

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO UNIDADE ACADÊMICA DO CABO DE SANTO AGOSTINHO BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

GUSTAVO SOUSA TEIXEIRA

Estudo de proteção de transformador em uma subestação de 69 kV: parametrização e simulação de aferição do relé de proteção.

> Cabo de Santo Agostinho - PE 2024

GUSTAVO SOUSA TEIXEIRA

Estudo de proteção de transformador em uma subestação de 69 kV:

parametrização e simulação de aferição do relé de proteção.

Trabalho apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho da Universidade Federal Rural de Pernambuco para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Profa. Dra. Mauren Pomalis Coelho da Silva.

Cabo de Santo Agostinho - PE 2024

FICHA CATALOGRÁFICA

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação Universidade Federal Rural de Pernambuco Sistema Integrado de Bibliotecas Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

T266e Teix

Teixeira, Gustavo Estudo de proteção de transformador em uma subestação de 69 kV: Parametrização e simulação de aferição do relé de proteção / Gustavo Teixeira. - 2024. 125 f.

Orientadora: Mauren Pomalis Coelho da Silva. Inclui referências.

inclui relefei

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, , Cabo de Santo Agostinho, 2024.

1. Proteção. 2. Transformador. 3. Subestação. I. Silva, Mauren Pomalis Coelho da, orient. II. Título

CDD

GUSTAVO SOUSA TEIXEIRA

Estudo de proteção de transformador em uma subestação de 69 kV:

parametrização e simulação de aferição do relé de proteção.

•

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: 08/03/2024

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Mauren Pomalis Coelho da Silva Universidade Federal Rural de Pernambuco

Profa. Dra. Ana Vitória de Almeida Macedo Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof. Dr. Denis Keuton Alves Universidade Federal Rural de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus por tudo, pela minha saúde, pela minha família e por ter me dado todas as condições de conseguir concluir minha graduação.

Aos meus pais, Celso Gustavo Caldas Teixeira e Cláudia Silvana Sousa Teixeira, estes são sem dúvida, os maiores responsáveis por conseguir atingir meus objetivos, sempre me proporcionando as melhores condições de bem-estar familiar, de estudo e de estrutura, sem eles certamente não teria conseguido. Ao meu irmão, Gabriel Sousa Teixeira, pela amizade e irmandade durante todo esse tempo.

À minha avó materna, Marlyny Rosa Souza, que hoje não está mais presente, porém sempre vibrou com minhas conquistas e me apoiou em todas as dificuldades, não medindo esforços para resolvê-las, sem dúvida tem uma imensa contribuição para hoje está concluindo minha graduação.

Aos meus avós paternos, Edval de Melo Teixeira Gueiros e Lúcia Maria Caldas Gueiros, por tudo que me fizeram por mim, principalmente no início da graduação, onde me proporcionaram condições de deslocamento até a universidade e hospedagem alguns dias da semana em sua casa.

Aos meus tios, Verônica e Ataíde, por na reta final da graduação me proporcionar hospedagem em sua casa, fazendo assim com que fosse possível conciliar minha vida acadêmica com a vida profissional.

À minha futura esposa, Rebeca, por toda compreensão e apoio nessa reta final de graduação, certamente colheremos os frutos de nossos esforços atualmente.

À minha orientadora, Profa°. Dra. Eng° Mauren Pomalis, por estar disponível sempre que precisei e por repassar seus conhecimentos acadêmicos, facilitando assim a conclusão desse trabalho de conclusão de curso.

À todos os meus professores da UFRPE, que sempre se mostraram solícitos a ajudar e repassar todos os conhecimentos, sem dúvida levarei todos os ensinamentos adquiridos na universidade para a minha vida profissional.

À todos os meus companheiros de trabalho da SRC Energy por me proporcionarem agregar o conhecimento prático ao conhecimento teórico adquirido durante a graduação.

RESUMO

O presente trabalho de conclusão de curso (TCC) tem como objetivo realizar um estudo abrangente sobre a proteção de transformadores em uma subestação de 69 kV, com foco na parametrização e aferição do relé de proteção. Na fase inicial, é realizada uma revisão bibliográfica detalhada sobre os elementos de uma subestação e as funções de proteção ANSI mais relevantes, incluindo as funções de sobrecorrente (50/51), subtensão (27), sobretensão (59) e diferencial (87). Essa fundamentação teórica proporciona uma compreensão profunda dos princípios e critérios de proteção empregados em sistemas elétricos de potência. Em seguida, são conduzidos os cálculos necessários para o dimensionamento das funções de proteção mencionadas, levando em consideração as características específicas do transformador e das condições de operação da subestação. Os cálculos incluem a determinação dos ajustes de corrente e tempo para as funções de sobrecorrente, bem como os valores de disparo para as funções de subtensão e sobretensão. Após a definição dos ajustes dimensionados, procede-se à parametrização do relé de proteção, configurando-o de acordo com os valores calculados para cada função de proteção. Esse processo envolve a programação dos parâmetros do relé, garantindo sua capacidade de detectar e responder adequadamente a condições anormais de operação. Por fim, realiza-se a simulação de aferição do relé de proteção utilizando uma mala de testes hexafásica. Essa etapa permite verificar a eficácia e a precisão dos ajustes parametrizados, garantindo que o relé seja capaz de operar de forma confiável e seletiva diante de situações de falha ou sobrecarga. Em resumo, este trabalho proporciona uma abordagem abrangente para o estudo e a implementação da proteção de transformadores em uma subestação de 69 kV, demonstrando a importância da parametrização adequada dos relés de proteção para garantir a segurança e a confiabilidade do sistema elétrico.

Palavras-chave: proteção de transformador; relé de proteção; parametrização. subestação; funções ANSI.

ABSTRACT

The present undergraduate thesis aims to conduct a comprehensive study on transformer protection in a 69 kV substation, focusing on the parametrization and simulation of the protection relay. In the initial phase, a detailed bibliographic review is conducted on the elements of a substation and the most relevant ANSI protection functions, including overcurrent (50/51), undervoltage (27), overvoltage (59), and differential (87) functions. This theoretical foundation provides a deep understanding of the principles and criteria of protection employed in power electrical systems. Subsequently, the necessary calculations are carried out for the sizing of the mentioned protection functions, taking into account the specific characteristics of the transformer and the operating conditions of the substation. The calculations include the determination of current and time settings for the overcurrent functions, as well as the trip values for undervoltage and overvoltage functions. After defining the sized settings, the protection relay is parametrized, configuring it according to the calculated values for each protection function. This process involves programming the relay parameters, ensuring its ability to detect and respond appropriately to abnormal operating conditions. Finally, the protection relay calibration is simulated using a hexaphase test set. This step allows verifying the effectiveness and accuracy of the parametrized settings, ensuring that the relay can operate reliably and selectively in case of fault or overload situations. In summary, this work provides a comprehensive approach to the study and implementation of transformer protection in a 69 kV substation, demonstrating the importance of proper parametrization of protection relays to ensure the safety and reliability of the electrical system.

Keywords: transformer protection; protection relay; parameterization; substation; ANSI functions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Vista interna de um transformador	19
Figura 2 - Transformador com isolação a seco	19
Figura 3 - Transformador com isolação a óleo	20
Figura 4 - TC do tipo barra a seco	21
Figura 5 - TC do tipo barra a óleo	22
Figura 6 - Vista interna TC barra para 69kV	22
Figura 7 - TC com polaridade subtrativa	24
Figura 8 - TC com polaridade aditiva	24
Figura 9 - Esquema de ligação do TC	25
Figura 10 - Interface de ligação para corrente de neutro calculada	25
Figura 11 - Interface de ligação para corrente de neutro medida	26
Figura 12 - TP do grupo 01	27
Figura 13 - TP do grupo 02 e 03	28
Figura 14 - Corrente de operação (IOPA) x corrente de restrição (IRTA)	31
Figura 15 - Janela de parametrização do transformador no ATPDraw	
Figura 16 - Janela de parametrização da fonte de tensão no ATPDraw	40
Figura 17 - Janela de parametrização do disjuntor no ATPDraw	41
Figura 18 - Ícone de um motor trifásico no ATPDraw	43
Figura 19 - Modelo de curto-circuito no ATPDraw	44
Figura 20 - Diagrama unifilar da subestação	48
Figura 21 - Modelo final da SE no ATPDraw	49
Figura 22 - Momento antes do curto-circuito	52
Figura 23 – Curto-circuito trifásico - terra	52
Figura 24 - Momento antes do curto-circuito	53
Figura 25 - Curto-circuito bifásico fase AB - terra	53
Figura 26 - Momento antes do curto-circuito	54
Figura 27 - Curto-circuito bifásico fase AC - terra	54
Figura 28 - Momento antes do curto-circuito	55
Figura 29 - Curto-circuito bifásico fase BC - terra	55
Figura 30 - Momento antes do curto-circuito	56

Figura 31 - Curto-circuito monofásico fase A - terra	56
Figura 32 - Momento antes do curto-circuito	58
Figura 33 - Curto-circuito monofásico fase B - terra	58
Figura 34 - Momento antes do curto-circuito	59
Figura 35 - Curto-circuito monofásico fase C - terra	59
Figura 36 - Disjuntor GL 69 kV	62
Figura 37 - Disjuntor de média tensão	63
Figura 38 - Esquema de fechamento do TP em delta aberto	65
Figura 39 - Relé de Proteção Modelo SEL 487E	78
Figura 40 - Janela de parametrização das configurações gerais do relé	79
Figura 41 - Janela de parametrização das configurações dos TC's	80
Figura 42 - Janela de parametrização das configurações dos TP's	81
Figura 43 - Janela de parametrização da função 27	81
Figura 44 - Janela de parametrização da função 59	82
Figura 45 - Janela de parametrização da função 50	83
Figura 46 - Janela de parametrização da função 50	83
Figura 47 - Janela de parametrização da função 50	84
Figura 48 - Janela de parametrização da função 50	84
Figura 49 - Janela de parametrização da função 50	85
Figura 50 - Janela de parametrização da função 50	85
Figura 51 - Janela de parametrização da função 51	86
Figura 52 - Janela de parametrização da função 51	87
Figura 53 - Janela de parametrização da função 51	88
Figura 54 - Parametrização dos dados do transformador no terminal S	89
Figura 55 - Parametrização dos dados do transformador no terminal T	89
Figura 56 - Parametrização dos dados do transformador no terminal U	89
Figura 57 - Parametrização dos ajustes da função 87	90
Figura 58 - Bloco de aferição	90
Figura 59 - Ambiente de inicialização do CTC	91
Figura 60 - Ajustes gerais no CTC	92
Figura 61 - Ajuste dos elementos de sobrecorrente para o lado de 69kV	93
Figura 62 - Janela para inserir os pontos de teste	94
Figura 63 - Inserir os tipos de curtos-circuitos para o teste de pick-up	94

Figura 64 - Múltiplos em relação ao valor de pick-up para o teste de tempo	95
Figura 65 - Inserir os tipos de curtos-circuitos para o teste de tempo	95
Figura 66 - Janela geral para realização dos testes (69 kV)	96
Figura 67 - Entradas binárias para recebimento de sinais digitais do relé	96
Figura 68 - Ajuste dos elementos de sobrecorrente para o lado de 13,8kV	97
Figura 69 - Tipos de curtos-circuitos para o teste de pick-up (13,8 kV)	98
Figura 70 - Tipos de curtos-circuitos para o teste de tempo (13,8 kV)	98
Figura 71 - Múltiplos em relação ao valor de pick-up para o teste de tempo	99
Figura 72 - Janela geral para realização dos testes (13,8 kV)	99
Figura 73 - Janela de identificação do hardware	100
Figura 74 - Tela inicial do teste da função 27	100
Figura 75 - Janela de informações gerais	101
Figura 76 - Janela de informações do sistema	101
Figura 77 - Direcionamento dos canais	102
Figura 78 - Janela de configuração das saídas analógicas	103
Figura 79 - Configuração dos ajustes de subtensão	104
Figura 80 - Janela de curto-circuito da função 27	105
Figura 81 - Janela de configuração da rampa de subtensão	106
Figura 82 - Características dos parâmetros para teste em rampa	107
Figura 83 - Ajuste da pré-falta para função 27	107
Figura 84 - Configuração dos ajustes de sobretensão	108
Figura 85 - Janela de configuração da rampa de sobretensão	109
Figura 86 - Direcionamento de canais da função 87	110
Figura 87 - Dados dos TC's e transformador de potência	111
Figura 88 - Ajuste do pick-up da função 87	111
Figura 89 - Ajuste do slope da função 87	112
Figura 90 - Tela inicial do teste diferencial	112
Figura 91 - Configuração dos testes (87)	113
Figura 92 - Teste de configuração (87)	114
Figura 93 - Teste de ponto	114
Figura 94 - Teste de ponto (Gráfico).	115
Figura 95 - Teste de busca	115
Figura 96 - Teste de busca (Gráfico)	116

Figura 97 - Mala de corrente hexafásica da fabricante Conprove	116
Figura 98 – Geração de sinais de corrente e tensão	117
Figura 99 - Entrada binária da mala de corrente	117
Figura 100 - Teste de pick-up da função 50/51 (69kV)	118
Figura 101 - Gráfico do teste de pick-up da função 50/51 (69kV)	119
Figura 102 - Teste de tempo da função 50/51 (69kV)	120
Figura 103 - Teste de tempo da função 50/51 (69kV)	120
Figura 104 - Gráfico do teste de tempo da função 50/51 (69kV)	121
Figura 105 - Teste de pick-up da função 50/51 (13,8kV)	122
Figura 106 - Gráfico do teste de pick-up da função 50/51 (13,8kV)	122
Figura 107 - Teste de tempo da função 50/51 (13,8kV)	123
Figura 108 - Teste de tempo da função 50/51 (13,8kV)	124
Figura 109 - Teste de tempo da função 50/51 (13,8kV)	124
Figura 110 - Gráfico do teste de tempo da função 50/51 (13,8kV)	125
Figura 111 - Resultado do teste de configuração	125
Figura 112 - Gráfico do teste de configuração	126
Figura 113 - Resultado do teste de ponto	127
Figura 114 - Gráfico do teste de ponto	127
Figura 115 - Resultado do teste de busca	128
Figura 116 - Gráfico do teste de busca	128

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ajustes da função 27 no AcSELerator QuickSet	.74
Tabela 2 - Ajustes da função 59 no AcSELerator QuickSet	.75
Tabela 3 - Ajustes da função 50 (69kV) no AcSELerator QuickSet	.75
Tabela 4 - Ajustes da função 51 (69kV) no AcSELerator QuickSet	.76
Tabela 5 - Ajustes da função 51 (Lado 1 - 13,8kV)	.76
Tabela 6 - Ajustes da função 51 (Lado 2 - 13,8kV)	.77
Tabela 7 - Ajustes da função 87 no AcSELerator QuickSet	.77

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANSI – American National Standards Institute.

ATP – Alternative Transients Program.

CC – Curto-Circuito.

CTC – Conprove Teste Center.

DROPOUT – Momento em que o relé volta ao seu estado normal de repouso após ter atuado.

DYn1 – Ligação do transformador em delta no enrolamento primário e estrela no enrolamento secundário.

IEC – International Electrotechnical Commission.

IED – Intelligent Eletronic Device.

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers.

INRUSH – Corrente de magnetização do transformador.

ONAF – Oil Natural/Air Forced.

ONAN – Oil Natural/Air Natural.

PICK-UP – Valor de ajuste em que o relé de proteção inicia sua operação.

- RTC Relação de transformação de corrente.
- RTP Relação de transformação de potencial.

SE – Subestação.

- SEP Sistema elétrico de potência.
- TAF Teste de aceitação de fábrica.
- TC Transformador de corrente.
- TP Transformador de potencial.
- TRIP Sinal elétrico de comando para abertura do disjuntor.
- TR1 Transformador de potência do lado 1.
- TR2 Transformador de potência do lado 2.

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos	16
1.2	Estrutura do trabalho	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	Transformadores de potência	18
2.2	Transformadores de corrente	20
2.3	Transformadores de potencial	26
2.4	Funções de proteção	28
2.5	Proteções intrínsecas	32
2.6	Curvas de operação nos relés de proteção	33
2.7	Modelagem e simulação no ATPDraw	37
2.8	Comissionamento de subestações	44
2.9	AcSELerator Quickset	45
2.10	0 CTC – Conprove Teste Center	46
3	ESTUDO DE CASO	47
3.1	Apresentação do estudo de caso	47
3.2	Modelagem e simulação no software ATPDraw do sistema	48
3.3	Memorial de cálculo para dimensionamento das proteções	59
3.4	Tabela de ajuste das proteções no SEL-487E-5	74
3.5	Parametrização do relé de proteção	77
3.6	Aferição do relé de proteção	91
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	118
4.2	Resultado do teste de sobrecorrente 50/51 (13,8kV)	121
4.3	Resultado do teste de proteção diferencial	125
5	CONCLUSÃO	129
	REFERÊNCIAS	

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO

"O sistema elétrico brasileiro possui, atualmente, mais de 171 mil km de linhas de transmissão e possui uma capacidade de geração de 217.048 MW de potência" (ONS, 2023, 2024). Uma parte integrante e imprescindível do setor elétrico são as subestações, que são responsáveis por elevar ou abaixar o nível de tensão em uma rede de transmissão ou distribuição de energia elétrica, além de realizar o monitoramento dos níveis de curto-circuito na linha, potência transmitida, controle da qualidade de energia etc. Nas subestações estão presentes diversos equipamentos elétricos, que tem funções como: transformação dos níveis de tensão (transformadores de potência), seccionamento das barras alimentadoras (disjuntores e chaves seccionadoras), medição, através de Transformadores de Corrente (TC's) e Transformadores de Potencial (TP's), proteção e controle (Relés de proteção) e supervisão (sistemas supervisórios). Neste trabalho será abordada a proteção em transformadores de potência, pois estes são expostos a ambientes e situações degradantes, nos quais podem ocorrer descargas atmosféricas, sobrecorrentes, oscilações no nível de tensão ou curto-circuito interno ao equipamento, tais ocorrências podem provocar o mal funcionamento do transformador de potência, trazendo assim problemas no fornecimento de energia elétrica.

A fim de mitigar os problemas relacionados acima, os dispositivos eletrônicos inteligentes ou *Intelligent Eletronic Device (IED's)* de proteção, que são os relés de proteção digitais, realizam a medição e monitoramento dos níveis de tensão e corrente no qual o equipamento protegido está exposto. Através dos dados de entrada (tensão e corrente) que serão coletados via equipamentos de medição (TC's e TP's), o relé de proteção atuará para ocorrências de subtensão (27), sobretensão (59), sobrecorrentes de fase (50/51) e curto-circuito nos enrolamentos do transformador (87).

1.1 Objetivos

Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é realizar o estudo de proteção de transformadores de potência em uma subestação de 69 kV, incluindo a parametrização dos relés de proteção envolvidos e aferição dos mesmos, visando garantir a segurança e confiabilidade do sistema elétrico.

