuito

Para calcular o curto circuito trifásico deve-se multiplicar a tensão em p.u. (V_{pu}) pela corrente de base do lado em que está o equipamento (I_b) e dividir pelo módulo da impedância de sequência positiva acumulada até o equipamento ($Z1$), como mostrado na Equação 3.18 (KINDERMANN, 1997).

$$I_{cc3\phi} = \frac{V_{pu} \cdot I_b}{|Z1|} \quad (3.18)$$

Para calcular o curto circuito bifásico deve-se multiplicar a corrente de curto-circuito trifásico ($I_{cc3\phi}$) do equipamento em questão por raiz de três e dividir por dois, como mostrado na Equação 3.19 (KINDERMANN, 1997).

$$I_{cc2\phi} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{cc3\phi}}{2} \quad (3.19)$$

Para calcular o curto circuito monofásico deve-se realizar o produto entre a tensão em p.u. (V_{pu}), a corrente de base do lado em que está o equipamento (I_b) e três, e dividir este produto pelo módulo da soma entre as impedâncias de sequências positiva ($Z1$), negativa ($Z2$) e zero ($Z0$) acumuladas até o equipamento em questão, como mostrado na Equação 3.20 (KINDERMANN, 1997).

$$I_{cc1\phi} = \frac{3 \cdot V_{pu} \cdot I_b}{|Z1 + Z2 + Z0|} = \frac{3 \cdot V_{pu} \cdot I_b}{|2 \cdot Z1 + Z0|} \quad (3.20)$$

Utilizando as impedâncias acumuladas calculadas em 3.3.1.1 e as Equações de 3.18 a 3.20, são obtidos os valores de curto-circuito mostrados na Tabela 11. Os valores de curto-circuito da barra 02B1 são iguais aos do relé associado ao disjuntor de entrada da subestação (12F1) e os curto-circuitos da barra 01B1 são iguais aos dos religadores de saída de alimentador da subestação (21L1, 21L2 e 21L3).

Tabela 11 – Curto-circuitos passantes nos elementos e equipamentos do sistema de distribuição do campus do Pici

Local	$I_{cc3\phi}$ (A)	$I_{cc2\phi}$ (A)	$I_{cc1\phi}$ (A)
02B1	15683,00	13582,00	10576,00
01B1	2882,70	2496,50	2918,40
R4	2563,80	2220,30	2331,90
R5	2480,00	2147,80	2198,20
R6	2557,90	2215,20	2322,20
R9	2580,70	2235,00	2359,90

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

3.3.1.4 Dimensionamento dos transformadores de corrente

Para dimensionar o TC é adotado o fator de sobrecorrente igual a $FS_{TC} = 20$.

A maior corrente de curto-circuito a qual o TC estará submetido é dada pela razão entre o curto-circuito trifásico ($I_{cc3\phi}$) e o fator de sobrecorrente do TC (FS_{TC}), como mostrado na Equação 3.21.

$$I_{cc_{maxTC}} = \frac{I_{cc3\phi}}{FS_{TC}} \quad (3.21)$$

A partir destes critérios são dimensionados os TCs conforme apresentado no Apêndice A. Os TCs dimensionados para cada equipamento são apresentados na Tabela 12. Como pode ser observado na Tabela 12, para a escolha da corrente do primário dos TCs associados aos equipamentos de média tensão, foi adotado o critério da corrente do condutor. Para a escolha da corrente do primário do 12F1 foi utilizado o critério do valor máximo de curto-circuito passante pelo equipamento.

Tabela 12 – Dimensionamento dos TCs do sistema.

Equipamento	Corrente máxima do condutor (A)	$I_{cc_{maxTC}}$ (A)	$I_{TC_{prim}}$ (A)	$I_{TC_{sec}}$ (A)	RTC
12F1	-	784,1625	800	5	160
11T1	470	144,1366	500	5	100
11T2	470	144,1366	500	5	100
R1 (21L1)	470	144,1366	500	5	100
R2 (21L2)	470	144,1366	500	5	100
R3 (21L3)	470	144,1366	500	5	100
R4	470	128,1894	500	5	100
R5	470	124,0024	500	5	100
R6	470	127,8928	500	5	100
R9	470	129,0363	500	5	100

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

3.3.2 Estudo de curto-circuito com inclusão da UFV

Nesta subseção são apresentados os resultados de simulação de curto-circuito do sistema de distribuição do campus do Pici com a inclusão da UFV e o dimensionamento dos TCs associados aos equipamentos do sistema com a inclusão da UFV.

3.3.2.1 Resultados de simulação de curto-circuito

Os valores de curto-circuito do sistema com inclusão da UFV foram obtidos por meio de simulação no *EasyPower*. Este *software* tem um multiplicador que determina o limite do valor de corrente entregue pelo inversor, na ocorrência de um curto-circuito. Para este valor, designado no *software* como *Fault X FLA*, onde *FLA* é a corrente máxima de saída do inversor, foi adotado o valor padrão do *software*, que é de 1,5. O diagrama montado para a simulação é apresentado na Figura 9. Os resultados da simulação são apresentados na Tabela 13. Comparando os resultados desta tabela com os resultados obtidos na Tabela 11 é possível observar que houve um aumento nos níveis de curto-circuito da rede elétrica do campus. O menor aumento foi de 0,06% e o maior aumento foi de 3,99%.

Tabela 13 – Curto-circuitos passantes nos elementos e equipamentos do sistema de distribuição do campus do Pici com inclusão da UFV.

Local	<i>I</i>_{cc3φ} (A)	<i>I</i>_{cc2φ} (A)	<i>I</i>_{cc1φ} (A)
02B1	15705,00	13601,00	10582,00
01B1	2997,00	2596,00	2995,00
R4	2653,00	2298,00	2380,00
R5	2563,00	2220,00	2241,00
R6	2647,00	2292,00	2370,00
R9	2671,00	2313,00	2409,00
Barra UFV	2997,00	2596,00	2995,00

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

3.3.2.2 Dimensionamento dos TCs com a inclusão da UFV

O dimensionamento dos TCs foi feito seguindo os mesmos critérios descritos em 3.3.1.4. Os detalhes dos cálculos são apresentados no Apêndice A. Os TCs dimensionados para cada equipamento são apresentados na Tabela 14. Como pode ser observado na Tabela 14, o TC associado ao disjuntor da UFV foi dimensionado a partir da corrente de carga passante pelo disjuntor.

Tabela 14 – Dimensionamento dos TCs do sistema com inclusão da UFV.

Equipamento	Corrente máxima do condutor (A)	$I_{CC_{maxTC}}$ (A)	$I_{TC_{prim}}$ (A)	$I_{TC_{sec}}$ (A)	RTC
12F1	-	785,25	800	5	160
11T1	470	149,85	500	5	100
11T2	470	149,85	500	5	100
R1 (21L1)	470	149,85	500	5	100
R2 (21L2)	470	149,85	500	5	100
R3 (21L3)	470	149,85	500	5	100
R4	470	132,65	500	5	100
R5	470	128,15	500	5	100
R6	470	132,35	500	5	100
R9	470	133,55	500	5	100
UFV	470	149,85	200	5	40

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

3.4 Critérios e equações para estudo das proteções

Nesta seção são apresentados os critérios e as equações utilizadas para o cálculo dos ajustes e da coordenação da proteção do sistema de distribuição do campus do Pici. Os critérios apresentados são válidos para o estudo com e sem a integração da UFV.

3.4.1 Critérios para estudo das proteções

Os critérios adotados para o estudo dos ajustes e de coordenação da proteção são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Critérios para estudo das proteções

Margem de Coordenação	$MC = 0,3 s$
Fator de segurança da função 50	$FS_{50} = 5$
Fator de segurança da função 51	$FS_{51} = 1,3$
Fator de segurança da função 51N	$FS_{51N} = 0,3$

Fonte: (SAMPAIO, 2019).

A curva utilizada nos relés é a MI, como mostrado nas Tabelas 5 e 6. Os valores das constantes α e β para a curva MI são mostrados na Tabela 16.

Tabela 16 – Valores das constantes α e β para a curva Muito Inversa

Constante	Curva Muito Inversa
α	13,50
β	1,00

Fonte: adaptado de Sampaio (2020a)

3.4.2 Equações para estudo das proteções

A seguir são mostradas as equações utilizadas para o cálculo dos ajustes de proteção.

3.4.2.1 Funções de sobrecorrente instantânea e temporizada de fase (50/51) e neutro (50N/51N)

Para o estudo de proteção das funções de sobrecorrente instantânea e temporizada são utilizadas as Equações de 3.22 a 3.33.

O cálculo da corrente de ajuste das funções de sobrecorrente temporizada, tanto para fase (51) quanto para neutro (51N) dependem do fator de segurança da função (FS_{51}), da corrente máxima de carga (I_{C_Max}) passante no equipamento, e da RTC do TC associado ao equipamento, como mostrado na Equação 3.22.

$$I_{aj51} = \frac{FS_{51} \cdot I_{C_Max}}{RTC} \quad (3.22)$$

O cálculo da corrente de ajuste das funções de sobrecorrente instantânea, tanto para fase (50) quanto para neutro (50N) é feito a partir do produto da corrente de ajuste da função de sobrecorrente temporizada (I_{aj51}) pelo fator de segurança da função 50 (FS_{50}), como mostra a Equação 3.23.

$$I_{aj50} = I_{aj51} \cdot FS_{50} \quad (3.23)$$

O cálculo da corrente de *pickup* das funções de sobrecorrente instantânea de fase (50) e de sobre corrente temporizada de fase (51) e de neutro (51N) é feito a partir do produto da corrente de ajuste (I_{aj}) pela RTC do TC associado ao equipamento, como mostrado na Equação 3.24.

$$I_{pkup} = I_{aj} \cdot RTC \quad (3.24)$$

O cálculo do múltiplo da função de sobrecorrente temporizada fase (51) é dado pela razão entre a corrente de curto-circuito trifásico ($I_{cc3\phi}$) passante pelo equipamento e a corrente de *pickup* da função 51 (I_{pkup51}), como mostra a Equação 3.25.

$$M_{51} = \frac{I_{cc3\phi}}{I_{pkup51}} \quad (3.25)$$

O cálculo do múltiplo da função de sobrecorrente temporizada neutro (51N) é dado pela razão entre a corrente de curto-circuito monofásico ($I_{cc1\phi}$) passante pelo equipamento em

questão e a corrente de *pickup* da função 51N ($I_{pkup51N}$), como mostra a Equação 3.26.

$$M_{51N} = \frac{I_{cc1\phi}}{I_{pkup51N}} \quad (3.26)$$

Os tempos de operação da função 50 são considerados neste trabalho como sendo iguais a $Top_{50} = 0,1$ s.

Há diferentes formas de calcular o tempo de operação das funções de sobrecorrente temporizada (51/51N). Na maior parte deste trabalho, este tempo de operação é calculado subtraindo a margem de coordenação (MC) do tempo de operação a montante do relé (Top_{51R_m}), como mostrado na Equação 3.27.

$$Top_{51} = Top_{51R_m} - MC \quad (3.27)$$

Para o relé associado ao disjuntor de entrada da UFV, o tempo de operação é obtido somando a margem de coordenação ao tempo de operação do relé a jusante. (Top_{51R_j}), como mostrado na Equação 3.28.

$$Top_{51} = Top_{51R_j} + MC \quad (3.28)$$

O cálculo deste tempo de operação também pode ser feito a partir dos valores do *dial* de tempo da função (DT_{51}), do múltiplo do relé (M_{51}) e das constantes α e β , como mostrado na Equação 3.29.

$$Top_{51} = \frac{DT_{51} \cdot \beta}{M_{51}^{\alpha} - 1} \quad (3.29)$$

Rearranjando a Equação 3.29, pode ser observado que o *dial* de tempo das funções de sobrecorrente temporizada (51/51N) (DT_{51}) é obtido como mostrado na Equação 3.30.

$$DT_{51} = \frac{Top_{51} \cdot (M_{51}^{\alpha} - 1)}{\beta} \quad (3.30)$$

Para o estudo das funções de sobrecorrente do disjuntor de entrada da subestação são utilizados os dados de corrente nominal do primário do transformador, de corrente de carga do lado de alta tensão e da corrente de *inrush*.

O cálculo da maior corrente nominal do primário do transformador de potência da subestação é feito como apresentado na Equação 3.31.

$$I_{Trp} = \frac{S_{ONAF}}{\sqrt{3} \cdot V_{Trp}} \quad (3.31)$$

O cálculo da corrente de carga do lado do alta tensão do transformador é feito como apresentado na Equação 3.32.

$$I_{CAT} = \frac{I_{21L1} + I_{21L2} + I_{21L3}}{RTT}. \quad (3.32)$$

O cálculo da corrente de *inrush* do transformador é feito como apresentado na Equação 3.33.

$$I_{Tr_{inrush}} = I_{CAT} \cdot 8 \quad (3.33)$$

3.4.2.2 Função de sobrecorrente do neutro do transformador (51G)

O cálculo da corrente de ajuste da função 51G é feito entre a corrente de *pickup* de neutro do lado de média ($I_{pkup_{51N_{MT}}}$) tensão do transformador e a RTC do TC do lado de alta tensão do transformador, como mostrado na Equação 3.34.

$$I_{aj_{51G_{Tr}}} = \frac{I_{pkup_{51N_{MT}}}}{RTC_{AT}} \quad (3.34)$$

3.4.2.3 Função de desequilíbrio de corrente direcional (46 – I₂)

O cálculo da corrente de ajuste da função de desequilíbrio de corrente direcional é feito assumindo um acréscimo de 10 % ao maior valor de corrente esperada (I_{max}), e assumindo um ajuste de tempo de 60 s, como mostrado na Equação 3.35.

$$I_{aj_{I2}} = \frac{I_{max} \cdot 1,1}{RTC} \quad (3.35)$$

3.4.2.4 Função de desequilíbrio por quebra de condutor (46 – I₂/I₁)

O cálculo da corrente de ajuste da função de desequilíbrio por quebra de condutor é feito assumindo uma taxa de 30 % do maior valor de corrente esperada (I_{max}), e assumindo um ajuste de tempo de 70 s, como mostrado na Equação 3.36.

$$I_{aj_{I2/I1}} = \frac{I_{max} \cdot 0,3}{RTC} \quad (3.36)$$

3.5 Considerações finais

Neste capítulo foi possível observar a partir dos resultados dos estudos de curto-circuito, que a inclusão da UFV causa um aumento nos níveis de curto-circuito, contudo os aumentos não são tão significativos, de forma que o aumento mais relevante foi de 4%.

4 ESTUDOS DE PROTEÇÃO DO CAMPUS DO PICI COM INTEGRAÇÃO DE UMA UFV

Neste capítulo são apresentados os resultados dos estudos de proteção do sistema de distribuição do campus do Pici da UFC. O estudo é mostrado sem a UFV e com a inclusão da UFV. Os resultados apresentados neste capítulo foram obtidos tendo como base o estudo de curto-circuito, as equações e os dados apresentados no Capítulo 3. Os cálculos foram realizados no *MathCAD*. Os detalhes são mostrados no Apêndice A.

O estudo é realizado no sentido da fonte para a carga. Primeiro é apresentado o estudo da subestação do campus e em seguida é mostrado o estudo da rede de distribuição em 13,8 kV. A sequência é a mesma para o estudo sem a UFV e com a UFV. No estudo com a UFV é adicionado o estudo da proteção da UFV. Os resultados apresentados contemplam ajustes das funções dos relés e religadores do sistema e os coordenogramas das funções de sobrecorrente.

4.1 Estudo de proteção do sistema de distribuição sem UFV

Nesta seção são apresentados os resultados do estudo de proteção do sistema de distribuição do campus do Pici da UFC sem a inclusão da UFV. A seção é dividida em estudo de proteção da subestação e estudo de proteção da rede de distribuição.

4.1.1 Estudo de proteção da subestação

Os resultados do estudo de proteção da subestação do campus do Pici são apresentados por *bay*. Em seguida são apresentados os coordenogramas das funções de sobrecorrente.

4.1.1.1 Relé associado ao disjuntor 12F1

Para o estudo de proteção do relé associado ao 12F1 foi admitido que a corrente de carga passante pelo disjuntor é a maior corrente nominal do primário do transformador de potência da subestação (I_{Tr_p}). Para obter esta corrente, é utilizada a Equação 3.31. O resultado obtido é

$$I_{Tr_p} = 52,2962 \text{ A.}$$

Com base neste valor de corrente e em todos os dados e equações apresentados no Capítulo 3 foi feito o estudo de proteção. Os resultados do estudo para o 12F1 são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – Dados de ajuste do 12F1.

Função	I_{ajuste} (A)	I_{pickup} (A)	M	Top (s)	DT
51	2,32	370,69	30,00	0,13	0,27
51N	0,10	15,69	30,00	0,34	1,38
50	11,58	1853,40	-	0,00	-
50N	6,61	1057,60	-	0,00	-

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

4.1.1.2 Relés associados aos disjuntores 11T1 e 11T2

Os estudos de proteção dos relés associados aos disjuntores 11T1 e 11T2 são iguais visto que eles não funcionam simultaneamente. A corrente de carga passante em 11T1 e em 11T2 é a soma das correntes dos alimentadores, que são mostradas na Tabela 9. A corrente de carga passante em 11T1 e 11T2 é calculada pela equação

$$I_{carga_{11T1_{11T2}}} = I_{R1(21L1)} + I_{R2(21L2)} + I_{R3(21L3)} = 261,5 \text{ A.}$$

Para os cálculos dos múltiplos do relé para as funções 51 e 51N foram utilizadas as Equações 3.25 e 3.26, contudo, utilizando os valores de curto-circuito refletidos para o lado de alta tensão do transformador. Para refletir a corrente de curto-circuito trifásico basta dividir pela RTT, conforme mostra a equação

$$I_{cc3\Phi_{refletida}} = \frac{I_{cc3\Phi}}{RTT}. \quad (4.1)$$

Para refletir a corrente de curto-circuito monofásico foi feita a divisão pela RTT e o resultado foi multiplicado por $\sqrt{3}$, conforme mostra a equação

$$I_{cc1\Phi_{refletida}} = \frac{I_{cc1\Phi} \cdot \sqrt{3}}{RTT}. \quad (4.2)$$

Com base nesses valores e equações e também com base nos dados e equações apresentados no Capítulo 3, foi feito o estudo de proteção. Os resultados são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 – Dados de ajuste do 11T1 e do 11T2.

Função	I_{ajuste} (A)	I_{pickup} (A)	M	Top (s)	DT
51	3,40	339,95	8,48	1,78	0,99
51N	0,78	78,45	25,00	0,78	1,39
50	17,00	1699,80	-	0,10	-
50N	3,92	392,25	-	0,10	-

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

4.1.1.3 Relé de sobrecorrente do neutro do transformador

O ajuste de corrente da função de sobrecorrente do neutro do transformador (51G) é feito conforme mostra a Equação 3.34. O resultado obtido para o valor da corrente ajuste é $I_{aj51G_Tr} = 0,49 A$.

4.1.1.4 Religador R1(21L1)

Como não foram obtidos dados históricos do sistema para este estudo, o valor da corrente de *pickup* adotado para a função 51NS é $I_{pkup_51NS} = 15 A$. Para calcular a corrente de ajuste, basta dividir este valor pela RTC do TC associado a R1. Para o estudo das funções 46-I2 e 46-I2/I1 é admitido que a corrente máxima passante no religador é igual à corrente de carga que é mostrada na Tabela 9. Os ajustes das funções de proteção do religador R1 são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 – Dados de ajuste do R1.

Função	$I_{ajuste} (A)$	$I_{pickup} (A)$	M	$Top (s)$	DT
51	1,30	130,00	22,17	0,88	1,38
51N	0,30	30,00	30,00	0,48	1,04
50	6,50	650,00	-	0,10	-
50N	1,50	150,00	-	0,10	-
51NS	0,15	15,00	-	60,00	-
46-I2	1,10	110,00	-	60,00	-
46-I2/I1	0,30	30,00	-	70,00	-

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A função de religamento (79) é configurada neste projeto tendo como base as configurações apresentadas em OAPs de religadores de alimentadores da concessionária. A função é configurada de forma que , após religar pela primeira vez, faça o bloqueio das funções de sobrecorrente instantâneas (50/50N). O religador só irá atuar novamente por sobrecorrente temporizada. A configuração com tempo morto e tempo de *reset* da função 79 é apresentada na Tabela 20.

Tabela 20 – Ajuste da função 79.

Função	Sequência de operação	Tempo de religamento (s)	Tempo de <i>reset</i> (s)
79	1I-1T	10	45

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

4.1.1.5 Religadores R2(21L2) e R3(21L3)

Por terem o mesmo valor de corrente de carga, os estudos das proteções de R2 e R3 são os mesmos. Para o estudo das funções 51NS, 46-I2 e 46-I2/I1 foram utilizados os mesmos critérios descritos em 4.1.1.4. Os resultados são mostrados na Tabela 21. A função 79 é configurada como mostrado na Tabela 20.

Tabela 21 – Dados de ajuste do R2 e do R3.

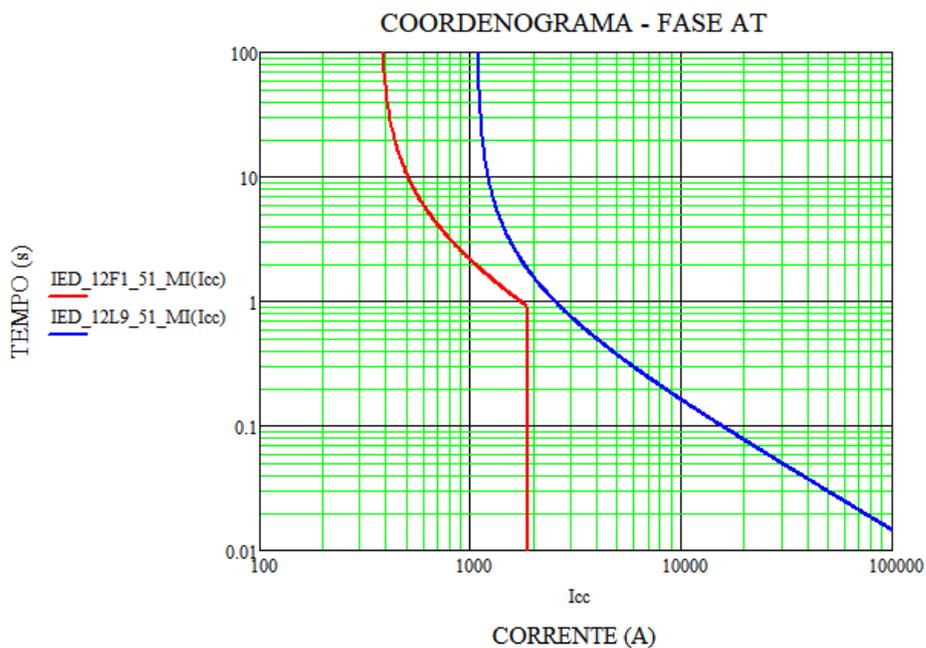
Função	I_{ajuste} (A)	I_{pickup} (A)	M	Top (s)	DT
51	1,05	104,97	27,46	0,72	1,42
51N	0,24	24,22	30,00	0,48	1,04
50	5,25	524,87	-	0,10	-
50N	1,21	121,12	-	0,10	-
51NS	0,15	15,00	-	60,00	-
46-I2	0,89	89,00	-	60,00	-
46-I2/I1	0,24	24,00	-	70,00	-

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

4.1.1.6 Coordenogramas da subestação

A partir dos valores obtidos no estudo de proteção da subestação foram gerados os coordenogramas das funções de sobrecorrente no *MathCAD*. Na Figura 10 é apresentado o coordenograma de fase do lado de alta tensão da subestação do campus.

Figura 10 – Coordenograma de fase dos equipamentos do lado de alta tensão da subestação

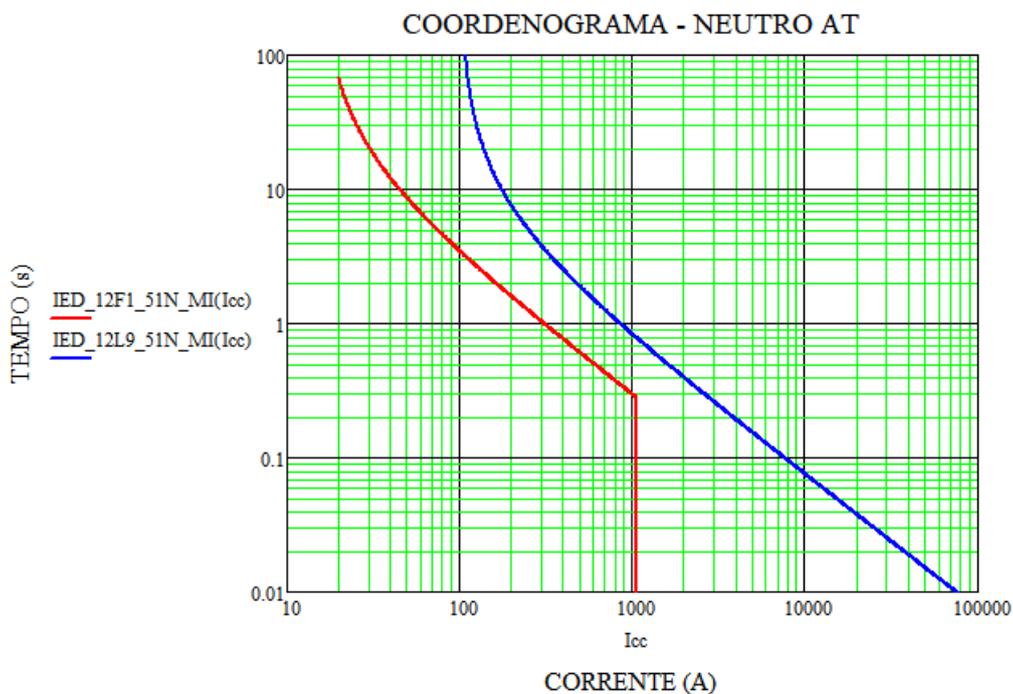


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Como pode ser observado na Figura 10 o disjuntor de linha da subestação PCI (curva azul) e o disjuntor de entrada da subestação do campus do Pici (curva vermelha) estão em coordenação. A margem de coordenação de 0,3 s projetada é obedecida. O relé associado ao disjuntor 12L9 de PCI não possui a função 50 ativa, como mostrado na OAP apresentada na Tabela 2.

Na Figura 11 é apresentado o coordenograma de neutro do lado de alta tensão da subestação do campus. Como pode ser observado, os disjuntores apresentam boa coordenação, obedecendo a margem de 0,3 s e com a atuação da função 50N do 12F1 no valor de corrente previsto.

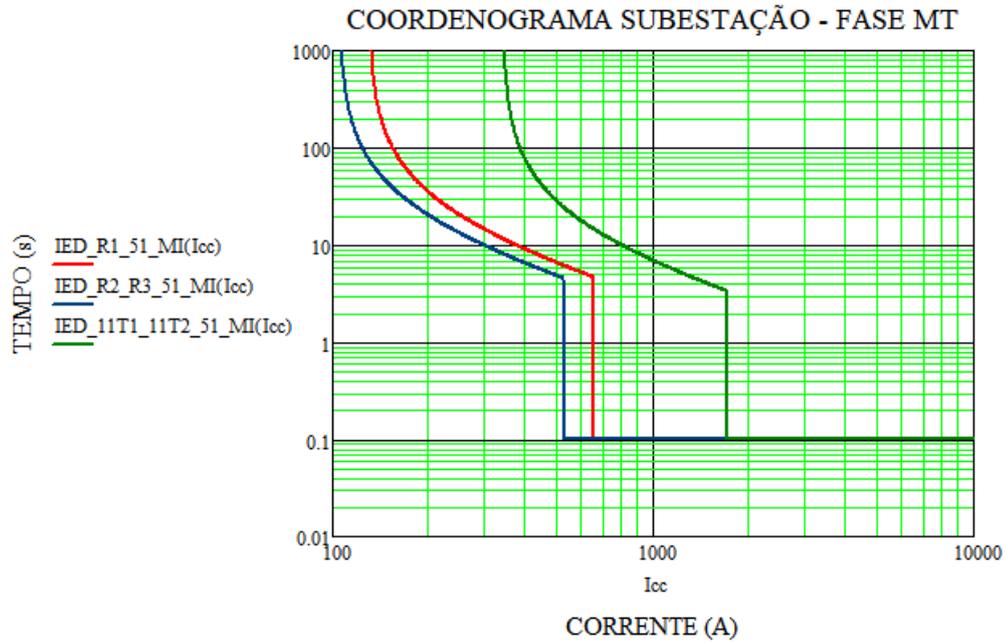
Figura 11 – Coordenograma de neutro dos equipamentos do lado de alta tensão da subestação



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Na Figura 12 é apresentado o coordenograma de fase dos equipamentos do lado de média tensão da subestação. Os disjuntores do lado de média do transformador (curva verde) estão em coordenação com os religadores de saída de alimentador da subestação (R1 - curva vermelha, R2 e R3 - curva azul), de forma que a margem de coordenação de 0,3 s é respeitada. Admitindo que a seletividade lógica está ativa, é garantida a coordenação da função 50, de forma que na ocorrência de uma falta, o relé associado ao equipamento imediatamente a montante da falta irá sinalizar aos outros para que não atuem.

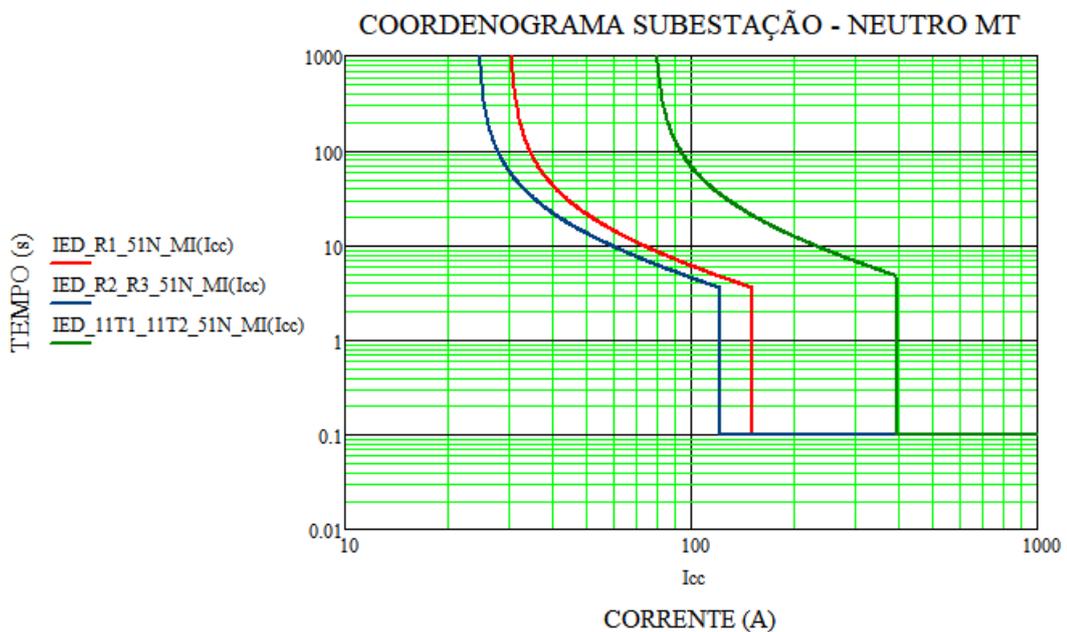
Figura 12 – Coordenograma de fase dos equipamentos do lado de média tensão da subestação



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Na Figura 13 é apresentado o coordenograma de neutro dos disjuntores do lado de média tensão da subestação. Como pode ser observado a margem de coordenação de 0,3 s é obedecida e, como comentado antes, o uso da seletividade lógica proporciona a coordenação das funções de sobrecorrente instantânea.

Figura 13 – Coordenograma de neutro dos equipamentos do lado de média tensão da subestação



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

4.1.2 Estudo de proteção da rede de distribuição

Os resultados do estudo de proteção da rede de distribuição do campus são apresentados por *bay*. Em seguida são apresentados os coordenogramas das funções de sobrecorrente.

A configuração da função de religamento (79) com tempo morto e tempo de *reset* da função 79 para todos os religadores da rede de distribuição é conforme apresentado na Tabela 20.

4.1.2.1 Religador R4

Os ajustes das funções de proteção do religador R4 são apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 – Dados de ajuste do R4.

Função	$I_{ajuste} (A)$	$I_{pickup} (A)$	M	$Top (s)$	DT
51	0,59	58,73	30,00	0,52	1,11
51N	0,14	13,55	30,00	0,18	0,40
50	2,94	293,65	-	0,10	-
50N	0,68	67,77	-	0,10	-

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

4.1.2.2 Religador R5

Os ajustes das funções de proteção do religador R5 são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 – Dados de ajuste do R5.

Função	$I_{ajuste} (A)$	$I_{pickup} (A)$	M	$Top (s)$	DT
51	0,17	16,93	30,00	0,22	0,47
51N	0,04	3,91	30,00	0,10	0,22
50	0,85	84,63	-	0,10	-
50N	0,19	19,53	-	0,10	-

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

4.1.2.3 Religador R6

Os ajustes das funções de proteção do religador R6 são apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 – Dados de ajuste do R6.

Função	$I_{ajuste} (A)$	$I_{pickup} (A)$	M	$Top (s)$	DT
51	0,30	29,95	30,00	0,47	1,02
51N	0,07	6,91	30,00	0,18	0,40
50	1,50	149,75	-	0,10	-
50N	0,35	34,56	-	0,10	-

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

4.1.2.4 Religador R9

Os ajustes das funções de proteção do religador R9 são apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 – Dados de ajuste do R9 com a inclusão da UFV à rede de distribuição.

Função	I_{ajuste} (A)	I_{pickup} (A)	M	Top (s)	DT
51	0,48	47,86	30,00	0,67	1,45
51N	0,11	11,04	30,00	0,60	1,29
50	2,39	239,29	-	0,10	-
50N	0,55	55,22	-	0,10	-

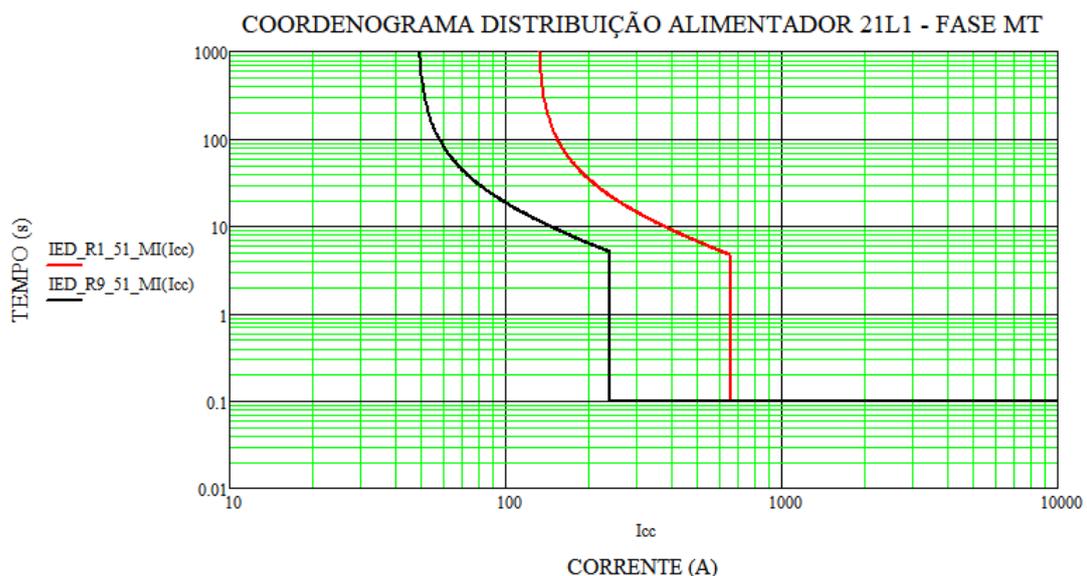
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

4.1.2.5 Coordenogramas da rede de distribuição

A partir dos valores obtidos no estudo de proteção da rede de distribuição foram gerados os coordenogramas das funções de sobrecorrente no *MathCAD*.

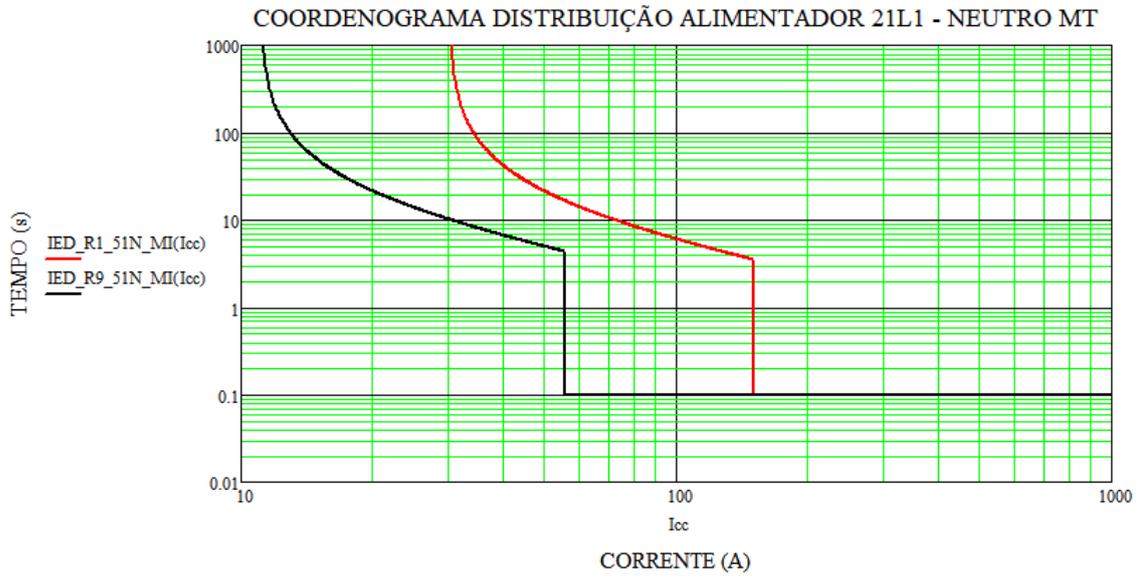
Nas Figuras 14 e 15 são apresentados os coordenogramas de fase e neutro respectivamente do tronco do alimentador 21L1. A curva vermelha representa o religador R1 (21L1), e a curva preta representa o religador R9. Como pode ser observado, há coordenação, visto que a margem de coordenação de 0,3 s é satisfeita e as funções de sobrecorrente instantânea atuam nos valores previstos em cálculo.

Figura 14 – Coordenograma de fase dos equipamentos da rede de distribuição ligados ao tronco do alimentador 21L1



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

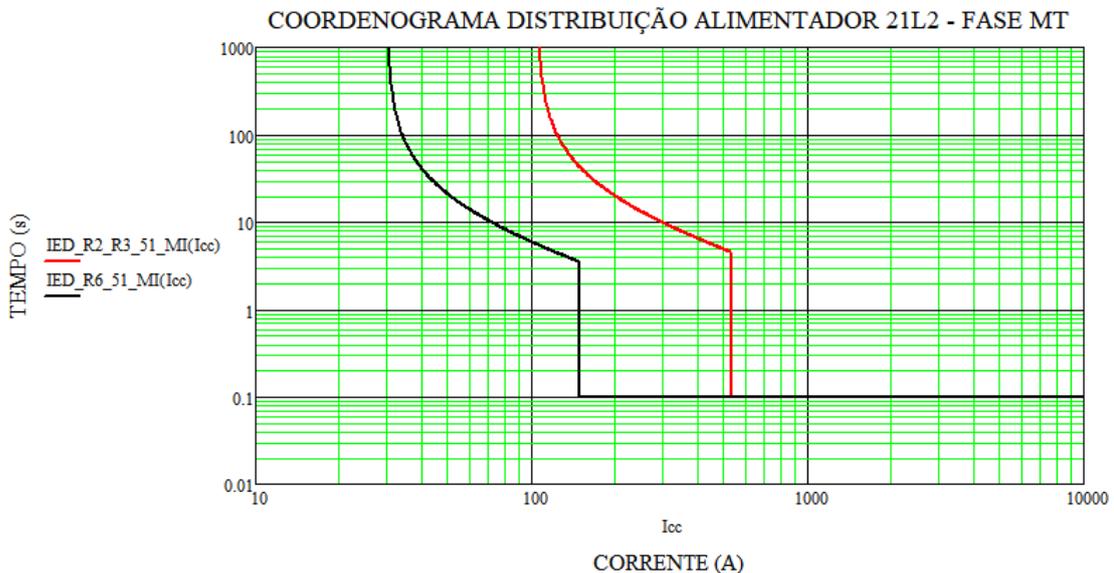
Figura 15 – Coordenograma de neutro dos equipamentos da rede de distribuição ligados ao tronco do alimentador 21L1



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

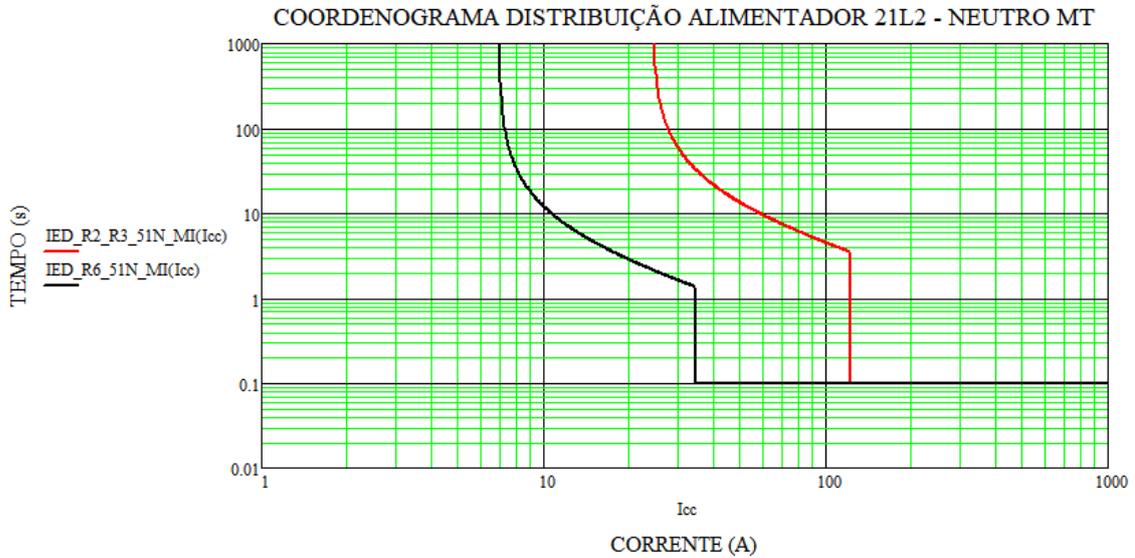
Nas Figuras 16 e 17 são apresentados os coordenogramas de fase e neutro respectivamente do tronco do alimentador 21L2. A curva vermelha representa o religador R2 (21L2), e a curva preta representa o religador R6. Como pode ser observado, a margem de coordenação e a atuação das funções de sobrecorrente instantânea estão de acordo com os valores obtidos nos cálculos.

Figura 16 – Coordenograma de fase dos equipamentos da rede de distribuição ligados ao tronco do alimentador 21L2



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

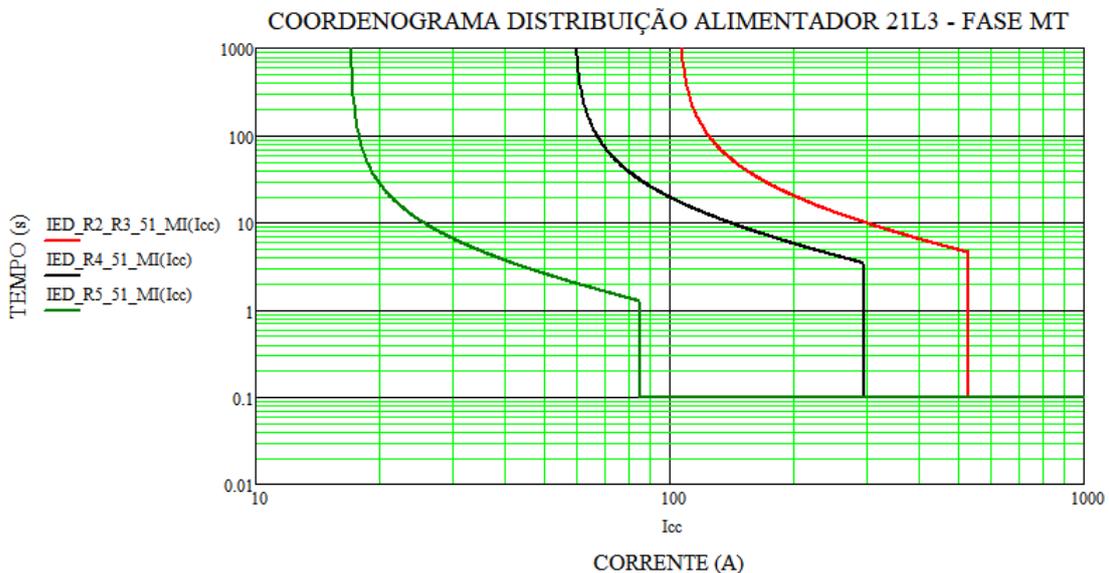
Figura 17 – Coordenograma de neutro dos equipamentos da rede de distribuição ligados ao tronco do alimentador 21L2



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

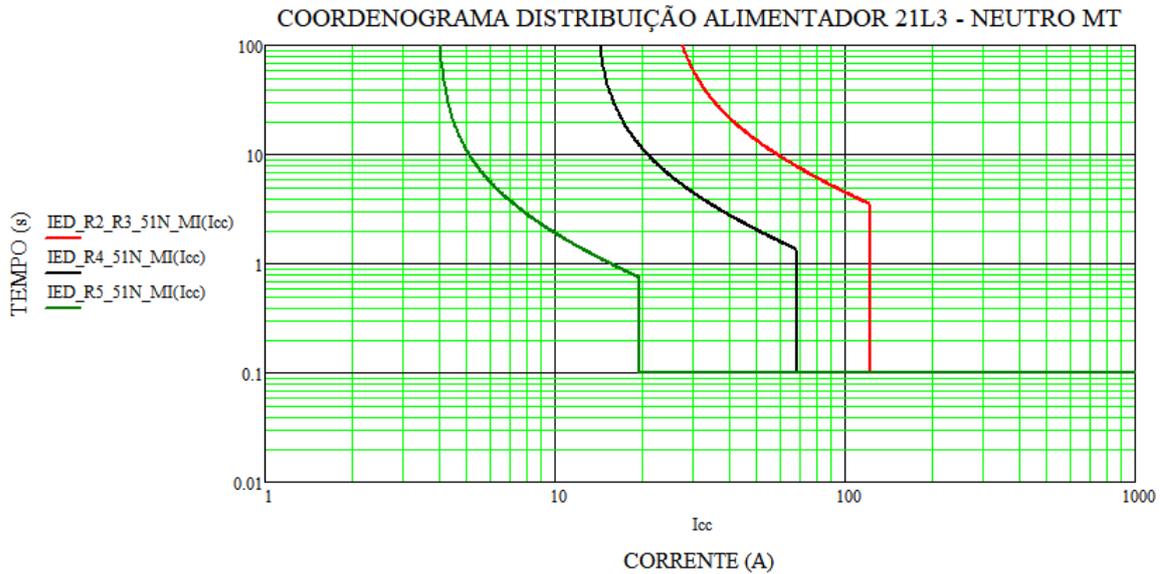
Nas Figuras 18 e 19 são apresentados os coordenogramas de fase e neutro respectivamente do tronco do alimentador 21L3. A curva vermelha representa o religador R3 (21L3), a curva preta representa o religador R4, e a curva verde o religador R5. Como pode ser observado, a margem de coordenação de 0,3 s é satisfeita e a atuação das funções de sobrecorrente instantânea ocorrem como previsto. Para que as funções 50 e 50N atuem de forma seletiva, é considerado que a seletividade lógica está ativa.

Figura 18 – Coordenograma de fase dos equipamentos da rede de distribuição ligados ao tronco do alimentador 21L3



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 19 – Coordenograma de neutro dos equipamentos da rede de distribuição ligados ao tronco do alimentador 21L3



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

4.2 Estudo de proteção do sistema de distribuição com UFV

Nesta seção são apresentados os resultados do estudo do sistema de distribuição do campus do Pici da UFC com a inclusão da UFV. A seção é dividida em estudo de proteção da subestação, estudo de proteção da rede de distribuição e estudo de proteção da UFV. Os detalhes dos cálculos deste estudo estão no Apêndice A.

4.2.1 Estudo de proteção da subestação

Todos os estudos apresentados nesta seção foram realizados utilizando os mesmos critérios e equações utilizados em 4.1. Como os valores de curto-circuito não sofreram grandes alterações com a inclusão da UFV os resultados obtidos foram semelhantes aos mostrados em 4.1. Os resultados do estudo com inclusão da UFV são apresentados por *bay*. Em seguida são apresentados os coordenogramas das funções de sobrecorrente.

4.2.1.1 Relé associado ao disjuntor 12F1 com UFV

Os ajustes das funções de proteção do relé associado ao disjuntor 12F1 são apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 – Dados de ajuste do 12F1 com a inclusão da UFV à rede de distribuição.

Função	I_{ajuste} (A)	I_{pickup} (A)	M	Top (s)	DT
51	2,38	380,42	30,00	0,11	0,24
51N	0,10	15,69	30,00	0,34	1,38
50	11,89	1902,10	-	0,00	-
50N	6,61	1058,20	-	0,00	-

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

4.2.1.2 Relés associados aos disjuntores 11T1 e 11T2 com UFV

Os ajustes das funções de proteção dos relés associados aos disjuntores 11T1 e 11T2 são apresentados na Tabela 27.

Tabela 27 – Dados de ajuste de 11T1 e 11T2 com a inclusão da UFV à rede de distribuição.

Função	I_{ajuste} (A)	I_{pickup} (A)	M	Top (s)	DT
51	3,40	339,95	8,82	1,93	0,94
51N	0,78	78,45	25,00	0,78	1,39
50	17,00	1699,80	-	0,10	-
50N	3,92	392,25	-	0,10	-

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

4.2.1.3 Relé de sobrecorrente do neutro do transformador com UFV

O ajuste de corrente da função de sobrecorrente do neutro do transformador (51G) é feito da mesma forma que foi mostrado em 4.1.1.3 e o resultado é o mesmo apresentado em 4.1.1.3.

4.2.1.4 Religador R1(21L1) com UFV

Os ajustes das funções de proteção do religador R1(21L1) são apresentados na Tabela 28. A função 79 é configurada como mostrado na Tabela 20.

Tabela 28 – Dados de ajuste do R1 com a inclusão da UFV à rede de distribuição.

Função	I_{ajuste} (A)	I_{pickup} (A)	M	Top (s)	DT
51	1,30	130,00	23,05	0,73	1,19
51N	0,30	30,00	30,00	0,48	1,04
50	6,50	650,00	-	0,10	-
50N	1,50	150,00	-	0,10	-
51NS	0,15	15,00	-	60,00	-
46-I2	1,10	110,00	-	60,00	-
46-I2/I1	0,30	30,00	-	70,00	-

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

4.2.1.5 Religadores R2(21L2) e R3(21L3) com UFV

Os ajustes das funções de proteção dos religadores R2(21L2) e R3(21L3) são apresentados na Tabela 29. A função 79 é configurada como mostrado na Tabela 20.

Tabela 29 – Dados de ajuste de R2 e R3 com a inclusão da UFV à rede de distribuição.

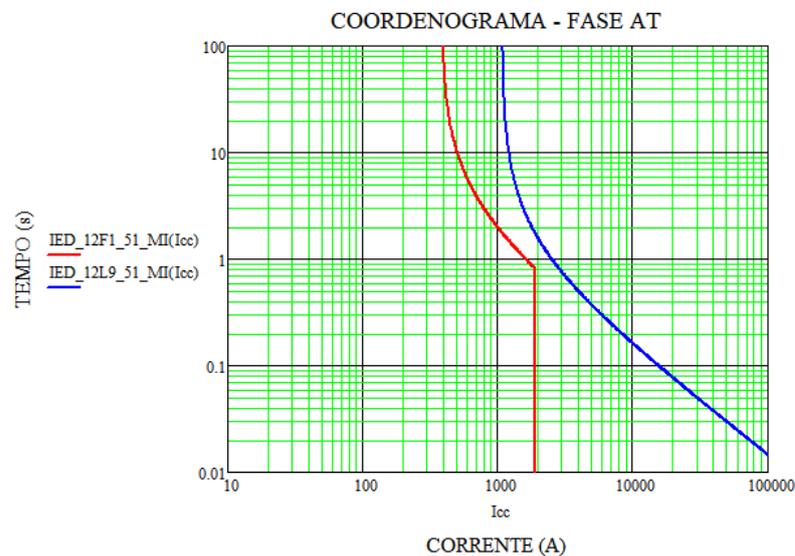
Função	I_{ajuste} (A)	I_{pickup} (A)	M	Top (s)	DT
51	1,05	104,97	28,55	0,53	1,80
51N	0,24	24,22	30,00	0,48	1,04
50	5,25	524,87	-	0,10	-
50N	1,21	121,12	-	0,10	-
51NS	0,15	15,00	-	60,00	-
46-I2	0,89	89,00	-	60,00	-
46-I2/I1	0,24	24,00	-	70,00	-

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

4.2.1.6 Coordenogramas da subestação com inclusão da UFV

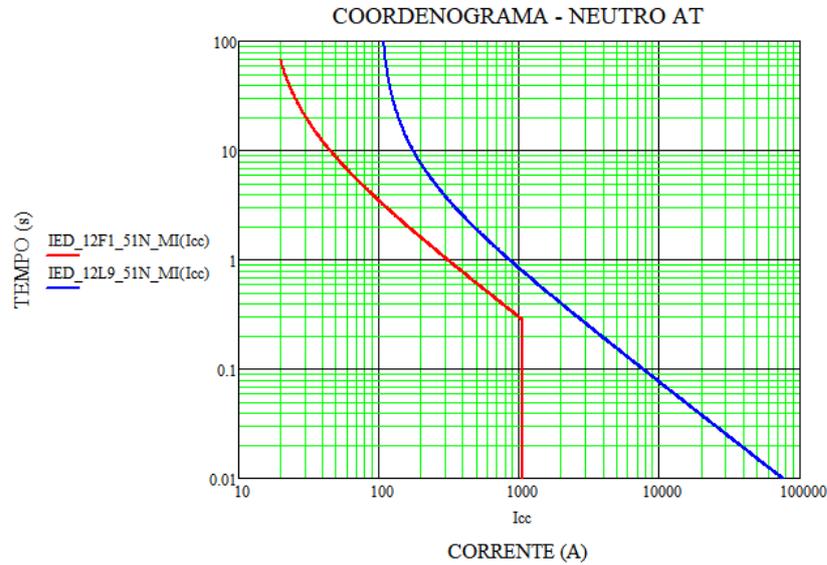
A partir dos valores obtidos no estudo de proteção da subestação com a inclusão da UFV foram gerados os coordenogramas das funções de sobrecorrente no *MathCAD*. Nas Figuras 20 e 21, são apresentados os coordenogramas de fase e neutro, respectivamente, do lado de alta tensão da subestação. Comparando com os coordenogramas das Figuras 10 e 11 pode ser observado que as curvas são praticamente idênticas, pois os ajustes não sofreram grandes alterações com a inclusão da UFV.