Objetivos Específicos

- Realizar um levantamento bibliográfico sobre os conceitos de proteção e seletividade em sistemas elétricos de potência, com foco em transformadores de uma subestação de 69 kV.
- Estudar as normas e padrões relevantes, como as funções do American National Standards Institute (ANSI) de proteção (27, 59, 50/51, 50N/51N, 87, 81U/81O), para compreender suas aplicações e requisitos específicos para a proteção de transformadores.
- Realizar análises de curto-circuito com modelagem e simulação do sistema no programa ATPDraw para determinar os ajustes adequados dos relés de proteção, considerando a topologia da subestação e as características do transformador.
- Utilizar o software de simulação de aferição: CTC (Conprove Test Center), para verificação de desempenho dos relés de proteção e suas curvas de atuação, analisando o desempenho do sistema diante de diferentes cenários de falhas e perturbações garantindo assim sua correta operação.
- Realizar a parametrização dos *IEDs* utilizando o *software* da fabricante selecionada, considerando as funções de proteção adequadas e os ajustes determinados nas etapas anteriores.
- Realizar testes e simulações para verificar a efetividade das proteções e suas curvas de atuação, analisando o desempenho do sistema diante de diferentes cenários de falhas e perturbações.

1.2 Estrutura do trabalho

O item 1 traz uma introdução sobre o assunto de Sistemas Elétricos de Potência (SEP) com foco na área de proteção, também são expostos os objetivos gerais e específicos do trabalho realizado. No item 2 é apresentado toda a parte teórica do trabalho, trazendo explanações sobre o uso de transformadores de instrumento e seus funcionamentos, as funções de proteção mais usadas na aplicação de proteção de transformadores, as curvas utilizadas e seus padrões, as equações para os cálculos de ajustes do relé e o uso da ferramenta de modelagem e de simulação dos testes utilizados neste trabalho. O item 3 demonstra toda a parte de desenvolvimento do estudo de caso, bem como o memorial de cálculo para dimensionamento das proteções, etapas de modelagem, simulação e por fim, comissionamento do relé de proteção selecionado e como utilizar a mala de teste hexafásica para realização de aferição no equipamento de proteção. No item 4 são mostrados os resultados obtidos, principalmente mostrando como o relé de proteção irá se comportar em possíveis eventos adversos no sistema elétrico. E por fim no capítulo 5 temos a conclusão de todo o trabalho realizado e como interpretar os resultados obtidos a fim de determinar se são satisfatórios ou não.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Transformadores de potência

Os transformadores de potência são dispositivos elétricos fundamentais em sistemas elétricos de potência, desempenhando um papel crucial na transmissão, distribuição e conversão de energia elétrica. Em sua parte construtiva, eles possuem circuitos elétricos acoplados magneticamente por um núcleo de material ferromagnético. Em resumo, esses equipamentos possuirão um enrolamento primário composto de um certo número de espiras, que ao ser ligado a uma fonte de tensão alternada (V1) irá refletir em seu enrolamento secundário uma tensão projetada previamente (V2), essa relação entre os valores de tensão no enrolamento primário e tensão no enrolamento secundário é chamado de relação de transformação (RT) e é expressa através da Equação (1):

$$RT = \frac{N_1}{N_2} \tag{1}$$

Em que:

N1 = Número de espiras no enrolamento primárioN2 = Número de espiras no enrolamento secundário



Figura 1 - Vista interna de um transformador

Fonte: Umans, (2014)

Atualmente existe no mercado diversos tipos de transformadores, eles podem diferir quanto ao:

- a) Tipo de isolação
 - Isolação a seco: Os transformadores a seco (Figura 2) utilizam materiais isolantes sólidos, como resina epóxi ou poliéster, para isolar os enrolamentos do transformador do ambiente externo. Esses transformadores são frequentemente utilizados em ambientes em que a presença de líquidos inflamáveis é indesejável, como por exemplo em instalações industriais, edifícios comerciais e ambientes internos a edificação.

Figura 2 - Transformador com isolação a seco



Fonte: Weg, (2024)

 Isolação a óleo: Os transformadores imersos em óleo (Figura 3) utilizam óleo mineral como meio isolante para os enrolamentos do transformador. O óleo mineral tem propriedades dielétricas apropriadas e ajuda a dissipar o calor gerado durante o funcionamento do transformador. Esses transformadores são encontrados frequentemente em subestações aéreas em sistemas de distribuição e subestações que são instaladas ao tempo.

Figura 3 - Transformador com isolação a óleo



Fonte: Weg, (2024)

b) Tipo de ligação

- Monofásico: Os transformadores monofásicos possuem dois enrolamentos: um primário e um secundário. Eles são projetados para fornecer energia em sistemas monofásicos, em que a carga é alimentada por uma única fase.
- Trifásico: Os transformadores trifásicos possuem três enrolamentos: um primário e dois ou três secundários, dependendo da configuração delta ou estrela. Os transformadores trifásicos são amplamente utilizados em sistemas de distribuição e transmissão de energia elétrica, como também em indústrias de grande porte.

2.2 Transformadores de corrente

Os transformadores de corrente (Figura 6 - Vista interna TC barra para 69kV.), que podem ser do tipo barra a seco (Figura 4 - TC do tipo barra a seco.), são equipamentos elétricos que tem como função reproduzir de forma proporcional em seu circuito secundário a corrente que está sendo submetido o seu lado primário, mantendo sua característica fasorial, são equipamentos utilizados para medição, proteção e controle. A utilização desses equipamentos em subestações é de extrema importância, pois os níveis de corrente de uma rede primária possuem valores elevados, nas quais os equipamentos de proteção e controle não teriam a capacidade de suportar, ou teriam que possuir tamanho e robustez para operar com nível de corrente muito elevado, o que elevaria o custo de produção e seria pouco viável devido ao espaço físico disponível para sua instalação.

Com o uso dos TC's essa corrente "lida" pelos equipamentos terá valores compatíveis com a margem de operação dos tais dispositivos, através da sua Relação de Transformação de Corrente (RTC) é possível definir a proporção em que a corrente do secundário será lida em relação ao primário (Kinderman, 2005, p. 2).



Figura 4 - TC do tipo barra a seco.

Fonte: Mamede Filho, (2014)



Figura 5 - TC do tipo barra a óleo.

Fonte: Mamede Filho, (2014)





Fonte: Mamede Filho, (2014)

Saturação

Os transformadores de corrente possuem sua curva de atuação na forma linear, porém ao ser submetido a um alto valor de corrente em seu primário, ou um valor elevado de burden (potência máxima conectada) no secundário, o equipamento pode "sair" de sua região linear de operação. Nessa ocasião, o TC não irá mais reproduzir de forma fidedigna os valores de corrente em seu secundário, ou seja, os valores lidos pelo relé de proteção não serão os valores reais, podendo assim ocasionar atuações indesejadas. Pode haver dois tipos de saturação: saturação AC (alternating current), em que a tensão máxima suportável pelo TC é ultrapassada pela tensão gerada por uma corrente AC de curto-circuito simétrica e saturação DC (Direct Current), essa é ocasionada por uma corrente de curto-circuito assimétrica.

Por convenção adota-se uma corrente de saturação como sendo 20 vezes a corrente nominal do TC, porém já existem literaturas em que esse valor tornase questionável, devido ao fato da maioria dos TC's no mercado possuírem um erro de leitura de até 10% (esse erro se dá pela existência de uma corrente de magnetização no núcleo do transformador), ou seja, em uma ocorrência de curto-circuito na linha, a impedância de magnetização tenderá a reduzir, consequentemente o erro de leitura irá aumentar, fazendo com que o valor de 20 vezes a corrente nominal não seja suficiente para evitar uma saturação do equipamento (Mardegan, 2022, p. 27).

Porém, para as aplicações desse trabalho o método de 20 vezes a corrente nominal é satisfatório.

Polaridade

Nos transformadores de corrente, podemos possuir dois tipos de polaridade, que é o indicativo do sentido da corrente no primário em relação ao secundário, os mais usuais são os de polaridade subtrativa, em que o enrolamento primário é "enrolado" no sentido contrário ao enrolamento secundário. Isso faz com que a corrente do primário entre no terminal "P1" e saia pelo terminal secundário "S1". Na polaridade aditiva, o enrolamento secundário e primário são "enrolados" no mesmo sentido, logo, a corrente primária entrará no "P1" e sairá no "S2". Na Figura 7 e Figura *8* podemos visualizar os dois tipos de TC's mencionados, em que a corrente "I1" é o lado de maior magnitude e o "I2" o lado de menor magnitude.





Fonte: Mardegan, (2022).





Fonte: Mardegan, (2022).

Esquemas de ligação

Os TC's possuem como princípio de ligação a inserção de sua bobina primária em série com o sistema a ser medido, em que haverá a polarização de entrada e saída da corrente que é informada em seu diagrama de ligação, convencionada como um ponto (polaridade de entrada). Na Figura 9 é possível visualizar o esquema de ligação de um TC, em que as entradas "P1" e "P2" pertencem aos terminais primários e as saídas "S1" e "S2" pertencem aos terminais do enrolamento secundário.





Fonte: Mardegan, (2022).

Para a ligação e fechamento de sua bobina secundária, temos os seguintes esquemas possíveis, dependendo da aplicação:

• Corrente de neutro calculada (310):

No método de corrente calculada, o relé de proteção irá medir a corrente residual que irá fluir pelos seus terminais devido ao desequilíbrio das correntes em um sistema trifásico. Na Figura 10, os terminais IL1M1, IL2M1 e IL3M1 serão conectados nos secundários dos TC's responsáveis pela aquisição dos sinais de corrente de L1, L2 e L3, respectivamente. Nota-se que nesse tipo de ligação não há uma corrente de neutro que irá fluir de um TC para os terminais do relé, essa corrente de neutro será calculada pelo equipamento.



Figura 10 - Interface de ligação para corrente de neutro calculada

Fonte: Siemens, (2016).

Corrente de neutro medida:

Nesse tipo de ligação existirá um TC exclusivo para o condutor de neutro, em que essa medição irá para um dos terminais do relé de proteção (IX1), os terminais IL1M1, IL2M1 e IL3M1 serão conectados nos secundários dos TC's responsáveis pela aquisição dos sinais de corrente de L1, L2 e L3, respectivamente.



Figura 11 - Interface de ligação para corrente de neutro medida

Fonte: Siemens, (2016).

Classe de exatidão

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), a classe de exatidão de um TC é definida pela relação entre a máxima potência aparente que será consumida pela carga conectada e sua corrente nominal do secundário, que para fins de proteção é definida como 5A (ABNT, 2021, p. 22).

2.3 Transformadores de potencial

Os TP's são equipamentos de medição bastante utilizados em subestações, em que o enrolamento primário estará exposto a uma tensão primária da barra e será refletido em seu secundário uma tensão de menor amplitude (através de uma relação de transformação). Esses equipamentos são utilizados para alimentar e/ou realizar leitura do nível de tensão no ponto instalado, em relés de proteção geralmente são utilizados TP's com sua tensão secundária em 115 V (entre fases), essa tensão lida será processada pelo relé de proteção e comparada com os ajustes que foram configurados no mesmo.

Esquemas de ligação

Segundo a NBR 6855, são previstos três tipos de ligações para transformadores de potencial indutivo, são eles:

 Grupo 1: Geralmente utilizados em sistemas de média tensão (até 34,5 kV), eles possuem a ligação entre as fases do sistema (tanto no primário, como no secundário).





Fonte: Mamede Filho, (2020).

2) Grupo 2: São utilizados para sistemas elétricos diretamente aterrados, em que seu enrolamento primário será ligado entre a fase e o neutro do sistema.





Fonte: Mamede Filho, (2020).

- Grupo 3: "Semelhante ao grupo 2, esses TP's são utilizados em sistemas em que o sistema de aterramento não possui alto grau de confiabilidade" (Mamede Filho, 2020, p. 81).
- 2.4 Funções de proteção

Sobrecorrente de fase (50/51)

No contexto do setor elétrico brasileiro, uma das funções mais difundidas é a função de sobrecorrente, sendo dividida em instantânea (50/50N), em que o relé de proteção irá atuar com tempo de retardo nulo assim que o valor lido for igual ao valor de ajuste (pick-up) e temporizada (51/51N), em que haverá um tempo de retardo, após o pick-up, para o envio do sinal de *trip* para bobina de abertura do disjuntor, esta poderá ser configurada sob curvas pré-definidas e regulamentadas por normas do tipo IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), ANSI (*American National Standards Institute*) e IEC (*International Electrotechnical Commission*), que são utilizadas em alimentadores de média tensão, linhas de transmissão, geradores, motores etc.

O funcionamento da proteção de sobrecorrente em um relé digital consiste em receber os sinais analógicos de correntes provenientes do secundário dos transformadores de correntes e comparar com o valor de ajuste. Internamente o relé possui um conversor analógico/digital, em que os sinais analógicos recebidos serão convertidos em sinais digitais que serão analisados pelo seu processador. Os valores de ajuste são armazenados em memórias do tipo não voláteis, ou seja, sem risco de perda em caso de ausência de tensão na alimentação do relé (Mamede Filho, 2014, p. 125).

A unidade temporizada de fase consiste na atuação do relé quando o valor eficaz da corrente lida pelo relé é igual ao valor ajustado, quando isso ocorre o relé irá ser ativado e contabilizará um tempo de retardo (pré-definido) para emissão de sinal de *trip* para o disjuntor. Se durante o tempo de contagem o sinal de corrente de entrada reduzir para abaixo do valor de ajuste, o relé volta ao seu estado normal, ou seja, não atuando. As curvas têm característica tempo versus corrente e podem ser, entre outras: normalmente inversa, muito inversa, extremamente inversa, inversa longa e inversa curta.

"A unidade instantânea de fase diferentemente da unidade temporizada, promove o funcionamento do relé sem retardo de tempo, assim que o valor lido for igual ao valor de ajuste da função" (Mamede Filho, 2014, p. 128).

Diferencial de corrente (87)

A proteção diferencial de corrente consiste em comparar o nível de corrente que circula em um equipamento, por exemplo nos transformadores de potência. O relé irá comparar as correntes que estão no primário do equipamento com as correntes do seu secundário, essa função de proteção leva em consideração que no interior do equipamento haverá perdas por magnetização do núcleo, perdas por excitação etc., logo, haverá tolerâncias quando for realizado o cálculo do ajuste utilizado, essa tolerância é chamada de corrente de restrição.

Chamamos o intervalo de espaço entre os terminais de entrada (primeira medição) e os terminais de saída (segunda medição) como zona protegida, e essas proteções diferenciais podem ser classificadas das seguintes formas: longitudinal (comparação direta entre as correntes que circulam nos dois pontos protegidos), transversal (compara os módulos de correntes que entram num ponto do circuito e circulam em dois ou mais circuitos), compensada (ocorre quando os ajustes não levam em conta as possíveis perdas internas ao equipamento, logo, a corrente lida na entrada deverá ser exatamente igual a corrente lida na saída do equipamento), direcional (possui direcionalidade imposta do ajuste, ou seja, as correntes circulantes no equipamento deverá ser mantida em um único sentido de movimento, caso contrário o relé irá atuar) (Mamede Filho, 2014, p. 128).

A atuação dessa função de proteção irá se basear na primeira Lei de *Kirchhoff*, em que a corrente de entrada é dada pela Equação (2) e a corrente lida pelo relé é dada pela Equação (3):

$$I_{entrada} = I_{saida} + I_{rel\acutee} \tag{2}$$

$$I_{rel\acute{e}} = I_{entrada} - I_{saida} \tag{3}$$

Para o modo de operação do dispositivo teremos as seguintes condições:

$$I_{entrada} = I_{saida} \tag{4}$$

O relé não irá atuar, pois o elemento protegido não apresenta defeito.

$$I_{entrada} - I_{saida} \le I_{ajuste} \tag{5}$$

O relé não irá atuar, pois a corrente diferencial é menor do que a corrente de ajuste.

$$I_{entrada} - I_{saida} \ge I_{ajuste} \tag{6}$$

"O relé irá atuar, pois a corrente diferencial é maior do que a corrente de ajuste. Para estes casos, temos um defeito no equipamento ou zona protegida" (Kinderman, 2005, p. 20).

Para evitar atuações indesejadas no sistema protegido devido às características próprias do sistema, como: corrente de magnetização, desequilíbrio das correntes devido a cargas assimétricas, calculamos uma corrente de restrição, que é dimensionada a partir do ajuste da corrente diferencial adotada (geralmente de 5% a 10%).

Outro parâmetro definido na proteção diferencial é o *slope* (inclinação), que será responsável por determinar a rapidez e a sensibilidade com que o relé irá atuar e é dado pela Equação:

$$a = tag \alpha \tag{7}$$

"Em que α é o ângulo da região limiar entre os estágios de operação e não operação do relé" (Kinderman, 2005, p. 29).

"O ajuste do *slope* pode ser seguido da seguinte maneira:" (Kinderman, 2005, p. 29).

- 5 a 25% para máquinas síncronas
- 10 a 45% para transformadores de potência

Figura 14 - Corrente de operação (IOPA) x corrente de restrição (IRTA)



Fonte: Schweitzer Engineering Laboratories, (2023).

A Figura 14 acima descreve o funcionamento da função diferencial em um relé de proteção com base na curva IOPA e IRTA, em que:

- IOPA: Corrente de operação
- IRTA: Corrente de restrição
- O87P: Valor de pick-up da função diferencial
- SLP2: Slope 2
- SLP1: Slope 1

A região abaixo da curva "SLP1" é denominada como região de restrição, isso significa que o relé não irá operar para esses valores, devido a tolerância por ocorrência de energização do transformador, erro na leitura dos instrumentos e outras variáveis. Na região acima da curva "SLP1" é definida a região de operação, em que o relé irá operar e enviar o comando de abertura do disjuntor.

Subtensão (27) e Sobretensão (59)

A proteção de subtensão (27) consiste em proteger o sistema elétrico de tensões abaixo de um valor ajustado, esses valores de ajuste são determinados a partir de um percentual da tensão nominal da rede. A proteção de sobretensão (59) atua de maneira análoga a função 27, porém os ajustes são acima dos valores de tensão nominal da rede. Em muitos casos as funções de proteção de tensão são utilizadas em conjunto com as funções de sobrecorrente, ou seja, o comando de abertura do disjuntor só será enviado se o relé de sobrecorrente atuar juntamente com o de subtensão (27), em outros casos podemos ter a proteção de sobrecorrente com restrição de tensão, ou seja, a atuação do elemento de sobrecorrente atuará somente em uma faixa de tensão pré-determinada pelo projetista.

Em sistemas isolados em que é comum a utilização de proteção de sobretensão a terra, utilizamos o esquema de três TP's ligados em delta aberto, conforme Figura 38, em que teremos a leitura de uma tensão de sequência zero. Em um funcionamento normal do sistema elétrico protegido, a soma das tensões terá um valor nulo, porém ao haver um desequilíbrio nas tensões, uma tensão positiva irá surgir fazendo assim com que o relé sensibilize e envie um sinal de abertura do disjuntor.

2.5 Proteções intrínsecas

As proteções intrínsecas desempenham um papel importante na garantia da segurança e do desempenho confiável dos transformadores de potência. Esses dispositivos são projetados para monitorar e responder a condições anormais de operação que possam representar riscos para a integridade do transformador e para a continuidade do fornecimento de energia elétrica.

Uma das proteções intrínsecas mais importantes é o relé de gás, também conhecido como relé *Buchholz*. Este dispositivo é instalado no tanque do transformador e monitora o óleo isolante em busca de sinais de deterioração ou falha. Em caso de ocorrência de arco elétrico, descargas parciais ou presença de gás proveniente de uma falha interna, o relé *Buchholz* é acionado, interrompendo o funcionamento do transformador e evitando danos mais graves.

Outra proteção importante é a ventilação forçada, que ajuda a controlar a temperatura do transformador, garantindo que ele opere dentro dos limites seguros. O sistema de ventilação forçada é projetado para resfriar o transformador, dissipando o calor gerado durante a operação normal ou em situações de sobrecarga. Isso ajuda a prevenir o superaquecimento do equipamento e reduzir o risco de danos aos materiais isolantes.

Além disso, as proteções de temperatura do óleo e do enrolamento também desempenham um papel importante na segurança do transformador. Sensores de temperatura são instalados no óleo isolante e nos enrolamentos do transformador para monitorar continuamente as condições térmicas. Se a temperatura do óleo ou do enrolamento exceder os limites predefinidos, os sistemas de proteção são acionados, alertando os operadores e desligando o transformador, se necessário, para evitar danos causados pelo superaquecimento.

2.6 Curvas de operação nos relés de proteção

ANSI

As curvas de proteção ANSI são um elemento essencial na proteção de sistemas elétricos, fornecendo uma maneira padrão de coordenar e ajustar dispositivos de proteção, como relés e disjuntores, para responder as falhas elétricas de forma eficiente e seletiva. ANSI é a sigla para *American National Standards Institute*, uma organização que estabelece padrões técnicos para uma variedade de indústrias, incluindo a elétrica.

As curvas de proteção ANSI são representações gráficas que mostram a relação entre a corrente de falha e o tempo de operação do dispositivo de proteção. Elas são fundamentais para determinar quando um dispositivo de proteção deve atuar em resposta a uma falha elétrica, garantindo assim a segurança e a confiabilidade do sistema elétrico.

Existem vários tipos de curvas de proteção ANSI, cada uma projetada para responder a diferentes tipos de falhas elétricas. Algumas das curvas de proteção para sobrecorrente mais comuns incluem:

• "Curva inversa:" (Siemens, 2016, p. 419).

$$t = \left(\frac{8,9341}{1 - \left(\frac{I}{I_p}\right)^{2,0938}} + 0,17966\right) x D$$
(8)

• "Moderadamente inversa:" (Siemens, 2016, p. 419).

$$t = \left(\frac{0,0103}{1 - \left(\frac{I}{I_p}\right)^{0,02}} + 0,0228\right) x D$$
(9)

• "Muito inversa:" (Siemens, 2016, p. 419).

$$t = \left(\frac{3,922}{1 - \left(\frac{I}{I_p}\right)^2} + 0,0982\right) x D$$
(10)

• "Extremamente inversa:" (Siemens, 2016, p. 419).

$$t = \left(\frac{5,64}{1 - \left(\frac{I}{I_p}\right)^2} + 0,02434\right) x D$$
(11)

Em que:

- *t* = Tempo de envio do sinal de *trip*
- D = Valor de configuração do múltiplo de tempo
- *I* = Corrente de curto-circuito
- *Ip* = Corrente de ajuste do *pick-up* do relé

IEC

As curvas de proteção IEC (International Electrotechnical Commission). também são representadas em um gráfico corrente-tempo. Uma das diferenças mais importantes entre as curvas de proteção ANSI e IEC é a sensibilidade à corrente de falha. As curvas de proteção ANSI tendem a ser mais sensíveis a correntes de falha de curta duração, enquanto as curvas de proteção IEC são mais sensíveis a correntes de falha de longa duração. Isso significa que, em certos cenários, os dispositivos de proteção baseados em curvas ANSI podem operar mais rapidamente do que os dispositivos baseados em curvas IEC para a mesma corrente de falha. Algumas das curvas de proteção no padrão IEC mais comuns incluem:

• "Curva inversa:" (Siemens, 2016, p. 420).

$$t = \left(\frac{0,14}{\left(\frac{I}{I_p}\right)^{0.02} - 1} x T_p\right)$$
(12)

• "Muito inversa:" (Siemens, 2016, p. 420).

$$t = \left(\frac{13,5}{\left(\frac{I}{I_p}\right)^1 - 1} \times T_p\right)$$
(13)
• "Extremamente inversa:" (Siemens, 2016, p. 420).

$$t = \left(\frac{80}{\left(\frac{l}{I_p}\right)^2 - 1} \times T_p\right)$$
(14)

Em que:

- t = Tempo de envio do sinal de trip
- D = Valor de configuração do múltiplo de tempo
- I = Corrente de curto-circuito
- Ip = Corrente de ajuste do pick-up do relé
- 2.7 Modelagem e simulação no ATPDraw

O Alternative Transient Program (ATP Draw) é um programa de simulação utilizado na área de sistemas de potência na engenharia elétrica, nele é possível modelar sistemas e redes elétricas, adicionando seus principais componentes e características, como: transformadores, geradores, linhas de transmissão, cargas e dispositivos de proteção. No programa é possível simular ocorrências de curto-circuito, subtensões e sobretensões, trata-se de uma plataforma importante para realizar estudos de curto-circuito e seletividade.

No quadro 1 pode ser visualizado os componentes que serão utilizados para simulação e suas respectivas descrições.

Tabela componentes ATPDraw							
Descrição	Componente no ATPDraw						
Transformador de potência							
Medição de tensão							
Medição de corrente	÷						
Alimentador concessionária	- Hr						
Disjuntor de alta/média tensão	djmt3						
Chave seccionadora							
Carga							

Quadro 1 - Componentes ATPDraw.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

Transformador

No ATPDraw os transformadores de potência são modelados através de valores de entrada, conforme pode ser visto na Figura 15, os quais o projetista deverá alimentar com informações do equipamento relacionado que será/é utilizado em campo. Quanto mais acurado o valor de entrada, mais próximo o comportamento representado no programa de simulação.

Saturable transformer: SATTRAFO X							×
Attributes Characteristic							
	Prim.	Sec.		NODE	PHAS	E NA	ME
U [V]	69000	7967.43		Primary	ABC		
R [ohm]	13.255	0.05808		Second	ary ABC		
L [ohm]	105.8	0.46464		Starpoir	it ABC		
Coupling	D 🔻	Y 🚽		Sec-N	1		
Phase shift 30 ▼ I(0)= 0 RMS 3-winding F(0)= 0 3-leg core Order: □ Order: □ Labet: ⇒							
Output Hide							
Edit definitions QK Cancel Help							

Figura 15 - Janela de parametrização do transformador no ATPDraw.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

Para o modelo SATTRAFO, os valores de entrada são os seguintes:

- U [V] Primário: Tensão de linha primária no transformador.
- U [V] Secundário: Tensão de linha secundária no transformador.
- R [Ohm] Primário: Resistência do enrolamento primário.
- R [Ohm] Secundário: Resistência do enrolamento secundário.
- L [Ohm] Primário: Indutância do enrolamento primário.
- L [Ohm] Secundário: Indutância do enrolamento secundário.
- Coupling: Fechamento do transformador.
- Phase shift: Defasagem angular do secundário em relação ao primário.
- I(0): Corrente a vazio do transformador.
- Rm: Resistência de magnetização.
- F(0): Fluxo magnético.

Fonte de tensão trifásica

De forma análoga ao equipamento anterior, as fontes de energia são modeladas refletindo a realidade encontrada no SEP, com entrada de valores nos modelos (Figura 16). Para modelar e simular geradores trifásicos de tensão são utilizados modelos de fonte CA.

Component: ACS	50URCE					×	
DATA	LINIT	VALUE		NODE	DUACE	NAME	
AmplitudeA	Volt	69000		AC	ABC	P001	
Frequency	Hz	60			1.00		
PhaseAngleA	degrees	0					
StartA	sec	-1					
StopA	sec	100					
Comment:							
Type of source Num phases Angle units Amplitude Grounding Hige Current Image: Single Image: Single							
Edit definitions			<u>o</u> k		<u>C</u> ancel	Help	

Figura 16 - Janela de parametrização da fonte de tensão no ATPDraw.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

Para o modelo ACSOURCE, os valores de entrada são os seguintes:

- Amplitude: Tensão de linha que irá ser fornecida ao sistema.
- Frequency: Frequência da rede de fornecimento de energia elétrica.
- PhaseAngleA: Ângulo de defasagem da fase A.
- StartA: Instante de tempo que irá iniciar o fornecimento de energia.
- *StopA*: Instante de tempo que irá interromper o fornecimento de energia.

Disjuntor de alta/média tensão

Na prática os disjuntores de média e alta tensão possuem comportamentos apenas mecânico, no qual sua função é interromper/seccionar a passagem de um fluxo de corrente, seu acionamento é realizado através de um sinal digital (*trip*), que é enviado pelo relé de proteção após a detecção de uma falha no sistema protegido, até a sua bobina de abertura. No *software ATPDraw* é utilizado o bloco "*CntrlCB*" (Figura *17*), que será responsável por receber o sinal de *trip* do relé de proteção e realizar a abertura do sistema, interrompendo assim o fornecimento de energia elétrica aos equipamentos a jusante do disjuntor.

Group: CtrlCB X								
Attributes								
DATA	UNIT	VALUE		NODE		PHASE	NAME	
CLOSED	>0:SS closed	1	1	From		ABC	X0014	
GIFU	>0:Test diod	0		To		ABC	X0015	
T_delay	s	0.2		Trip		1	X001	
Copy Paste Reset Order: Labet: Comment: Group data Hige Name: CtrlCB Protect								
Edit definitions QK Cancel Help					Help			

Figura 17 - Janela de parametrização do disjuntor no ATPDraw.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

Para o modelo CTRLCB, os valores de entrada são os seguintes:

- Closed: Informa se o disjuntor estará fechado ou aberto no instante em que a simulação iniciar.
- *T_delay*: Tempo de resposta em que o equipamento mudará de estado após receber o sinal digital do relé de proteção.

 Trip: Informa de qual nó será recebido o sinal digital de abertura/fechamento.

Motores

Os motores de indução são uma escolha comum para simular cargas em estudos de sistemas elétricos no *software ATPDraw*. Isso ocorre devido à sua capacidade de replicar o comportamento de vários tipos cargas encontradas em sistemas industriais reais, como motores, compressores e bombas.

A modelagem de motores de indução no *ATPDraw* envolve a definição de uma série de parâmetros elétricos e mecânicos, incluindo potência nominal, tensão, corrente, fator de potência, inércia e outros. Além disso, é possível especificar o comportamento dinâmico do motor, como tempo de aceleração, tempo de desaceleração e características de carga.

Ao simular cargas com motores de indução no *ATPDraw*, os usuários podem analisar como essas cargas afetam o sistema elétrico, incluindo efeitos como quedas de tensão, distorções harmônicas, sobrecorrentes e desequilíbrios de fase. Essa análise permite uma avaliação abrangente do desempenho do sistema e ajuda a identificar possíveis problemas ou áreas de melhoria.

"No ATPDraw o uso de motores de indução é dado pelo ícone da Figura 18, e possuem os seguintes parâmetros". (DA SILVA, 2014, p. 48).

Figura 18 - Ícone de um motor trifásico no ATPDraw.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

- Stator: Terminal de saída da armadura;
- M_Node: Nó de torque do entreferro;
- BUSM: Fonte de corrente para inicialização automática;
- Neut: Ponto de neutro;

Modelagem de faltas para simulação de corrente de curto-circuito

Para obter os níveis de corrente de curto-circuito (trifásico, bifásico e monofásico) nos barramentos de alta tensão, utilizaremos o *software* de simulação *ATPDraw* (Figura 19), em que será modelada e descrita a subestação no capítulo 3 deste trabalho. Os resultados obtidos na simulação serão importantes para realizar o dimensionamento dos componentes da subestação e os ajustes que serão utilizados no relé de proteção.

Para o estudo de curto-circuito nessa subestação, considerando que a fonte geradora se encontra consideravelmente distante, e tratando-se de uma alimentação proveniente de uma linha de distribuição, teremos uma relação $X/_R$ (Reatância indutiva/ Resistência) baixa, logo, não levaremos em consideração a contribuição de uma corrente DC no momento do curto-circuito, ou seja, teremos uma baixa assimetria, contendo assim somente a ocorrência de curto-circuito simétrico. Para a resistência de falta do sistema, foi considerado o valor de 10 Ohms.

Figura 19 - Modelo de curto-circuito no ATPDraw.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

2.8 Comissionamento de subestações

O comissionamento em subestações equipadas com relés de proteção é um procedimento essencial para assegurar que os sistemas de proteção estejam devidamente instalados, configurados e operando conforme projetado. Esse processo envolve uma série de passos e atividades destinadas a verificar e validar o desempenho dos relés de proteção, garantindo, assim, a segurança e a confiabilidade do sistema elétrico como um todo.

Inicialmente, o processo de comissionamento concentra-se na verificação física da instalação dos relés de proteção, garantindo que estejam adequadamente montados e conectados aos equipamentos elétricos pertinentes, como transformadores, disjuntores e barramentos. Além disso, nessa fase, é realizada uma verificação minuciosa dos cabos de comunicação e alimentação que ligam os relés aos dispositivos de medição e controle, a fim de assegurar sua integridade e adequação.

Em seguida, os relés de proteção são configurados conforme as especificações do projeto e os requisitos operacionais do sistema elétrico. Isso implica na definição

de parâmetros de ajuste, como curvas de proteção, tempos de atuação, ajustes de seletividade e lógica de controle. Os engenheiros de comissionamento conduzem testes para verificar se essas configurações estão corretas e se atendem aos requisitos de proteção e operação.

Após a configuração inicial, são realizados testes funcionais nos relés de proteção para garantir que operem corretamente em condições simuladas de falha. Isso inclui testes de ativação (*pick-up*), testes de tempo de resposta, e testes de comunicação entre os relés e o sistema de supervisão, caso exista.

Finalmente, após a conclusão dos testes e a verificação da conformidade com as especificações do projeto, os relés de proteção são colocados em operação e o sistema elétrico é monitorado continuamente para garantir o funcionamento adequado dos relés em condições reais de operação.

Em resumo, o comissionamento em subestações com relés de proteção é um procedimento fundamental para garantir a segurança e a confiabilidade do sistema elétrico.

2.9 AcSELerator Quickset

O software AcSELerator QuickSet, desenvolvido pela Schweitzer Engineering Laboratories (SEL), é uma ferramenta projetada para simplificar a configuração e a parametrização dos relés de proteção e controle exclusivamente da fabricante SEL. Este software é amplamente utilizado por engenheiros elétricos e técnicos de proteção em todo o mundo devido à sua facilidade de uso e capacidade de realizar uma ampla gama de tarefas relacionadas à configuração de relés.

Uma das principais características do *AcSELerator QuickSet* é a sua interface de usuário amigável, que permite aos usuários configurar rapidamente os parâmetros do relé e realizar ajustes específicos de acordo com as necessidades do sistema elétrico.

Além disso, o AcSELerator QuickSet oferece uma variedade de recursos avançados para ajudar os usuários a otimizarem o desempenho dos relés. Isso inclui ferramentas para configuração de curvas de proteção, definição de configurações de comunicação, configuração de lógica de controle e configuração de registros de eventos e oscilografia.

2.10 CTC – Conprove Teste Center

Uma das etapas mais importantes em um sistema de proteção é a aferição dos *IED's* de proteção, nesses testes é possível realizar simulações de curto-circuitos monofásicos, bifásicos e trifásicos, como também simulações com níveis de tensão, frequência etc. Nesse trabalho será utilizado a mala de testes da fabricante conprove, de modelo 6006, em que o *software* responsável por programar os testes e obter os resultados é o CTC (*Conprove Teste Center*).

Este *software* foi desenvolvido pela CONPROVE Engenharia Ltda., uma empresa brasileira especializada em soluções de teste e medição para o setor elétrico e eletrônico. Ele foi projetado para facilitar e otimizar o processo de teste, calibração e diagnóstico de equipamentos elétricos, como relés de proteção, medidores de energia, transformadores, entre outros.

O CONPROVE Test Center oferece uma ampla gama de recursos e funcionalidades para atender às necessidades específicas de teste e diagnóstico de equipamentos elétricos. Isso inclui a capacidade de realizar testes de funcionalidade, testes de desempenho, testes de calibração e testes de aceitação de fábrica (TAF), entre outros.

Além disso, o *software* permite que os usuários configurem e adaptem os testes de acordo com as especificações e requisitos individuais de cada equipamento, garantindo assim uma maior precisão e confiabilidade nos resultados dos testes.

Outra vantagem do *CONPROVE Test Center* é a sua capacidade de gerar relatórios detalhados e personalizados sobre os resultados dos testes realizados. Os relatórios podem incluir informações como resultados de testes, dados de medição, gráficos e análises de tendências, proporcionando aos usuários uma visão abrangente do desempenho do equipamento testado.

3 ESTUDO DE CASO

3.1 Apresentação do estudo de caso

O objeto de estudo deste trabalho será a proteção de 2 (dois) transformadores que serão responsáveis por realizar a alimentação de um barramento em média tensão. O sistema da concessionária, demonstrado na Figura 20, irá fornecer no ponto de entrega uma tensão nominal de 69 kV, que alimentará o primário dos transformadores nomeados nesse trabalho como "TR1" e "TR2", esses transformadores possuirão relação de transformação de 69 kV/13,8 kV, com potência nominal de 5 MVA cada, totalizando assim uma potência máxima de alimentação de 10 MVA, essa potência poderá sofrer uma sobrecarga de aproximadamente 25% caso esses transformadores estejam em condições de funcionamento ONAF (Oil Natural/Air Forced). Para os cálculos seguintes consideraremos um funcionamento ONAN (Oil Natural/Air Natural), sendo que potência considerada será sua nominal. Para realizar o seccionamento entre as barras de alimentação da subestação serão utilizados um disjuntor de alta tensão (barramento de 69 kV) e dois disjuntores de média tensão (barramento de 13,8 kV), esses disjuntores possuem características de seccionamento apenas mecânico, ou seja, sua manobra de seccionamento da linha só será realizada caso o mesmo receba um sinal de trip, proveniente do relé de proteção, que irá alimentar sua bobina de abertura, fazendo assim com que o disjuntor abra seus polos, interrompendo assim a continuidade do fluxo de corrente naquele ramo. Para as aquisições dos sinais de tensão e corrente que farão o monitoramento da linha e enviarão tais informações para o relé de proteção, serão utilizados TP's e TC's, cujo dimensionamento será realizado ao longo deste capítulo. O relé de proteção escolhido para este sistema irá possuir no mínimo a disponibilidade de realizar o monitoramento de três enrolamentos, cujo primeiro enrolamento será responsável por receber sinais provenientes do barramento de 69 kV e os dois enrolamentos restantes possuirão entradas dos sinais que virão do barramento de 13,8 kV, sendo o enrolamento dois proveniente do secundário do transformador 1 (TR1) e o enrolamento três vindo do secundário do transformador 2 (TR2).