Figura 20 – Coordenograma de fase dos equipamentos do lado de alta tensão da subestação com inclusão da UFV.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

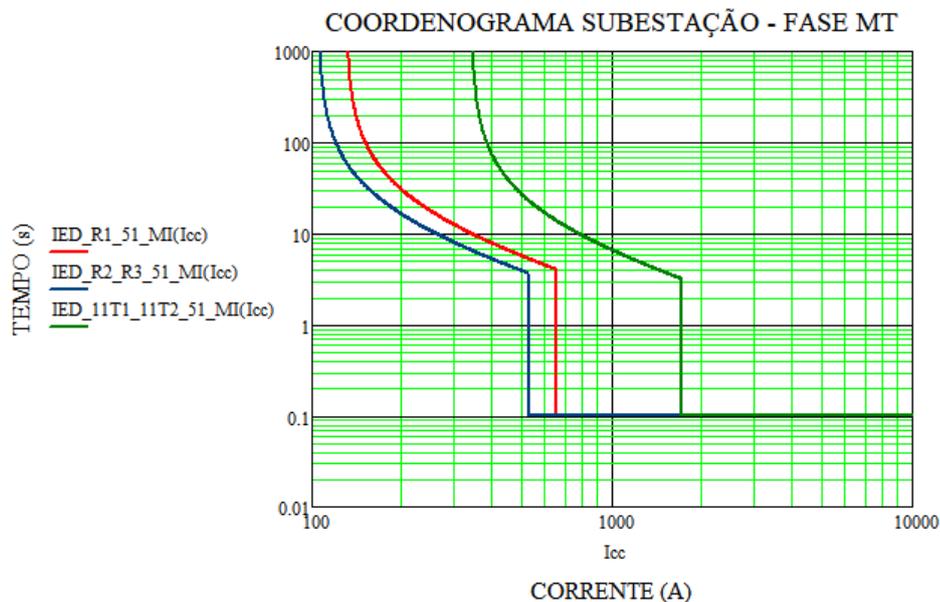
Figura 21 – Coordenograma de neutro dos equipamentos do lado de alta tensão da subestação com inclusão da UFV.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

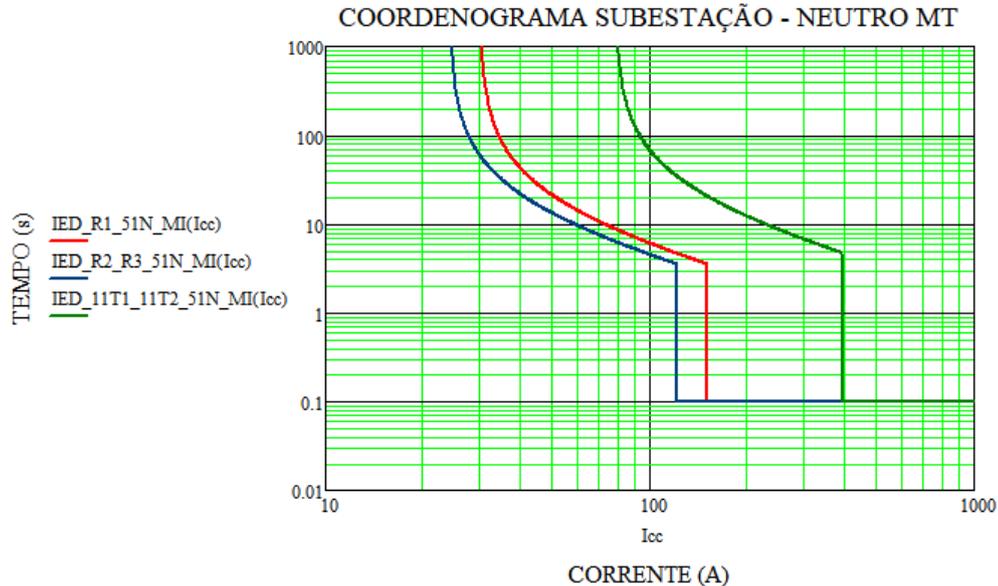
Nas Figuras 22 e 23 são apresentados os coordenogramas de fase e neutro, respectivamente dos disjuntores do lado de média tensão da subestação. Ao comparar estes coordenogramas com os mostrados das Figuras 12 e 13 pode ser observado que a inclusão da UFV não influenciou consideravelmente nos ajustes de proteção, pois as curvas são muito semelhantes em ambos os casos.

Figura 22 – Coordenograma de fase dos equipamentos do lado de média tensão da subestação com inclusão da UFV.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 23 – Coordenograma de neutro dos equipamentos do lado de média tensão da subestação com inclusão da UFV.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

4.2.2 Estudo de proteção da rede de distribuição com inclusão da UFV

Todos os estudos apresentados nesta seção foram realizados utilizando os mesmo critérios e equações utilizados em 4.1. Como os valores de curto-circuito não sofreram grandes alterações com a inclusão da UFV os resultados obtidos foram semelhantes aos mostrados em 4.1. Os resultados do estudo com inclusão da UFV são apresentados por *bay*. Em seguida são apresentados os coordenogramas das funções de sobrecorrente.

A configuração da função de religamento (79) com tempo morto e tempo de *reset* da função 79 para todos os religadores da rede de distribuição é conforme apresentado na Tabela 20.

4.2.2.1 Religador R4 com UFV

Os ajustes das funções de proteção do religador R4 são apresentados na Tabela 30.

Tabela 30 – Dados de ajuste do R4 com a inclusão da UFV à rede de distribuição.

Função	I_{ajuste} (A)	I_{pickup} (A)	M	Top (s)	DT
51	0,59	58,73	30,00	0,42	0,91
51N	0,14	13,55	30,00	0,18	0,40
50	2,94	293,65	-	0,10	-
50N	0,68	67,77	-	0,10	-

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

4.2.2.2 Religador R5 com UFV

Os ajustes das funções de proteção do religador R5 são apresentados na Tabela 31.

Tabela 31 – Dados de ajuste do R5 com a inclusão da UFV à rede de distribuição.

Função	I_{ajuste} (A)	I_{pickup} (A)	M	Top (s)	DT
51	0,17	16,93	30,00	0,16	0,35
51N	0,04	3,91	30,00	0,10	0,22
50	0,85	84,63	-	0,10	-
50N	0,19	19,53	-	0,10	-

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

4.2.2.3 Religador R6 com UFV

Os ajustes das funções de proteção do religador R6 são apresentados na Tabela 32.

Tabela 32 – Dados de ajuste do R6 com a inclusão da UFV à rede de distribuição.

Função	I_{ajuste} (A)	I_{pickup} (A)	M	Top (s)	DT
51	0,30	29,95	30,00	0,30	0,65
51N	0,07	6,91	30,00	0,18	0,40
50	1,50	149,75	-	0,10	-
50N	0,35	34,56	-	0,10	-

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

4.2.2.4 Religador R9 com UFV

Os ajustes das funções de proteção do religador R9 são apresentados na Tabela 33.

Tabela 33 – Dados de ajuste do R9 com a inclusão da UFV à rede de distribuição.

Função	I_{ajuste} (A)	I_{pickup} (A)	M	Top (s)	DT
51	0,48	47,86	30,00	0,53	1,13
51N	0,11	11,04	30,00	0,60	1,29
50	2,39	239,29	-	0,10	-
50N	0,55	55,22	-	0,10	-

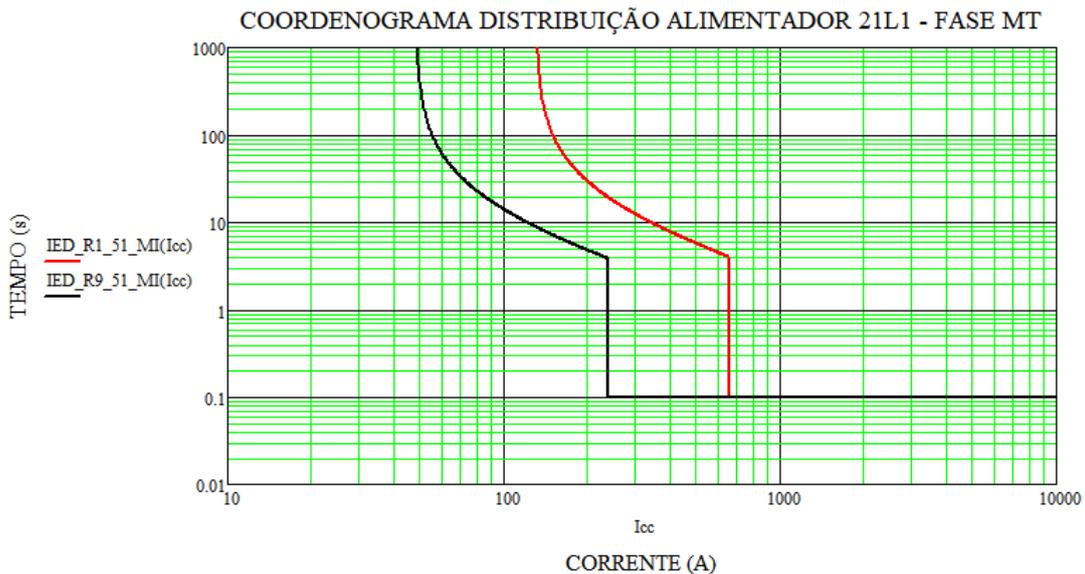
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

4.2.2.5 Coordenogramas da rede de distribuição com inclusão da UFV

A partir dos valores obtidos no estudo de proteção da rede de distribuição com a inclusão da UFV foram gerados os coordenogramas das funções de sobrecorrente no *MathCAD*.

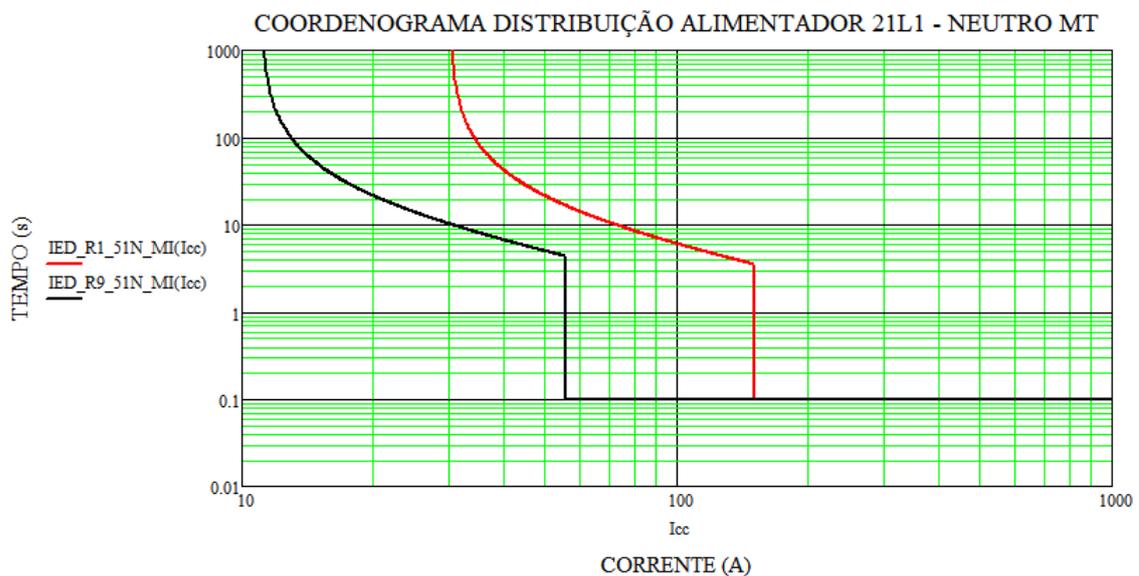
Como pode ser observado nas Figuras 24 e 25, a inclusão da UFV não ocasionou em alterações relevantes nos ajustes de proteção do tronco do alimentador 21L1, visto que os coordenogramas de fase e neutro apresentados sofreram poucas alterações se comparados os das Figuras 14 e 15.

Figura 24 – Coordenograma de fase dos equipamentos da rede de distribuição ligados ao tronco do alimentador 21L1 com inclusão da UFV.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

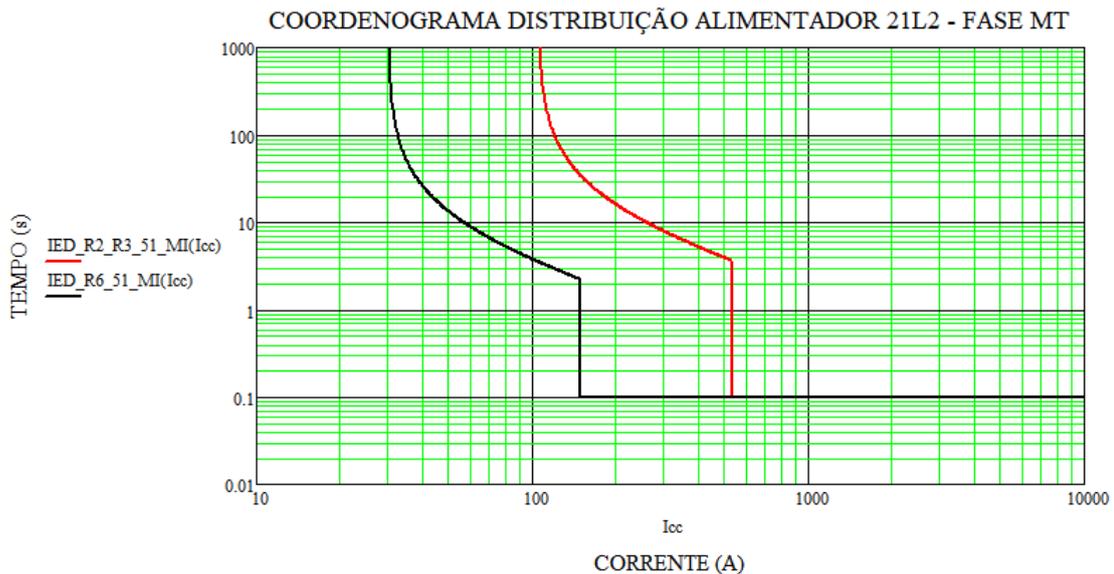
Figura 25 – Coordenograma de neutro dos equipamentos da rede de distribuição ligados ao tronco do alimentador 21L1 com inclusão da UFV.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

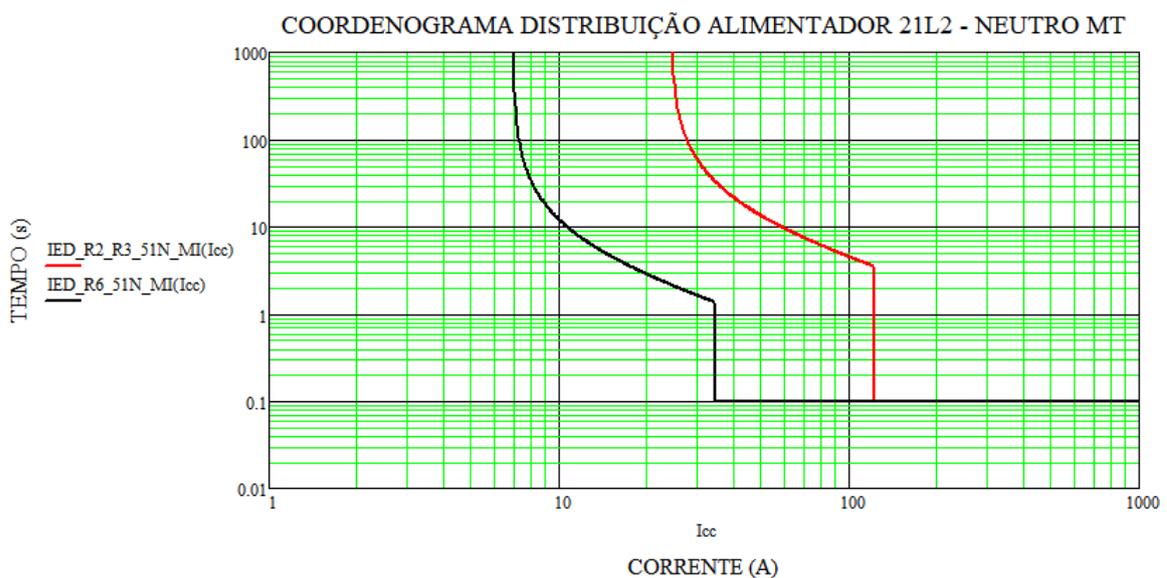
Nas Figuras 26 e 27 são mostrados os coordenogramas de fase e neutro do tronco de alimentador 21L2. Comparando com os resultados apresentados nas Figuras 16 e 17 pode-se observar que as curvas são muito semelhantes, visto que os resultados do estudo de proteção com a UFV foram bem próximos aos resultados sem a inclusão da mesma.

Figura 26 – Coordenograma de fase dos equipamentos da rede de distribuição ligados ao tronco do alimentador 21L2 com inclusão da UFV.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

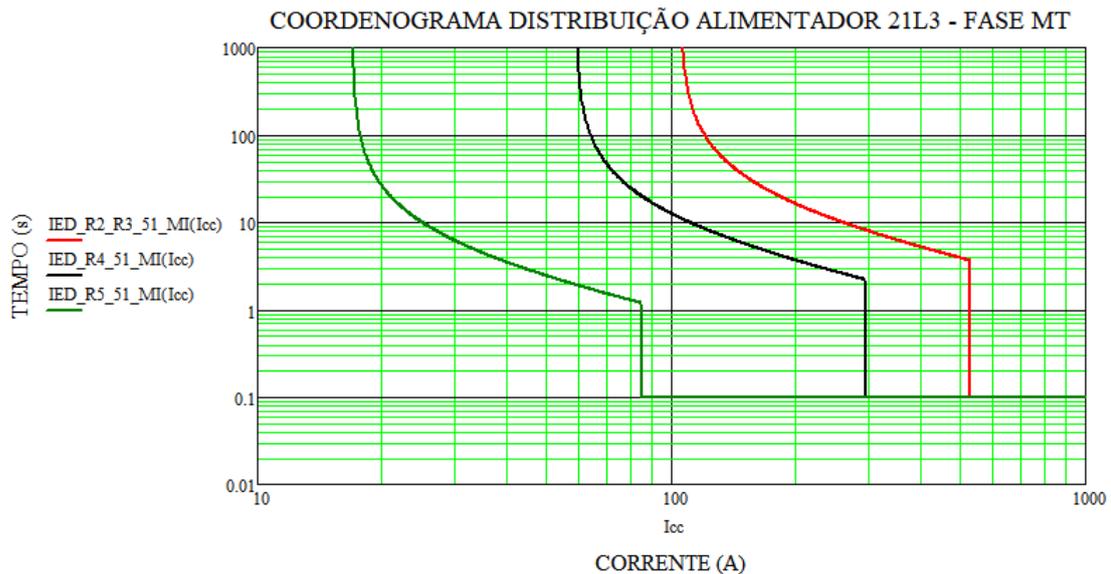
Figura 27 – Coordenograma de neutro dos equipamentos da rede de distribuição ligados ao tronco do alimentador 21L2 com inclusão da UFV.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

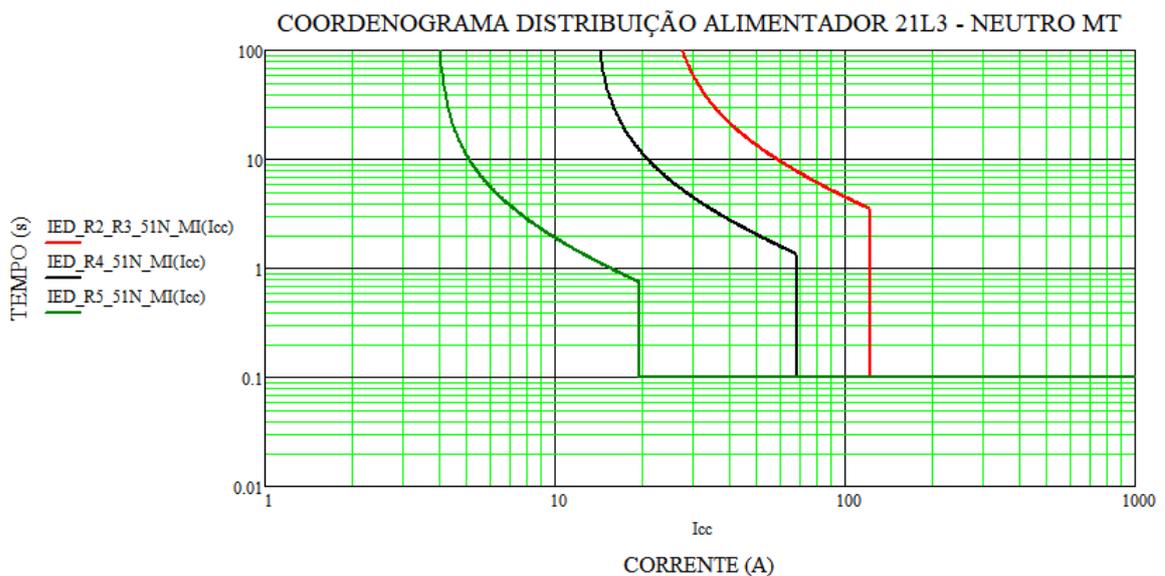
Nas Figuras 28 e 29 são apresentados os coordenogramas de fase e neutro, respectivamente, do tronco do alimentador 21L3. Como pode ser observado, os coordenogramas apresentaram poucas alterações se comparados aos coordenogramas mostrados nas Figuras 18 e 19, pois os ajustes não foram muito influenciados pela inclusão da UFV.

Figura 28 – Coordenograma de fase dos equipamentos da rede de distribuição ligados ao tronco do alimentador 21L3 com inclusão da UFV.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 29 – Coordenograma de neutro dos equipamentos da rede de distribuição ligados ao tronco do alimentador 21L3 com inclusão da UFV.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

4.2.3 Estudo de proteção da UFV

Nesta seção são apresentados os resultados do estudo de proteção do relé associado ao disjuntor de entrada da UFV. Em seguida são apresentados os coordenogramas das funções de sobrecorrente.

4.2.3.1 Relé associado ao disjuntor da UFV

O disjuntor de entrada da UFV é conectado a um barramento localizado a jusante do religador R1(21L1), como mostrado na Figura 9. Os estudos de proteção com a inclusão da UFV são realizados a partir da premissa de que toda a carga do tronco do alimentador 21L1 é suprida pela UFV.

Para o cálculo das correntes de ajuste e de *pickup* das funções de sobrecorrente instantânea foram utilizadas as correntes de magnetização mostradas nas Equações 3.3 e 3.4. As correntes de *pickup* foram calculadas como sendo as correntes de magnetização incrementadas em 10%, como mostrado nas Equações 4.3 e 4.4 (OLIVEIRA, 2019).

$$I_{pickup_50} = I_{mag_F} \cdot 1,1 \quad (4.3)$$

$$I_{pickup_50N} = I_{mag_N} \cdot 1,1 \quad (4.4)$$

Os resultados obtidos a partir destas equações são apresentados na Tabela 34.

Tabela 34 – Dados de ajuste do relé associado ao disjuntor da UFV.

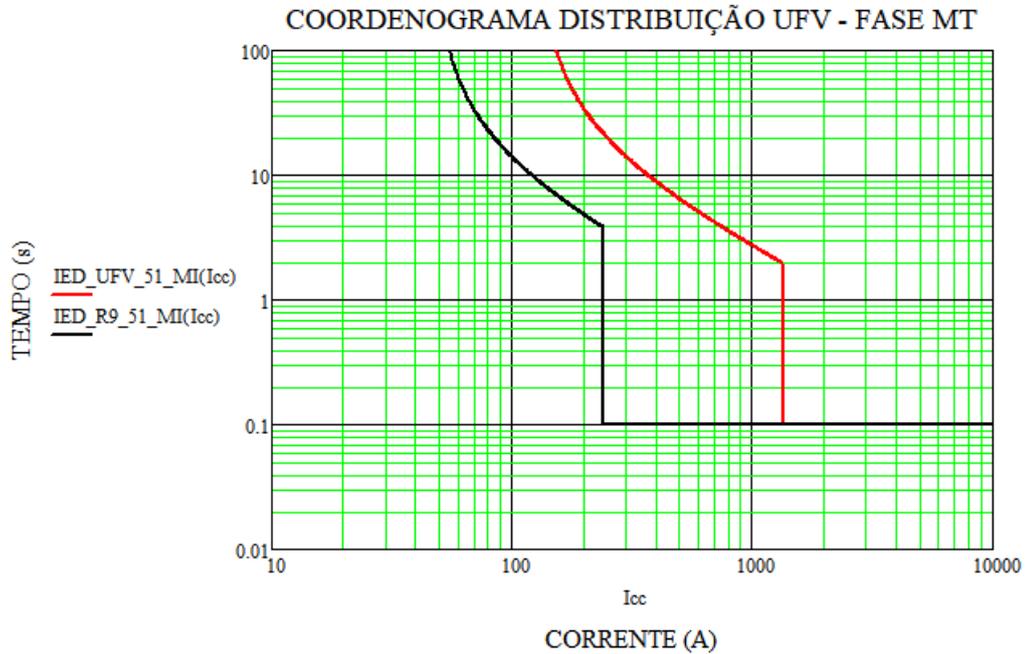
Função	I_{ajuste} (A)	I_{pickup} (A)	M	Top (s)	DT
51	3,25	130	23,05	0,83	1,35
51N	0,75	30	20,00	0,90	1,27
50	33,36	1334,60	-	0,10	-
50N	6,67	266,92	-	0,10	-

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

4.2.3.2 Coordenogramas da integração da UFV ao tronco do alimentador 21L1.

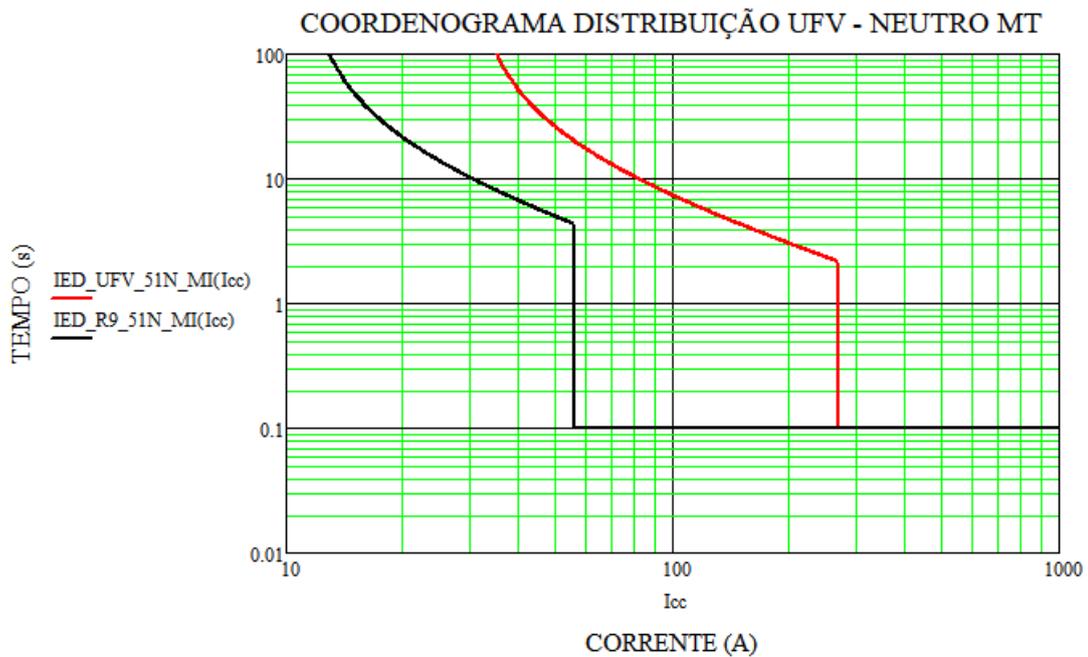
A partir dos valores obtidos no estudo de proteção da UFV foram gerados os coordenogramas das funções de sobrecorrente no *MathCAD*. Como pode ser observado nas Figuras 30 e 31, há coordenação entre o disjuntor de entrada da UFV (curva vermelha) e o religador R9 (curva preta), visto que a margem de coordenação de 0,3 s é respeitada e a atuação da função de sobrecorrente é como prevista nos cálculos.