Figura 20 - Diagrama unifilar da subestação

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

3.2 Modelagem e simulação no software ATPDraw do sistema

Na etapa de modelagem da subestação no *ATPDraw* (Figura 21) é selecionado e configurado os equipamentos presentes no sistema, como transformadores, chaves, medição de tensão e corrente. Para a simulação de correntes de curto-circuito é inserido um conjunto de chaves que irão simular uma fuga do fluxo de corrente para a terra, com resistência de aterramento de 10 Ohms. Esse bloco irá inicialmente ficar oculto no sistema, sendo utilizado somente para fins de simulação de correntes de curto-circuito.



Figura 21 - Modelo final da SE no ATPDraw.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

Cálculo dos valores de entrada

Neste tópico será calculado os valores de entrada no *software ATPDraw*, levando em consideração os valores reais do sistema considerado.

Gerador

Na equação 15 será calculado o valor da tensão de pico no gerador que será modelado no sistema.

$$V_{ponto}{}_{de\,entrega} = 69 \, k V_{rms} \tag{14}$$

$$V_{gerador_{ATP}} = V_{ponto_{de_{entrega}}} \times \sqrt{2}$$
(15)

$$V_{gerador_{ATP}} = 97.580,73 \, kV \tag{16}$$

Transformador

Os transformadores TR1 e TR2 foram baseados no modelo da fabricante WEG, cuja potência nominal é de 5 MVA, em que a tensão no primário é de 69kV e a tensão no secundário de 13.8kV. Ambos são de característica DYn1, ou seja, ligado em delta no primário, estrela no secundário com neutro acessível e defasado de 30° elétricos (secundário em relação ao primário). Possuem uma impedância percentual de 10%, iremos considerar para fins do estudo de proteção os valores de $R_{\%} = 1\%$ e $X_{\%} = 9\%$.

No ATPDraw, teremos que parametrizar as tensões no secundário em relação a tensão de fase, logo, através da equação 17:

$$V_{fase_{ATP}} = \frac{V_{linha_{secund\acute{a}rio}}}{\sqrt{3}}$$
(17)

$$V_{fase_{ATP}} = \frac{13800}{\sqrt{3}} = 7,96743 \, kV \tag{18}$$

Para calcularmos a resistência e indutância interna, faremos:

• Para o primário ligado em delta:

$$Z_{sistema_{primário}} = \frac{V_{nominal_{primário}}^{2}}{S_{nominal/3}}$$
(19)

$$Z_{sistema_{primário}} = \frac{69000^2}{1666666,66} = 2856,6\ \Omega \tag{20}$$

$$R_{prim\acute{a}rio} = Z_{sistema}{}_{prim\acute{a}rio} \times R_{\%}$$
(21)

$$R = 28,566 \,\Omega \tag{22}$$

$$L_{primário} = Z_{sistema_{primário}} \times X_{\%}$$
(23)

$$X = 257,09 \ \Omega$$
 (24)

• Para o secundário ligado em estrela:

$$Z_{siste} = \frac{\left(\frac{V_{nominal secundário}}{\sqrt{3}}\right)^2}{S_{nominal}/3}$$
(25)

$$Z_{sistema_{secundário}} = \frac{7967,43^2}{1666666,66} = 38,08\,\Omega \tag{26}$$

$$R_{secund{\acute{a}rio}} = Z_{sistema_{secund{\acute{a}rio}}} \times R_{\%}$$
(27)

$$R = 0.38 \,\Omega \tag{28}$$

$$L_{secund{\acute{a}rio}} = Z_{sistema\,secund{\acute{a}rio}} \times X_{\%}$$
(29)

$$X = 3,42 \ \Omega \tag{30}$$

Simulação de curto-circuito no barramento de 69Kv

Para obter o nível de curto-circuito nos barramentos da subestação, são realizadas simulações, onde uma chave irá fechar após um tempo de 50 milissegundos fazendo com que o fluxo de corrente flua para a terra (em casos de curto-circuito fase-terra) ou ocorra um conflito no fluxo de corrente entre duas ou três fases (curto-circuito fase-fase).

Curto-circuito trifásico para terra

Para simularmos um curto-circuito trifásico do lado de alta tensão para a terra é realizado o fechamento de uma chave com três polos, no qual o fluxo de corrente das três fases irá fluir para a terra. Na Figura 22 pode ser visualizado o momento antes do fechamento da chave, em que o eixo Y é definido pela amplitude da corrente e o eixo X pelo tempo em milissegundos. Na Figura 23 é visualizado o momento pós falta (fechamento das chaves), onde é possível visualizar o valor de corrente de curtocircuito (10kA).



Figura 22 - Momento antes do curto-circuito

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

Curto-circuito bifásico - terra (fase AB – terra)

Para simularmos um curto-circuito bifásico (fase A e fase B) do lado de alta tensão para a terra (fase AB - terra) é realizado o fechamento de uma chave com dois polos localizados na fase A e na fase B, no qual o fluxo de corrente das duas fases irá fluir para a terra. Na Figura 24 pode ser visualizado o momento antes do fechamento da chave, em que o eixo Y é definido pela amplitude da corrente e o eixo X pelo tempo em milissegundos. Na Figura 25 é visualizado o momento pós falta (fechamento das chaves), onde é possível visualizar o valor de corrente de curto-circuito (8kA).



Figura 24 - Momento antes do curto-circuito

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).



Figura 25 - Curto-circuito bifásico fase AB - terra

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

Curto-circuito bifásico - terra (fase AC - terra)

Para simularmos um curto-circuito bifásico (fase A e fase C) do lado de alta tensão para a terra é realizado o fechamento de uma chave com dois polos localizados na fase A e na fase C, no qual o fluxo de corrente das duas fases irá fluir para a terra. Na Figura 26 pode ser visualizado o momento antes do fechamento da chave, em que o eixo Y é definido pela amplitude da corrente e o eixo X pelo tempo em milissegundos.

Na Figura 27 é visualizado o momento pós falta (fechamento das chaves), onde é possível visualizar o valor de corrente de curto-circuito (8kA).







Figura 27 - Curto-circuito bifásico fase AC - terra

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

Curto-circuito bifásico - terra (fase BC - terra)

Para simularmos um curto-circuito bifásico (fase B e fase C) do lado de alta tensão para a terra é realizado o fechamento de uma chave com dois polos localizados na fase B e na fase C, no qual o fluxo de corrente das duas fases irá fluir para a terra. Na Figura 28 pode ser visualizado o momento antes do fechamento da chave, em que o eixo Y é definido pela amplitude da corrente e o eixo X pelo tempo em milissegundos. Na Figura 29 é visualizado o momento pós falta (fechamento das chaves), onde é possível visualizar o valor de corrente de curto-circuito (8kA).



Figura 28 - Momento antes do curto-circuito

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).



Figura 29 - Curto-circuito bifásico fase BC - terra

Curto-circuito monofásico (fase A - terra)

Para simularmos um curto-circuito monofásico (fase A) do lado de alta tensão para a terra é realizado o fechamento de uma chave com um polo localizado na fase A, no qual o fluxo de corrente irá fluir para a terra. Na Figura 30 pode ser visualizado o momento antes do fechamento da chave, em que o eixo Y é definido pela amplitude da corrente e o eixo X pelo tempo em milissegundos.





Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).



Figura 31 - Curto-circuito monofásico fase A - terra

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

Curto-circuito monofásico (fase B – terra)

Para simularmos um curto-circuito monofásico (fase B) do lado de alta tensão para a terra é realizado o fechamento de uma chave com um polo localizado na fase B, no qual o fluxo de corrente irá fluir para a terra. Na Figura 32 pode ser visualizado o momento antes do fechamento da chave, em que o eixo Y é definido pela amplitude da corrente e o eixo X pelo tempo em milissegundos. Na Figura 33 é visualizado o momento pós falta (fechamento das chaves), onde é possível visualizar o valor de corrente de curto-circuito (5kA).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).



Figura 33 - Curto-circuito monofásico fase B - terra

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

Curto-circuito monofásico (fase C - terra)

Para simularmos um curto-circuito monofásico (fase C) do lado de alta tensão para a terra é realizado o fechamento de uma chave com um polo localizado na fase C, no qual o fluxo de corrente irá fluir para a terra. Na Figura *34* pode ser visualizado o momento antes do fechamento da chave, em que o eixo Y é definido pela amplitude da corrente e o eixo X pelo tempo em milissegundos. Na Figura *35* é visualizado o momento pós falta (fechamento das chaves), onde é possível visualizar o valor de corrente de curto-circuito (5kA).



Figura 34 - Momento antes do curto-circuito

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).





Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

3.3 Memorial de cálculo para dimensionamento das proteções

Cálculo da corrente nominal dos transformadores

• Corrente no primário:

$$I_{linha_{nominal_{primário}}} = \frac{S_{nominal}}{V_{L_{Primário}}}$$
(31)

$$I_{linha_{nominal_{primario}}} = \frac{5000000}{69000}$$
(32)

$$I_{linha_{nominal_{primário}}} = 72,46 A$$

$$I_{fase_{nominal_{primário}}} = \frac{I_{linha_{nominal_{primário}}}}{\sqrt{3}}$$
(33)

$$I_{fase_{nominal_{primário}}} = 41,83 A \tag{34}$$

• Corrente no secundário:

$$I_{nominal_{secundário}} = \frac{S_{nominal}}{V_{L_{secundário}}}$$
(35)

$$I_{nominal_{secundário}} = \frac{5000000}{\sqrt{3 \times 13800}}$$
(36)

$$I_{nominal_{secundário}} = 209,18 \, A \tag{37}$$

$$I_{fase_{nomin_{primário}}} = \frac{I_{linha_{nominal_{primário}}}}{\sqrt{3}}$$
(38)

$$I_{fase_{nominal_{primário}}} = 41,83 A \tag{39}$$

Cálculo da corrente inrush dos transformadores

Ao energizar um transformador, irá circular uma corrente de valor elevado por um curto espaço de tempo, essa corrente será responsável pela magnetização do núcleo ferromagnético do transformador. A corrente *inrush* deverá ser calculada para ser considerada no estudo de proteção, com o objetivo de não haver atuação indevida da proteção.

A duração de ocorrência da corrente de magnetização é de aproximadamente 100 milissegundos e para transformadores abaixadores com ligação em delta no primário, utilizamos fatores multiplicativos padrões a depender da potência do transformador. (Mardegan, 2022, p. 568).

$$S_{nominal transformador} < 1 \, MVA \rightarrow I_{inrush} = 10 \times I_{nominal}$$
(40)

$$S_{nominal transformador} \ge 1 \, MVA \to I_{inrush} = 8 \times I_{nominal} \tag{41}$$

Logo:

$$I_{inrush} = 8 \times I_{fase_{nominal_{primário}}}$$
(42)

$$I_{inrush} = 8 \times 41,83 \, A \tag{43}$$

$$I_{inrush} = 334,69 A$$
 (44)

$$T_{inrush} = 0.1 s \tag{45}$$

Dimensionamento dos disjuntores a montante e a jusante dos transformadores:

De acordo com a topologia da subestação, será utilizado dois grupos de disjuntores, um a montante que ficará localizado no barramento de 69kV, sendo responsável pelo seccionamento desse trecho e o a jusante que ficará no trecho de 13,8kV.

• A montante:

$$I_{disjuntor} = 1,25 \times I_{fase_{nominal_{primário}}}$$
(46)

$$I_{disjuntor} = 1,25 \times 41,83 \, A$$
 (47)

$$I_{disjuntor} = 52,28 A \tag{48}$$

$$I_{m\acute{a}x_{interrupção}} = 1,25 \times I_{curtocircuito}_{m\acute{a}ximo}$$
(49)

$$I_{m\acute{a}x_{interrupção}} = 1,25 \times 10 \ kA \tag{50}$$

$$I_{m\acute{a}x_{interrupção}} = 12,5 \ kA \tag{51}$$

De acordo com os cálculos e resultados apresentados no memorial acima (Equação 48 e Equação 51), é possível definir os parâmetros para escolha do modelo do disjuntor, por motivos de disponibilidade no mercado atual, foi o modelo GL da fabricante Areva (Figura 36), com tensão nominal de 69kV, possuindo isolação a gás do tipo SF6, com corrente nominal de 150A e corrente máxima de interrupção de 40 kA.

Figura 36 - Disjuntor GL 69 kV



Fonte: Halptec, (2024).

• A jusante:

 $I_{disjuntor} = 1,25 \times I_{nominal secundário}$ (52)

$$I_{disjuntor} = 1,25 \times 209,18 \, A$$
 (53)

$$I_{disjuntor} = 261,47 A \tag{54}$$

$$I_{m\acute{a}x_{interrupção}} = 1,25 \times I_{curtocircuito\,m\acute{a}ximo}$$
(55)

$$I_{m\acute{a}x_{interrupcão}} = 12,5 \ kA \tag{56}$$

De acordo com os cálculos acima, é possível definir os parâmetros para escolha do modelo do disjuntor, por motivos de disponibilidade no mercado atual, foi selecionado o de modelo *Basic Function Vacuum Circuit Breaker*, da fabricante Schneider (Figura 37), com tensão nominal de 17,5kV, com corrente nominal de 630A e corrente máxima de interrupção de 20 kA.



Figura 37 - Disjuntor de média tensão

Fonte: Schneider Electric, (2024).

Dimensionamento dos transformadores de corrente

Fator de sobrecorrente (FS)

É a relação matemática entre a corrente nominal do transformador de corrente (primário) e a máxima corrente de curto-circuito no trecho instalado, usualmente utiliza-se o fator de 20, logo:

$$I_{máx_{curto_{circuito}}} = 10.000 A \tag{57}$$

$$I_{nominal primário}_{TC_{69kV}} = \frac{I_{máx curto_{circuito}}}{FS}$$
(58)

$$I_{nominal_{primário}_{TC_{69kV}}} = \frac{10.000}{20} / 20$$
 (59)

$$I_{nominal primário}{}_{TC_{69kV}} = 500 A \tag{60}$$

Relação de transformação de corrente (RTC):

$$I_{nominal secund {ario}_{TC_{69kV}}} = 5A \tag{61}$$

$$RTC_{69kV} = \frac{I_{nominal primário_{TC}}}{I_{nominal secundário_{TC}}}$$
(62)

$$RTC_{69kV} = \frac{500 A}{5 A}$$
(63)

$$RTC_{69kV} = 100$$
 (64)

Para o dimensionamento dos TC's que são ligados a linha secundária do transformador, utilizaremos uma relação de 250/5A, onde a corrente do primário do TC será considerada o valor de 250A, logo:

$$RTC_{13,8kV} = 50 (65)$$

Classe de exatidão

"Trata-se do erro máximo que o TC irá admitir em determinada condição (geralmente 20 vezes a corrente nominal)" (Mardegan, 2022, p. 272). Logo utilizaremos os TC's de proteção com a seguinte especificação: 10B200 (Medição na barra de 69kV) e 10B100 (Medição na barra de 13,8 kV), em que:

- 10: Erro máximo de 10% para uma corrente de 20 vezes a corrente nominal;
- B: TC de baixa impedância, indicado para proteção;
- 100: Tensão de saturação secundária do TC (medição 13,8 kV);
- 200: Tensão de saturação secundária do TC (medição 69 kV).

Esquema de ligação

Será adotado o esquema de ligação com o uso de três TC's para cada enrolamento medido e com a corrente de neutro calculada (método 310).

Dimensionamento dos transformadores de potencial no lado de média tensão (13,8 kV)

Relação de transformação de potencial (RTP):

$$V_{nominal primário_{TP}} = 13,8 \, kV \tag{66}$$

$$V_{nominal_{secund{\acute{a}}rio_{TP}}} = 115 V \tag{67}$$

$$RTP = \frac{V_{nominal primário_{TP}}}{V_{nominal secundário_{TC}}}$$
(68)

$$RTP = \frac{13800}{115} \tag{69}$$

$$RTP = 120 \tag{70}$$

Esquema de ligação adotado

Foi selecionado o uso de dois transformadores de potencial com fechamento no secundário em delta aberto, conforme Figura 38.

Figura 38 - Esquema de fechamento do TP em delta aberto



Fonte: MESH ENGENHARIA, (2024)

Proteção de fase primária temporizada (51):

"O ajuste da unidade temporizada de fase para o primário do transformador é de $1,2 \times I_{nominal_{primário}}$ a $1,5 \times I_{nominal_{primário}}$ " (Mardegan, 2022, p. 588). Como a aquisição do sinal de corrente será proveniente de um barramento comum de 69kV, ou seja, a corrente que irá fluir pelo TC no lado de 69kV possuirá a contribuição da corrente nominal do primário dos dois transformadores, logo:

$$I_{pickup_{51}} \ge 1,2 \times 2 \times I_{fase_{nominal_{primário}}}$$
(71)

$$I_{pickup}{}_{51} \ge 1,2 \times 2 \times 41,83 \tag{72}$$

$$I_{pickup_{51}} \ge 100,632 A$$
 (73)

Para realizarmos o ajuste no relé de proteção, utilizaremos valores secundários, ou seja:

$$I_{ajuste}{}_{pkp}{}_{51} \ge \frac{I_{pickup}{}_{51}}{RTC}$$
(74)

$$I_{ajuste}{}_{pkp}{}_{51} = \frac{100,62\,A}{100} \tag{75}$$

$$I_{ajuste_{pkp_{51}}} = 1,00 A$$
 (76)

"Para o cálculo do ajuste da temporização de fase, é levado em consideração o tempo da proteção secundária acrescida do tempo de coordenação do disjuntor e do relé de proteção, este vale em média 0,2 segundos" (Mardegan, 2022, p. 593). Utilizaremos a curva no padrão IEC e do tipo inversa, logo, de acordo com a Equação (11):

$$t = \left(\frac{0,14}{\left(\frac{I}{I_p}\right)^{0.02} - 1} \times T_p\right)$$
(77)

$$t = 0.57s + 0.2s = 0.77s \tag{78}$$

$$I = 10kA \tag{79}$$

$$I_p = 100,62 A \tag{80}$$

$$0,77 = (1,45 x T_p) \tag{81}$$

$$T_{Ajuste} = 0,52 s \tag{82}$$

Proteção de fase primária instantânea (50):

De forma análoga ao dimensionamento da unidade temporizada, o ajuste da função instantânea deverá levar em consideração a contribuição dos dois transformadores em operação, logo, o ajuste da unidade instantânea deverá ser:

$$I_{pickup}{}_{50} \ge 1,1 \times 2 \times I_{inrush} \tag{83}$$

$$I_{pickup}{}_{50} \ge 1,1 \times 2 \times 334,69 A$$
 (84)

$$I_{pickup}{}_{50} = 736,31A \tag{85}$$

Para realizarmos o ajuste no relé de proteção, utilizaremos valores secundários, ou seja:

$$I_{ajuste}{}_{pkp}{}_{50} = \frac{I_{pickup}{}_{50}}{}_{RTC}$$
(86)

$$I_{ajuste}{}_{pkp}{}_{50} = \frac{736,31}{100}$$
(87)

$$I_{ajuste}{}_{pkp}{}_{50} = 7,36 A \tag{88}$$

Proteção de fase secundária temporizada (51):

$$I_{pickup_{51}} \ge 1,2 \times I_{nominal secundário}$$
(89)

$$I_{pickup_{51}} \ge 1,2 \times 209,18 \,A \tag{90}$$

$$I_{pickup_{51}} \ge 251,01 A$$
 (91)

Para realizarmos o ajuste no relé de proteção, utilizaremos valores secundários, ou seja:

$$I_{ajuste}{}_{pkp}{}_{51} = \frac{I_{pickup}{}_{51}}{_{RTC}}$$
(92)

$$I_{ajuste}{}_{pkp}{}_{51} = \frac{251,01}{50} \tag{93}$$

$$I_{ajuste}{}_{pkp}{}_{51} = 5,02 A \tag{94}$$

"Para o cálculo do ajuste da temporização de fase, é levado em consideração o tempo da atuação de abertura do disjuntor acrescida do tempo de resposta do relé de proteção, que em média vale 0,2 segundos" (Mardegan, 2022, p. 594).

$$t = \left(\frac{13,5}{\left(\frac{l}{l_p}\right)^1 - 1} \times T_p\right)$$
(95)

$$t = 0.2 s$$
 (96)

$$I = 10 \, kA \tag{97}$$

$$I_p = 251,01 A \tag{98}$$

$$0,2 = (0,34 x T_p)$$
(99)

$$T_p = 0,57$$
 (100)

$$T_{Ajuste} = 0,57 s \tag{101}$$

Proteção de fase secundária instantânea (50)

Essa função ficará bloqueada no relé para garantir coordenação e seletividade.

Proteção de tensão no enrolamento secundário

Subtensão (27):

"Utilizaremos dois estágios de ajuste para a função de subtensão, em que o estágio um terá um retardo para envio de sinal de abertura do disjuntor e o segundo estágio será instantâneo, ou seja, tempo nulo" (Mamede Filho, 2014, p. 315).

$$V_{pickup_{27_1}} = 0.85 \times V_{nominal_{rede}}$$
(102)

$$V_{pickup_{27_1}} = 0.85 \times 13.800V \tag{103}$$

$$V_{pickup_{27_1}} = 11.730V \tag{104}$$

$$V_{pickup_{27_2}} = 0.80 \times V_{nominal_{rede}}$$
(105)

$$V_{pickup_{27_2}} = 0.80 \times 13.800V \tag{106}$$

$$V_{pickup_{27_2}} = 11.040V \tag{107}$$

Para realizarmos o ajuste no relé de proteção utilizaremos valores secundários, ou seja:

$$V_{ajuste}{}_{pkp}{}_{27_1} = \frac{V_{pickup}{}_{27_1}}{}_{RTP}$$
(108)

$$V_{ajuste}{}_{pkp}{}_{27_1} = \frac{11.730}{120} \tag{109}$$

$$V_{ajuste}{}_{pkp}{}_{27_1} = 97,75V \tag{110}$$

$$t_{ajuste_{27_1}} = 2 s$$
 (111)

$$V_{ajuste}{}_{pkp}{}_{27_2} = \frac{V_{pickup}{}_{27_2}}{}_{RTP}$$
(112)

$$V_{ajuste}{}_{pkp}{}_{27_2} = \frac{11.040}{120} \tag{113}$$

$$V_{ajuste}{}_{pkp}{}_{27_2} = 92,00V \tag{114}$$

$$t_{ajuste_{27_2}} = 0 s$$
 (115)

Sobretensão (59):

Os níveis máximos de tensão admitidos em um sistema elétrico de potência não devem ultrapassar 115% do valor de tensão nominal para a unidade temporizada e 120% da tensão nominal para a unidade instantânea. De maneira análoga a função 27, utilizaremos dois estágios de ajuste para a função de sobretensão, em que o estágio um terá um retardo para envio de sinal de abertura do disjuntor e o segundo estágio será instantâneo, ou seja, tempo nulo (Mamede Filho, 2014, p. 320).

$$V_{pickup}_{59_1} = 1,15 \times V_{nominal_{rede}}$$
(116)

$$V_{pickup_{59_1}} = 1,15 \times 13.800V \tag{117}$$

$$V_{pickup_{59_1}} = 15.870V \tag{118}$$

$$V_{pickup} = 1,20 \times V_{nominal_{rede}}$$
(119)

$$V_{pickup}_{59_2} = 1,20 \times 13.800V \tag{120}$$

$$V_{pickup_{59_2}} = 16.560V \tag{121}$$

Para realizarmos o ajuste no relé de proteção utilizaremos valores secundários, ou seja:

$$V_{ajuste}{}_{pkp}{}_{59_1} = \frac{V_{pickup}{}_{59_1}}{}_{RTP}$$
(122)

$$V_{ajuste}{}_{pkp}{}_{59_1} = \frac{15.870\,V}{120} \tag{123}$$

$$V_{ajuste_{pkp_{59_1}}} = 132,25V \tag{124}$$

$$t_{ajuste_{59_1}} = 1,5 s$$
 (125)

$$V_{ajuste}{}_{pkp}{}_{59_2} = \frac{V_{pickup}{}_{59_2}}{}_{RTP}$$
(126)

$$V_{ajuste}{}_{pkp}{}_{59_2} = \frac{\frac{16.560\,V}{120}}{120} \tag{127}$$

$$V_{ajuste}{}_{pkp}{}_{59_2} = 138 V \tag{128}$$

$$t_{ajuste}_{59_2} = 0 s \tag{129}$$

Proteção diferencial (87):

Corrente diferencial (*I*_{diff}):

• Lado de 69 kV

Posição de TAP mínimo: 63,825 kV:

$$I_{nom_{TAP_{Min}}} = \frac{S_{nom}}{\sqrt{3}xV_{TAP_{Min}}} = 45,22A$$
(130)

$$I_{nom_{TAP_{médio}}} = \frac{S_{nom}}{\sqrt{3}xV_{TAP_{Médio}}} = 41,83A$$
(131)

$$I_{nom_{TAP_{Min_{TC}}}} = \frac{I_{nom_{TAP_{Min}}}}{RTC} = 0,4522A$$
(132)

$$I_{nom_{TAP_{M\acute{e}dio_{TC}}}} = \frac{I_{nom_{TAP_{M\acute{e}dio}}}}{RTC} = 0,4183A$$
(133)

-

$$\Delta_{Ia_1} = |I_{nom_{TAP_{Min_{TC}}}} - I_{nom_{TAP_{Médio_{TC}}}}|$$
(134)

$$\triangle_{Ia_1} = |0,4522A - 0,4183A| \tag{135}$$

$$\triangle_{Ia_1} = 0,0339A \tag{136}$$

Posição de TAP médio: 69 kV:

$$\Delta_{Ia_2} = |I_{nom_{TAP}M\acute{e}dio_{TC}} - I_{nom_{TAP}M\acute{e}dio_{TC}}|$$
(137)

$$\Delta_{Ia_2} = |0,4183A - 0,4183A| \tag{138}$$

$$\triangle_{Ia_2} = 0A \tag{139}$$

Posição de TAP máximo: 72,45 kV:

$$I_{nom_{TAP_{M\acute{a}x}}} = \frac{S_{nom}}{\sqrt{3}xV_{TAP_{M\acute{a}x}}} = 39,84A \tag{140}$$

$$I_{nom_{TAP_{M}\acute{a}x_{TC}}} = \frac{I_{nom_{TAP_{M}\acute{n}}}}{RTC} = 0,3984A \tag{141}$$

$$\Delta_{Ia_3} = |I_{nom_{TAP}M\acute{a}x_{TC}} - I_{nom_{TAP}M\acute{e}dio_{TC}}|$$
(142)

$$\triangle_{Ia_3} = |0,3984A - 0,4183A| \tag{143}$$

$$\triangle_{Ia_3} = 0,0199A \tag{144}$$

• Lado de 13,8 kV

O lado secundário do transformador não possui TAP de ajuste.

Cálculo do *slope* (inclinação)

Com a utilização dos relés digitais, é adotado a parametrização de dois estágios de *slope*, que definiremos como *slope 1* e *slope 2.*

"O cálculo do dimensionamento do *slope* é dado a partir do valor de erro total encontrado através da expressão a seguir" (Mamede Filho, 2014, p. 335).

$$e_T = e_M + e_{TC} + e_C \tag{145}$$

Em que:

eT = Erro total
eM = Erro de ajuste
eTC = Erro de precisão dos TC's

eC = Erro de corrente a vazio

Erro de ajuste (e_{Ajuste}):

• Lado de 69kV

Posição de TAP mínimo:

$$e_{Ajuste_1} = \frac{\triangle_{Ia_1}}{I_{nom_{TAP_{M\acute{e}dio_{TC}}}}} x100\%$$
(146)

$$e_{Ajuste_1} = \frac{0,0339A}{0,4183A} \times 100\% \tag{147}$$

$$e_{Ajuste_1} = 8,1\% \tag{148}$$

Posição de TAP nominal:

$$e_{Ajuste_2} = \frac{\Delta_{Ia_2}}{I_{nom_{TAP_{Médio_{TC}}}}} x100\%$$
(149)

$$e_{Ajuste_2} = 0\% \tag{150}$$

Posição de TAP máximo:

$$e_{Ajuste_3} = \frac{\Delta_{Ia_3}}{I_{nom_{TAP}\,M\acute{e}dio_{TC}}} x100\% \tag{151}$$

$$e_{Ajuste_3} = \frac{0,0199A}{0,4183A} \times 100\% \tag{152}$$

$$e_{Ajuste_3} = 4,75\%$$
 (153)

 Para o valor de erro de ajuste será utilizado o erro de maior valor, logo:

$$e_{Ajuste} = 8,1\% \tag{154}$$

Erro de precisão dos TC's (e_{TC}):
"É o erro associado a exatidão dos TC's de proteção, geralmente possuem o valor de 2,5%, 5% ou 10%" (Mardegan, 2022, p. 293). Selecionaremos o pior caso, logo:

$$e_{TC} = 10\%$$
 (155)

Erro de corrente a vazio (e_c) :

"É o erro relativo as correntes geradas quando o transformador opera em vazio (sem carga), geralmente possuem o valor de 2% logo:" (Mamede Filho, 2014, p. 338).

$$e_c = 2\% \tag{156}$$

$$e_T = e_{Ajuste} + e_{TC} + e_C \tag{157}$$

$$e_T = 8,1\% + 10\% + 2\% \tag{158}$$

$$SLOPE \ 1 = 20,1 \ \%$$
 (159)

$$|Ajuste_{SLOPE1} = 25\%$$
(160)

"O cálculo do *slope* 2 é feito através do valor encontrado para o *slope* 1, multiplicado por 2, logo:" (Mardegan, 2022, p. 601).

$$SLOPE_2 = 2 x SLOPE_1 \tag{161}$$

$$Ajuste_{SLOPE2} = 50 \%$$
 (162)

Cálculo do pick-up

Para o ajuste do pick-up da função diferencial, o fabricante recomenda o dimensionamento a partir da Equação (155):

$$087P \ge \frac{0.02 \times I_{nominal}}{TAP_{minimo}}$$
(163)

$$087P \ge \frac{0.02 \times 72,46\,A}{63,825\,kV} \tag{164}$$

$$087P \ge 0,022$$
 (165)

$$087P_{ajuste} = 0,60 \tag{166}$$

3.4 Tabela de ajuste das proteções no SEL-487E-5

Nesta seção serão elaboradas algumas tabelas (Tabela 2, Tabela 3, Tabela 4, Tabela 5, Tabela 6 e Tabela 7) com os ajustes obtidos na etapa de dimensionamento da proteção, estas tabelas estarão com as nomenclaturas utilizadas pelo relé de proteção selecionado, visto que é uma boa prática pois facilita a equipe de comissionamento em campo.

Subtensão (27) Elemento 1 Configurações Nome Valor Faixa 2701 VNMINVF 27P1P1 97,75 2,00 - 300,0027TC1 1 **SELogic Equation** 27P1D1 2,00 0,00 - 16000,0027P1P2 92,00 2,00 - 300,00

Tabela 1 - Ajustes da função 27 no AcSELerator QuickSet

- 27O1: Seleção do tipo de medição para fins de proteção;
- 27P1P1: Ajuste de pick-up do primeiro estágio;
- 27TC1: Utilizado para criação de lógicas internas no relé;
- 27P1D1: Tempo de atuação do primeiro estágio;
- 27P1P2: Ajuste de pick-up do segundo estágio.

Sobretensão (59) Elemento 1		nto 1
	Configurações	
Nome	Valor	Faixa
5901	VNMINVF	-
59P1P1	132,25	2,00 - 300,00
59TC1	1	SELogic Equation
59P1D1	1,50	0,00 – 16000,00
59P1P2	138,00	2,00 - 300,00
Canta, Cla	In a wanta wanta waƙa wia ay M	or (2024)

Tabela 2 - Ajustes da função 59 no AcSELerator QuickSet

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

- 59O1: Seleção do tipo de medição para fins de proteção;
- 59P1P1: Ajuste de pick-up do primeiro estágio;
- 59TC1: Utilizado para criação de lógicas internas no relé;
- 59P1D1: Tempo de atuação do primeiro estágio;
- 59P1P2: Ajuste de pick-up do segundo estágio.

Tabela 3 - Ajustes da função 50 (69kV) no AcSELerator QuickSet

Elemento de s	obrecorrente de fas	e – Terminal S
	Configurações	
Nome	Valor	Faixa
50SP1P	7,36	0,25 – 100,00
67SP1D	0	0,00 - 16000,00

- 50SP1P: Ajuste do pick-up da função 50;
- 67SP1D: Ajuste do tempo da função 50.

Elemento 01 d	e sobrecorrente de	tempo inverso
	Configurações	
Nome	Valor	Faixa
51001	IMAXSF	-
51P01	1,00	0,25 – 16,00
51C01	C1	U1-U5, C1-C5
51TD01	0,52	0,05 - 1,00
51TC01	N	Y, N

Tabela 4 - Ajustes da função 51 (69kV) no AcSELerator QuickSet

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

- 51001: Seleção de qual terminal será habilitado a função 51;
- 51P01: Ajuste do *pick-up* da função 51;
- 51C01: Ajuste do tipo de curva utilizado;
- 51TD01: Ajuste do dial de tempo;
- 51TC01: Ajuste de função *reset* eletromecânico.

Tabela 5 - Ajustes da função 51 (Lado 1 - 13,8kV).

Elemento 02 d	le sobrecorrente de	tempo inverso
	Configurações	
Nome	Valor	Faixa
51002	IMAXTF	-
51P02	5,02	0,25 – 16,00
51C02	C2	U1-U5, C1-C5
51TD02	0,57	0,05 – 1,00
51TC02	N	Y, N

Elemento 03 d	e sobrecorrente de	tempo inverso
	Configurações	
Nome	Valor	Faixa
51003	IMAXUF	-
51P03	5,02	0,25 – 16,00
51C03	C2	U1-U5, C1-C5
51TD03	0,57	0,05 – 1,00
51TC03	N	Y, N

Tabela 6 - Ajustes da função 51 (Lado 2 - 13,8kV).

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

Tabela 7 - Ajustes da função 87 no AcSELerator QuickSet.

Configurações e dados de elementos diferenciais		os diferenciais
	Configurações	
Nome	Valor	Faixa
MVA	10	1 – 5000, OFF
087P	0,60	0,10-4,00
SLP1	25,00	5,00 - 90,00
SLP2	50,00	5,00 - 90,00

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

- MVA: Potência do transformador, nesse caso será a soma dos dois transformadores (que se comportam como um transformador com dois enrolamentos secundários);
- O87P: Ajuste de pick-up;
- SLP1: Ajuste do *slope* 1;
- SLP2: Ajuste do slope 2.

3.5 Parametrização do relé de proteção

Seguindo as proteções que foram utilizadas na etapa do estudo de proteção, foi selecionado um relé de proteção da fabricante SCHWEITZER ENGINEERING

LABORATORIES, de modelo SEL-487E-5 (Figura 39), cujo software de parametrização é o AcSELerator.

O relé selecionado possui em seu *hardware* nove entradas de sinais de corrente, em que para esse projeto será utilizada nove entradas de corrente, simulando um transformador com duplo enrolamento secundário, no terminal S do relé será ligado as entradas de corrente do lado de 69kV, o terminal T terá as entradas de corrente do secundário do TR1 e o terminal U terá a aquisição dos sinais de corrente do secundário do TR2. A tensão de alimentação do relé de proteção é de 48V a 125V em tensão contínua.



Figura 39 - Relé de Proteção Modelo SEL 487E

Fonte: SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, (2023).

Configurações gerais do relé

Através do uso do *software* de parametrização do relé, será feito as devidas configurações no relé de proteção de acordo com o sistema considerado nesse trabalho (Figura 40).

S & B 🖉 H H H S & O O S	
Control Inputs Ontrol Inputs Settings Group Selection	Relay Configuration
······ O Frequency Source Selection	ECTTERM Enable the Following Ourrent Terminals
O Synchrophasor Settings Time and Date Management	S,T,U Combination of: S, T, U, W, X or OFF
Data Reset Control	EPTTERM Enable the Following Voltage Terminals
ONP SV Application Settings	V Combination of: V, Z or OFF
Monitor	E87 Include the Following Terminals in the Differential Element
✓ O Set 1	S,T,U Combination of: S, T, U or OFF
Relay Configuration Current Transformer Data	EREF. Enable the Following Number of Restricted Earth Fault Elements
	N V Select: N, 1-3
Voltage Reference Terminal Selection Differential Element Configuration and Data	EEO Enable Definite Time Overaurent Elemente for the Following Terminal
Restricted Earth Fault Elements	S,T,U Combination of: S, T, U, ST, TU or OFF
> ·· 🕘 Winding S	
> - O Winding U	Select: N. 1-10
> • • Winding W	
> · • Winding ST	E46 Enable Current Unbalance Elements for the Following Terminals
> - O Winding TU	
> · • Winding WX	E59 Enable the Following Number of Overvoltage Elements
> Inverse Time Overcurrent Elements	1 v Select: N, 1-5
Volts per Hertz Elements	E27 Enable the Following Number of Undervoltage Elements
- O Under Voltage Elements	1 √ Select: N, 1-5
Over Voltage Elements	

Figura 40 - Janela de parametrização das configurações gerais do relé

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

- ECTTERM: Habilitar quais terminais possuirá as entradas de corrente
- EPTTERM: Habilitar os terminais que possuirá as entradas de tensão
- E87: Informar quais os terminais estarão habilitados para o elemento diferencial
- E50: Terminais em que irá possuir função de sobrecorrente instantânea
- E51: Número de elementos para a função de sobrecorrente temporizada
- E59: Número de elementos para a função de sobretensão
- E27: Número de elementos para a função de subtensão

Entrada de dados do transformador de corrente

Nesta etapa, é realizado a parametrização no software (Figura 41) com os dados dos TC's selecionados.