Figura 30 – Coordenograma de fase do relé da UFV integrado aos equipamentos ligados ao tronco do alimentador 21L1.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 31 – Coordenograma de neutro do relé da UFV integrado aos equipamentos ligados ao tronco do alimentador 21L1.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

4.3 Considerações finais

Analisando os resultados dos estudos de proteção observa-se que os valores de ajustes obtidos após a inclusão da UFV foram próximos aos valores obtidos sem a UFV. Estes resultados puderam ser comprovados graficamente por meio dos coordenogramas, que apresentaram poucas alterações com a inclusão da UFV, de forma que, nos ajustes de proteção da subestação, poucos parâmetros sofreram alterações, a maioria com uma diferença menor que 20%. A maior diferença encontrada foi de 36%, o que ainda se trata de uma diferença pouco considerável como comprovado por meio da semelhança entre os coordenogramas. Assim pode-se concluir que, com a integração desta UFV hipotética ao sistema do campus do Pici, os ajustes de proteção necessitam de poucas alterações, e as que precisam ser feitas não causam grande impacto na coordenação do sistema de proteção. As funções de sobrecorrente instantânea correm o risco de atuar indevidamente ao longo da rede de distribuição caso não seja utilizada a seletividade lógica, portanto, para que este estudo funcione adequadamente, a seletividade lógica, com comunicação entre os relés sendo feita por meio do uso de fibra óptica, deve estar ativa nos relés do sistema.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

O presente trabalho apresentou um estudo de proteção da integração de uma UFV hipotética à rede de distribuição elétrica do campus do Pici da UFC.

Ao longo do trabalho foram apresentados os dados do sistema utilizados para a elaboração do estudo. De posse dos dados apresentados, foram elaborados os estudos de curto-circuito e de proteção com e sem a integração da UFV. Foram geradas as OAPs de cada equipamento e os coordenogramas das funções de sobrecorrente. Os resultados dos estudos sem a UFV e com a inclusão da mesma foram comparados afim de avaliar o impacto da integração da UFV à rede de distribuição do campus.

Foi realizada a simulação do sistema com a inclusão da UFV no *EasyPower* para a obtenção dos dados de curto-circuito que foram utilizados nos estudos de proteção do sistema com integração da UFV. Antes desta simulação foi feita a simulação do sistema sem a UFV para verificar a precisão do *software*, que se mostrou eficiente, apresentando resultados condizentes com os dados do sistema calculados no *MathCAD* e disponibilizados pela concessionária.

Os estudos de proteção do sistema em ambos os casos, sem a UFV e com a inclusão da mesma, satisfizeram as condições de coordenação entre os equipamentos, obedecendo a margem de coordenação adotada de 0,3 s. As funções de sobrecorrente instantânea apresentaram resultados que podem promover a atuação indevida, contudo este problema pode ser contornado utilizando a seletividade lógica, com comunicação entre os relés por meio de fibra óptica.

Comparando os resultados do estudo de curto-circuito sem a usina fotovoltaica com os resultados de curto-circuito obtidos em simulação, com a inclusão da UFV, foi possível notar um aumento nos valores de curto-circuito, entretanto os resultados foram bastante próximos em ambos os casos. Quando feita a comparação entre os resultados do estudo de proteção sem a UFV e os resultados do estudo com a inclusão da mesma pode ser observado que poucos parâmetros sofrem alterações. Dos poucos que mudam, que em sua maioria são o tempo de operação, o múltiplo e o *dial* de tempo, a maior parte possui uma diferença menor que 20%. A maior diferença é de 36%, porém ainda é uma diferença que não afeta significativamente a coordenação do sistema, como pode ser observado nos coordenogramas apresentados.

5.2 Sugestões de Trabalhos futuros

Este trabalho motiva o desenvolvimento de outros estudos, como:

- Estudo com análise de contingência, levando em conta os religadores que se encontram em estado normalmente aberto no sistema atualmente;
- Estudo de mais funções de proteção além das apresentadas neste trabalho;
- Estudo considerando paralelismo dos transformadores da subestação do campus;
- Análise dos impactos no fluxo de carga e no nível de tensão com a inclusão da UFV;
- Implementação da UFV ao sistema *Supervisory Control And Data Acquisition* / Sistema de Aquisição de Controle de Dados (SCADA);
- Análise dos impactos da GD com a previsão do aumento da sua potência instalada na rede elétrica do Campus do Pici;
- Estudo de coordenação de isolamento com uso do *software Alternative Transient Program* / Programa Transitório Alternativo (ATP) para dimensionamento adequado dos para-raios do Campus do Pici;
- Estudo da regulamentação atual para instalação de planta híbrida.

REFERÊNCIAS

ANSI/IEEE C37.2. Ieee standard electrical power system device function numbers, acronyms, and contact designations. **IEEE Std C37.2-2008 (Revision of IEEE Std C37.2-1996)**, p. 1–48, 2008.

CARNEIRO, J. A. B. **PROPOSTA DE METODOLOGIA DE APRENDIZAGEM BASEADA EM PROJETO PARA APLICAÇÃO NA DISCIPLINA DE SUPERVISÃO E CONTROLE DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA** 2021. Graduação em Engenharia Elétrica – Centro de Tecnologia, Trabalho Final de Curso. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

GOMES, F. V. **Análise de Sistemas Elétricos de Potência 1: Representação em pu**. Juiz de Fora, 2012.

IEC 60255. Electrical relays - part 4: Single input energizing quantity measuring relays with dependent specified time. **IEC Std 60255-4 - 1976**, 1976.

KINDERMANN, G. **Curto-Circuito**. [S. l.]: Sagra Luzzatto, 1997. v. 1.

KINDERMANN, G. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. [S. l.]: Ed. do autor, 2005. v. 1.

KINDERMANN, G. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. [S. l.]: Ed. do autor, 2006. v. 2.

LOPES, R. F. M. **ESTUDOS ELÉTRICOS PARA EXPANSÃO E MELHORIA DA REDE ELÉTRICA DO CAMPUS DO PICI DA UFC**. 2011. Graduação em Engenharia Elétrica – Centro de Tecnologia, Monografia. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

MAMEDE FILHO, J. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. [S. l.]: LTC, 2013. v. 1.

OLIVEIRA, A. C. M. d. **ESTUDOS DE PROTEÇÃO E SELETIVIDADE SOB A PERSPECTIVA DE MINIGERAÇÃO FOTOVOLTAICA**. 2019. Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

PRATA, I. P. **APLICAÇÃO DO SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO PRIMÁRIA DO CAMPUS DO PICI DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**. 2021. Graduação em Engenharia Elétrica – Centro de Tecnologia, Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

RODRIGUES, M. S. d. L. **TESTE E VALIDAÇÃO DAS FUNÇÕES DE PROTEÇÃO BASEADAS NA NORMA IEC 61850 PROPOSTAS PARA IMPLANTAÇÃO NO PROJETO PILOTO DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO INTELIGENTE DE AQUIRAZ**. 2015. Graduação em Engenharia Elétrica – Centro de Tecnologia, Monografia. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

SAMPAIO, R. F. **PROJETO FINAL: Critérios para cálculo dos ajustes da proteção da subestação**. Fortaleza, 2019.

SAMPAIO, R. F. **Pricípios Fundamentais dos Relés e Funções de Proteção e Conrole**. Fortaleza, 2020.

SAMPAIO, R. F. **Projeto Final: Estudos Preliminares e apresentação da subestação.** Fortaleza, 2020.

SAMPAIO, R. F. **Proteção de Subestação e Linha de Transmissão.** Fortaleza, 2020.

SILVA, F. E. C. d. **ESTUDOS PARA INTEGRAÇÃO DE UMA PLANTA DE MINIGERAÇÃO FOTOVOLTAICA AO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO.** 2022. Graduação em Engenharia Elétrica – Centro de Tecnologia, Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

VIEIRA, C. R. **ANÁLISE DOS IMPACTOS DA GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA NO SISTEMA ELÉTRICO DE DISTRIBUIÇÃO DE UM CAMPUS UNIVERSITÁRIO.** 2016. Graduação em Engenharia Elétrica – Centro de Tecnologia, Trabalho Final de Curso. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

APÊNDICE A – CÁLCULOS *MATHCAD*

Documento com detalhes dos cálculos gerado no *MathCAD*.

ESTUDO DA PROTEÇÃO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DO CAMPUS DO PICI DA UFC

CONSTANTES E FÓRMULAS:

VALORES DE BASE:

$$V_A := 1V \cdot 1A \quad V_{pu} := 1$$

$$S_b := 100 \cdot 10^6 VA \quad V_{base_alta} := 69 \cdot 10^3 V \quad V_{base_baixa} := 13.8 \cdot 10^3 V$$

$$I_{base_alta} := \frac{S_b}{\sqrt{3} \cdot V_{base_alta}} = 836.74 A \quad Z_{base_alta} := \frac{V_{base_alta}^2}{S_b} = 47.61 \Omega$$

$$I_{base_baixa} := \frac{S_b}{\sqrt{3} \cdot V_{base_baixa}} = 4183.698 A \quad Z_{base_baixa} := \frac{V_{base_baixa}^2}{S_b} = 1.9044 \Omega$$

$$R_c := 100 \Omega \quad R_{c_pu_alta} := \frac{R_c}{Z_{base_alta}} = 2.1004 \quad R_{c_pu_baixa} := \frac{R_c}{Z_{base_baixa}} = 52.51$$

$$RTT := \frac{V_{base_alta}}{V_{base_baixa}} = 5$$

Distâncias dos trechos dos alimentadores:

$$d_{TA} := 0.823 km \quad d_{TB} := 0.892 km \quad d_{TC} := 0.874 km \quad d_{TD} := 0.455 km$$

$$d_{TE} := 0.029 km \quad d_{TF} := 0.261 km \quad d_{TG} := 0.495 km$$

Correntes de carga nos trechos dos alimentadores:

$$I_{TA} := 63.1868 A \quad I_{TB} := 57.7118 A \quad I_{TC} := 35.5727 A \quad I_{TD} := 36.8132 A$$

$$I_{TE} := 23.0382 A \quad I_{TF} := 32.1577 A \quad I_{TG} := 13.0196 A$$

Corrente total nos alimentadores:

$$I_{21L1} := I_{TA} + I_{TD} = 100 A \quad I_{21L2} := I_{TB} + I_{TE} = 80.75 A \quad I_{21L3} := I_{TC} + I_{TF} + I_{TG} = 80.75 A$$

$$I_{R1} := I_{TA} + I_{TD} = 100 A \quad I_{R2} := I_{TB} + I_{TE} = 80.75 A \quad I_{R3} := I_{TC} + I_{TF} + I_{TG} = 80.75 A$$

$$I_{R9} := I_{TD} = 36.8132 A \quad I_{R6} := I_{TE} = 23.0382 A \quad I_{R4} := I_{TF} + I_{TG} = 45.1773 A$$

$$I_{R5} := I_{TG} = 13.0196 A$$

DADOS DOS CONDUTORES

$$I_{MaxCondutor} := 470 A \quad FatorTermico := 1.2$$

$$I_{limitecondutor} := I_{MaxCondutor} \cdot FatorTermico = 564 A$$

IMPEDÂNCIAS EM P.U.:

Sequência Positiva:

$$Z_{102B1} := (0.00416 + 0.05319i) \quad Z_{101B1} := (0.00416 + 1.45129i)$$

$$Z_{102B1_pol} := |Z_{102B1}| = 0.0534 \quad Z_{101B1_pol} := |Z_{101B1}| = 1.4513$$

$$Z_{1TA} := \left(0.2354 \frac{\Omega}{km} \cdot \frac{d_{TA}}{Z_{base_baixa}} + 0.3850i \cdot \frac{\Omega}{km} \cdot \frac{d_{TA}}{Z_{base_baixa}} \right) = 0.1017 + 0.1664i$$

$$Z_{1TB} := \left(0.2354 \frac{\Omega}{km} \cdot \frac{d_{TB}}{Z_{base_baixa}} + 0.3850i \cdot \frac{\Omega}{km} \cdot \frac{d_{TB}}{Z_{base_baixa}} \right) = 0.1103 + 0.1803i$$

$$Z_{1TC} := \left(0.2354 \frac{\Omega}{km} \cdot \frac{d_{TC}}{Z_{base_baixa}} + 0.3850i \cdot \frac{\Omega}{km} \cdot \frac{d_{TC}}{Z_{base_baixa}} \right) = 0.108 + 0.1767i$$

$$Z1_{TD} := \left(0.2354 \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot \frac{d_{TD}}{Z_{\text{base_baixa}}} + 0.3850i \cdot \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot \frac{d_{TD}}{Z_{\text{base_baixa}}} \right) = 0.0562 + 0.092i$$

$$Z1_{TE} := \left(0.2354 \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot \frac{d_{TE}}{Z_{\text{base_baixa}}} + 0.3850i \cdot \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot \frac{d_{TE}}{Z_{\text{base_baixa}}} \right) = 3.5846 \times 10^{-3} + 5.8627i \times 10^{-3}$$

$$Z1_{TF} := \left(0.2354 \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot \frac{d_{TF}}{Z_{\text{base_baixa}}} + 0.3850i \cdot \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot \frac{d_{TF}}{Z_{\text{base_baixa}}} \right) = 0.0323 + 0.0528i$$

$$Z1_{TG} := \left(0.2354 \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot \frac{d_{TG}}{Z_{\text{base_baixa}}} + 0.3850i \cdot \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot \frac{d_{TG}}{Z_{\text{base_baixa}}} \right) = 0.0612 + 0.1001i$$

Sequência Negativa:

$$Z2_{02B1} := Z1_{02B1} \quad Z2_{01B1} := Z1_{01B1} \quad Z2_{TA} := Z1_{TA} \quad Z2_{TB} := Z1_{TB}$$

$$Z2_{TC} := Z1_{TC} \quad Z2_{TD} := Z1_{TD} \quad Z2_{TE} := Z1_{TE} \quad Z2_{TF} := Z1_{TF} \quad Z2_{TG} := Z1_{TG}$$

Sequência Zero:

$$Z0_{02B1} := (0.00300 + 0.13071i) \quad Z0_{01B1} := (1.3981i)$$

$$Z0_{TA} := \left(0.4130 \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot \frac{d_{TA}}{Z_{\text{base_baixa}}} + 1.5520i \cdot \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot \frac{d_{TA}}{Z_{\text{base_baixa}}} \right) = 0.1785 + 0.6707i$$

$$Z0_{TB} := \left(0.4130 \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot \frac{d_{TB}}{Z_{\text{base_baixa}}} + 1.5520i \cdot \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot \frac{d_{TB}}{Z_{\text{base_baixa}}} \right) = 0.1934 + 0.7269i$$

$$Z0_{TC} := \left(0.4130 \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot \frac{d_{TC}}{Z_{\text{base_baixa}}} + 1.5520i \cdot \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot \frac{d_{TC}}{Z_{\text{base_baixa}}} \right) = 0.1895 + 0.7123i$$

$$Z0_{TD} := \left(0.4130 \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot \frac{d_{TD}}{Z_{\text{base_baixa}}} + 1.5520i \cdot \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot \frac{d_{TD}}{Z_{\text{base_baixa}}} \right) = 0.0987 + 0.3708i$$

$$Z0_{TE} := \left(0.4130 \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot \frac{d_{TE}}{Z_{\text{base_baixa}}} + 1.5520i \cdot \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot \frac{d_{TE}}{Z_{\text{base_baixa}}} \right) = 6.2891 \times 10^{-3} + 0.0236i$$

$$Z0_{TF} := \left(0.4130 \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot \frac{d_{TF}}{Z_{\text{base_baixa}}} + 1.5520i \cdot \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot \frac{d_{TF}}{Z_{\text{base_baixa}}} \right) = 0.0566 + 0.2127i$$

$$Z0_{TG} := \left(0.4130 \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot \frac{d_{TG}}{Z_{\text{base_baixa}}} + 1.5520i \cdot \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot \frac{d_{TG}}{Z_{\text{base_baixa}}} \right) = 0.1073 + 0.4034i$$

Impedâncias Acumuladas:

$$Z1_{R1_pu} := Z1_{01B1} = 4.16 \times 10^{-3} + 1.4513i \quad Z2_{R1_pu} := Z1_{R1_pu} = 4.16 \times 10^{-3} + 1.4513i \quad Z0_{R1_pu} := Z0_{01B1} = 1.3981i$$

$$Z1_{R2_pu} := Z1_{01B1} = 4.16 \times 10^{-3} + 1.4513i \quad Z2_{R2_pu} := Z1_{R2_pu} = 4.16 \times 10^{-3} + 1.4513i \quad Z0_{R2_pu} := Z0_{01B1} = 1.3981i$$

$$Z1_{R3_pu} := Z1_{01B1} = 4.16 \times 10^{-3} + 1.4513i \quad Z2_{R3_pu} := Z1_{R3_pu} = 4.16 \times 10^{-3} + 1.4513i \quad Z0_{R3_pu} := Z0_{01B1} = 1.3981i$$

$$Z1_{R4_pu} := Z1_{01B1} + Z1_{TC} = 0.1122 + 1.628i \quad Z2_{R4_pu} := Z1_{R4_pu} = 0.1122 + 1.628i \quad Z0_{R4_pu} := Z0_{01B1} + Z0_{TC} = 0.1895 + 2.1104i$$

$$Z1_{R5_pu} := Z1_{R4_pu} + Z1_{TF} = 0.1445 + 1.6807i \quad Z2_{R5_pu} := Z1_{R5_pu} = 0.1445 + 1.6807i \quad Z0_{R5_pu} := Z0_{R4_pu} + Z0_{TF} = 0.2461 + 2.3231i$$

$$Z1_{R6_pu} := Z1_{R2_pu} + Z1_{TB} = 0.1144 + 1.6316i \quad Z2_{R6_pu} := Z1_{R6_pu} = 0.1144 + 1.6316i \quad Z0_{R6_pu} := Z0_{R2_pu} + Z0_{TB} = 0.1934 + 2.125i$$

$$Z1_{R9_pu} := Z1_{R1_pu} + Z1_{TA} = 0.1059 + 1.6177i \quad Z2_{R9_pu} := Z1_{R9_pu} = 0.1059 + 1.6177i \quad Z0_{R9_pu} := Z0_{R1_pu} + Z0_{TA} = 0.1785 + 2.0688i$$

CÁLCULO DOS CURTO-CIRCUITOS:

EM 02B1:

$$I_{cc3\Phi_{02B1}} := \left(\frac{V_{pu}}{|Z_{102B1}|} \right) I_{base_alta} = 1.5683 \times 10^4 \text{ A}$$

$$I_{cc2\Phi_{02B1}} := \frac{\sqrt{3} \cdot I_{cc3\Phi_{02B1}}}{2} = 1.3582 \times 10^4 \text{ A}$$

$$I_{cc1\Phi_{02B1}} := \left[\frac{(3V_{pu})}{|2 \cdot Z_{102B1} + Z_{002B1}|} \right] I_{base_alta} = 1.0576 \times 10^4 \text{ A}$$

EM 01B1:

$$I_{cc3\Phi_{01B1}} := \left(\frac{V_{pu}}{|Z_{101B1}|} \right) I_{base_baixa} = 2.8827 \times 10^3 \text{ A}$$

$$I_{cc2\Phi_{01B1}} := \frac{\sqrt{3} \cdot I_{cc3\Phi_{01B1}}}{2} = 2.4965 \times 10^3 \text{ A}$$

$$I_{cc1\Phi_{01B1}} := \left[\frac{(3V_{pu})}{|2 \cdot Z_{101B1} + Z_{001B1}|} \right] I_{base_baixa} = 2.9184 \times 10^3 \text{ A}$$

EM R4:

$$I_{cc3\Phi_{R4}} := \left(\frac{V_{pu}}{|Z_{1R4_pu}|} \right) I_{base_baixa} = 2.5638 \times 10^3 \text{ A}$$

$$I_{cc2\Phi_{R4}} := \frac{\sqrt{3} \cdot I_{cc3\Phi_{R4}}}{2} = 2.2203 \times 10^3 \text{ A}$$

$$I_{cc1\Phi_{R4}} := \left[\frac{(3V_{pu})}{|2 \cdot Z_{1R4_pu} + Z_{0R4_pu}|} \right] I_{base_baixa} = 2.3319 \times 10^3 \text{ A}$$

EM R5:

$$I_{cc3\Phi_{R5}} := \left(\frac{V_{pu}}{|Z_{1R5_pu}|} \right) I_{base_baixa} = 2.48 \times 10^3 \text{ A}$$

$$I_{cc2\Phi_{R5}} := \frac{\sqrt{3} \cdot I_{cc3\Phi_{R5}}}{2} = 2.1478 \times 10^3 \text{ A}$$

$$I_{cc1\Phi_{R5}} := \left[\frac{(3V_{pu})}{|2 \cdot Z_{1R5_pu} + Z_{0R5_pu}|} \right] I_{base_baixa} = 2.1982 \times 10^3 \text{ A}$$

EM R6:

$$I_{cc3\Phi_{R6}} := \left(\frac{V_{pu}}{|Z_{1R6_pu}|} \right) I_{base_baixa} = 2.5579 \times 10^3 \text{ A}$$

$$I_{cc2\Phi_{R6}} := \frac{\sqrt{3} \cdot I_{cc3\Phi_{R6}}}{2} = 2.2152 \times 10^3 \text{ A}$$

$$I_{cc1\Phi_{R6}} := \left[\frac{(3V_{pu})}{|2 \cdot Z_{1R6_pu} + Z_{0R6_pu}|} \right] I_{base_baixa} = 2.3222 \times 10^3 \text{ A}$$

EM R9:

$$I_{cc3\Phi_{R9}} := \left(\frac{V_{pu}}{|Z_{1R9_pu}|} \right) I_{base_baixa} = 2.5807 \times 10^3 \text{ A}$$

$$I_{cc2\Phi_{R9}} := \frac{\sqrt{3} \cdot I_{cc3\Phi_{R9}}}{2} = 2.235 \times 10^3 \text{ A}$$

$$I_{cc1\Phi_{R9}} := \left[\frac{(3V_{pu})}{|2 \cdot Z_{1R9_pu} + Z_{0R9_pu}|} \right] I_{base_baixa} = 2.3599 \times 10^3 \text{ A}$$

DIMENSIONAMENTO DOS TC's:

$$FS_{TC} := 20$$

TC EM 12F1:

$$\text{Corrente de carga: } \frac{(I_{21L1} + I_{21L2} + I_{21L3})}{RTT} = 52.3 \text{ A}$$

$$\text{Maior corrente de curto-circuito: } I_{cc3\Phi_{02B1}} = 1.5683 \times 10^4 \text{ A} \quad \frac{I_{cc3\Phi_{02B1}}}{FS_{TC}} = 784.1625 \text{ A}$$

Baseando-se no critério de corrente de carga, optou-se por adotar um TC de 800-5

$$\text{Especificação do TC: } 800 - 5 \text{ A} \quad RTC_{TC_{12F1}} := \frac{800}{5} = 160 \quad \text{Primario}_{TC_{12F1}} := 800 \text{ A}$$

TC EM 11T1 e 11T2:

$$\text{Corrente de carga: } I_{21L1} + I_{21L2} + I_{21L3} = 261.5 \text{ A}$$

$$\text{Maior corrente de curto-circuito: } I_{cc3\Phi_{01B1}} = 2.8827 \times 10^3 \text{ A} \quad \frac{I_{cc3\Phi_{01B1}}}{FS_{TC}} = 144.1366 \text{ A}$$

$$\text{Capacidade do condutor: } I_{MaxCondutor} = 470 \text{ A}$$

$$\text{Primario}_{TC_{11T1}} := 500 \text{ A}$$

$$\text{Primario}_{TC_{11T2}} := 500 \text{ A}$$

Baseando-se no critério de capacidade do condutor, optou-se por adotar um TC de 500-5

$$\text{Especificação do TC: } 500 - 5 \text{ A} \quad RTC_{TC_{11T1}} := \frac{500}{5} = 100$$

$$\text{Especificação do TC: } 500 - 5 \text{ A} \quad RTC_{TC_{11T2}} := \frac{500}{5} = 100$$

TC EM R1:

$$\text{Corrente de carga: } I_{R1} = 100 \text{ A}$$

$$\text{Maior corrente de curto-circuito: } I_{cc3\Phi_{01B1}} = 2.8827 \times 10^3 \text{ A} \quad \frac{I_{cc3\Phi_{01B1}}}{FS_{TC}} = 144.1366 \text{ A}$$

$$\text{Capacidade do condutor: } I_{MaxCondutor} = 470 \text{ A}$$

Baseando-se no critério de capacidade do condutor, optou-se por adotar um TC de 500-5

$$\text{Especificação do TC: } 500 - 5 \text{ A} \quad RTC_{TC_{R1}} := \frac{500}{5} = 100 \quad \text{Primario}_{TC_{R1}} := 500 \text{ A}$$

TC EM R2:

$$\text{Corrente de carga: } I_{R2} = 80.75 \text{ A}$$

$$\text{Maior corrente de curto-circuito: } I_{cc3\Phi_{01B1}} = 2.8827 \times 10^3 \text{ A} \quad \frac{I_{cc3\Phi_{01B1}}}{FS_{TC}} = 144.1366 \text{ A}$$

$$\text{Capacidade do condutor: } I_{MaxCondutor} = 470 \text{ A}$$

Baseando-se no critério de capacidade do condutor, optou-se por adotar um TC de 500-5

$$\text{Especificação do TC: } 500 - 5 \text{ A} \quad RTC_{TC_{R2}} := \frac{500}{5} = 100 \quad \text{Primario}_{TC_{R2}} := 500 \text{ A}$$

TC EM R3:

$$\text{Corrente de carga: } I_{R3} = 80.75 \text{ A}$$

$$\text{Maior corrente de curto-circuito: } I_{cc3\Phi_{01B1}} = 2.8827 \times 10^3 \text{ A} \quad \frac{I_{cc3\Phi_{01B1}}}{FS_{TC}} = 144.1366 \text{ A}$$

$$\text{Capacidade do condutor: } I_{MaxCondutor} = 470 \text{ A}$$

Baseando-se no critério de capacidade do condutor, optou-se por adotar um TC de 500-5

$$\text{Especificação do TC: } 500 - 5 \text{ A} \quad RTC_{TC_{R3}} := \frac{500}{5} = 100 \quad \text{Primario}_{TC_{R3}} := 500 \text{ A}$$

TC EM R4:

Corrente de carga: $I_{R4} = 45.1773 \text{ A}$

Maior corrente de curto-circuito: $I_{cc3\Phi_{R4}} = 2.5638 \times 10^3 \text{ A}$ $\frac{I_{cc3\Phi_{R4}}}{FS_{TC}} = 128.1894 \text{ A}$

Capacidade do condutor: $I_{MaxCondutor} = 470 \text{ A}$

Baseando-se no critério de capacidade do condutor, optou-se por adotar um TC de 500-5

Especificação do TC: $500 - 5 \text{ A}$ $RTC_{TC_R4} := \frac{500}{5} = 100$ $Primario_TC_R4 := 500 \text{ A}$

TC EM R5:

Corrente de carga: $I_{R5} = 13.0196 \text{ A}$

Maior corrente de curto-circuito: $I_{cc3\Phi_{R5}} = 2.48 \times 10^3 \text{ A}$ $\frac{I_{cc3\Phi_{R5}}}{FS_{TC}} = 124.0024 \text{ A}$

Capacidade do condutor: $I_{MaxCondutor} = 470 \text{ A}$

Baseando-se no critério de capacidade do condutor, optou-se por adotar um TC de 500-5