Figura 41 - Janela de parametrização das configurações dos TC's

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

- CTRS: Valor de RTC dos TC' conectados no terminal S
- CTCONS: Tipo de conexão do TC no terminal S
- CTRT: Valor de RTC dos TC' conectados no terminal T
- CTCONT: Tipo de conexão do TC no terminal T
- CTRU: Valor de RTC dos TC' conectados no terminal U
- CTCONU: Tipo de conexão do TC no terminal U

Entrada de dados do transformador de potencial

Nesta etapa, é realizado a parametrização no software (Figura 42) com os dados dos TP's selecionados.



Figura 42 - Janela de parametrização das configurações dos TP's

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

- PTRV: Valor de RTP dos TP' conectados no terminal V
- PTCONV: Tipo de conexão do TP no terminal P
- PTCOMPV: Compensação angular
- VNOMV: Tensão de linha-linha secundária no terminal V

Ajustes das funções de subtensão e sobretensão

Na Figura 43 é realizado a parametrização da função de subtensão, no qual os valores de entrada foram calculados.



Figura 43 - Janela de parametrização da função 27.

Na Figura 44 é realizado a parametrização da função de sobretensão, no qual os valores de entrada foram calculados.

Figura 44 - Janela de parametrização da função 59.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

Ajustes da função de sobrecorrente instantâneo de fase (50)

Nesta etapa, é realizado a configuração no software com os valores de parametrização da função de sobrecorrente instantânea calculada.

Terminal S (Lado de 69kV)

Na Figura 45 e Figura 46 é realizado a parametrização da função de sobrecorrente instantânea de fase no lado de 69 kV da subestação, no qual os valores de entrada foram calculados.

Overcurrent Elements Terminal S
575 Enable Directional Elements
I Select: Y, N IPS Current Transformer Polarity Select: P, N
F

Figura 45 - Janela de parametrização da função 50.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

 E50S: Habilitar o tipo de elemento de sobrecorrente instantânea será configurado no terminal S. "P" para elemento de sequência positiva, "Q" para elemento de sequência negativa e "G" para elemento de sequência zero.

Figura 46 - Janela de parametrização da função 50.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

• 50SP1P: Valor de ajuste do pick-up da função 50.

Terminal T (Lado 1 de 13,8kV)

) 🚯 🛅 💭 🛄 🗐 🗟 🖻 🕑 🚳 🧏 V	
Global Monitor Group 1 Set 1	Overcurrent Elements Terminal 1
Relay Configuration	P Combination of: P. O. G
O Current Transformer Data	
O Potential Transformer Data	E67T Enable Directional Elements
🕘 Voltage Reference Terminal Selection	N Select: Y, N
💿 Differential Element Configuration and Data	
🕘 Restricted Earth Fault Elements	CTPT Current Transformer Polarity
V · O Winding S	P Select: P, N
Overcurrent Elements Terminal S Overcurrent Element	
🕘 Terminal S Neg-Seq Overcurrent Element	Z1ANGT Positive Sequence Line Impedance Angle (deg)
🕘 Terminal S Zero-Seq Overcurrent Element	89,00 Range = 5,00 to 90,00
🔘 Terminal S Current Unbalance Element	
🕘 Breaker S Failure Logic	ZUANGT Zero Sequence Line Impedance Angle (deg)
Directional Element Blocking	85,00 Range = 5,00 to 90,00
🗸 🔘 Winding T	
Overgurrent Elements Terminal T	EADVST Enable Advanced Setting

Figura 47 - Janela de parametrização da função 50.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

 E50S: Habilitar o tipo de elemento de sobrecorrente instantânea será configurado no terminal T. "P" para elemento de sequência positiva, "Q" para elemento de sequência negativa e "G" para elemento de sequência zero.

Figura 48 - Janela de parametrização da função 50.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

• 50SP1P: Valor de ajuste do pick-up da função 50.

Conforme definido no memorial de cálculo, para o enrolamento de 13,8 kV a função instantânea ficará desabilitada, logo configuraremos na posição "OFF".

Terminal U (Lado 2 de 13,8kV)

Figura 49 - Janela de parametrização da função 50.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

Figura 50 - Janela de parametrização da função 50.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

Conforme definido no item 3.3.9 no memorial de cálculo, para o enrolamento de 13,8 kV a função instantânea ficará desabilitada, logo configuraremos na posição "OFF".

Ajustes da função de sobrecorrente temporizada de fase (51)

Nesta etapa, é realizado a configuração no software com os valores de parametrização da função de sobrecorrente temporizada calculada.

Terminal S (Lado de 69kV)

Figura 51 - Janela de parametrização da função 51.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

 51001: Determinar qual terminal de ligação será atribuído ao ajuste da janela "Inverse time overcurrent element 01".

Para esse ajuste, foi determinado o terminal S (Lado de 69kV).

- 51P01: Ajuste do valor de *pick-up*.
- 51C01: Ajuste do tipo de curva utilizado.

Para esse ajuste, foi utilizado o "C1", que corresponde a curva IEC inversa.

- 51TD01: Ajuste do valor de dial de tempo, encontrado na Equação (77).
- 51RS01: Ajuste para habilitar ou não o uso de *reset* eletromecânico.

Terminal T (Lado 1 de 13,8kV)

 ☆ AcSELerator® QuickSet - [Editor de Ajustes - SEL 487 - TCC] ☆ Arquivo Editar Visualizar Comunicações Ferramer ☆ ☆ 참 값 나 다 다 다 다 다 다 다 다 다 다 다 다 다 다 다 다 다 다	ialterado] (SEL-487E-5 200 v7.1.0.2)] itas Janelas Ajuda Idioma	
> -● Global ▲ > -● Monitor ▲ ✓ -● Group 1 ▲ ✓ -● Set 1 ■ ● Relay Configuration ■ ● Competition ■	Inverse Time Overcurrent Element 02 Inverse Time Overcurrent Element 02 S1002 Inverse Time Overcurrent Element 02 Overste Quantity	
Outrain Transformer Data Ottarial Transformer Data Ottarial Reference Terminal Selection Olfferential Element Configuration and Data	IMAXTF 51P02 Inverse Time Overcurrent Element 02 Pickup Value (SELogic) Range = 0.25-16.00 A,sec	~
	5,020000 51C02 Inverse Time Overcurrent Element 02 Curve Selection C2 Select: U1-U5, C1-C5 51TD02 Inverse Time Overcurrent Element 02 Time Dial (SELogic) Range = 0.05-1.00	
> ⊕ Winding ST > ⊕ Winding TU > ⊕ Winding UW > ⊕ Winding WX ∨ ⊕ Inverse Time Overcurrent Elements	0.570000 S1R502 Inverse Time Overcurrent Element 02 Electromechanical Reset Enable N V Select: Y, N	
Inverse Time Overcurrent Element 01 Inverse Time Overcurrent Element 02 Inverse Time Overcurrent Element 03 Inverse Time Overcurrent Element 04	51TC02 Inverse Time Overcurrent Element 02 Torque Control (SELogic) PLT09	

Figura 52 - Janela de parametrização da função 51.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

• 51002: Determinar qual terminal de ligação será atribuído ao ajuste da janela "*Inverse time overcurrent element 02*".

Para esse ajuste, foi determinado o terminal T (Lado 1 de 13,8kV).

- 51P02: Ajuste do valor de *pick-up*.
- 51C02: Ajuste do tipo de curva utilizado.

Para esse ajuste, foi utilizado o "C2", que corresponde a curva IEC muito inversa.

- 51TD02: Ajuste do valor de dial de tempo, encontrado na Equação (96).
- 51RS02: Ajuste para habilitar ou não o uso de *reset* eletromecânico.

Terminal U (Lado 2 de 13,8kV)

AcSELerator® QuickSet - [Editor de Ajustes - SEL 487 - TCC[alterado] (SEL-487E-5 200 v7.1.0.2)] 🚰 Arquivo Editar Visualizar Comunicações Ferramentas Janelas Ajuda Idioma 6 🖓 🛅 💋 💭 🔄 🕒 🕑 🔕 🕱 🖕 📮 🗖 🖬 🖾 🗇 > - 🕘 Global Inverse Time Overcurrent Element 03 - Monitor Group 1
 G Inverse Time Overcurrent Element 03 51003 Inverse Time Overcurrent Element 03 Operate Quantity Current Transformer Data
 Potential Transformer Data IMAXUF v Voltage Reference Terminal Selection Differential Element Configuration and Data 51P03 Inverse Time Overcurrent Element 03 Pickup Value (SELogic) Range = 0.25-16.00 A,sec Restricted Earth Fault Elements
 Winding S 5,020000 ... · O Winding T 51C03 Inverse Time Overcurrent Element 03 Curve Selection Winding U
 Winding W ✓ Select: U1-U5, C1-C5 C2 - 🔘 Winding X 51TD03 Inverse Time Overcurrent Element 03 Time Dial (SELogic) Range = 0.05-1.00 Winding X
 Winding ST
 Winding TU
 Winding UW 0,570000 ---51RS03 Inverse Time Overcurrent Element 03 Electromechanical Reset Enable Winding WX
 Inverse Time Overcurrent Elements ✓ Select: Y, N N Inverse Time Overcurrent Element 01 51TC03 Inverse Time Overcurrent Element 03 Torque Control (SELogic) Inverse Time Overcurrent Element 02 Inverse Time Overcurrent Element 03 PLT09 ... Inverse Time Overcurrent Element 04

Figura 53 - Janela de parametrização da função 51.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

• 51002: Determinar qual terminal de ligação será atribuído ao ajuste da janela "*Inverse time overcurrent element 02*".

Para esse ajuste, foi determinado o terminal T (Lado 2 de 13,8kV).

- 51P02: Ajuste do valor de *pick-up*.
- 51C02: Ajuste do tipo de curva utilizado.

Para esse ajuste, foi utilizado o "C2", que corresponde a curva IEC muito inversa.

- 51TD02: Ajuste do valor de dial de tempo, encontrado na Equação (96).
- 51RS02: Ajuste para habilitar ou não o uso de *reset* eletromecânico.

Ajustes da função diferencial (87)

erminal S		
87TS Include	Terminal S in the Differential Element for the Following Conditions	
1		
SCTC Termin	al S CT Connection Compensation	
11	Range = 0 to 12	
TERMS Term	inal S Nominal Line-to-Line Voltage (kV)	
69,00	Range = 1,00 to 1000,00	

Figura 54 - Parametrização dos dados do transformador no terminal S.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

• VTERMS: Valor de tensão de linha no terminal S

Figura 55 - Parametrização dos dados do transformador no terminal T.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

• VTERMT: Valor de tensão de linha no terminal T

Figura 56 - Parametrização dos dados do transformador no terminal U.

1		
FUCTC Term	inal U CT Connection Compensation	
11	Range = 0 to 12	
VTERMU Terr	minal U Nominal Line-to-Line Voltage (kV)	

• VTERMU: Valor de tensão de linha no terminal U

Figura 57 - Parametrização dos ajustes da função 87.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

Atribuição das entradas analógicas no hardware do relé

A interligação elétrica responsável pelos sinais de entrada analógica do relé é feita através dos sinais de corrente (TC) e sinais de tensão (TP), estes irão passar eletricamente por um bloco de aferição, que é um equipamento utilizado para realização de testes e manutenção em subestações (Figura 58), após a passagem pelo bloco de aferição os cabos de campo são interligados nas entradas do relé de proteção.

Fonte: KONECTY, (2024).

3.6 Aferição do relé de proteção

Após realizado todos os ajustes no relé de proteção, tem-se a etapa de aferição do relé, que consiste em simular diversas situações de perturbação na rede no qual o equipamento protegido encontra-se conectado e verificar o correto funcionamento do relé de proteção, trazendo assim mais segurança e confiabilidade ao sistema. Para realizar essas simulações é utilizado uma mala de corrente hexafásica, nela será configurado todos os ajustes utilizados no relé e determinar quais os tipos de curtocircuitos e suas magnitudes que serão consideradas. Para a parametrização desses ajustes é utilizado o *software* CTC da própria fabricante da mala de corrente (Conprove).

Ambiente de parametrização do CTC (Conprove Test Center)

Ao iniciar o *software*, será aberto a janela inicial com os tipos de testes que poderão ser realizados pelo equipamento, conforme Figura 59.

Conprove Test Center 2.02.19	94	- X
CONPROVE	Conprove Test Ce Versão 2.02.194	enter
Geral Testes diversos Cuick C Aux L C Aux	Secundários Testes secundários Differential Prover Directional Distance	Medição Aplicações para medição ふ Multimeter
Primários	Aaster ∰ Meter ∰ Power Quality ↓ PSB OoS Amp ↓ Harmonic Restraint	Setup Config. do Equipamento/Testes Settings Dipdate Firmware
Estes prinarios	 Sequencer Synchronism Overcurrent Transducer Transient Playback Volts/Hertz 	Suporte Documentação e assistência 20 Tutorials
	Outros Aplicações adicionais Transient View Validate PDF Reports Statistical Analysis 	Contact Forum User Manual ✓ Quick Guide ✓ Self-diagnosis ?⊒ Remote Access

Figura 59 - Ambiente de inicialização do CTC.

Nessa janela é mostrado as opções de testes manuais, testes para nível primário, teste para nível secundário, opções de configuração e suporte da própria fabricante. Para esse trabalho será utilizado a opção de testes secundários, para as funções desenvolvidas neste trabalho, faremos os testes de "*differential*" para função 87, "*Quick*" para funções de subtensão (27) e sobretensão (59) e a "*Overcurrent*" para as funções de sobrecorrente instantânea e temporizada.

Dados de entrada

Após selecionar algum dos testes acima, é aberto uma janela para os dados de entrada, que são ajustes gerais sobre as características da instalação em que o equipamento testado se encontra instalado, conforme Figura 60.

Figura 60 - Ajustes gerais no CTC.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

Ajustes dos testes de sobrecorrente

Lado de 69 kV

Selecionando a opção de "sobrecorrente" e após isso a abertura da janela "Elementos de sobrecorrente" é possível configurar os parâmetros previamente calculados, atribuindo assim os valores de *pick-up* da unidade instantânea e temporizada, como também o tipo de curva utilizada e o seu dial de tempo.

Figura 61 - Ajuste dos elementos de sobrecorrente para o lado de 69kV.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

Após a conclusão desses ajustes, com valores determinados na Tabela 3, é aberto uma janela de teste (Figura 62), em que será feito a atribuição dos pontos nos quais o operador deseja realizar os testes no equipamento, como por exemplo: tipo de curto-circuito, corrente de curto-circuito e os erros admitidos.

Inserir/Editar Pontos	-
Inserir/Editar Ponto de Teste	
Editar Ponto Habilitar o teste de DropOut	
Novo Ponto V	
Sequência	
Remover	
Remover Todos	

Figura 62 - Janela para inserir os pontos de teste.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

Primeiramente será realizado o teste de *pick-up*, que consiste em atestar que o relé irá atuar quando o valor de teste atingir o valor de ajuste. Selecionando o item "novo ponto", abrirá uma janela para selecionar quais os tipos de curtos-circuitos que será realizado a simulação. Para o caso desse trabalho, realizaremos a simulação de curtos-circuitos fase A – terra, fase B – terra, fase C – terra e curto-circuito trifásico.

Inserir/Editar Po	ontos				
inserir/Editar	Ponto de Teste				
Editar Porto	Habilitar o teste d	e DropOut			
Novo Ponto 🖌	Tipo <mark>de Falta:</mark>	AE ~]		
Sequência		BE CE			
Remover		BC			
Remover Todos		A-B B-C C-A	onfirmar	Cancelar	

Figura 63 - Inserir os tipos de curtos-circuitos para o teste de *pick-up*.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

Após esse ajuste, será selecionado o teste de tempo, nele será verificado se o relé irá atuar nos tempos corretos e se irá obedecer ao tipo de curva que foi selecionado, para isso será adotado três pontos de teste para cada tipo de curtocircuito, o que é suficiente para definir uma curva. Será ajustado intervalos de 1 vezes o valor de *pick-up* até 10 vezes o valor de *pick-up*.

Pickup	Tempo	Configurações dos Testes						
Inse	erir/Editar	Pontos					-	•
- Inserir/	/Editar	Sequência						
Ed	ditar Linha	Mult Relativo a:	INom	~				
No	va Linha	, Tipo de Faltas:	Faltas	✓ Nº d	l <mark>e Linhas</mark> :	12		
		Múltiplo Inicial:	1.00					
S	equência	Múltiplo Final:	10,00					
F		Passo do Múltiplo:	4,00					
Rem	nover Todos			Confirmar	1	Cancelar		

Figura 64 - Múltiplos em relação ao valor de *pick-up* para o teste de tempo.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

Figura 65 - Inserir os tipos de curtos-circuitos para o teste de tempo.

Inserir/Editar Po	ntos			
Inserir/Editar	Sequência			
Editar Linha	🗹 Mult Relativo a:	INom ~		
Nova Linha 🗸 🗸	Tipo de Faltas:	Faltas ~	<mark>№</mark> de Linhas:	12
Sequência	Multiplo Final:	 ☑ BE ☑ CE 		
Remover	Passo do Múltiplo:	П А В		
Remover Todos		C	pnfimar	Cancelar

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

Concluindo esses ajustes, o *software* exibirá a curva selecionada e os valores de testes que foram selecionados, a última etapa consiste em atribuir quais as binárias de entrada do hardware da mala de testes que receberá o sinal de *pick-up* e *trip* do relé de proteção. Serão atribuídas as binárias 1 (BI1) para sinal de *pick-up* da unidade temporizada, 2 (BI2) para sinal de *trip* da unidade temporizada, 3 (BI3) para sinal de *pick-up* da unidade instantânea e 4 (BI4) para sinal de *trip* da unidade instantânea (Figura 67).

Inserir/Editar Po	ontos								-	Gráfico	Sobrec	orrente	Forma de	Onda F.	sores	Direcionalida	de	
Editar Linha Nova Linha	Sequênci	a It Relativo a: Îpo de Faltas	INom Faltas	~	Nº de Linhas	: 12	_			500 Hts 200 100								Falta A-B-C Ângulo 0 °
Sequência Remover	Pas	vuitipio iniciai Múltipio Final io do Múltipio	10.00 4.00	-						50 20								Linha de Teste Pontos Testados
Remover Todos				Confirm	ar	Cancelar				5,0			N		ac	ão		Cores: NT OK Err
Pontos de Teste									•	2.0		-						
ontos lestados										1,00		1						Ponto Atual:
Nº Falta	Múltiplo Rel a	Múltiplo	Corrente	Angulo	Região	Atuou	Tempo Nominal	Tempo Real	Е^	0,50								-m: -t
2-02 A-B-C	Corrente Nominal	9,00	45,00 A	~	Operação	-	100,0 ms		~	0.20				+++		11		

Figura 66 - Janela geral para realização dos testes (69 kV).

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

Figura 67 - Entradas binárias para recebimento de sinais digitais do relé.

ec ais	👷 Config Hrd ् 🗞 C 🗶 Config Sync ् प् र¥ Conexão	onfig GOOS onfig SV	E Inicial	r Parar	 Próximo Ponto Próxima Linha 	🧹 Limpar test	e os • Geração Estática
	Hardware				Geraq	:ão	
up	Tempo Configura	ições dos T	estes				
rec.	dos Canais de Geração		Habilita	r Pré-Falta 1		Habilitar Pre	é-Falta 2
	Canal de Geraçã	ăo	Modo	Vs=0,	ls=lNom 🔹]	
/a	Va (Hrd: V1)		V1	0 V	0 °	1	
/b	Vb (Hrd: V2)		V2	0 V	240,0 °		
/c	Vc (Hrd: V3)	•	V3	0 V	120,0 °		
/D		•					
а	la (Hrd: I4)	•	14	5,00 A	0°		
Ь	Ib (Hrd: I5) 🔹		15	5,00 A	240,0 °		
с	Ic (Hrd: 16)	•	16	5,00 A	120,0 °		
E		•					
aída 30 30 30 rec.	is Binárias & Goose - Falt 0; 0; 1; 1; 0; initialar Erro Sampled Vi das Interfaces de Atuaç	a 0 • tue/GO	T Saidas Bin BO GO	empo Pré-Fal árias & Goose 0; 0; 1; ar Eiro Semp	ta 1: 100,00 ms - Pré-Falta 1 : 1: 0: 0 ▼ Ted Value / GO	Limites de Picku	up
E	e Residual Seq +	Seq -	Seq O		Inicial NA \sim	VSeq-Min.	0 V
aə	Сигча	Interf. Pic	kup	Interf. Trip		ISeq-Min.	0 A
Nº Nº		BI01 (Hrd:	BI1) 🔻	BI02 (Hrd: E	B12) 🔻	3V0 Min.	0 V
Nº 1	1_Fase		BI3) V BI02 (Hrd: BIA) V			310 Min	0.0
Nº 1 2	1_Fase 2_Fase	BI03 (Hrd:	BI3) 🔻	BI04 (Hrd: E	BI4) 🔻	ore rearry	UA
№ 1 2	2_Fase	BI03 (Hrd:	BI3) 👻	BI04 (Hrd: I	BI4) 🔻	VSeq+ Min.	0V

Para os testes de sobrecorrente no lado de 13,8 kV (secundário dos dois transformadores) os ajustes dos testes são iguais, logo um só arquivo de teste irá satisfazer o secundário dos dois transformadores. De acordo com os valores calculados na Equação (89), é possível atribuir os valores de *pick-up* da unidade temporizada (lembrando que para esse caso a unidade instantânea não é habilitada), como também o tipo de curva utilizada e o seu dial de tempo.

Figura 68 - Ajuste dos elementos de sobrecorrente para o lado de 13,8kV.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

Após a conclusão dos ajustes, definimos os tipos de curtos-circuitos que serão aplicados no equipamento para o teste de *pick-up (*Figura *69*), de forma análoga como foi feito no lado de 69 kV.

Pickup	Tempo	Configuraçõe	es dos Testes	
Inse Inserir/I	Editar P	Ponto de	Teste	
Edi	tar Ponto o Ponto 🔽	Ha	ibilitar o teste de Dr Tipo de Falta: A-I	opOut
Pon Pontos	ntos de Teste Testados	:		
Nº	Falta	Ângulo	Status	
01	AE	-	Não Testado	
02	BE	-	Não Testado	
03	CE	-	Não Testado	
04	A-B-C		Não Testado	
Tipo:	Grupos	V 🗹 Falta	a & Ang	

Figura 69 - Tipos de curtos-circuitos para o teste de pick-up (13,8 kV).

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

Para o teste de tempo, será ajustado o mesmo tipo de curto-circuito do teste de *pick-up* com intervalos de 1 vezes o valor de *pick-up* até 10 vezes o valor de *pick-up* com intervalo de 4.

Figura 70 - Tipos de curtos-circuitos para o teste de tempo (13,8 kV).

Pickup	Tempo	Configurações dos Testes				
Inse	erir/Editar F	Pontos				•
Inserir/	Editar	Sequência				
Ed	litar Linha	Mult Relativo a:	INom ~			
Nov	a Linha	Tipo de Faltas:	Faltas 🗸	N⁰ de Linh	as: 12	
		Múltiplo Inicial:	✓ AE ^ ✓ BE			
56		Múltiplo Final:	CE			
F		Passo do Múltiplo:	A B			
Rem	over Todos		C	onfimar	Cancelar	
			■ B-C v			

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

Inserir/Editar Pon	tos				
Inserir/Editar	Sequência				
Editar Linha	Mult Relativo a:	INom ~			
Nova Linha 🗸	Tipo <mark>de Falta</mark> s:	Faltas V	Nº de Linh	as: 12	
Sequência	Múltiplo Inicial: Múltiplo Final:	1.00			
Remover	Passo do Múltiplo:	4.00			
Remover Todos		Co	onfimar	Cancelar	

Figura 71 - Múltiplos em relação ao valor de pick-up para o teste de tempo.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

Figura 72 - Janela geral para realização dos testes (13,8 kV).

Pickup	Tempo	Configuraçõ	es dos Testes	1													
Ins	erir/Editar Po	ntos					- /	Gráfico	Sobrecorren	nte Fo	orma de On	da Fas	iores [irecionali	dade		•
Inserir/	Editar	Ponto de	Teste				10	00 Itte									Falta A-B-C
Ed	itar Linha	⊠ M	ult Relativo a:	INom	\sim		5	00									Ângulo 0 °
Nov	a Linha 🗸		Tipo de Falta	A-B-C	\sim		2	00						-			Legenda:
6	1 International		Múltiplo	9,00			1	00	1								····· Linha de Teste
	rquericia		I Falta	45,00 A				50									
	lemover							20		1	MAC	de					Pontos Testados
Rem	over Todos							10		1	1.41.5	44					Cores: NT OK Erro
Por	tos de Teste	1					 • 5	.0			X	nu	aça	0			Informações:
Pontos	Testados						_ 2	.0									Ponto Atual:
N ²	Falta	Múltiplo Rel a	Múltiplo	Corrente	Angulo	Status	^ 1	.0					~	-			- m:
01	AE	Corrente	1.00	E 00 A		NEs Testada	0,	50									-t
-	~=	Nominal	,.00	5,00 A		11001051200	0,	20									
02	AE	Corrente	5,00	25,00 A		Não Testado	¥ 0.	10				TTT		11		Mult Pkp	
Tipo:	Grupos	∨ 🗹 Fait	a 🗹 Múltipk	IRt & Ar	ng .			0,50	1,0		2,0	5,	0	10	20		

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

Para a atribuição das binárias de entrada na mala de corrente, é utilizado as mesmas configurações do teste de sobrecorrente do lado de 69 kV Figura 67.

Ajuste da função de subtensão

Na janela apresentada na Figura 59, é selecionada a opção de "Quick" e após isso é realizado a abertura da janela de identificação do hardware, nela inserimos o modelo da mala de corrente utilizada, que é o modelo 6006 e o número de série da mesma.

Figura 73 - Janela de identificação do hardware.

ldentificação d	e Hard	vare		×
Modelo:		Núm. de Série:		
CE-6006	\sim	11604146302101110011X	xx	~
Aviso Nenhum h Selecione Se ele não	ardware o númer o estiver	foi encontrado. o de série de seu equipamento na lista, entre em contato com	para contin o fabricante	uar.
Refresh		ON Line O	FF Line	Cancelar

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

Na Figura 74 temos a tela geral do teste, nela iremos selecionar a aba "ajustes", em que será inserido as informações gerais do teste e do sistema em que o equipamento testado será instalado, ver Figura 75 e Figura 76.

Arquivo início Exibir Opcões So Config Hrd & Config GOOSE Direc Canais & Conergo Sv Canais & Conexio	Adicionar Reeditar Teste	Em Edição	Iniciar Parar	jain Ajustes	F. Onda	<mark>↓µ.</mark> Har Ição ⊞ Ava	mônicas <u> 1</u> liações <u> 1</u>	Ajustar OffSet Is Ajustar OffSet V	pc spc	Apresentar Relatório	€ ~ P3 5 rel	Recriar Restau Gráficos Layou	rar Visualizar		^ (
Pré-Falta Falta	- X	Monitoramento	Geração	- X	Entr 8	Sin GOOSE	e An DC	Formas de Ond	N	Relatorio	Fasores	Harmônicas	V Protecão	Avaliacões) = x
Falta		Ref. Ang.: Autom	ática	~	Entradas B	inárias	combe [V	• •	Entradas GOO	SE	Turrioritori	Trocegoo] 7 •
✓ NO01		✓ NO01				Canal	Tipo		^	(Canal	Dado			
✓ Saidas Analog. DC					0	BI01	Contato								
✓ Saídas Binárias						BI02	Contato	·							
✓ Saidas GOOSE					18	BI04	Contato	<u>.</u>							
✓ Tempo e Avanço					1 ŏ	BI05	Contato	0							
					Ō	BI06	Contato	K	-						,
					0	BI07	Contato	0	~	1.					
					Lógicas				• •	 Entradas Anal Canais de Ter 	log. DC / AC nsão	Especiais			
						Canal	Tipo		_	Canal	RMSTot	Valor DC			
		Crônometros		• ×	1										
		Cronômetro 1:			1					1					
		Interf. Parada	Em Espera							Canais de Cor	rente				
		Desab.	~ 0s		Modo	de Aqs. Padr	Бо			Canal	RMSTot	Valor DC			
		Cronômetro 2:			O Prioriz	ar Entradas A	nalógicas na	Aquisição							
		hard Breat			O Habit	ar Entradas E	specials/Afe	r. Transd. na Aqs.		1					

Figura 74 - Tela inicial do teste da função 27.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

	~
	~
	~
	~
	~
	~
Estado: PE	~
	~
	~
001 270RXD	
JOULLEUTIND	
	Estado: PE

Figura 75 - Janela de informações gerais.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

Figura 76 - Janela de informações do sistema.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

Retornando a janela geral de teste (Figura 74), é selecionado a aba "Direcionamento de canais" e posteriormente a aba "Configurar", em que será configurado as saídas analógicas de tensão e corrente da mala de teste, logo, é escolhido a opção de 3 canais com tensão máxima de 300 V e uma fonte auxiliar (para energização do relé de proteção) de 110 V, conforme Figura 78.

Direcionamento dos Cana	is																×
Modelo: CE-6707 ~ N° de Série: 00603227CCL034220	Redef. p/ Hard. Conectado 011U5HVRG0000L22	Cor	figurar	•	Básico Avançado ON Line	e ⁶ 0 (50	GOOSE. 6. Value.	Hard.:	Adequar I/Os Autoassociar Limpar	Nós:	utoassociar 💌 Limpar 👻		Importa	ar	C C Expor	onfirmar ancelar tar	×
Saidas: Analóg. e SV	Entradas: Analóg.	e SV	5	aídas: B	inárias, GOOS	E e Ana	alóg. DC	En	ntradas: Binárias, GOOSE	e Analóg. DC	Lógicas					-	// >>
K < NO01 >	N 🕂 🗕 -	<u> </u>	m	<u>η_</u>	40	Forma				Canais de T	ensão	as Sa	ampied val	lue	+		• •
Nominais Linha Fo	inte		-m	n	~0	ruiwa				Descr.	Hardware	_	Nó	- 1	Ponto	,	_
			łm	<u>n</u>						AO_V01	V1	-	NO01		Va	-	
Frequência:	60 Hz ~	L	<u> </u>			1				AO_V02	V2	•	NO01	•	Vb	-	
Seq. de Fase:	ABC \checkmark		ц_		OBI	h		312		AO_V03	V3	•	NO01	•	Vc	•	
Potência 3¢:	10.00 MVA				085	ы		- []		AO_V04	V4	•	NO01	•	UD	•	
16:	3.33 MVA				1	11-		3 ET I		AO_V05		•	NO01	•	UD	•	
Teneão Primária (EE):	13.90 KV						× .	3124		AO_V06		•	NO01	•	UD	•	
rensao minana (m).	15,00 10							≈≂⊢									
(FN):	7,97 KV						3	3EI									
Corrente Primária:	418.4 A							Ŧ									
Tensão Secund. (FF):	115.0 V									1		_		_			
(FN):	66.40 V									Canais de C	omente			Y	-+	•	
Corrente Secundária:	40.00 A		Tens	ies	Cana	i i	C	Correntes	Canal	Descr.	Hardware		Nó		Ponto	,	
DTD C	120.0		1	Va	AO_V01	~		5 la	~ Σ								
RIPE:	120,0	FN	2	Vb	AO_V02	~	F	6 lb	~ Σ								
RTC F:	10,46		3	Vc	AO_V03	~		7 lc	~ Σ								

Figura 77 - Direcionamento dos canais.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

Figura 78 - Janela de configuração das saídas analógicas.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

Retornando a tela inicial de teste (Figura 74), é selecionado a aba "proteção", depois "Tensão x tempo" e "Subtensão", conforme Figura 79. Nessa janela será feita a entrada de dados com os ajustes calculados.

Figura 79 - Configuração dos ajustes de subtensão.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

- Temp: Tensão de fase nominal da rede;
- Instant 1: Ajuste do pick-up do elemento 1 da função 27;
- Instant 2: Ajuste do pick-up do elemento 2 da função 27;
- T Esperado: Tempo de ajuste do elemento 1 e 2 da função 27;
- Tol V%: Tolerância de tensão aceitável, em percentual, para aprovação do teste;
- Tol V Abs: Tolerância de tensão absoluta aceitável para aprovação do teste;
- Tol t%: Tolerância de tempo aceitável, em percentual, para aprovação do teste;
- Tol t Abs: Tolerância de tempo absoluto aceitável para aprovação do teste;

Voltando a tela inicial de teste (Figura 74), é selecionado a aba "falta", selecionando o tipo "Rampa" e depois "...", conforme Figura 80. Após abrir a janela "Rampa", é feita a etapa de configuração da rampa de teste, que consiste em valores superiores ao do ajuste até valores inferiores ao ajustes (Figura 81), o teste fará o

decremento de um valor de tensão acima do configurado para a atuação do relé até valores abaixo do ajuste, como trata-se de uma função de subtensão, os valores acima do ajustado não provocarão atuação do relé, que com o passar do tempo, no teste, terá sua tensão diminuindo até a etapa que chegará no valor ajustado, esperando assim que o relé atue e envie um sinal de *trip* para a binária configurada na mala de corrente, verificando assim a correta atuação do relé, no que diz respeito aos valores de tensão e tempo de resposta.

	Falta								
^	Canais	/Definição	Rampa	×					
	Ponto	Canal	Definições						
	Va	AO_V01	Módulos						
	Vb	AO_V02	tincr 1,00 s						
	Vc	AO_V03							
	la	AO_I01	1						
	lb	AO_102	1						
	lc	AO_103	1						
NON!									

Figura 80 - Janela de curto-circuito da função 27.

o de l	Rampa			Direta				Rese	et Cronômetro	os a Cada Inc	crementação	Tempo Aprox, de Geração a Cada Incr.:	2 s
lódulos	S		~	🔿 Pulsada				🗹 Mant	ter Hamônica	as Durante a	Incrementação		
alores I	niciais				Lin	ites e In	crementaçõ	es				Reset	
Canais	/Definicã	0					Limite	Incr.	d/dt	N Passos	Tempo	11	
Ponto	Canal	Mod	Ang	Free	1	Va	55,93 V	-10,00 mV	-5,00 mV/s	101,0	202,0 s		
Va		FC 02 1/	Alig.	C0.00 Hz	12	Vb	55,93 V	-10,00 mV	-5.00 mV/s	101,0	202,0 s		
Vd Vb	AO_V01	50,55 V	120.0 *	60,00 Hz	[2]	Vc	55,93 V	-10,00 mV	-5,00 mV/s	101,0	202,0 s		
/D	AU_V02	50,33 V	-120,0	00,00 HZ	1	la							
/C	AU_V03	56,93 V	120,0	DU,UU HZ	1	lb							
a	AO_101	0 A	0	60,00 HZ	100	lc							
D	AU_IUZ	UA	U	60,00 HZ									
Saidas E	Binárias				Sa	idas GO	OSE				Atenção: Jos Te	s definições de Reset Cron. a Cada Incr., Dirett pos de Incr. e de Reset serão os mesmos para	ta ou Pul
Gaidas E	Binárias nal	Incr.			Sa	idas GO Cana	OSE	ner.			Atenção: / os Te	s definições de Reset Cron. a Cada Incr., Direta mpos de Incr. e de Reset serão os mesmos para	ta ou Puls 1 todos os
iaidas E Car BOC	Binárias nal D1	Incr.			Sa	idas GO Canal	OSE	ncr.			Atenção: / os Te	Is definições de Reset Cron. a Cada Incr., Direta mpos de Incr. e de Reset serão os mesmos para	ta ou Pul-
Saidas E Car BOO	Sinárias nal 01 02	Incr.			Sa	idas GO Cana	OSE II	ncr.			Atenção: / os Te	Is definições de Reset Cron. a Cada Incr., Diret. mpos de Incr. e de Reset serão os mesmos para	ta ou Pul-
Gaidas E Car BOC BOC BOC	Binárias nal 01 02 03	Incr.			Sa	idas GO Canal	OSE In	ner.			Atenção: / os Te	Is definições de Reset Cron. a Cada Incr., Diret. mpos de Incr. e de Reset serão os mesmos para	ta ou Pul I todos o
Saidas E Car BOC BOC BOC BOC	Binárias nal 01 02 03 04	Incr.			Sa	idas GO Canal	OSE In	ıcr.			Atenção: a Te os Te Valor Inic	s definições de Reset Cron. a Cada Incr., Diret mpos de Incr. e de Reset serão os mesmos para	ta ou Pul a todos o
Saidas E Car BOC BOC BOC BOC BOC	Binárias nal 01 02 03 04 05 06	Incr.			Sa	idas GO Canal	OSE II	ıcr.			Atenção: / os Te Valor Inic	Inc. I In	ta ou Pul I todos o
aidas E Car BOC BOC BOC BOC BOC	Binárias nal 01 02 03 04 05 06	Incr.			Sa	idas GO Canal	OSE II	ıcr.			Atenção: / os Te Valor Inic	Incr. I cada Incr., Direta moos de Incr. e de Reset Serão os mesmos para ial Incr. I cada Incr., Direta Incr. I cada Incr., Diret	ta ou Puls a todos o
Saidas E Car BOC BOC BOC BOC BOC	Binárias nal 01 02 03 04 05 06	Incr.			Sa	idas GO Canal	OSE II	ıcr.			Atenção: os Te Valor Inic	Is definições de Reset Cron. a Cada Incr., Direta mpos de Incr. e de Reset serão os mesmos para ad termo de Tempo de Geração a Cada Incr.	ta ou Pul a todos o

Figura 81 - Janela de configuração da rampa de subtensão.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

Valores Iniciais:

- Va: Tensão de fase e ângulo de ajuste da fase A para início do teste, estes valores devem ser maiores que o *pick-up* da função 27;
- Vb: Tensão de fase e ângulo de ajuste da fase B para início do teste;
- Vc: Tensão de fase e ângulo de ajuste da fase C para início do teste.