Especificação do TC: $500 - 5 \text{ A}$ $RTC_{TC_R5} := \frac{500}{5} = 100$ $Primario_TC_R5 := 500 \text{ A}$

TC EM R6:

Corrente de carga: $I_{R6} = 23.0382 \text{ A}$

Maior corrente de curto-circuito: $I_{cc3\Phi_{R6}} = 2.5579 \times 10^3 \text{ A}$ $\frac{I_{cc3\Phi_{R6}}}{FS_{TC}} = 127.8928 \text{ A}$

Capacidade do condutor: $I_{MaxCondutor} = 470 \text{ A}$

Baseando-se no critério de capacidade do condutor, optou-se por adotar um TC de 500-5

Especificação do TC: $500 - 5 \text{ A}$ $RTC_{TC_R6} := \frac{500}{5} = 100$ $Primario_TC_R6 := 500 \text{ A}$

TC EM R9:

Corrente de carga: $I_{R9} = 36.8132 \text{ A}$

Maior corrente de curto-circuito: $I_{cc3\Phi_{R9}} = 2.5807 \times 10^3 \text{ A}$ $\frac{I_{cc3\Phi_{R9}}}{FS_{TC}} = 129.0363 \text{ A}$

Capacidade do condutor: $I_{MaxCondutor} = 470 \text{ A}$

Baseando-se no critério de capacidade do condutor, optou-se por adotar um TC de 500-5

Especificação do TC: $500 - 5 \text{ A}$ $RTC_{TC_R9} := \frac{500}{5} = 100$ $Primario_TC_R9 := 500 \text{ A}$

FUNÇÃO DE SOBRECORRENTE (50/51 E 50/51N):

Valores de α e β : $M_{MaxRelé} := 30$ $FS_{51} := 1.3$ $FS_{51N} := 0.3$ $FS_{50} := 5$
 $\alpha_{MI_51} := 1$ $\beta_{MI_51} := 13.5$ Margem de coordenação: $MC := 0.3$

Estudo da proteção da subestação:

Relé PCI 12L9:

Função 50/51:

$$I_{pick_up51_12L9} := 1070.4A \quad I_{ajuste51_12L9} := 4.46A \quad DT_{51_12L9} := 0.1$$

$$IED_{12L9_51_MI}(I_{cc}) := DT_{51_12L9} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(\frac{I_{cc}}{I_{pick_up51_12L9}}\right)^{\alpha_{MI_51}} - 1}$$

Função (50/51)N:

$$I_{pick_up51N_12L9} := 100.8A \quad I_{ajuste51N_12L9} := 0.42A \quad DT_{51N_12L9} := 0.55$$

$$IED_{12L9_51N_MI}(I_{cc}) := DT_{51N_12L9} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(\frac{I_{cc}}{I_{pick_up51N_12L9}}\right)^{\alpha_{MI_51}} - 1}$$

Relé 12F1:

Função 50/51:

$$I_{prim} := 6.25W \cdot \frac{10^6}{69000V \cdot \sqrt{3}} = 52.2962 A$$

$$I_{pick_up51_12F1} := \left[(I_{prim}) \cdot FS_{51} \right] = 67.9851 A$$

$$I_{cc1\Phi_{01B1_refletido}} := \frac{I_{cc1\Phi_{01B1}}}{RTT \cdot \sqrt{3}} = 336.9869 A$$

$$I_{pick_up51_12F1} > I_{cc1\Phi_{01B1_refletido}} = 0$$

$$I_{pick_up51_12F1} := I_{cc1\Phi_{01B1_refletido}} \cdot 1.1 = 370.6855 A \quad \text{Usando 10\% a mais da corrente de cc monofásico na barra de 13,8kV refletida}$$

$$I_{pick_up51_12F1} < \frac{I_{cc2\Phi_{02B1}}}{1.5} = 1 \quad \text{Ok!}$$

$$I_{pick_up51_12F1} < \text{Primario_TC_12F1} \cdot \text{FatorTermico} = 1 \quad \text{Ok!}$$

Múltiplo para um curto na barra 02B1:

$$M_{51_12F1_I_{cc3\Phi_{02B1}}} := \frac{I_{cc3\Phi_{02B1}}}{I_{pick_up51_12F1}} = 42.3088$$

$$M_{51_12F1_I_{cc3\Phi_{02B1}}} < M_{MaxRelé} = 0 \quad \text{Falso!}$$

Aplicando o múltiplo máximo:

$$M_{51_12F1_I_{cc3\Phi_{02B1}}} := M_{MaxRelé} = 30$$

$$I_{pick_up50_12F1} := FS_{50} \cdot I_{pick_up51_12F1} = 1.8534 \times 10^3 A$$

$$I_{carga_AT} := \frac{(I_{21L1} + I_{21L2} + I_{21L3})}{RTT} = 52.3 A$$

$$I_{rush} := I_{carga_AT}^8 = 418.4 A$$

$$I_{pick_up50_12F1} > I_{rush} = 1 \quad \text{Ok!}$$

$$I_{ajuste51_12F1} := \frac{I_{pick_up51_12F1}}{RTC_TC_12F1} = 2.3168 A$$

$$I_{ajuste50_12F1} := \frac{I_{pick_up50_12F1}}{RTC_TC_12F1} = 11.5839 A$$

Calculo do Top do Relé 12L9 - Função 50/51:

Múltiplo para um curto na barra 02B1:

$$M_{51_12L9_I_{cc3\Phi_{02B1}}} := \frac{I_{pick_up50_12F1} \cdot 2.4}{I_{pick_up51_12L9}} = 4.1557 \quad \text{Aplicando um multiplicador de 2,4 ao pickup da 50 do 12F1 para garantir coordenação}$$

Tempo de Atuação para um curto na barra 02B1:

$$Top_{51_12L9_I_{cc3\Phi_{02B1}}} := DT_{51_12L9} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(M_{51_12L9_I_{cc3\Phi_{02B1}}}^{\alpha_{MI_51}} - 1\right)} = 0.4278$$

TOPs 12F1:

$$Top_{50_12F1} := 0.0001 \quad \text{Valor ilustrativo para geração do gráfico. Na verdade o Top50_12F1 é zero.}$$

$$Top_{51_12F1_I_{cc3\Phi_{02B1}}} := Top_{51_12L9_I_{cc3\Phi_{02B1}}} - MC = 0.1278$$

Cálculo do Dial:

$$DT_{51_12F1} := \text{round} \left[\frac{Top_{51_12F1_I_{cc3\Phi_{02B1}}} \cdot \left(M_{51_12F1_I_{cc3\Phi_{02B1}}}^{\alpha_{MI_51}} - 1\right)}{\beta_{MI_51}}, 2 \right] = 0.27$$

$$IED_{12F1_51_MI}(I_{cc}) := \begin{cases} DT_{51_12F1} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(\frac{I_{cc}}{I_{pick_up51_12F1}} \right)^{\alpha_{MI_51}} - 1} & \text{if } I_{cc} < I_{pick_up50_12F1} \\ Top_{50_12F1} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Função (50/51)N:

$$I_{pick_up51N_12F1} := I_{prim} \cdot FS_{51N} = 15.6889 \text{ A}$$

$$M_{51N_12F1_Icc1\Phi_02B1} := \frac{I_{cc1\Phi_02B1}}{I_{pick_up51N_12F1}} = 674.0813$$

$$M_{51N_12F1_Icc1\Phi_02B1} < M_{MaxRelé} = 0 \text{ Falso!}$$

Aplicando o múltiplo máximo:

$$M_{51N_12F1_Icc1\Phi_02B1} := M_{MaxRelé} = 30$$

$$I_{pick_up50N_12F1} := I_{cc1\Phi_02B1} \cdot 0.1 = 1.0576 \times 10^3 \text{ A}$$

Usando 10% da corrente de cc da barra de 69kV

$$I_{ajuste51N_12F1} := \frac{I_{pick_up51N_12F1}}{RTC_TC_12F1} = 0.0981 \text{ A}$$

$$I_{ajuste50N_12F1} := \frac{I_{pick_up50N_12F1}}{RTC_TC_12F1} = 6.6097 \text{ A}$$

Calculo do Top do Relé 12L9 - Função 50/51N:

Múltiplo para um curto na barra 02B1:

$$M_{51N_12L9_Icc1\Phi_02B1} := \frac{I_{pick_up50N_12F1}^{1.2}}{I_{pick_up51N_12L9}} = 12.59 \quad 1.2 \text{ usado para que o DT do 12F1 fique abaixo de 1.5 que é o máximo}$$

Tempo de Atuação para um curto na barra 02B1:

$$Top_{51N_12L9_Icc1\Phi_02B1} := DT_{51N_12L9} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(M_{51N_12L9_Icc1\Phi_02B1}^{\alpha_{MI_51}} - 1 \right)} = 0.6406$$

TOPs 12F1:

$$Top_{50N_12F1} := 0.0001 \quad \text{Valor ilustrativo para geração do gráfico. Na verdade o Top}_{50N_12F1} \text{ é zero.}$$

$$Top_{51N_12F1_Icc3\Phi_02B1} := Top_{51N_12L9_Icc1\Phi_02B1} - MC = 0.3406$$

Cálculo do Dial:

$$DT_{51N_12F1} := \text{round} \left[\frac{Top_{51N_12L9_Icc1\Phi_02B1} \cdot \left(M_{51N_12F1_Icc1\Phi_02B1}^{\alpha_{MI_51}} - 1 \right)}{\beta_{MI_51}}, 2 \right] = 1.38$$

$$IED_{12F1_51N_MI}(I_{cc}) := \begin{cases} DT_{51N_12F1} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(\frac{I_{cc}}{I_{pick_up51N_12F1}} \right)^{\alpha_{MI_51}} - 1} & \text{if } I_{cc} < I_{pick_up50N_12F1} \\ Top_{50N_12F1} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Relés 11T1 E 11T2:

Função 50/51:

$$I_{pick_up51_11T1_11T2} := (I_{21L1} + I_{21L2} + I_{21L3}) \cdot FS_{51} = 339.95 \text{ A}$$

$$I_{pick_up51_11T1_11T2} < \frac{I_{cc2\Phi_01B1}}{1.5} = 1 \quad \text{Ok!}$$

$$I_{pick_up51_11T1_11T2} < Primario_TC_11T1 \cdot \text{FatorTermico} = 1 \quad \text{Ok!}$$

Múltiplo para um curto na barra 01B1:

$$M_{51_11T1_11T2_Icc3\Phi_01B1} := \frac{I_{cc3\Phi_01B1}}{I_{pick_up51_11T1_11T2}} = 8.4799$$

$$M_{51_11T1_11T2_Icc3\Phi_01B1} < M_{MaxRelé} = 1 \quad \text{Ok!}$$

$$I_{pick_up50_11T1_11T2} := FS_{50} \cdot I_{pick_up51_11T1_11T2} = 1.6998 \times 10^3 \text{ A}$$

$$I_{ajuste51_11T1_11T2} := \frac{I_{pick_up51_11T1_11T2}}{RTC_TC_11T1} = 3.3995 \text{ A}$$

$$I_{ajuste50_11T1_11T2} := \frac{I_{pick_up50_11T1_11T2}}{RTC_TC_11T1} = 16.9975 \text{ A}$$

Calculo do Top do Relé 12F1 - Função 50/51:

Múltiplo para um curto na barra 01B1:

$$M_{51_12F1_Icc3\Phi_01B1} := \frac{I_{pick_up50_11T1_11T2}^3}{RTT \cdot I_{pick_up51_12F1}} = 2.7513 \quad \text{3 usado para que o DT do 11T1 e 11T2 fique abaixo de 1.5 que é o máximo}$$

$$M_{51_12F1_Icc3\Phi_01B1} < M_{MaxRelé} = 1 \quad \text{Ok!}$$

Tempo de Atuação para um curto na barra 01B1:

$$Top_{51_12F1_Icc3\Phi_01B1} := DT_{51_12F1} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(M_{51_12F1_Icc3\Phi_01B1}^{\alpha_{MI_51}} - 1 \right)} = 2.0814$$

TOPs 11T1/11T2:

$$Top_{51_11T1_11T2} := Top_{51_12F1_Icc3\Phi_01B1} - MC = 1.7814$$

$$Top_{50_11T1_11T2} := 0.1$$

Cálculo do Dial:

$$DT_{51_11T1_11T2} := \text{round} \left[\frac{Top_{51_11T1_11T2} \cdot \left(M_{51_11T1_11T2_Icc3\Phi_01B1}^{\alpha_{MI_51}} - 1 \right)}{\beta_{MI_51}}, 2 \right] = 0.99$$

$$IED_{11T1_11T2_51_MI(Icc)} := \begin{cases} DT_{51_11T1_11T2} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(\frac{Icc}{I_{pick_up51_11T1_11T2}} \right)^{\alpha_{MI_51}} - 1} & \text{if } Icc < I_{pick_up50_11T1_11T2} \\ Top_{50_11T1_11T2} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Função (50/51)N:

$$I_{pick_up51N_11T1_11T2} := (I_{21L1} + I_{21L2} + I_{21L3}) \cdot FS_{51N} = 78.45 \text{ A}$$

Múltiplo para um curto na barra 01B1:

$$M_{51N_11T1_11T2_Icc1\Phi_01B1} := \frac{Icc1\Phi_{01B1}}{I_{pick_up51N_11T1_11T2}} = 37.2007$$

$$M_{51N_11T1_11T2_Icc1\Phi_01B1} < M_{MaxRelé} = 0 \quad \text{Falso!}$$

$$M_{51N_11T1_11T2_Icc1\Phi_01B1} := M_{MaxRelé} - 5 = 25$$

$$I_{pick_up50N_11T1_11T2} := FS_{50} \cdot I_{pick_up51N_11T1_11T2} = 392.25 \text{ A}$$

$$I_{ajuste51N_11T1_11T2} := \frac{I_{pick_up51N_11T1_11T2}}{RTC_TC_11T1} = 0.7845 \text{ A}$$

$$I_{ajuste50N_11T1_11T2} := \frac{I_{pick_up50N_11T1_11T2}}{RTC_TC_11T1} = 3.9225 \text{ A}$$

Calculo do Top do Relé 12F1 - Função 50/51N:

Múltiplo para um curto na barra 01B1:

2.3 usado para que o DT do 11T1_11T2 fique abaixo de 1.5 que é o máximo

$$M_{51N_12F1_Icc1\Phi_01B1} := \frac{I_{pick_up50N_11T1_11T2} \cdot 2.1\sqrt{3}}{RTT \cdot I_{pick_up51N_12F1}} = 18.1878$$

$$M_{51N_12F1_Icc1\Phi_01B1} < M_{MaxRelé} = 1 \quad \text{Ok!}$$

Tempo de Atuação para um curto na barra 01B1:

$$Top_{51N_12F1_Icc1\Phi_01B1} := DT_{51N_12F1} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(M_{51N_12F1_Icc1\Phi_01B1}^{\alpha_{MI_51}} - 1 \right)} = 1.0839$$

TOPs 11T1/11T2:

$$Top_{51N_11T1_11T2} := Top_{51N_12F1_Icc1\Phi_01B1} - MC = 0.7839$$

$$Top_{50N_11T1_11T2} := 0.1$$

Cálculo do Dial:

$$DT_{51N_11T1_11T2} := \text{round} \left[\frac{Top_{51N_11T1_11T2} \cdot \left(M_{51N_11T1_11T2_Icc1\Phi_01B1}^{\alpha_{MI_51}} - 1 \right)}{\beta_{MI_51}}, 2 \right] = 1.39$$

$$IED_{11T1_11T2_51N_MI(Icc)} := \begin{cases} DT_{51N_11T1_11T2} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(\frac{Icc}{I_{pick_up51N_11T1_11T2}} \right)^{\alpha_{MI_51}} - 1} & \text{if } Icc < I_{pick_up50N_11T1_11T2} \\ Top_{50N_11T1_11T2} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Função 51G:

Relé de Sobrecorrente do Neutro do Transformador:

$$I_{pick_up51G_trafo} := I_{pick_up51N_11T1_11T2} = 78.45 \text{ A} \quad I_{ajuste51G_trafo} := \frac{I_{pick_up51G_trafo}}{RTC_TC_12F1} = 0.4903 \text{ A}$$

Relé R1:

Função 50/51:

$$I_{pick_up51_R1} := I_{21L1} \cdot FS_{51} = 130 \text{ A}$$

$$I_{pick_up51_R1} < \frac{I_{cc2\Phi_{01B1}}}{1.5} = 1 \quad \text{Ok!}$$

$$I_{pick_up51_R1} < \text{Primario_TC_R1} \cdot \text{FatorTermico} = 1 \quad \text{Ok!}$$

$$M_{51_R1_Icc3\Phi_{01B1}} := \frac{I_{cc3\Phi_{01B1}}}{I_{pick_up51_R1}} = 22.1749$$

$$M_{51_R1_Icc3\Phi_{01B1}} < M_{MaxRelé} = 1 \quad \text{Ok!}$$

$$I_{pick_up50_R1} := FS_{50} \cdot I_{pick_up51_R1} = 650 \text{ A}$$

$$I_{ajuste51_R1} := \frac{I_{pick_up51_R1}}{RTC_TC_R1} = 1.3 \text{ A}$$

$$I_{ajuste50_R1} := \frac{I_{pick_up50_R1}}{RTC_TC_R1} = 6.5 \text{ A}$$

$$Top_{50_R1} := 0.1$$

$$Top_{51_R1} := Top_{51_11T1_11T2} - MC - 0.6 = 0.8814 \quad \text{A margem de coordenação foi aumentada para 0.9s aqui para que o DT do R1 fosse menor que 1.5}$$

Cálculo do Dial:

$$DT_{51_R1} := \text{round} \left[\frac{Top_{51_R1} \cdot \left(M_{51_R1_Icc3\Phi_{01B1}}^{\alpha_{MI_{51}}} - 1 \right)}{\beta_{MI_{51}}}, 2 \right] = 1.38$$

$$IED_{R1_51_MI}(I_{cc}) := \begin{cases} DT_{51_R1} \cdot \frac{\beta_{MI_{51}}}{\left(\frac{I_{cc}}{I_{pick_up51_R1}} \right)^{\alpha_{MI_{51}}} - 1} & \text{if } I_{cc} < I_{pick_up50_R1} \\ Top_{50_R1} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Função (50/51)N:

$$I_{pick_up51N_R1} := I_{21L1} \cdot FS_{51N} = 30 \text{ A}$$

Múltiplo para um curto na barra 01B1:

$$M_{51N_R1_Icc1\Phi_{-}} := \frac{I_{cc1\Phi_{01B1}}}{I_{pick_up51N_R1}} = 97.2797$$

$$M_{51N_R1_Icc1\Phi_{-}} < M_{MaxRelé} = 0 \quad \text{Falso!}$$

Aplicando o múltiplo máximo:

$$M_{51N_R1_Icc1\Phi_{-}} := M_{MaxRelé} = 30$$

$$I_{pick_up50N_R1} := FS_{50} \cdot I_{pick_up51N_R1} = 150 \text{ A}$$

$$I_{ajuste51N_R1} := \frac{I_{pick_up51N_R1}}{RTC_TC_R1} = 0.3 \text{ A}$$

$$I_{ajuste50N_R1} := \frac{I_{pick_up50N_R1}}{RTC_TC_R1} = 1.5 \text{ A}$$

$$Top_{50N_R1} := 0.1$$

$$Top_{51N_R1} := Top_{51N_11T1_11T2} - MC = 0.4839$$

Cálculo do Dial:

$$DT_{51N_R1} := \text{round} \left[\frac{Top_{51N_R1} \cdot \left(M_{51N_R1_Icc1\Phi_{-}}^{\alpha_{MI_{51}}} - 1 \right)}{\beta_{MI_{51}}}, 2 \right] = 1.04$$

$$IED_{R1_51N_MI}(I_{cc}) := \begin{cases} DT_{51N_R1} \cdot \frac{\beta_{MI_{51}}}{\left(\frac{I_{cc}}{I_{pick_up51N_R1}} \right)^{\alpha_{MI_{51}}} - 1} & \text{if } I_{cc} < I_{pick_up50N_R1} \\ Top_{50N_R1} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Relés R2/R3:

Função 50/51:

$$I_{pick_up51_R2_R3} := I_{21L3} \cdot FS_{51} = 104.975 \text{ A}$$

$$I_{pick_up51_R2_R3} < \frac{I_{cc2\Phi_{01B1}}}{1.5} = 1 \quad \text{Ok!}$$

$$I_{pick_up51_R2_R3} < \text{Primario_TC_R3} \cdot \text{FatorTermico} = 1 \quad \text{Ok!}$$

$$M_{51_R2_R3_Icc3\Phi_{01B1}} := \frac{I_{cc3\Phi_{01B1}}}{I_{pick_up51_R2_R3}} = 27.4611$$

$$M_{51_R2_R3_Icc3\Phi_01B1} < M_{MaxRelé} = 1 \quad \text{Ok!}$$

$$I_{pick_up50_R2_R3} := FS_{50} \cdot I_{pick_up51_R2_R3} = 524.875 \text{ A}$$

$$I_{ajuste51_R2_R3} := \frac{I_{pick_up51_R2_R3}}{RTC_TC_R3} = 1.0498 \text{ A}$$

$$I_{ajuste50_R2_R3} := \frac{I_{pick_up50_R2_R3}}{RTC_TC_R3} = 5.2488 \text{ A}$$

$$Top_{50_R2_R3} := 0.1$$

$$Top_{51_R2_R3} := Top_{51_11T1_11T2} - MC - 0.8 = 0.6814 \quad \text{A margem de coordenação foi aumentada para 1.1s aqui para que o DT do R2 e do R3 fosse menor que 1.5}$$

Cálculo do Dial:

$$DT_{51_R2_R3} := \text{round} \left[\frac{Top_{51_R2_R3} \cdot \left(M_{51_R2_R3_Icc3\Phi_01B1}^{\alpha_{MI_51}} - 1 \right)}{\beta_{MI_51}}, 2 \right] = 1.34$$

$$IED_{R2_R3_51_MI}(Icc) := \begin{cases} DT_{51_R2_R3} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(\frac{Icc}{I_{pick_up51_R2_R3}} \right)^{\alpha_{MI_51}} - 1} & \text{if } Icc < I_{pick_up50_R2_R3} \\ Top_{50_R2_R3} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Função (50/51)N:

$$I_{pick_up51N_R2_R3} := I_{21L3} \cdot FS_{51N} = 24.225 \text{ A}$$

Múltiplo para um curto na barra 01B1:

$$M_{51N_R2_R3_Icc1\Phi_} := \frac{Icc1\Phi_{01B1}}{I_{pick_up51N_R2_R3}} = 120.4703$$

$$M_{51N_R2_R3_Icc1\Phi_} < M_{MaxRelé} = 0 \quad \text{Falso!}$$

Aplicando o múltiplo máximo:

$$M_{51N_R2_R3_Icc1\Phi} := M_{MaxRelé} = 30$$

$$I_{pick_up50N_R2_R3} := FS_{50} \cdot I_{pick_up51N_R2_R3} = 121.125 \text{ A}$$

$$I_{ajuste51N_R2_R3} := \frac{I_{pick_up51N_R2_R3}}{RTC_TC_R3} = 0.2422 \text{ A}$$

$$I_{ajuste50N_R2_R3} := \frac{I_{pick_up50N_R2_R3}}{RTC_TC_R3} = 1.2112 \text{ A}$$

$$Top_{50N_R2_R3} := 0.1$$

$$Top_{51N_R2_R3} := Top_{51N_11T1_11T2} - MC = 0.4839$$

Cálculo do Dial:

$$DT_{51N_R2_R3} := \text{round} \left[\frac{Top_{51N_R2_R3} \cdot \left(M_{51N_R2_R3_Icc1\Phi}^{\alpha_{MI_51}} - 1 \right)}{\beta_{MI_51}}, 2 \right] = 1.04$$

$$IED_{R2_R3_51N_MI}(Icc) := \begin{cases} DT_{51N_R2_R3} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(\frac{Icc}{I_{pick_up51N_R2_R3}} \right)^{\alpha_{MI_51}} - 1} & \text{if } Icc < I_{pick_up50N_R2_R3} \\ Top_{50N_R2_R3} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Estudo da proteção da distribuição:

Relé R9:

Função 50/51:

$$I_{pick_up51_R9} := I_{R9} \cdot FS_{51} = 47.8572 \text{ A}$$

$$I_{pick_up51_R9} < \frac{Icc2\Phi_{R9}}{1.5} = 1 \quad \text{Ok!}$$

$$I_{pick_up51_R9} < Primario_TC_R9 \cdot FatorTermico = 1 \quad \text{Ok!}$$

$$M_{51_R9_Icc3\Phi_} := \frac{Icc3\Phi_{R9}}{I_{pick_up51_R9}} = 53.9256$$

$$M_{51_R9_Icc3\Phi_} < M_{MaxRelé} = 0 \quad \text{Falso!}$$

Aplicando o múltiplo máximo:

$$M_{51_R9_Icc3\Phi} := M_{MaxRelé} = 30$$

$$I_{pick_up50_R9} := FS_{50} \cdot I_{pick_up51_R9} = 239.2858 \text{ A}$$

$$I_{ajuste51_R9} := \frac{I_{pick_up51_R9}}{RTC_TC_R9} = 0.4786 \text{ A}$$

$$I_{\text{ajuste50_R9}} := \frac{I_{\text{pick_up50_R9}}}{RTC_TC_R9} = 2.3929 \text{ A}$$

Calculo do Top do Relé R1 - Função 50/51:

Múltiplo para um curto no religador R9:

$$M_{51_R1_Icc3\Phi_R9} := \frac{I_{cc3\Phi R4}}{I_{\text{pick_up51_R1}}} = 19.7214$$

$$M_{51_R1_Icc3\Phi_R9} < M_{\text{MaxRelé}} = 1 \quad \text{Ok!}$$

Tempo de Atuação para um curto nos religadores R9:

$$Top_{51_R1_Icc3\Phi_R9} := DT_{51_R1} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(M_{51_R1_Icc3\Phi_R9}^{\alpha_{MI_51}} - 1 \right)} = 0.9951$$

TOPs R9:

$$Top_{50_R9} := 0.1$$

$$Top_{51_R9} := Top_{51_R1_Icc3\Phi_R9} - MC = 0.6951$$

Cálculo do Dial:

$$DT_{51_R9} := \text{round} \left[\frac{Top_{51_R9} \left(M_{51_R9_Icc3\Phi}^{\alpha_{MI_51}} - 1 \right)}{\beta_{MI_51}}, 2 \right] = 1.49$$

$$IED_{R9_51_MI}(I_{cc}) := \begin{cases} DT_{51_R9} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(\frac{I_{cc}}{I_{\text{pick_up51_R9}}} \right)^{\alpha_{MI_51}} - 1} & \text{if } I_{cc} < I_{\text{pick_up50_R9}} \\ Top_{50_R9} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Função (50/51)N:

$$I_{\text{pick_up51N_R9}} := I_{R9} \cdot FS_{51N} = 11.044 \text{ A}$$

$$I_{\text{pick_up51N_R9}} \leq 24 \text{ A} = 1 \quad \text{Ok!}$$

$$M_{51N_R9_Icc1\Phi} := \frac{I_{cc1\Phi R9}}{I_{\text{pick_up51N_R9}}} = 213.6824$$

$$M_{51N_R9_Icc1\Phi} < M_{\text{MaxRelé}} = 0 \quad \text{Falso!}$$

Aplicando o múltiplo máximo:

$$M_{51N_R9_Icc1\Phi} := M_{\text{MaxRelé}} = 30$$

$$I_{\text{pick_up50N_R9}} := FS_{50} \cdot I_{\text{pick_up51N_R9}} = 55.2198 \text{ A}$$

$$I_{\text{ajuste51N_R9}} := \frac{I_{\text{pick_up51N_R9}}}{RTC_TC_R9} = 0.1104 \text{ A}$$

$$I_{\text{ajuste50N_R9}} := \frac{I_{\text{pick_up50N_R9}}}{RTC_TC_R9} = 0.5522 \text{ A}$$

Calculo do Top do Relé R1 - Função 50/51N:

Múltiplo para um curto no religador R9:

$$M_{51N_R1_Icc1\Phi_R9} := \frac{I_{\text{pick_up50N_R9}}^9}{I_{\text{pick_up51N_R1}}} = 16.5659 \quad \text{9 usado para que o DT do R9 fique abaixo de 1.5 que é o máximo}$$

$$M_{51N_R1_Icc1\Phi_R9} < M_{\text{MaxRelé}} = 1 \quad \text{Ok!}$$

Tempo de Atuação para um curto no religador R9:

$$Top_{51N_R1_Icc1\Phi_R9} := DT_{51N_R1} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(M_{51N_R1_Icc1\Phi_R9}^{\alpha_{MI_51}} - 1 \right)} = 0.902$$

TOPs R9:

$$Top_{50N_R9} := 0.1$$

$$Top_{51N_R9} := Top_{51N_R1_Icc1\Phi_R9} - MC = 0.602$$

Cálculo do Dial:

$$DT_{51N_R9} := \text{round} \left[\frac{Top_{51N_R9} \left(M_{51N_R9_Icc1\Phi}^{\alpha_{MI_51}} - 1 \right)}{\beta_{MI_51}}, 2 \right] = 1.29$$

$$IED_{R9_51N_MI}(I_{cc}) := \begin{cases} DT_{51N_R9} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(\frac{I_{cc}}{I_{\text{pick_up51N_R9}}} \right)^{\alpha_{MI_51}} - 1} & \text{if } I_{cc} < I_{\text{pick_up50N_R9}} \\ Top_{50N_R9} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Relé R6:**Função 50/51:**

$$I_{pick_up51_R6} := I_{R6} \cdot FS_{51} = 29.9497 \text{ A}$$

$$I_{pick_up51_R6} < \frac{I_{cc2\Phi_{R6}}}{1.5} = 1 \quad \text{Ok!}$$

$$I_{pick_up51_R6} < \text{Primario_TC_R6} \cdot \text{FatorTermico} = 1 \quad \text{Ok!}$$

$$M_{51_R6_Icc3\Phi_} := \frac{I_{cc3\Phi_{R6}}}{I_{pick_up51_R6}} = 85.4052$$

$$M_{51_R6_Icc3\Phi_} < M_{\text{MaxRelé}} = 0 \quad \text{Falso!}$$

Aplicando o múltiplo máximo:

$$M_{51_R6_Icc3\Phi_} := M_{\text{MaxRelé}} = 30$$

$$I_{pick_up50_R6} := FS_{50} \cdot I_{pick_up51_R6} = 149.7483 \text{ A}$$

$$I_{ajuste51_R6} := \frac{I_{pick_up51_R6}}{RTC_TC_R6} = 0.2995 \text{ A}$$

$$I_{ajuste50_R6} := \frac{I_{pick_up50_R6}}{RTC_TC_R6} = 1.4975 \text{ A}$$

Calculo do Top do Relé R2 - Função 50/51:

Múltiplo para um curto no religador R6:

$$M_{51_R2_Icc3\Phi_R6} := \frac{I_{cc3\Phi_{R6}}}{I_{pick_up51_R2_R3}} = 24.3663$$

$$M_{51_R2_Icc3\Phi_R6} < M_{\text{MaxRelé}} = 1 \quad \text{Ok!}$$

Tempo de Atuação para um curto nos religadores R6:

$$Top_{51_R2_Icc3\Phi_R6} := DT_{51_R2_R3} \cdot \left(\frac{\beta_{MI_51}}{M_{51_R2_Icc3\Phi_R6}^{\alpha_{MI_51}} - 1} \right) = 0.7742$$

TOPs R6:

$$Top_{50_R6} := 0.1$$

$$Top_{51_R6} := Top_{51_R2_Icc3\Phi_R6} - MC = 0.4742$$

Cálculo do Dial:

$$DT_{51_R6} := \text{round} \left[\frac{Top_{51_R6} \cdot \left(M_{51_R6_Icc3\Phi}^{\alpha_{MI_51}} - 1 \right)}{\beta_{MI_51}}, 2 \right] = 1.02$$

$$IED_{R6_51_MI(Icc)} := \begin{cases} DT_{51_R6} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(\frac{I_{cc}}{I_{pick_up51_R6}} \right)^{\alpha_{MI_51}} - 1} & \text{if } I_{cc} < I_{pick_up50_R6} \\ Top_{50_R6} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Função (50/51)N:

$$I_{pick_up51N_R6} := I_{R6} \cdot FS_{51N} = 6.9115 \text{ A}$$

$$M_{51N_R6_Icc1\Phi_} := \frac{I_{cc1\Phi_{R6}}}{I_{pick_up51N_R6}} = 335.9944$$

$$M_{51N_R6_Icc1\Phi_} < M_{\text{MaxRelé}} = 0 \quad \text{Falso!}$$

Aplicando o múltiplo máximo:

$$M_{51N_R6_Icc1\Phi_} := M_{\text{MaxRelé}} = 30$$

$$I_{pick_up50N_R6} := FS_{50} \cdot I_{pick_up51N_R6} = 34.5573 \text{ A}$$

$$I_{ajuste51N_R6} := \frac{I_{pick_up51N_R6}}{RTC_TC_R6} = 0.0691 \text{ A}$$

$$I_{ajuste50N_R6} := \frac{I_{pick_up50N_R6}}{RTC_TC_R6} = 0.3456 \text{ A}$$

Calculo do Top do Relé R2 - Função 50/51N:

Múltiplo para um curto nos religadores R6:

$$M_{51N_R2_Icc1\Phi_R6_} := \frac{I_{cc1\Phi_{R6}}}{I_{pick_up51N_R2_R3}} = 95.8601$$

$$M_{51N_R2_Icc1\Phi_R6_} < M_{\text{MaxRelé}} = 0 \quad \text{Falso!}$$

$$M_{51N_R2_Icc1\Phi_R6_} := M_{\text{MaxRelé}} = 30$$

Tempo de Atuação para um curto nos religadores R6:

$$Top_{51N_R2_Icc1\Phi_R6} := DT_{51N_R2_R3} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(M_{51N_R2_Icc1\Phi_R6}^{\alpha_{MI_51}} - 1 \right)} = 0.4841$$

TOPs R6:

$$Top_{50N_R6} := 0.1$$

$$Top_{51N_R6} := Top_{51N_R2_Icc1\Phi_R6} - MC = 0.1841$$

Cálculo do Dial:

$$DT_{51N_R6} := \text{round} \left[\frac{Top_{51N_R6} \cdot \left(M_{51N_R6_Icc1\Phi}^{\alpha_{MI_51}} - 1 \right)}{\beta_{MI_51}}, 2 \right] = 0.4$$

$$IED_{R6_51N_MI}(Icc) := \begin{cases} DT_{51N_R6} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(\frac{Icc}{I_{pick_up51N_R6}} \right)^{\alpha_{MI_51}} - 1} & \text{if } Icc < I_{pick_up50N_R6} \\ Top_{50N_R6} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Relé R4:

Função 50/51:

$$I_{pick_up51_R4} := I_{R4} \cdot FS_{51} = 58.7305 \text{ A}$$

$$I_{pick_up51_R4} < \frac{I_{cc2\Phi R4}}{1.5} = 1 \quad \text{Ok!}$$

$$I_{pick_up51_R4} < \text{Primario_TC_R4} \cdot \text{FatorTermico} = 1 \quad \text{Ok!}$$

$$M_{51_R4_Icc3\Phi} := \frac{I_{cc3\Phi R4}}{I_{pick_up51_R4}} = 43.6534$$

$$M_{51_R4_Icc3\Phi} < M_{\text{MaxRelé}} = 0 \quad \text{Falso!}$$

Aplicando o múltiplo máximo:

$$M_{51_R4_Icc3\Phi} := M_{\text{MaxRelé}} = 30$$

$$I_{pick_up50_R4} := FS_{50} \cdot I_{pick_up51_R4} = 293.6525 \text{ A}$$

$$I_{ajuste51_R4} := \frac{I_{pick_up51_R4}}{RTC_TC_R4} = 0.5873 \text{ A}$$

$$I_{ajuste50_R4} := \frac{I_{pick_up50_R4}}{RTC_TC_R4} = 2.9365 \text{ A}$$

Cálculo do Top do Relé R3 - Função 50/51:

Múltiplo para um curto nos religadores R4:

$$M_{51_R3_Icc3\Phi_R4} := \frac{I_{cc3\Phi R4}}{I_{pick_up51_R2_R3}} = 24.4228$$

$$M_{51_R3_Icc3\Phi_R4} < M_{\text{MaxRelé}} = 1 \quad \text{Ok!}$$

Tempo de Atuação para um curto nos religadores R4:

$$Top_{51_R3_Icc3\Phi_R4} := DT_{51_R2_R3} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(M_{51_R3_Icc3\Phi_R4}^{\alpha_{MI_51}} - 1 \right)} = 0.7723$$

TOPs R4:

$$Top_{50_R4} := 0.1$$

$$Top_{51_R4} := Top_{51_R3_Icc3\Phi_R4} - MC = 0.4723$$

Cálculo do Dial:

$$DT_{51_R4} := \text{round} \left[\frac{Top_{51_R4} \cdot \left(M_{51_R4_Icc3\Phi}^{\alpha_{MI_51}} - 1 \right)}{\beta_{MI_51}}, 2 \right] = 1.01$$

$$IED_{R4_51_MI}(Icc) := \begin{cases} DT_{51_R4} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(\frac{Icc}{I_{pick_up51_R4}} \right)^{\alpha_{MI_51}} - 1} & \text{if } Icc < I_{pick_up50_R4} \\ Top_{50_R4} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Função (50/51)N:

$$I_{pick_up51N_R4} := I_{R4} \cdot FS_{51N} = 13.5532 \text{ A}$$

$$M_{51N_R4_Icc1\Phi_} := \frac{I_{cc1\Phi_{R4}}}{I_{pick_up51N_R4}} = 172.0578$$

$$M_{51N_R4_Icc1\Phi_} < M_{MaxRelé} = 0 \quad \text{Falso!}$$

Aplicando o múltiplo máximo:

$$M_{51N_R4_Icc1\Phi_} := M_{MaxRelé} = 30$$

$$I_{pick_up50N_R4} := FS_{50} \cdot I_{pick_up51N_R4} = 67.766 \text{ A}$$

$$I_{ajuste51N_R4} := \frac{I_{pick_up51N_R4}}{RTC_TC_R4} = 0.1355 \text{ A}$$

$$I_{ajuste50N_R4} := \frac{I_{pick_up50N_R4}}{RTC_TC_R4} = 0.6777 \text{ A}$$

Cálculo do Top do Relé R3 - Função 50/51N:

Múltiplo para um curto nos religadores R4:

$$M_{51N_R3_Icc1\Phi_R4_} := \frac{I_{cc1\Phi_{R4}}}{I_{pick_up51N_R2_R3}} = 96.2614$$

$$M_{51N_R3_Icc1\Phi_R4_} < M_{MaxRelé} = 0 \quad \text{Falso!}$$

$$M_{51N_R3_Icc1\Phi_R4_} := M_{MaxRelé} = 30$$

Tempo de Atuação para um curto nos religadores R4:

$$Top_{51N_R3_Icc1\Phi_R4_} := DT_{51N_R2_R3} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(M_{51N_R3_Icc1\Phi_R4_}^{\alpha_{MI_51}} - 1 \right)} = 0.4841$$

TOPs R4:

$$Top_{50N_R4} := 0.1$$

$$Top_{51N_R4} := Top_{51N_R3_Icc1\Phi_R4_} - MC = 0.1841$$

Cálculo do Dial:

$$DT_{51N_R4} := \text{round} \left[\frac{Top_{51N_R4} \cdot \left(M_{51N_R4_Icc1\Phi_}^{\alpha_{MI_51}} - 1 \right)}{\beta_{MI_51}}, 2 \right] = 0.4$$

$$IED_{R4_51N_MI(Icc)} := \begin{cases} DT_{51N_R4} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(\frac{I_{cc}}{I_{pick_up51N_R4}} \right)^{\alpha_{MI_51}} - 1} & \text{if } I_{cc} < I_{pick_up50N_R4} \\ Top_{50N_R4} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Relé R5:**Função 50/51:**

$$I_{pick_up51_R5} := I_{R5} \cdot FS_{51} = 16.9255 \text{ A}$$

$$I_{pick_up51_R5} < \frac{I_{cc2\Phi_{R5}}}{1.5} = 1 \quad \text{Ok!}$$

$$I_{pick_up51_R5} < \text{Primario_TC_R5} \cdot \text{FatorTermico} = 1 \quad \text{Ok!}$$

$$M_{51_R5_Icc3\Phi_} := \frac{I_{cc3\Phi_{R5}}}{I_{pick_up51_R5}} = 146.5275$$

$$M_{51_R5_Icc3\Phi_} < M_{MaxRelé} = 0 \quad \text{Falso!}$$

Aplicando o múltiplo máximo:

$$M_{51_R5_Icc3\Phi_} := M_{MaxRelé} = 30$$

$$I_{pick_up50_R5} := FS_{50} \cdot I_{pick_up51_R5} = 84.6274 \text{ A}$$

$$I_{ajuste51_R5} := \frac{I_{pick_up51_R5}}{RTC_TC_R5} = 0.1693 \text{ A}$$

$$I_{ajuste50_R5} := \frac{I_{pick_up50_R5}}{RTC_TC_R5} = 0.8463 \text{ A}$$

Cálculo do Top do Relé R4 - Função 50/51:

Múltiplo para um curto no religador R5:

$$M_{51_R4_Icc3\Phi_R5_} := \frac{I_{cc3\Phi_{R5}}}{I_{pick_up51_R4}} = 42.2276$$

$$M_{51_R4_Icc3\Phi_R5_} < M_{MaxRelé} = 0 \quad \text{Falso!}$$

$$M_{51_R4_Icc3\Phi_R5_} := M_{MaxRelé} = 30$$

Tempo de Atuação para um curto no religador R5:

$$Top_{51_R4_Icc3\Phi_R5} := DT_{51_R4} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(M_{51_R4_Icc3\Phi_R5}^{\alpha_{MI_51}} - 1 \right)} = 0.4702$$

TOPs R5:

$$Top_{50_R5} := 0.1$$

$$Top_{51_R5} := Top_{51_R4_Icc3\Phi_R5} - 0.3 = 0.1702$$

Cálculo do Dial:

$$DT_{51_R5} := \text{round} \left[\frac{Top_{51_R5} \cdot \left(M_{51_R5_Icc3\Phi}^{\alpha_{MI_51}} - 1 \right)}{\beta_{MI_51}}, 2 \right] = 0.37$$

$$IED_{R5_51_MI}(Icc) := \begin{cases} DT_{51_R5} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(\frac{Icc}{I_{pick_up51_R5}} \right)^{\alpha_{MI_51}} - 1} & \text{if } Icc < I_{pick_up50_R5} \\ Top_{50_R5} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Função (50/51)N:

$$I_{pick_up51N_R5} := I_{R5} \cdot FS_{51N} = 3.9059 \text{ A}$$

$$M_{51N_R5_Icc1\Phi_} := \frac{Icc1\Phi_{R5}}{I_{pick_up51N_R5}} = 562.7949$$

$$M_{51N_R5_Icc1\Phi_} < M_{MaxRelé} = 0 \quad \text{Falso!}$$

Aplicando o múltiplo máximo:

$$M_{51N_R5_Icc1\Phi_} := M_{MaxRelé} = 30$$

$$I_{pick_up50N_R5} := FS_{50} \cdot I_{pick_up51N_R5} = 19.5294 \text{ A}$$

$$I_{ajuste51N_R5} := \frac{I_{pick_up51N_R5}}{RTC_TC_R5} = 0.0391 \text{ A}$$

$$I_{ajuste50N_R5} := \frac{I_{pick_up50N_R5}}{RTC_TC_R5} = 0.1953 \text{ A}$$

Cálculo do Top do Relé R4 - Função 50/51N:

Múltiplo para um curto no religador R5:

$$I_{pick_up50N_R5} \cdot 8 < Icc1\Phi_{R5} = 1$$

$$M_{51N_R4_Icc1\Phi_R5} := \frac{I_{pick_up50N_R5} \cdot 10}{I_{pick_up51N_R4}} = 14.4094$$

10 usado para que o DT do R5 fique abaixo de 1.5 que é o máximo

$$M_{51N_R4_Icc1\Phi_R5} < M_{MaxRelé} = 1 \quad \text{Ok!}$$

Tempo de Atuação para um curto no religador R5:

$$Top_{51N_R4_Icc1\Phi_R5} := DT_{51N_R4} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(M_{51N_R4_Icc1\Phi_R5}^{\alpha_{MI_51}} - 1 \right)} = 0.4027$$

TOPs R5:

$$Top_{50N_R5} := 0.1$$

$$Top_{51N_R5} := Top_{51N_R4_Icc1\Phi_R5} - MC = 0.1027$$

Cálculo do Dial:

$$DT_{51N_R5} := \text{round} \left[\frac{Top_{51N_R5} \cdot \left(M_{51N_R5_Icc1\Phi}^{\alpha_{MI_51}} - 1 \right)}{\beta_{MI_51}}, 2 \right] = 0.22$$

$$IED_{R5_51N_MI}(Icc) := \begin{cases} DT_{51N_R5} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(\frac{Icc}{I_{pick_up51N_R5}} \right)^{\alpha_{MI_51}} - 1} & \text{if } Icc < I_{pick_up50N_R5} \\ Top_{50N_R5} & \text{otherwise} \end{cases}$$

FUNÇÃO DE SOBRECORRENTE DE NEUTRO SENSÍVEL (51NS):

Como não foi informado o maior valor histórico de desequilíbrio da rede elétrica para essa instalação, utilizaremos um valor padrão para esse ajuste.

$$I_{\text{pick_up_51NS_R1_R2_R3}} := 15 \text{ A}$$

$$I_{\text{ajuste_51NS_R1_R2_R3}} := \frac{I_{\text{pick_up_51NS_R1_R2_R3}}}{\text{RTC_TC_R1}} = 0.15 \text{ A}$$

$$\text{Top}_{51\text{NS_R1_R2_R3}} := 60 \text{ s}$$

FUNÇÃO DE DESEQUILÍBRIO DE CORRENTE DIRECIONAL (46 - I2):

Define-se a corrente de ajuste da função 46(I2) pelo critério da carga máxima esperada, com um pequeno acréscimo. Optamos por adotar um acréscimo de 10%. O ajuste de tempo é 60s.

$$I_{\text{ajuste46_I2_R1}} := \text{Round}\left(\frac{I_{21L1} \cdot 1.1}{\text{RTC_TC_R1}}, 0.01 \text{ A}\right) = 1.1 \text{ A}$$

$$I_{\text{ajuste46_I2_R2_R3}} := \text{Round}\left(\frac{I_{21L3} \cdot 1.1}{\text{RTC_TC_R3}}, 0.01 \text{ A}\right) = 0.89 \text{ A}$$

$$I_{\text{pick_up_46_I2_R1}} := I_{\text{ajuste46_I2_R1}} \cdot \text{RTC_TC_R1} = 110 \text{ A}$$

$$I_{\text{pick_up_46_I2_R2_R3}} := I_{\text{ajuste46_I2_R2_R3}} \cdot \text{RTC_TC_R3} = 89 \text{ A}$$

$$\text{Top}_{46_I2_R1} := 60 \text{ s}$$

$$\text{Top}_{46_I2_R2_R3} := 60 \text{ s}$$

FUNÇÃO DE DESEQUILÍBRIO QUEBRA DE CONDUTOR (46 - I2/I1):

Define-se a corrente de ajuste da função 46(I2/I1) pelo critério da carga máxima esperada, utilizando um fator de 0,3 e ajuste de tempo de 70 segundos.

$$I_{\text{ajuste46_I2_I1_R1}} := \text{Round}\left(\frac{I_{21L1} \cdot 0.3}{\text{RTC_TC_R1}}, 0.01 \text{ A}\right) = 0.3 \text{ A}$$

$$I_{\text{ajuste46_I2_I1_R2_R3}} := \text{Round}\left(\frac{I_{21L3} \cdot 0.3}{\text{RTC_TC_R3}}, 0.01 \text{ A}\right) = 0.24 \text{ A}$$

$$I_{\text{pick_up_46_I2_I1_R1}} := I_{\text{ajuste46_I2_I1_R1}} \cdot \text{RTC_TC_R1} = 30 \text{ A}$$

$$I_{\text{pick_up_46_I2_I1_R2_R3}} := I_{\text{ajuste46_I2_I1_R2_R3}} \cdot \text{RTC_TC_R3} = 24 \text{ A}$$

$$\text{Top}_{46_I2_I1_R1} := 70 \text{ s}$$

$$\text{Top}_{46_I2_I1_R2_R3} := 70 \text{ s}$$

ESTUDO DA PROTEÇÃO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DO CAMPUS DO PICI DA UFC COM INTEGRAÇÃO DE UMA UFV

CURTO-CIRCUITOS SIMULADOS NO EASY POWER:

EM 02B1:

$I_{cc3\Phi_{02B1}} := 15705A$
 $I_{cc2\Phi_{02B1}} := 13601A$
 $I_{cc2\Phi_{terra_{02B1}}} := 14348A$
 $I_{cc1\Phi_{02B1}} := 10582A$
 $I_{cc1\Phi_{min_{02B1}}} := 0A$

EM 01B1:

$I_{cc3\Phi_{01B1}} := 2997A$
 $I_{cc2\Phi_{01B1}} := 2596A$
 $I_{cc2\Phi_{terra_{01B1}}} := 3003A$
 $I_{cc1\Phi_{01B1}} := 2995A$
 $I_{cc1\Phi_{min_{01B1}}} := 0A$

EM R4:

$I_{cc3\Phi_{R4}} := 2653A$
 $I_{cc2\Phi_{R4}} := 2298A$
 $I_{cc2\Phi_{terra_{R4}}} := 2548A$
 $I_{cc1\Phi_{R4}} := 2380A$
 $I_{cc1\Phi_{min_{R4}}} := 0A$

EM R5:

$I_{cc3\Phi_{R5}} := 2563A$
 $I_{cc2\Phi_{R5}} := 2220A$
 $I_{cc2\Phi_{terra_{R5}}} := 2424A$
 $I_{cc1\Phi_{R5}} := 2241A$
 $I_{cc1\Phi_{min_{R5}}} := 0A$

EM R6:

$I_{cc3\Phi_{R6}} := 2647A$
 $I_{cc2\Phi_{R6}} := 2292A$
 $I_{cc2\Phi_{terra_{R6}}} := 2541A$
 $I_{cc1\Phi_{R6}} := 2370A$
 $I_{cc1\Phi_{min_{R6}}} := 0A$

EM R9:

$I_{cc3\Phi_{R9}} := 2671A$
 $I_{cc2\Phi_{R9}} := 2313A$
 $I_{cc2\Phi_{terra_{R9}}} := 2570A$
 $I_{cc1\Phi_{R9}} := 2409A$
 $I_{cc1\Phi_{min_{R9}}} := 0A$

EM BARRA DA UFV:

$I_{cc3\Phi_{UFV}} := 2997A$
 $I_{cc2\Phi_{UFV}} := 2596A$
 $I_{cc2\Phi_{terra_{UFV}}} := 3003A$
 $I_{cc1\Phi_{UFV}} := 2995A$
 $I_{cc1\Phi_{min_{UFV}}} := 0A$

DIMENSIONAMENTO DOS TC's:

$FS_{TC} := 20$ $FT := 1.2$

TC EM 12F1:

Corrente de carga: $\frac{(I_{21L1} + I_{21L2} + I_{21L3})}{RTT} = 52.3A$

Maior corrente de curto-circuito: $I_{cc3\Phi_{02B1}} = 1.5705 \times 10^4 A$ $\frac{I_{cc3\Phi_{02B1}}}{FS_{TC}} = 785.25A$

Baseando-se no critério de corrente de carga, optou-se por adotar um TC de 800-5

Especificação do TC: $800 - 5 A$ $RTC_{TC_{12F1}} := \frac{800}{5} = 160$ $Primario_{TC_{12F1}} := 800A$

TC EM 11T1 e 11T2:

Corrente de carga: $I_{21L1} + I_{21L2} + I_{21L3} = 261.5A$

Maior corrente de curto-circuito: $I_{cc3\Phi_{01B1}} = 2.997 \times 10^3 A$ $\frac{I_{cc3\Phi_{01B1}}}{FS_{TC}} = 149.85A$

Capacidade do condutor: $I_{MaxCondutor} = 470A$

$Primario_{TC_{11T1}} := 500A$

$Primario_{TC_{11T2}} := 500A$

Baseando-se no critério de capacidade do condutor, optou-se por adotar um TC de 500-5

Especificação do TC: $500 - 5 A$ $RTC_{TC_{11T1}} := \frac{500}{5} = 100$

Especificação do TC: $500 - 5 A$ $RTC_{TC_{11T2}} := \frac{500}{5} = 100$

TC EM R1:

Corrente de carga: $I_{R1} = 100A$

Maior corrente de curto-circuito: $I_{cc3\Phi_{01B1}} = 2.997 \times 10^3 A$ $\frac{I_{cc3\Phi_{01B1}}}{FS_{TC}} = 149.85A$

Capacidade do condutor: $I_{MaxCondutor} = 470A$

Baseando-se no critério de capacidade do condutor, optou-se por adotar um TC de 500-5

Especificação do TC: $500 - 5 A$ $RTC_{TC_{R1}} := \frac{500}{5} = 100$ $Primario_{TC_{R1}} := 500A$

TC EM R2:

Corrente de carga: $I_{R2} = 80.75 \text{ A}$

Maior corrente de curto-circuito: $I_{cc3\Phi_{01B1}} = 2.997 \times 10^3 \text{ A}$ $\frac{I_{cc3\Phi_{01B1}}}{FS_{TC}} = 149.85 \text{ A}$

Capacidade do condutor: $I_{MaxCondutor} = 470 \text{ A}$

Baseando-se no critério de capacidade do condutor, optou-se por adotar um TC de 500-5

Especificação do TC: $500 - 5 \text{ A}$ $RTC_{TC_R2} := \frac{500}{5} = 100$ $Primario_TC_R2 := 500 \text{ A}$

TC EM R3:

Corrente de carga: $I_{R3} = 80.75 \text{ A}$

Maior corrente de curto-circuito: $I_{cc3\Phi_{01B1}} = 2.997 \times 10^3 \text{ A}$ $\frac{I_{cc3\Phi_{01B1}}}{FS_{TC}} = 149.85 \text{ A}$

Capacidade do condutor: $I_{MaxCondutor} = 470 \text{ A}$

Baseando-se no critério de capacidade do condutor, optou-se por adotar um TC de 500-5

Especificação do TC: $500 - 5 \text{ A}$ $RTC_{TC_R3} := \frac{500}{5} = 100$ $Primario_TC_R3 := 500 \text{ A}$

TC EM R4:

Corrente de carga: $I_{R4} = 45.1773 \text{ A}$

Maior corrente de curto-circuito: $I_{cc3\Phi_{R4}} = 2.653 \times 10^3 \text{ A}$ $\frac{I_{cc3\Phi_{R4}}}{FS_{TC}} = 132.65 \text{ A}$

Capacidade do condutor: $I_{MaxCondutor} = 470 \text{ A}$

Baseando-se no critério de capacidade do condutor, optou-se por adotar um TC de 500-5

Especificação do TC: $500 - 5 \text{ A}$ $RTC_{TC_R4} := \frac{500}{5} = 100$ $Primario_TC_R4 := 500 \text{ A}$

TC EM R5:

Corrente de carga: $I_{R5} = 13.0196 \text{ A}$

Maior corrente de curto-circuito: $I_{cc3\Phi_{R5}} = 2.563 \times 10^3 \text{ A}$ $\frac{I_{cc3\Phi_{R5}}}{FS_{TC}} = 128.15 \text{ A}$

Capacidade do condutor: $I_{MaxCondutor} = 470 \text{ A}$

Baseando-se no critério de capacidade do condutor, optou-se por adotar um TC de 500-5

Especificação do TC: $500 - 5 \text{ A}$ $RTC_{TC_R5} := \frac{500}{5} = 100$ $Primario_TC_R5 := 500 \text{ A}$

TC EM R6:

Corrente de carga: $I_{R6} = 23.0382 \text{ A}$

Maior corrente de curto-circuito: $I_{cc3\Phi_{R6}} = 2.647 \times 10^3 \text{ A}$ $\frac{I_{cc3\Phi_{R6}}}{FS_{TC}} = 132.35 \text{ A}$

Capacidade do condutor: $I_{MaxCondutor} = 470 \text{ A}$

Baseando-se no critério de capacidade do condutor, optou-se por adotar um TC de 500-5

Especificação do TC: $500 - 5 \text{ A}$ $RTC_{TC_R6} := \frac{500}{5} = 100$ $Primario_TC_R6 := 500 \text{ A}$

TC EM R9:

Corrente de carga: $I_{R9} = 36.8132 \text{ A}$

Maior corrente de curto-circuito: $I_{cc3\Phi_{R9}} = 2.671 \times 10^3 \text{ A}$ $\frac{I_{cc3\Phi_{R9}}}{FS_{TC}} = 133.55 \text{ A}$

Capacidade do condutor: $I_{MaxCondutor} = 470 \text{ A}$

Baseando-se no critério de capacidade do condutor, optou-se por adotar um TC de 500-5

Especificação do TC: $500 - 5 \text{ A}$ $RTC_{TC_R9} := \frac{500}{5} = 100$ $Primario_TC_R9 := 500 \text{ A}$

FUNÇÃO DE SOBRECORRENTE (50/51 E 50/51N):

Valores de α e β :

$\alpha_{MI_51} := 1$ $\beta_{MI_51} := 13.5$

$M_{MaxRelé} := 30$ $FS_{51} := 1.3$ $FS_{51N} := 0.3$ $FS_{50} := 5$

Margem de coordenação: $MC := 0.3$

Estudo da proteção da subestação:

Relé PCI 12L9:

Função 50/51:

$$I_{pick_up51_12L9} := 1070.4A \quad I_{ajuste51_12L9} := 4.46A \quad DT_{51_12L9} := 0.1$$

$$IED_{12L9_51_MI}(I_{cc}) := DT_{51_12L9} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(\frac{I_{cc}}{I_{pick_up51_12L9}}\right)^{\alpha_{MI_51}} - 1}$$

Função (50/51)N:

$$I_{pick_up51N_12L9} := 100.8A \quad I_{ajuste51N_12L9} := 0.42A \quad DT_{51N_12L9} := 0.55$$

$$IED_{12L9_51N_MI}(I_{cc}) := DT_{51N_12L9} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(\frac{I_{cc}}{I_{pick_up51N_12L9}}\right)^{\alpha_{MI_51}} - 1}$$

Relé 12F1:

Função 50/51:

$$I_{prim} := 6.25W \cdot \frac{10^6}{69000V \cdot \sqrt{3}} = 52.2962 A$$

$$I_{pick_up51_12F1} := \left[(I_{prim}) \cdot FS_{51} \right] = 67.9851 A$$

$$I_{cc1\Phi_{01B1_refletido}} := \frac{I_{cc1\Phi_{01B1}}}{RTT \cdot \sqrt{3}} = 345.8328 A$$

$$I_{pick_up51_12F1} > I_{cc1\Phi_{01B1_refletido}} = 0$$

$$I_{pick_up51_12F1} := I_{cc1\Phi_{01B1_refletido}} \cdot 1.1 = 380.4161 A \quad \text{Usando 10\% a mais da corrente de cc monofásico na barra de 13,8kV refletida}$$

$$I_{pick_up51_12F1} < \frac{I_{cc2\Phi_{02B1}}}{1.5} = 1 \quad \text{Ok!}$$

$$I_{pick_up51_12F1} < \text{Primario_TC_12F1} \cdot \text{FatorTermico} = 1 \quad \text{Ok!}$$

Múltiplo para um curto na barra 02B1:

$$M_{51_12F1_Icc3\Phi_{02B1}} := \frac{I_{cc3\Phi_{02B1}}}{I_{pick_up51_12F1}} = 41.2837$$

$$M_{51_12F1_Icc3\Phi_{02B1}} < M_{MaxRelé} = 0 \quad \text{Falso!}$$

Aplicando o múltiplo máximo:

$$M_{51_12F1_Icc3\Phi_{02B1}} := M_{MaxRelé} = 30$$

$$I_{pick_up50_12F1} := FS_{50} \cdot I_{pick_up51_12F1} = 1.9021 \times 10^3 A$$

$$I_{carga_AT} := \frac{(I_{21L1} + I_{21L2} + I_{21L3})}{RTT} = 52.3 A$$

$$I_{rush} := I_{carga_AT} \cdot 8 = 418.4 A$$

$$I_{pick_up50_12F1} > I_{rush} = 1 \quad \text{Ok!}$$

$$I_{ajuste51_12F1} := \frac{I_{pick_up51_12F1}}{RTC_TC_12F1} = 2.3776 A$$

$$I_{ajuste50_12F1} := \frac{I_{pick_up50_12F1}}{RTC_TC_12F1} = 11.888 A$$

Calculo do Top do Relé 12L9 - Função 50/51:

Múltiplo para um curto na barra 02B1:

$$M_{51_12L9_Icc3\Phi_{02B1}} := \frac{I_{pick_up50_12F1} \cdot 2.4}{I_{pick_up51_12L9}} = 4.2648 \quad \text{Aplicando um multiplicador de 2,4 ao pickup da 50 do 12F1 para garantir coordenação}$$

Tempo de Atuação para um curto na barra 02B1:

$$Top_{51_12L9_Icc3\Phi_{02B1}} := DT_{51_12L9} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(M_{51_12L9_Icc3\Phi_{02B1}}^{\alpha_{MI_51}} - 1\right)} = 0.4135$$

TOPs 12F1:

$$Top_{50_12F1} := 0.0001 \quad \text{Valor ilustrativo para geração do gráfico. Na verdade o Top50_12F1 é zero.}$$

$$Top_{51_12F1_Icc3\Phi_{02B1}} := Top_{51_12L9_Icc3\Phi_{02B1}} - MC = 0.1135$$

Cálculo do Dial:

$$DT_{51_12F1} := \text{round} \left[\frac{Top_{51_12F1_Icc3\Phi_{02B1}} \cdot \left(M_{51_12F1_Icc3\Phi_{02B1}}^{\alpha_{MI_51}} - 1\right)}{\beta_{MI_51}}, 2 \right] = 0.24$$

$$IED_{12F1_51_MI}(I_{cc}) := \begin{cases} DT_{51_12F1} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(\frac{I_{cc}}{I_{pick_up51_12F1}} \right)^{\alpha_{MI_51}} - 1} & \text{if } I_{cc} < I_{pick_up50_12F1} \\ Top_{50_12F1} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Função (50/51)N:

$$I_{pick_up51N_12F1} := I_{prim} \cdot FS_{51N} = 15.6889 \text{ A}$$

$$M_{51N_12F1_Icc1\Phi_02B1} := \frac{I_{cc1\Phi_02B1}}{I_{pick_up51N_12F1}} = 674.4911$$

$$M_{51N_12F1_Icc1\Phi_02B1} < M_{MaxRelé} = 0 \text{ Falso!}$$

Aplicando o múltiplo máximo:

$$M_{51N_12F1_Icc1\Phi_02B1} := M_{MaxRelé} = 30$$

$$I_{pick_up50N_12F1} := I_{cc1\Phi_02B1} \cdot 0.1 = 1.0582 \times 10^3 \text{ A}$$

Usando 10% da corrente de cc da barra de 69kV

$$I_{ajuste51N_12F1} := \frac{I_{pick_up51N_12F1}}{RTC_TC_12F1} = 0.0981 \text{ A}$$

$$I_{ajuste50N_12F1} := \frac{I_{pick_up50N_12F1}}{RTC_TC_12F1} = 6.6138 \text{ A}$$

Calculo do Top do Relé 12L9 - Função 50/51N:

Múltiplo para um curto na barra 02B1:

$$M_{51N_12L9_Icc1\Phi_02B1} := \frac{I_{pick_up50N_12F1}^{1.2}}{I_{pick_up51N_12L9}} = 12.5976 \quad 1.2 \text{ usado para que o DT do 12F1 fique abaixo de 1.5 que é o máximo}$$

Tempo de Atuação para um curto na barra 02B1:

$$Top_{51N_12L9_Icc1\Phi_02B1} := DT_{51N_12L9} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(M_{51N_12L9_Icc1\Phi_02B1}^{\alpha_{MI_51}} - 1 \right)} = 0.6402$$

TOPs 12F1:

$$Top_{50N_12F1} := 0.0001 \quad \text{Valor ilustrativo para geração do gráfico. Na verdade o Top}_{50N_12F1} \text{ é zero.}$$

$$Top_{51N_12F1_Icc3\Phi_02B1} := Top_{51N_12L9_Icc1\Phi_02B1} - MC = 0.3402$$

Cálculo do Dial:

$$DT_{51N_12F1} := \text{round} \left[\frac{Top_{51N_12L9_Icc1\Phi_02B1} \cdot \left(M_{51N_12F1_Icc1\Phi_02B1}^{\alpha_{MI_51}} - 1 \right)}{\beta_{MI_51}}, 2 \right] = 1.38$$

$$IED_{12F1_51N_MI}(I_{cc}) := \begin{cases} DT_{51N_12F1} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(\frac{I_{cc}}{I_{pick_up51N_12F1}} \right)^{\alpha_{MI_51}} - 1} & \text{if } I_{cc} < I_{pick_up50N_12F1} \\ Top_{50N_12F1} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Relés 11T1 E 11T2:

Função 50/51:

$$I_{pick_up51_11T1_11T2} := (I_{21L1} + I_{21L2} + I_{21L3}) \cdot FS_{51} = 339.95 \text{ A}$$

$$I_{pick_up51_11T1_11T2} < \frac{I_{cc2\Phi_01B1}}{1.5} = 1 \quad \text{Ok!}$$

$$I_{pick_up51_11T1_11T2} < \text{Primario_TC_11T1} \cdot \text{FatorTermico} = 1 \quad \text{Ok!}$$

Múltiplo para um curto na barra 01B1:

$$M_{51_11T1_11T2_Icc3\Phi_01B1} := \frac{I_{cc3\Phi_01B1}}{I_{pick_up51_11T1_11T2}} = 8.816$$

$$M_{51_11T1_11T2_Icc3\Phi_01B1} < M_{MaxRelé} = 1 \quad \text{Ok!}$$

$$I_{pick_up50_11T1_11T2} := FS_{50} \cdot I_{pick_up51_11T1_11T2} = 1.6998 \times 10^3 \text{ A}$$

$$I_{ajuste51_11T1_11T2} := \frac{I_{pick_up51_11T1_11T2}}{RTC_TC_11T1} = 3.3995 \text{ A}$$

$$I_{ajuste50_11T1_11T2} := \frac{I_{pick_up50_11T1_11T2}}{RTC_TC_11T1} = 16.9975 \text{ A}$$

Calculo do Top do Relé 12F1 - Função 50/51:

Múltiplo para um curto na barra 01B1:

$$M_{51_12F1_Icc3\Phi_01B1} := \frac{I_{pick_up50_11T1_11T2}^3}{RTT \cdot I_{pick_up51_12F1}} = 2.6809 \quad \text{3 usado para que o DT do 11T1 e 11T2 fique abaixo de 1.5 que é o máximo}$$

$$M_{51_12F1_Icc3\Phi_01B1} < M_{MaxRelé} = 1 \quad \text{Ok!}$$

Tempo de Atuação para um curto na barra 01B1:

$$Top_{51_12F1_Icc3\Phi_01B1} := DT_{51_12F1} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(M_{51_12F1_Icc3\Phi_01B1}^{\alpha_{MI_51}} - 1 \right)} = 1.9276$$

TOPs 11T1/11T2:

$$Top_{51_11T1_11T2} := Top_{51_12F1_Icc3\Phi_01B1} - MC = 1.6276$$

$$Top_{50_11T1_11T2} := 0.1$$

Cálculo do Dial:

$$DT_{51_11T1_11T2} := \text{round} \left[\frac{Top_{51_11T1_11T2} \cdot \left(M_{51_11T1_11T2_Icc3\Phi_01B1}^{\alpha_{MI_51}} - 1 \right)}{\beta_{MI_51}}, 2 \right] = 0.94$$

$$IED_{11T1_11T2_51_MI}(Icc) := \begin{cases} DT_{51_11T1_11T2} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(\frac{Icc}{I_{pick_up51_11T1_11T2}} \right)^{\alpha_{MI_51}} - 1} & \text{if } Icc < I_{pick_up50_11T1_11T2} \\ Top_{50_11T1_11T2} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Função (50/51)N:

$$I_{pick_up51N_11T1_11T2} := (I_{21L1} + I_{21L2} + I_{21L3}) \cdot FS_{51N} = 78.45 \text{ A}$$

Múltiplo para um curto na barra 01B1:

$$M_{51N_11T1_11T2_Icc1\Phi_01B1} := \frac{Icc1\Phi_{01B1}}{I_{pick_up51N_11T1_11T2}} = 38.1772$$

$$M_{51N_11T1_11T2_Icc1\Phi_01B1} < M_{MaxRelé} = 0 \quad \text{Falso!}$$

$$M_{51N_11T1_11T2_Icc1\Phi_01B1} := M_{MaxRelé} - 5 = 25$$

$$I_{pick_up50N_11T1_11T2} := FS_{50} \cdot I_{pick_up51N_11T1_11T2} = 392.25 \text{ A}$$

$$I_{ajuste51N_11T1_11T2} := \frac{I_{pick_up51N_11T1_11T2}}{RTC_TC_{11T1}} = 0.7845 \text{ A}$$

$$I_{ajuste50N_11T1_11T2} := \frac{I_{pick_up50N_11T1_11T2}}{RTC_TC_{11T1}} = 3.9225 \text{ A}$$

Calculo do Top do Relé 12F1 - Função 50/51N:

Múltiplo para um curto na barra 01B1:

2.3 usado para que o DT do 11T1_11T2 fique abaixo de 1.5 que é o máximo

$$M_{51N_12F1_Icc1\Phi_01B1} := \frac{I_{pick_up50N_11T1_11T2} \cdot 2.1\sqrt{3}}{RTT \cdot I_{pick_up51N_12F1}} = 18.1878$$

$$M_{51N_12F1_Icc1\Phi_01B1} < M_{MaxRelé} = 1 \quad \text{Ok!}$$

Tempo de Atuação para um curto na barra 01B1:

$$Top_{51N_12F1_Icc1\Phi_01B1} := DT_{51N_12F1} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(M_{51N_12F1_Icc1\Phi_01B1}^{\alpha_{MI_51}} - 1 \right)} = 1.0839$$

TOPs 11T1/11T2:

$$Top_{51N_11T1_11T2} := Top_{51N_12F1_Icc1\Phi_01B1} - MC = 0.7839$$

$$Top_{50N_11T1_11T2} := 0.1$$

Cálculo do Dial:

$$DT_{51N_11T1_11T2} := \text{round} \left[\frac{Top_{51N_11T1_11T2} \cdot \left(M_{51N_11T1_11T2_Icc1\Phi_01B1}^{\alpha_{MI_51}} - 1 \right)}{\beta_{MI_51}}, 2 \right] = 1.39$$

$$IED_{11T1_11T2_51N_MI}(Icc) := \begin{cases} DT_{51N_11T1_11T2} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(\frac{Icc}{I_{pick_up51N_11T1_11T2}} \right)^{\alpha_{MI_51}} - 1} & \text{if } Icc < I_{pick_up50N_11T1_11T2} \\ Top_{50N_11T1_11T2} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Função 51G:

Relé de Sobrecorrente do Neutro do Transformador:

$$I_{pick_up51G_trafo} := I_{pick_up51N_11T1_11T2} = 78.45 \text{ A} \quad I_{ajuste51G_trafo} := \frac{I_{pick_up51G_trafo}}{RTC_TC_{12F1}} = 0.4903 \text{ A}$$

Relé R1:

Função 50/51:

$$I_{pick_up51_R1} := I_{21L1} \cdot FS_{51} = 130 \text{ A}$$

$$I_{pick_up51_R1} < \frac{I_{cc2\Phi_{01B1}}}{1.5} = 1 \quad \text{Ok!}$$

$$I_{pick_up51_R1} < \text{Primario_TC_R1} \cdot \text{FatorTermico} = 1 \quad \text{Ok!}$$

$$M_{51_R1_Icc3\Phi_{01B1}} := \frac{I_{cc3\Phi_{01B1}}}{I_{pick_up51_R1}} = 23.0538$$

$$M_{51_R1_Icc3\Phi_{01B1}} < M_{\text{MaxRelé}} = 1 \quad \text{Ok!}$$

$$I_{pick_up50_R1} := FS_{50} \cdot I_{pick_up51_R1} = 650 \text{ A}$$

$$I_{ajuste51_R1} := \frac{I_{pick_up51_R1}}{RTC_TC_R1} = 1.3 \text{ A}$$

$$I_{ajuste50_R1} := \frac{I_{pick_up50_R1}}{RTC_TC_R1} = 6.5 \text{ A}$$

$$Top_{50_R1} := 0.1$$

$$Top_{51_R1} := Top_{51_11T1_11T2} - MC - 0.6 = 0.7276 \quad \text{A margem de coordenação foi aumentada para 0.9s aqui para que o DT do R1 fosse menor que 1.5}$$

Cálculo do Dial:

$$DT_{51_R1} := \text{round} \left[\frac{Top_{51_R1} \cdot \left(M_{51_R1_Icc3\Phi_{01B1}}^{\alpha_{MI_51}} - 1 \right)}{\beta_{MI_51}}, 2 \right] = 1.19$$

$$IED_{R1_51_MI}(I_{cc}) := \begin{cases} DT_{51_R1} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(\frac{I_{cc}}{I_{pick_up51_R1}} \right)^{\alpha_{MI_51}} - 1} & \text{if } I_{cc} < I_{pick_up50_R1} \\ Top_{50_R1} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Função (50/51)N:

$$I_{pick_up51N_R1} := I_{21L1} \cdot FS_{51N} = 30 \text{ A}$$

Múltiplo para um curto na barra 01B1:

$$M_{51N_R1_Icc1\Phi_{-}} := \frac{I_{cc1\Phi_{01B1}}}{I_{pick_up51N_R1}} = 99.8333$$

$$M_{51N_R1_Icc1\Phi_{-}} < M_{\text{MaxRelé}} = 0 \quad \text{Falso!}$$

Aplicando o múltiplo máximo:

$$M_{51N_R1_Icc1\Phi_{-}} := M_{\text{MaxRelé}} = 30$$

$$I_{pick_up50N_R1} := FS_{50} \cdot I_{pick_up51N_R1} = 150 \text{ A}$$

$$I_{ajuste51N_R1} := \frac{I_{pick_up51N_R1}}{RTC_TC_R1} = 0.3 \text{ A}$$

$$I_{ajuste50N_R1} := \frac{I_{pick_up50N_R1}}{RTC_TC_R1} = 1.5 \text{ A}$$

$$Top_{50N_R1} := 0.1$$

$$Top_{51N_R1} := Top_{51N_11T1_11T2} - MC = 0.4839$$

Cálculo do Dial:

$$DT_{51N_R1} := \text{round} \left[\frac{Top_{51N_R1} \cdot \left(M_{51N_R1_Icc1\Phi_{-}}^{\alpha_{MI_51}} - 1 \right)}{\beta_{MI_51}}, 2 \right] = 1.04$$

$$IED_{R1_51N_MI}(I_{cc}) := \begin{cases} DT_{51N_R1} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(\frac{I_{cc}}{I_{pick_up51N_R1}} \right)^{\alpha_{MI_51}} - 1} & \text{if } I_{cc} < I_{pick_up50N_R1} \\ Top_{50N_R1} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Relés R2/R3:

Função 50/51:

$$I_{pick_up51_R2_R3} := I_{21L3} \cdot FS_{51} = 104.975 \text{ A}$$

$$I_{pick_up51_R2_R3} < \frac{I_{cc2\Phi_{01B1}}}{1.5} = 1 \quad \text{Ok!}$$

$$I_{pick_up51_R2_R3} < \text{Primario_TC_R3} \cdot \text{FatorTermico} = 1 \quad \text{Ok!}$$

$$M_{51_R2_R3_Icc3\Phi_{01B1}} := \frac{I_{cc3\Phi_{01B1}}}{I_{pick_up51_R2_R3}} = 28.5497$$

$$M_{51_R2_R3_Icc3\Phi_01B1} < M_{MaxRelé} = 1 \quad \text{Ok!}$$

$$I_{pick_up50_R2_R3} := FS_{50} \cdot I_{pick_up51_R2_R3} = 524.875 \text{ A}$$

$$I_{ajuste51_R2_R3} := \frac{I_{pick_up51_R2_R3}}{RTC_TC_R3} = 1.0498 \text{ A}$$

$$I_{ajuste50_R2_R3} := \frac{I_{pick_up50_R2_R3}}{RTC_TC_R3} = 5.2488 \text{ A}$$

$$Top_{50_R2_R3} := 0.1$$

$$Top_{51_R2_R3} := Top_{51_11T1_11T2} - MC - 0.8 = 0.5276$$

A margem de coordenação foi aumentada para 1.1s aqui para que o DT do R2 e do R3 fosse menor que 1.5

Cálculo do Dial:

$$DT_{51_R2_R3} := \text{round} \left[\frac{Top_{51_R2_R3} \cdot \left(M_{51_R2_R3_Icc3\Phi_01B1}^{\alpha_{MI_51}} - 1 \right)}{\beta_{MI_51}}, 2 \right] = 1.08$$

$$IED_{R2_R3_51_MI}(Icc) := \begin{cases} DT_{51_R2_R3} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(\frac{Icc}{I_{pick_up51_R2_R3}} \right)^{\alpha_{MI_51}} - 1} & \text{if } Icc < I_{pick_up50_R2_R3} \\ Top_{50_R2_R3} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Função (50/51)N:

$$I_{pick_up51N_R2_R3} := I_{21L3} \cdot FS_{51N} = 24.225 \text{ A}$$

Múltiplo para um curto na barra 01B1:

$$M_{51N_R2_R3_Icc1\Phi_} := \frac{Icc1\Phi_{01B1}}{I_{pick_up51N_R2_R3}} = 123.6326$$

$$M_{51N_R2_R3_Icc1\Phi_} < M_{MaxRelé} = 0 \quad \text{Falso!}$$

Aplicando o múltiplo máximo:

$$M_{51N_R2_R3_Icc1\Phi_} := M_{MaxRelé} = 30$$

$$I_{pick_up50N_R2_R3} := FS_{50} \cdot I_{pick_up51N_R2_R3} = 121.125 \text{ A}$$

$$I_{ajuste51N_R2_R3} := \frac{I_{pick_up51N_R2_R3}}{RTC_TC_R3} = 0.2422 \text{ A}$$

$$I_{ajuste50N_R2_R3} := \frac{I_{pick_up50N_R2_R3}}{RTC_TC_R3} = 1.2112 \text{ A}$$

$$Top_{50N_R2_R3} := 0.1$$

$$Top_{51N_R2_R3} := Top_{51N_11T1_11T2} - MC = 0.4839$$

Cálculo do Dial:

$$DT_{51N_R2_R3} := \text{round} \left[\frac{Top_{51N_R2_R3} \cdot \left(M_{51N_R2_R3_Icc1\Phi_}^{\alpha_{MI_51}} - 1 \right)}{\beta_{MI_51}}, 2 \right] = 1.04$$

$$IED_{R2_R3_51N_MI}(Icc) := \begin{cases} DT_{51N_R2_R3} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(\frac{Icc}{I_{pick_up51N_R2_R3}} \right)^{\alpha_{MI_51}} - 1} & \text{if } Icc < I_{pick_up50N_R2_R3} \\ Top_{50N_R2_R3} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Estudo da proteção da distribuição:

Relé R9:

Função 50/51:

$$I_{pick_up51_R9} := I_{R9} \cdot FS_{51} = 47.8572 \text{ A}$$

$$I_{pick_up51_R9} < \frac{Icc2\Phi_{R9}}{1.5} = 1 \quad \text{Ok!}$$

$$I_{pick_up51_R9} < Primario_TC_R9 \cdot FatorTermico = 1 \quad \text{Ok!}$$

$$M_{51_R9_Icc3\Phi_} := \frac{Icc3\Phi_{R9}}{I_{pick_up51_R9}} = 55.8119$$

$$M_{51_R9_Icc3\Phi_} < M_{MaxRelé} = 0 \quad \text{Falso!}$$

Aplicando o múltiplo máximo:

$$M_{51_R9_Icc3\Phi_} := M_{MaxRelé} = 30$$

$$I_{pick_up50_R9} := FS_{50} \cdot I_{pick_up51_R9} = 239.2858 \text{ A}$$

$$I_{ajuste51_R9} := \frac{I_{pick_up51_R9}}{RTC_TC_R9} = 0.4786 \text{ A}$$

$$I_{ajuste50_R9} := \frac{I_{pick_up50_R9}}{RTC_TC_R9} = 2.3929 \text{ A}$$

Calculo do Top do Relé R1 - Função 50/51:

Múltiplo para um curto no religador R9:

$$M_{51_R1_Icc3\Phi_R9} := \frac{I_{cc3\Phi R4}}{I_{pick_up51_R1}} = 20.4077$$

$$M_{51_R1_Icc3\Phi_R9} < M_{MaxRelé} = 1 \quad \text{Ok!}$$

Tempo de Atuação para um curto nos religadores R9:

$$Top_{51_R1_Icc3\Phi_R9} := DT_{51_R1} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(M_{51_R1_Icc3\Phi_R9}^{\alpha_{MI_51}} - 1 \right)} = 0.8278$$

TOPs R9:

$$Top_{50_R9} := 0.1$$

$$Top_{51_R9} := Top_{51_R1_Icc3\Phi_R9} - MC = 0.5278$$

Cálculo do Dial:

$$DT_{51_R9} := \text{round} \left[\frac{Top_{51_R9} \cdot \left(M_{51_R9_Icc3\Phi}^{\alpha_{MI_51}} - 1 \right)}{\beta_{MI_51}}, 2 \right] = 1.13$$

$$IED_{R9_51_MI(Icc)} := \begin{cases} DT_{51_R9} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(\frac{I_{cc}}{I_{pick_up51_R9}} \right)^{\alpha_{MI_51}} - 1} & \text{if } I_{cc} < I_{pick_up50_R9} \\ Top_{50_R9} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Função (50/51)N:

$$I_{pick_up51N_R9} := I_{R9} \cdot FS_{51N} = 11.044 \text{ A}$$

$$I_{pick_up51N_R9} \leq 24 \text{ A} = 1 \quad \text{Ok!}$$

$$M_{51N_R9_Icc1\Phi} := \frac{I_{cc1\Phi R9}}{I_{pick_up51N_R9}} = 218.1283$$

$$M_{51N_R9_Icc1\Phi} < M_{MaxRelé} = 0 \quad \text{Falso!}$$

Aplicando o múltiplo máximo:

$$M_{51N_R9_Icc1\Phi} := M_{MaxRelé} = 30$$

$$I_{pick_up50N_R9} := FS_{50} \cdot I_{pick_up51N_R9} = 55.2198 \text{ A}$$

$$I_{ajuste51N_R9} := \frac{I_{pick_up51N_R9}}{RTC_TC_R9} = 0.1104 \text{ A}$$

$$I_{ajuste50N_R9} := \frac{I_{pick_up50N_R9}}{RTC_TC_R9} = 0.5522 \text{ A}$$

Calculo do Top do Relé R1 - Função 50/51N:

Múltiplo para um curto no religador R9:

$$M_{51N_R1_Icc1\Phi_R9} := \frac{I_{pick_up50N_R9}^9}{I_{pick_up51N_R1}} = 16.5659 \quad \text{9 usado para que o DT do R9 fique abaixo de 1.5 que é o máximo}$$

$$M_{51N_R1_Icc1\Phi_R9} < M_{MaxRelé} = 1 \quad \text{Ok!}$$

Tempo de Atuação para um curto no religador R9:

$$Top_{51N_R1_Icc1\Phi_R9} := DT_{51N_R1} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(M_{51N_R1_Icc1\Phi_R9}^{\alpha_{MI_51}} - 1 \right)} = 0.902$$

TOPs R9:

$$Top_{50N_R9} := 0.1$$

$$Top_{51N_R9} := Top_{51N_R1_Icc1\Phi_R9} - MC = 0.602$$

Cálculo do Dial:

$$DT_{51N_R9} := \text{round} \left[\frac{Top_{51N_R9} \cdot \left(M_{51N_R9_Icc1\Phi}^{\alpha_{MI_51}} - 1 \right)}{\beta_{MI_51}}, 2 \right] = 1.29$$

$$IED_{R9_51N_MI(Icc)} := \begin{cases} DT_{51N_R9} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(\frac{I_{cc}}{I_{pick_up51N_R9}} \right)^{\alpha_{MI_51}} - 1} & \text{if } I_{cc} < I_{pick_up50N_R9} \\ Top_{50N_R9} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Relé R6:**Função 50/51:**

$$I_{pick_up51_R6} := I_{R6} \cdot FS_{51} = 29.9497 \text{ A}$$

$$I_{pick_up51_R6} < \frac{I_{cc2}\Phi_{R6}}{1.5} = 1 \quad \text{Ok!}$$

$$I_{pick_up51_R6} < \text{Primario_TC_R6} \cdot \text{FatorTermico} = 1 \quad \text{Ok!}$$

$$M_{51_R6_Icc3\Phi_} := \frac{I_{cc3}\Phi_{R6}}{I_{pick_up51_R6}} = 88.3816$$

$$M_{51_R6_Icc3\Phi_} < M_{MaxRelé} = 0 \quad \text{Falso!}$$

Aplicando o múltiplo máximo:

$$M_{51_R6_Icc3\Phi_} := M_{MaxRelé} = 30$$

$$I_{pick_up50_R6} := FS_{50} \cdot I_{pick_up51_R6} = 149.7483 \text{ A}$$

$$I_{ajuste51_R6} := \frac{I_{pick_up51_R6}}{RTC_TC_R6} = 0.2995 \text{ A}$$

$$I_{ajuste50_R6} := \frac{I_{pick_up50_R6}}{RTC_TC_R6} = 1.4975 \text{ A}$$

Cálculo do Top do Relé R2 - Função 50/51:

Múltiplo para um curto no religador R6:

$$M_{51_R2_Icc3\Phi_R6} := \frac{I_{cc3}\Phi_{R6}}{I_{pick_up51_R2_R3}} = 25.2155$$

$$M_{51_R2_Icc3\Phi_R6} < M_{MaxRelé} = 1 \quad \text{Ok!}$$

Tempo de Atuação para um curto nos religadores R6:

$$Top_{51_R2_Icc3\Phi_R6} := DT_{51_R2_R3} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(M_{51_R2_Icc3\Phi_R6}^{\alpha_{MI_51}} - 1 \right)} = 0.6021$$

TOPs R6:

$$Top_{50_R6} := 0.1$$

$$Top_{51_R6} := Top_{51_R2_Icc3\Phi_R6} - MC = 0.3021$$

Cálculo do Dial:

$$DT_{51_R6} := \text{round} \left[\frac{Top_{51_R6} \cdot \left(M_{51_R6_Icc3\Phi}^{\alpha_{MI_51}} - 1 \right)}{\beta_{MI_51}}, 2 \right] = 0.65$$

$$IED_{R6_51_MI(Icc)} := \begin{cases} DT_{51_R6} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(\frac{I_{cc}}{I_{pick_up51_R6}} \right)^{\alpha_{MI_51}} - 1} & \text{if } I_{cc} < I_{pick_up50_R6} \\ Top_{50_R6} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Função (50/51)N:

$$I_{pick_up51N_R6} := I_{R6} \cdot FS_{51N} = 6.9115 \text{ A}$$

$$M_{51N_R6_Icc1\Phi_} := \frac{I_{cc1}\Phi_{R6}}{I_{pick_up51N_R6}} = 342.9087$$

$$M_{51N_R6_Icc1\Phi_} < M_{MaxRelé} = 0 \quad \text{Falso!}$$

Aplicando o múltiplo máximo:

$$M_{51N_R6_Icc1\Phi_} := M_{MaxRelé} = 30$$

$$I_{pick_up50N_R6} := FS_{50} \cdot I_{pick_up51N_R6} = 34.5573 \text{ A}$$

$$I_{ajuste51N_R6} := \frac{I_{pick_up51N_R6}}{RTC_TC_R6} = 0.0691 \text{ A}$$

$$I_{ajuste50N_R6} := \frac{I_{pick_up50N_R6}}{RTC_TC_R6} = 0.3456 \text{ A}$$

Cálculo do Top do Relé R2 - Função 50/51N:

Múltiplo para um curto nos religadores R6:

$$M_{51N_R2_Icc1\Phi_R6_} := \frac{I_{cc1}\Phi_{R6}}{I_{pick_up51N_R2_R3}} = 97.8328$$

$$M_{51N_R2_Icc1\Phi_R6_} < M_{MaxRelé} = 0 \quad \text{Falso!}$$

$$M_{51N_R2_Icc1\Phi_R6_} := M_{MaxRelé} = 30$$

Tempo de Atuação para um curto nos religadores R6:

$$Top_{51N_R2_Icc1\Phi_R6} := DT_{51N_R2_R3} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(M_{51N_R2_Icc1\Phi_R6}^{\alpha_{MI_51}} - 1 \right)} = 0.4841$$

TOPs R6:

$$Top_{50N_R6} := 0.1$$

$$Top_{51N_R6} := Top_{51N_R2_Icc1\Phi_R6} - MC = 0.1841$$

Cálculo do Dial:

$$DT_{51N_R6} := \text{round} \left[\frac{Top_{51N_R6} \cdot \left(M_{51N_R6_Icc1\Phi}^{\alpha_{MI_51}} - 1 \right)}{\beta_{MI_51}}, 2 \right] = 0.4$$

$$IED_{R6_51N_MI(Icc)} := \begin{cases} DT_{51N_R6} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(\frac{Icc}{I_{pick_up51N_R6}} \right)^{\alpha_{MI_51}} - 1} & \text{if } Icc < I_{pick_up50N_R6} \\ Top_{50N_R6} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Relé R4:

Função 50/51:

$$I_{pick_up51_R4} := I_{R4} \cdot FS_{51} = 58.7305 \text{ A}$$

$$I_{pick_up51_R4} < \frac{Icc2\Phi_{R4}}{1.5} = 1 \quad \text{Ok!}$$

$$I_{pick_up51_R4} < \text{Primario_TC_R4} \cdot \text{FatorTermico} = 1 \quad \text{Ok!}$$

$$M_{51_R4_Icc3\Phi_} := \frac{Icc3\Phi_{R4}}{I_{pick_up51_R4}} = 45.1724$$

$$M_{51_R4_Icc3\Phi_} < M_{\text{MaxRelé}} = 0 \quad \text{Falso!}$$

Aplicando o múltiplo máximo:

$$M_{51_R4_Icc3\Phi_} := M_{\text{MaxRelé}} = 30$$

$$I_{pick_up50_R4} := FS_{50} \cdot I_{pick_up51_R4} = 293.6525 \text{ A}$$

$$I_{ajuste51_R4} := \frac{I_{pick_up51_R4}}{RTC_TC_R4} = 0.5873 \text{ A}$$

$$I_{ajuste50_R4} := \frac{I_{pick_up50_R4}}{RTC_TC_R4} = 2.9365 \text{ A}$$

Cálculo do Top do Relé R3 - Função 50/51:

Múltiplo para um curto nos religadores R4:

$$M_{51_R3_Icc3\Phi_R4} := \frac{Icc3\Phi_{R4}}{I_{pick_up51_R2_R3}} = 25.2727$$

$$M_{51_R3_Icc3\Phi_R4} < M_{\text{MaxRelé}} = 1 \quad \text{Ok!}$$

Tempo de Atuação para um curto nos religadores R4:

$$Top_{51_R3_Icc3\Phi_R4} := DT_{51_R2_R3} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(M_{51_R3_Icc3\Phi_R4}^{\alpha_{MI_51}} - 1 \right)} = 0.6007$$

TOPs R4:

$$Top_{50_R4} := 0.1$$

$$Top_{51_R4} := Top_{51_R3_Icc3\Phi_R4} - MC = 0.3007$$

Cálculo do Dial:

$$DT_{51_R4} := \text{round} \left[\frac{Top_{51_R4} \cdot \left(M_{51_R4_Icc3\Phi}^{\alpha_{MI_51}} - 1 \right)}{\beta_{MI_51}}, 2 \right] = 0.65$$

$$IED_{R4_51_MI(Icc)} := \begin{cases} DT_{51_R4} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(\frac{Icc}{I_{pick_up51_R4}} \right)^{\alpha_{MI_51}} - 1} & \text{if } Icc < I_{pick_up50_R4} \\ Top_{50_R4} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Função (50/51)N:

$$I_{pick_up51N_R4} := I_{R4} \cdot FS_{51N} = 13.5532 \text{ A}$$

$$M_{51N_R4_Icc1\Phi_} := \frac{I_{cc1\Phi_{R4}}}{I_{pick_up51N_R4}} = 175.6044$$

$$M_{51N_R4_Icc1\Phi_} < M_{MaxRelé} = 0 \quad \text{Falso!}$$

Aplicando o múltiplo máximo:

$$M_{51N_R4_Icc1\Phi_} := M_{MaxRelé} = 30$$

$$I_{pick_up50N_R4} := FS_{50} \cdot I_{pick_up51N_R4} = 67.766 \text{ A}$$

$$I_{ajuste51N_R4} := \frac{I_{pick_up51N_R4}}{RTC_TC_R4} = 0.1355 \text{ A}$$

$$I_{ajuste50N_R4} := \frac{I_{pick_up50N_R4}}{RTC_TC_R4} = 0.6777 \text{ A}$$

Cálculo do Top do Relé R3 - Função 50/51N:

Múltiplo para um curto nos religadores R4:

$$M_{51N_R3_Icc1\Phi_R4_} := \frac{I_{cc1\Phi_{R4}}}{I_{pick_up51N_R2_R3}} = 98.2456$$

$$M_{51N_R3_Icc1\Phi_R4_} < M_{MaxRelé} = 0 \quad \text{Falso!}$$

$$M_{51N_R3_Icc1\Phi_R4_} := M_{MaxRelé} = 30$$

Tempo de Atuação para um curto nos religadores R4:

$$Top_{51N_R3_Icc1\Phi_R4_} := DT_{51N_R2_R3} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(M_{51N_R3_Icc1\Phi_R4_}^{\alpha_{MI_51}} - 1 \right)} = 0.4841$$

TOPs R4:

$$Top_{50N_R4} := 0.1$$

$$Top_{51N_R4} := Top_{51N_R3_Icc1\Phi_R4_} - MC = 0.1841$$

Cálculo do Dial:

$$DT_{51N_R4} := \text{round} \left[\frac{Top_{51N_R4} \cdot \left(M_{51N_R4_Icc1\Phi_}^{\alpha_{MI_51}} - 1 \right)}{\beta_{MI_51}}, 2 \right] = 0.4$$

$$IED_{R4_51N_MI(Icc)} := \begin{cases} DT_{51N_R4} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(\frac{I_{cc}}{I_{pick_up51N_R4}} \right)^{\alpha_{MI_51}} - 1} & \text{if } I_{cc} < I_{pick_up50N_R4} \\ Top_{50N_R4} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Relé R5:**Função 50/51:**

$$I_{pick_up51_R5} := I_{R5} \cdot FS_{51} = 16.9255 \text{ A}$$

$$I_{pick_up51_R5} < \frac{I_{cc2\Phi_{R5}}}{1.5} = 1 \quad \text{Ok!}$$

$$I_{pick_up51_R5} < \text{Primario_TC_R5} \cdot \text{FatorTermico} = 1 \quad \text{Ok!}$$

$$M_{51_R5_Icc3\Phi_} := \frac{I_{cc3\Phi_{R5}}}{I_{pick_up51_R5}} = 151.4285$$

$$M_{51_R5_Icc3\Phi_} < M_{MaxRelé} = 0 \quad \text{Falso!}$$

Aplicando o múltiplo máximo:

$$M_{51_R5_Icc3\Phi_} := M_{MaxRelé} = 30$$

$$I_{pick_up50_R5} := FS_{50} \cdot I_{pick_up51_R5} = 84.6274 \text{ A}$$

$$I_{ajuste51_R5} := \frac{I_{pick_up51_R5}}{RTC_TC_R5} = 0.1693 \text{ A}$$

$$I_{ajuste50_R5} := \frac{I_{pick_up50_R5}}{RTC_TC_R5} = 0.8463 \text{ A}$$

Cálculo do Top do Relé R4 - Função 50/51:

Múltiplo para um curto no religador R5:

$$M_{51_R4_Icc3\Phi_R5_} := \frac{I_{cc3\Phi_{R5}}}{I_{pick_up51_R4}} = 43.64$$

$$M_{51_R4_Icc3\Phi_R5_} < M_{MaxRelé} = 0 \quad \text{Falso!}$$

$$M_{51_R4_Icc3\Phi_R5_} := M_{MaxRelé} - 10 = 20$$

Tempo de Atuação para um curto no religador R5:

$$Top_{51_R4_Icc3\Phi_R5} := DT_{51_R4} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(M_{51_R4_Icc3\Phi_R5}^{\alpha_{MI_51}} - 1 \right)} = 0.4618$$

TOPs R5:

$$Top_{50_R5} := 0.1$$

$$Top_{51_R5} := Top_{51_R4_Icc3\Phi_R5} - 0.3 = 0.1618$$

Cálculo do Dial:

$$DT_{51_R5} := \text{round} \left[\frac{Top_{51_R5} \cdot \left(M_{51_R5_Icc3\Phi}^{\alpha_{MI_51}} - 1 \right)}{\beta_{MI_51}}, 2 \right] = 0.35$$

$$IED_{R5_51_MI}(Icc) := \begin{cases} DT_{51_R5} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(\frac{Icc}{I_{pick_up51_R5}} \right)^{\alpha_{MI_51}} - 1} & \text{if } Icc < I_{pick_up50_R5} \\ Top_{50_R5} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Função (50/51)N:

$$I_{pick_up51N_R5} := I_{R5} \cdot FS_{51N} = 3.9059 \text{ A}$$

$$M_{51N_R5_Icc1\Phi_} := \frac{Icc1\Phi_{R5}}{I_{pick_up51N_R5}} = 573.7503$$

$$M_{51N_R5_Icc1\Phi_} < M_{MaxRelé} = 0 \quad \text{Falso!}$$

Aplicando o múltiplo máximo:

$$M_{51N_R5_Icc1\Phi_} := M_{MaxRelé} = 30$$

$$I_{pick_up50N_R5} := FS_{50} \cdot I_{pick_up51N_R5} = 19.5294 \text{ A}$$

$$I_{ajuste51N_R5} := \frac{I_{pick_up51N_R5}}{RTC_TC_R5} = 0.0391 \text{ A}$$

$$I_{ajuste50N_R5} := \frac{I_{pick_up50N_R5}}{RTC_TC_R5} = 0.1953 \text{ A}$$

Calculo do Top do Relé R4 - Função 50/51N:

Múltiplo para um curto no religador R5:

$$I_{pick_up50N_R5} \cdot 8 < Icc1\Phi_{R5} = 1$$

$$M_{51N_R4_Icc1\Phi_R5} := \frac{I_{pick_up50N_R5}^{10}}{I_{pick_up51N_R4}} = 14.4094$$

10 usado para que o DT do R5 fique abaixo de 1.5 que é o máximo

$$M_{51N_R4_Icc1\Phi_R5} < M_{MaxRelé} = 1 \quad \text{Ok!}$$

Tempo de Atuação para um curto no religador R5:

$$Top_{51N_R4_Icc1\Phi_R5} := DT_{51N_R4} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(M_{51N_R4_Icc1\Phi_R5}^{\alpha_{MI_51}} - 1 \right)} = 0.4027$$

TOPs R5:

$$Top_{50N_R5} := 0.1$$

$$Top_{51N_R5} := Top_{51N_R4_Icc1\Phi_R5} - MC = 0.1027$$

Cálculo do Dial:

$$DT_{51N_R5} := \text{round} \left[\frac{Top_{51N_R5} \cdot \left(M_{51N_R5_Icc1\Phi}^{\alpha_{MI_51}} - 1 \right)}{\beta_{MI_51}}, 2 \right] = 0.22$$

$$IED_{R5_51N_MI}(Icc) := \begin{cases} DT_{51N_R5} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(\frac{Icc}{I_{pick_up51N_R5}} \right)^{\alpha_{MI_51}} - 1} & \text{if } Icc < I_{pick_up50N_R5} \\ Top_{50N_R5} & \text{otherwise} \end{cases}$$

FUNÇÃO DE SOBRECORRENTE DE NEUTRO SENSÍVEL (51NS):

Como não foi informado o maior valor histórico de desequilíbrio da rede elétrica para essa instalação, utilizaremos um valor padrão para esse ajuste.

$$I_{pick_up_51NS_R1_R2_R3} := 15A$$

$$I_{ajuste_51NS_R1_R2_R3} := \frac{I_{pick_up_51NS_R1_R2_R3}}{RTC_TC_R1} = 0.15 A$$

$$Top51NS_R1_R2_R3 := 60s$$

FUNÇÃO DE DESEQUILÍBRIO DE CORRENTE DIRECIONAL (46 - I2):

Define-se a corrente de ajuste da função 46(I2) pelo critério da carga máxima esperada, com um pequeno acréscimo. Optamos por adotar um acréscimo de 10%. O ajuste de tempo é 60s.

$$I_{ajuste46_I2_R1} := Round\left(\frac{I_{21L1} \cdot 1.1}{RTC_TC_R1}, 0.01A\right) = 1.1 A$$

$$I_{ajuste46_I2_R2_R3} := Round\left(\frac{I_{21L3} \cdot 1.1}{RTC_TC_R3}, 0.01A\right) = 0.89 A$$

$$I_{pick_up_46_I2_R1} := I_{ajuste46_I2_R1} \cdot RTC_TC_R1 = 110 A$$

$$I_{pick_up_46_I2_R2_R3} := I_{ajuste46_I2_R2_R3} \cdot RTC_TC_R3 = 89 A$$

$$Top46_I2_R1 := 60s$$

$$Top46_I2_R2_R3 := 60s$$

FUNÇÃO DE DESEQUILÍBRIO QUEBRA DE CONDUTOR (46 - I2/I1):

Define-se a corrente de ajuste da função 46(I2/I1) pelo critério da carga máxima esperada, utilizando um fator de 0,3 e ajuste de tempo de 70 segundos.

$$I_{ajuste46_I2_I1_R1} := Round\left(\frac{I_{21L1} \cdot 0.3}{RTC_TC_R1}, 0.01A\right) = 0.3 A$$

$$I_{ajuste46_I2_I1_R2_R3} := Round\left(\frac{I_{21L3} \cdot 0.3}{RTC_TC_R3}, 0.01A\right) = 0.24 A$$

$$I_{pick_up_46_I2_I1_R1} := I_{ajuste46_I2_I1_R1} \cdot RTC_TC_R1 = 30 A$$

$$I_{pick_up_46_I2_I1_R2_R3} := I_{ajuste46_I2_I1_R2_R3} \cdot RTC_TC_R3 = 24 A$$

$$Top46_I2_I1_R1 := 70s$$

$$Top46_I2_I1_R2_R3 := 70s$$

PROTEÇÕES DA USINA FOTOVOLTAICA

Transformador de Potência:

$$S_{\text{trafo_UFV}} := 2500000 \text{ VA}$$

$$V_{\text{AT_trafo_UFV}} := 13800 \text{ V}$$

$$I_{\text{AT_trafo_UFV}} := \frac{S_{\text{trafo_UFV}}}{\sqrt{3} \cdot V_{\text{AT_trafo_UFV}}} = 104.5924 \text{ A}$$

$$Z\% := 5.5$$

$$\frac{X}{R} = X_{\text{R}} := 7.12772$$

$$Z0\% := 4.675$$

Na energização do transformador um elevado valor de corrente flui pelo seu núcleo magnético durante um intervalo de tempo em torno de 6 ciclos ou 100 ms. Esta corrente é chamada de corrente de magnetização ou corrente de inrush.

A corrente de magnetização de fase ($I_{\text{mag_F}}$) para o transformador a seco da UFV equivale 11,6 vezes a sua corrente nominal primária, de acordo com o fabricante. Já a corrente de magnetização residual ($I_{\text{mag_N}}$) pode ser considerada como 20% da corrente de magnetização de fase.

$$I_{\text{mag_F}} := 11.6 \cdot I_{\text{AT_trafo_UFV}} = 1.2133 \times 10^3 \text{ A} \quad \text{por } 0,1\text{s}$$

$$I_{\text{mag_N}} := 0.2 \cdot I_{\text{mag_F}} = 242.6545 \text{ A} \quad \text{por } 0,1\text{s}$$

O ponto ANSI de fase é o máximo valor de corrente que um transformador pode suportar durante um período definido sem se danificar. No caso de transformador Estrela aterrada-Estrela aterrada, o ponto ANSI de neutro igual o ponto ANSI de fase.

$$I_{\text{F,ANSI}} := \frac{100 \cdot I_{\text{AT_trafo_UFV}}}{Z\%} = 1.9017 \times 10^3 \text{ A}$$

$$I_{\text{N,ANSI}} := I_{\text{F,ANSI}} = 1.9017 \times 10^3 \text{ A}$$

Transformador de Corrente (TC):

$$\text{Corrente de carga: } I_{21L1} = 100 \text{ A}$$

$$\text{Maior corrente de curto-circuito: } I_{\text{cc}3\Phi_{\text{UFV}}} = 2.997 \times 10^3 \text{ A} \quad \frac{I_{\text{cc}3\Phi_{\text{UFV}}}}{FS_{\text{TC}}} = 149.85 \text{ A}$$

Optou-se por adotar um TC de 200-5

$$\text{Especificação do TC: } 200 - 5 \text{ A} \quad RTC_{\text{TC_UFV}} := \frac{200}{5} = 40 \quad \text{Primário}_{\text{TC_UFV}} := 200 \text{ A}$$

Função Sobrecorrente Temporizada Fase (51):

$$I_{\text{pick_up}51_{\text{UFV}}} := I_{21L1} \cdot FS_{51} = 130 \text{ A}$$

$$I_{\text{pick_up}51_{\text{UFV}}} < \frac{I_{\text{cc}2\Phi_{\text{UFV}}}}{1.5} = 1 \quad \text{Ok!}$$

$$I_{\text{pick_up}51_{\text{UFV}}} > I_{\text{AT_trafo_UFV}} = 1 \quad \text{Ok!}$$

$$I_{\text{ajuste}51_{\text{UFV}}} := \frac{I_{\text{pick_up}51_{\text{UFV}}}}{RTC_{\text{TC_UFV}}} = 3.25 \text{ A}$$

Função Sobrecorrente Instantânea Fase (50):

$$I_{\text{pick_up}50_{\text{UFV}}} := I_{\text{mag_F}} \cdot 1.1 = 1.3346 \times 10^3 \text{ A} \quad \text{Aplicando um acréscimo de 10\% da } I_{\text{mag_F}}$$

$$I_{pick_up50_UFV} < I_{cc3\Phi_{UFV}} = 1 \text{ Ok!}$$

$$I_{pick_up50_UFV} < I_{F,ANSI} = 1 \text{ Ok!}$$

$$I_{ajuste50_UFV} := \frac{I_{pick_up50_UFV}}{RTC_TC_UFV} = 33.365 \text{ A}$$

Calculo dos Tops do Relé da UFV (50/51):

$$Top_{50_UFV} := 0.1$$

Múltiplo para um curto na barra de conexão da UFV:

$$M_{51_UFV_Icc3\Phi} := \frac{I_{cc3\Phi_{UFV}}}{I_{pick_up51_UFV}} = 23.0538$$

$$M_{51_UFV_Icc3\Phi} < M_{MaxRelé} = 1 \text{ Ok!}$$

Tempo de Atuação Temporizada:

$$Top_{51_UFV_Icc3\Phi} := Top_{51_R9} + MC = 0.8278$$

$$DT_{51_UFV} := \text{round} \left[\frac{Top_{51_UFV_Icc3\Phi} \cdot \left(M_{51_UFV_Icc3\Phi}^{\alpha_{MI_51}} - 1 \right)}{\beta_{MI_51}}, 2 \right] = 1.35$$

$$IED_UFV_51_MI(Icc) := \begin{cases} DT_{51_UFV} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(\frac{I_{cc}}{I_{pick_up51_UFV}} \right)^{\alpha_{MI_51}} - 1} & \text{if } I_{cc} < I_{pick_up50_UFV} \\ Top_{50_UFV} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Função Sobrecorrente Temporizada Neutro (51N):

$$I_{pick_up51N_UFV} := I_{21L1} \cdot FS_{51N} = 30 \text{ A}$$

$$I_{ajuste51N_UFV} := \frac{I_{pick_up51N_UFV}}{RTC_TC_UFV} = 0.75 \text{ A}$$

Função Sobrecorrente Instantânea Neutro (50N):

$$I_{pick_up50N_UFV} := I_{mag_N} \cdot 1.1 = 266.9199 \text{ A}$$

$$I_{pick_up50N_UFV} < I_{cc1\Phi_{UFV}} = 1$$

$$I_{pick_up50N_UFV} < I_{N,ANSI} = 1$$

$$I_{ajuste50N_UFV} := \frac{I_{pick_up50N_UFV}}{RTC_TC_UFV} = 6.673 \text{ A}$$

Calculo dos Tops do Relé da UFV (50/51N):

$$Top_{50N_UFV} := 0.1$$

Múltiplo para um curto na barra de conexão da UFV:

$$M_{51N_UFV_Icc1\Phi} := \frac{I_{cc1\Phi_{UFV}}}{I_{pick_up51N_UFV}} = 99.8333$$

$$M_{51N_UFV_Icc1\Phi} < M_{MaxRelé} = 0 \text{ Falso!}$$

Aplicando o múltiplo máximo:

$$M_{51N_UFV_Icc1\Phi} := 20 \quad \text{Aplicou-se o múltiplo 20 para que o DT ficasse abaixo de 1.5 que é o máximo}$$

Tempo de Atuação Temporizada:

$$Top_{51N_UFV_Icc1\Phi} := Top_{51N_R9} + 0.3 = 0.902$$

$$DT_{51N_UFV} := \text{round} \left[\frac{Top_{51N_UFV_Icc1\Phi} \cdot \left(M_{51N_UFV_Icc1\Phi}^{\alpha_{MI_51}} - 1 \right)}{\beta_{MI_51}}, 2 \right] = 1.27$$

$$IED_UFV_51N_MI(Icc) := \begin{cases} DT_{51N_UFV} \cdot \frac{\beta_{MI_51}}{\left(\frac{I_{cc}}{I_{pick_up51N_UFV}} \right)^{\alpha_{MI_51}} - 1} & \text{if } I_{cc} < I_{pick_up50N_UFV} \\ Top_{50N_UFV} & \text{otherwise} \end{cases}$$