Limites e incrementos:

- Va: Tensão de fase de ajuste da fase A para término do teste, estes valores devem ser menores que o *pick-up* da função 27. O valor de incremento corresponde a variação de tensão acrescentada ou retirada a cada geração do teste, ver Figura 82, por convenção adota-se o valor de 10 mV;
- Vb: Tensão de fase de ajuste da fase B para término do teste;
- Vc: Tensão de fase de ajuste da fase C para término do teste.

Figura 82 - Características dos parâmetros para teste em rampa.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

Por se tratar de um teste de subtensão, é recomendável que seja inserido uma "pré-falta", pois no instante de inicialização do relé os terminais de tensão apresentarão tensão nula, podendo levar a uma atuação indevida do relé, fazendo assim com que o teste não tenha os resultados satisfatórios. A "pré-falta" irá aplicar uma tensão nominal nos terminais de tensão do relé, provocando assim um *dropout* do mesmo.

Dire	ais 📢	Conexão Hardwar	e	-	Adicionar R Teste	editar Feste Res	ultad	luir Todo os	5	lniciar Gera	Parar A ção	Ajuste
F	ré-Falta	Falta				• ×		Monitor	amento			+ >
	🗹 Pré-	Falta			0,500 s			Ref. Ang	g.: Automáti	са		~
•	Canais	/Definição	Dir	eto	~		^	Canais	/Definição			
	Ponto	Canal	Mod.	Ang.	Freq.			Ponto	Canal	Mod.	Ang.	
	Va	AO_V01	66,40 V	0 *	60,00 Hz			Va	AO_V01			
I	Vb	AO_V02	66,40 V	-120,0 °	60,00 Hz			Vb	AO_V02			
I	Vc	AO_V03	66,40 V	120,0 °	60,00 Hz			Vc	AO_V03			
I	la	AO_I01	0 A	0°	60,00 Hz			la	AO_101			
	lb	AO_102	0 A	0 *	60,00 Hz			lb	AO_102			
	10	AO 103	OΔ	0.0	60.00 Hz			lc	AO 103			

Figura 83 - Ajuste da pré-falta para função 27.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

- Ao habilitar a função "Pré-Falta" é definido o tempo de operação do mesmo, por convenção utiliza-se 0,5 segundos.
- Va: Ajuste da tensão de fase durante a pré-falta. Configura-se o valor de 66,40 V, que corresponde a tensão nominal da rede visto no secundário do TP.

Ajuste da função de sobretensão

Para o teste de sobretensão, o procedimento é análogo ao visto no item anterior, tendo somente que alterar os parâmetros de ajuste, conforme Tabela 2. Logo:

Corrente x tempo	Tensão x	tempo	Diferencial R	estr. Harm.	Direcional	Frequência			
Sobretensão	Subtensão								
An 🗸 V:	AO_V01	~	Editar Curva			Gráf.c/relaçã	io ao Pkp Temp.	Gráfico	v
1,60 t[s]									
1,40									<u> </u>
1,20									
1.00				<u></u>					
0,800									
0,600									-
0,400									
0,200								v	[V
40,00	50,00	60,00	70,00	80,00	90,00	100,0	110,0	120,0 13	0,0
		Сар	turar Tempo p/:	O Cron. 0	1 () Cron. 02	2	Simula	ção:	~
Dial Tempo:					Limpar				
Curva Temp.:					Pd.	0	Tol.	V %: 2.00%	_
	Pkp Esperado	b	Drp Esperad	lo	t Esperado		Tol. V A	Abs.: 0,50 V	_
Temp.:	66,40 V	Pd		Pd					
Instant, 1:	76,35 V	Pd		Pd	1,50 s		Tol.	t %: 5,00 %	
Instant. 2:	79,67 V	Pd		Pd	0,00 s		Tol.t A	bs.: 30,00 ms	8

Figura 84 - Configuração dos ajustes de sobretensão.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

- Temp: Tensão de fase nominal da rede;
- Instant 1: Ajuste do pick-up do elemento 1 da função 59;
- Instant 2: Ajuste do pick-up do elemento 2 da função 59;
- T Esperado: Tempo de ajuste do elemento 1 e 2 da função 59;
- Tol V%: Tolerância de tensão aceitável, em percentual, para aprovação do teste;
- Tol V Abs: Tolerância de tensão absoluta aceitável para aprovação do teste;
- Tol t%: Tolerância de tempo aceitável, em percentual, para aprovação do teste;
- Tol t Abs: Tolerância de tempo absoluto aceitável para aprovação do teste;
| Tipo d | e Rampa | | | Direta | | | | Res | et Cronômetro | s a Cada Inc | rementação | Tempo Aprox. de Geração a Cada Incr.: | 2 s |
|--------|--------------|---------|----------|-----------|-----|-----------|-------------|-----------|---------------|---------------------------|---------------|---------------------------------------|-----|
| Módu | los | | ~ | 🔿 Pulsada | | | | 🗹 Man | ter Harmônica | as Durante <mark>a</mark> | Incrementação | | |
| /alore | s Iniciais | | | | Lim | nites e l | ncrementaçõ | es | | | | Reset | |
| Cana | is/Definição | | | | | | Limite | Incr. | d/dt | N Passos | Tempo | | |
| Pont | o Canal | Mod | Ang | Frea | V | Va | 74,85 V | -10,00 mV | -5,00 mV/s | 101,0 | 202,0 s | | |
| Va | AO V01 | 75.85 V | 0 ° | 60.00 Hz | | Vb | 74,85 V | -10,00 mV | -5,00 mV/s | 101,0 | 202,0 s | | |
| Vb | AO V02 | 75.85 V | -120.0 ° | 60.00 Hz | V | Vc | 74,85 V | -10,00 mV | -5,00 mV/s | 101,0 | 202.0 s | | |
| Vc | AO V03 | 75,85 V | 120.0° | 60,00 Hz | | la | | | | | | | |
| la | AO_101 | 0 A | 0. | 60,00 Hz | 100 | lb | _ | _ | | | | | |
| lb | AO_102 | 0 A | 0° | 60,00 Hz | | lc | | | | | | | |
| lc | AO_103 | 0 A | 0 * | 60,00 Hz | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |

Figura 85 - Janela de configuração da rampa de sobretensão.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

Valores Iniciais:

 Va: Tensão de fase e ângulo de ajuste da fase A para início do teste, estes valores devem ser menores que o *pick-up* da função 59.

Limites e incrementos:

• Va: Tensão de fase de ajuste da fase A para término do teste, estes valores devem ser maiores que o *pick-up* da função 59.

Ajuste da função diferencial

Para o teste da função 87, é selecionado na janela apresentada na Figura *59*, a opção de "*Differential*". Na tela inicial é necessário abrir a janela "configurações de *hardware*" para habilitar 6 canais de corrente na mala de teste (Figura *86*), cada conjunto de 3 canais de corrente corresponderá a um enrolamento do transformador. Vale ressaltar que para fins de teste, o modelo utilizado será de um transformador com 3 enrolamentos, em que o enrolamento 1 é o lado primário (69 kV) dos dois transformadores e os enrolamentos 2 e 3 são respectivamente o secundário dos transformadores 1 e 2 (13,8 kV).

stre	Escravo			Saidas	Binárias:	Fonte Auxiliar:
Nodelo: Sa idas Padrão	CE-6006 Analógicas: () Pa o - Tensões:	Num. Série: trão () Livres	11604146302101110011XXX	B01: B02: B03: B04:	Estado Inicial NA ~ NA ~ NF ~	- 250 V - 220 V - 110 V
	5 x 300 V; 90 VA 3 x 300 V; 90 VA 3 x 300 V; 150 VA	V1 V2	V3 V4 V5 V6			- 60 V - 48 V
03	3 x 600 V: 150 VA 2 x 300 V: 200 VA 1 x 300 V: 400 VA			Entr. An IA: 1 IB: 1 IC: 1	alóg, Comentes: Escala do Clamp 00mV/A (10A) ~ 00mV/A (10A) ~ 00mV/A (10A) ~	- Outro - Deslig.
() () ()	Não Utilizado	Conectar TP	Ś	Entrada	s Binárias: Contato 5 \	/pk 50 Vpk 100 Vj
 N Padrão O O O 	Não Utilizado o - Correntes: 5 x 20 A; 90 VA 3 x 20 A; 90 VA 3 x 20 A; 150 VA	Conectar TP	is	Entrada Bi1 8 Bi3 8 Bi5 8	s Binárias: Contato 5 \ & B12: & B14:	/pk 50 Vpk 100 Vp
 Padrão O O<!--</td--><td>Não Utilizado o - Correntes: 5 x 20 A; 90 VA 3 x 20 A; 90 VA ~ 3 x 20 A; 150 VA 3 x 40 A; 150 VA 2 x 60 A; 200 VA 1 x 120 A; 400 VA</td><td>Conectar TP</td><td>s 13 14 15 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16</td><td>Entrada Bil 4 Bi3 4 Bi5 4</td><td>s Binárias: Contato 5 \ & B12: & B14: & B16: & B18:</td><td>/pk 50 Vpk 100 Vj</td>	Não Utilizado o - Correntes: 5 x 20 A; 90 VA 3 x 20 A; 90 VA ~ 3 x 20 A; 150 VA 3 x 40 A; 150 VA 2 x 60 A; 200 VA 1 x 120 A; 400 VA	Conectar TP	s 13 14 15 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16	Entrada Bil 4 Bi3 4 Bi5 4	s Binárias: Contato 5 \ & B12: & B14: & B16: & B18:	/pk 50 Vpk 100 Vj
Padrão C	Não Utilizado o - Correntes: 5 x 20 A; 90 VA 3 x 20 A; 90 VA ✓ 3 x 20 A; 150 VA 2 x 60 A; 150 VA 2 x 60 A; 200 VA 1 x 120 A; 400 VA 1 x 120 A; 400 VA 1 x 30 A; 600 VA 1 x 24 A; 1100 VA	Conectar TP	is 13 14 15 16 13 14 15 16 13 14 15 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16	Entrada Bil 4 Bi3 4 Bi5 4 Bi7 4	s Binárias: Contato 5 \ 8 BI2: 8 BI4: 8 BI6: 8 BI6:	/pk 50 Vpk 100 V

Figura 86 - Direcionamento de canais da função 87.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

Na janela de "ajustes" é apresentado a aba 1 (Figura 87) com as configurações dos transformadores de potência e os transformadores de corrente, os valores de entrada para parametrização foi determinado no capítulo 3 desse trabalho. Na aba 2 (Figura 88 e Figura 89), é realizado os ajustes da função diferencial, como pick-up da função 87, o tempo de atuação, o *slope* 1 e *slope* 2 encontrados nas expressões (152) e (154).

Geral	Equipamento Prote	gido/TC's	Ajuste Prot. [Diferencial						
Iferencial	Equipamento Pro	egido								
All Charles	Equipamento:	Transformade	or/AutoTrafo 🗸			Nº d	e Fases:	3Ø	✓ Nº de Enr.: :	3 、
	Descriptio	Tonaño	Potôncia	Conorio	Grupo Vet	٨	aroda	1		
	Eng 1	C0.00.10/	10.00 M0/A	V	Cirupo ver	AL	Cim			
	Enr. 1	12.00 10/	E OO MUZA		0.00	1001	Cim			
	Enr. 2	13,00 KV	5,00 MVA	y •	0(0)		Sim			
	Enr. 3	13,80 KV	5,00 MVA	у •	0(0) •		Sim			
	TC's	ais TC's Au	xiliares] Habilitar TC's Auxil	liares
	TC's TC's Principa Description	ais TC's A⊔	xiliares	I Sec	Conevão	Gr	uno Vet		Habilitar TC's Auxil	liares
	TC's TC's Principa Descrição Enr. 1	ais TC's Au I Nom 83.67.0	xiliares	1 Sec	Conexão Yhar 🗸	Gr	upo Vet] Habilitar TC's Auxil	liares
	TC's TC's Princip Descrição Enr. 1 Enr. 2	ais TC's Au I Nom 83,67 A 209.2 A	xiliares I Prim 0.500 kA 250.0 A	1 Sec 5,00 A 5,00 A	Conexão Ybar ▼ Ybar ▼	Gr	upo Vet		🗌 Habilitar TC's Auxil	liares
	TC's TC's Princip Descrição Enr. 1 Enr. 2 Enr. 3	ais TC's Au I Nom 83,67 A 209,2 A 209,2 A	xiliares I Prim 0,500 kA 250,0 A 250,0 A	I Sec 5.00 A 5.00 A 5.00 A	Conexão Ybar V Ybar V Ybar V	Gr	upo Vet] Habilitar TC's Auxil	liares
	TC's Principy Descrição Enr. 1 Enr. 2 Enr. 3	ais TC's Au I Nom 83,67 A 209,2 A 209,2 A	xiliares I Prim 0,500 kA 250,0 A 250,0 A	I Sec 5.00 A 5.00 A 5.00 A	Conexão Ybar ♥ Ybar ♥ Ybar ♥	Gr	upo Vet		☐ Habilitar TC's Auxil	liares
	TC's Princip Descrição Enr. 1 Enr. 2 Enr. 3	ais TC's Au I Nom 83.67 A 209,2 A 209,2 A	xiliares I Prim 0.500 kA 250.0 A 250.0 A	I Sec 5.00 A 5.00 A 5.00 A	Conexão Ybar ♥ Ybar ♥ Ybar ♥	Gr	upo Vet		☐ Habilitar TC's Auxil	liares
	TC's Princip Descrição Enr. 1 Enr. 2 Enr. 3	iis TC's Au I Nom 83.67 A 209.2 A 209.2 A	xiliares I Prim 0,500 kA 250,0 A 250,0 A	I Sec 5.00 A 5.00 A 5.00 A	Conexão Ybar V Ybar Ybar Ybar V	Gr	upo Vet		☐ Habilitar TC's Auxil	liares
	TC's Princip Descrição Enr. 1 Enr. 2 Enr. 3	is TC's AL I Nom 83.67 A 209.2 A 209.2 A	xiliares I Prim 0.500 kA 250.0 A 250.0 A	I Sec 5.00 A 5.00 A 5.00 A	Conexão Ybar ▼ Ybar ▼ Ybar ▼	Gr	upo Vet		☐ Habiltar TC's Auxil	liares

Figura 87 - Dados dos TC's e transformador de potência.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

Figura 88 - Ajuste do pick-up da função 87.

Ajustes	Definição	o do Slope					
Entrada de	e Dados:	SEL 487		× 💷			
		Ajustes do Dife	rencial	🗹 Ajustes do	Instantâneo	Tolerância de 0	Corrente
		Pickup:	0,60 In	Pickup:	5,00 ln	Relativa:	5,00 %
		Tempo:	0,00 s	Tempo:	0,00 s	Absoluta:	0,10 In
Corrente	de Restri	ção		Tolerância de	Angulo	Tolerância de 1	Гетро
(p -	- s + t)	/K				Relativa:	1,00 %
K:	1			Absoluta:	3.00 °	Absoluta:	40,00 ms
Opções	Gerais			Compensação	de Defasamento		
TAPs:	Calc	culados 🗠 🖓		Lado	com 1	Antes Leg:	
Enr. de 1	Referência	1p/ 4		Angulo	Fixo: Internet	O Após 12:	345
Cálculos	(in) :	1 0		Rotação.	DC		The
				Descr For 1	СТС		12
				Enr. 2	11		\leq
				Enr. 3	11	1	11
Elmi	nação de	Sequência Zero					X

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).



Figura 89 - Ajuste do slope da função 87.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

Figura 90 - Tela inicial do teste diferencial.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

Na tela inicial (Figura 90), na aba "Configuração dos testes" (Figura 91) é feito a atribuição dos canais de corrente proveniente da mala de testes com os enrolamentos do transformador testado.

	dos Ca	anais de Gera	ição		Habilita	r Pré-Falta 1		Habi
Enr.	Fse	Canal de C	Ger.	^	Modo	No	ominal	^
01	la	E1_la (Hrd:	11) 👻		11	418,4 mA	150,0 °	
01	lb	E1_Ib (Hrd:	12) 🔹		12	418,4 mA	30,00 °	
01	lc	E1_lc (Hrd	<mark>1</mark> 3) 🔻		13	418,4 mA	-90,00 °	
02	la	E2_la (Hrd	14) 👻		14	2,09 A	0°	
02	lb	E2_lb (Hrd:	15) 🔻		15	2,09 A	-120,0 °	
02	lc	E2_lc (Hrd:	16) 🔻		16	2,09 A	120,0 °	
03	la							
03	lb			1				
03	lc							
01	Va		•					
01	Vb							
01	Vc		•	v				Y
a ída:	s Binár	ias & Goose 0; 0; 1;	-Falta 1;0;0	-	Saidas Bin BO GO	empo Pre-Fal árias & Goose 0; 0; 1;	ta :: 100,00 r - Pré-Falta 1 : 1: 0: 0	▼
BO GO	mular	Erro Sampla		-				
BO GO Mites	de Ge	Erro Sample tração	eu warwer, Gr	-	Modo de T	este		
BO GO mites	de Ge . Ger.	Erro Sample eração p/ Canal	by hard		Modo de T Modo	este Int	eligente	
BO GO mites I Max	de Ge Ger. tilizar	Erro Sample eração p/ Canal Limite do Ha	by hard		Modo de T Modo Variação	este Int do RMS e Ar	eligente	
BO GO mites Max U U	de Ge Ger. tilizar	Erro Sample eração p/ Canal Limite do Ha da BI01 (Hro	by hard irdware d: BI1) ~		Modo de T Modo Variação Lógica de P	este Int do RMS e Ar arada	eligente ng Inicial NA	• •
BO GO mites I Max V U Interf	de Ge c. Ger. tilizar . Parac	Erro Sample eração p/ Canal Limite do Ha da BI01 (Hro ro Software	by hard ardware d: BI1) ~		Modo de T Modo Variação Lógica de P	este Int do RMS e Ar arada	eligente ng Inicial NA	 ▼

Figura 91 - Configuração dos testes (87).

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

Novamente na tela inicial (Figura 90), na aba "Teste de configuração" (Figura 92) é realizado um teste para confrontar se as configurações feitas no relé de proteção convergem com as que foram atribuídas na mala de corrente. A mala de teste irá gerar um valor de corrente de restrição e um valor de corrente de operação, e o valor mostrado no relé em tempo real deverá ser igual ao valor testado.

Inserir/Editar									
	Pontos								•
	Local da F	Fonte	Cargas		-	Correntes			
	Enrolame	nto1 🗠	Modo: Nenhu	im 🗠 I	Ref: in 🖂		IDif;	1,00 in	
Sequência	Local do C	Surto:					Deat	2.00 %	-
	Forolame	nto2					(FNESL.	2,00 m	
Remover	(and the second s								
	Tipo de Fa	alta:							
emover Todos	A-B-C								
									>
lº Falta	IDif	IRest	Região	Operou	Status				
	A: 1,00 In B: 1,00 In	A: 2,00 In B: 2,00 In	Operação	-	Não Testa	do			

Figura 92 - Teste de configuração (87).

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

Após o teste de configuração, é feito o "teste de ponto" (Figura 93), nele é inserido de forma manual curtos-circuitos trifásicos ao longo da reta de *slope (*de coloração azul), em que a região de operação do relé deverá ser acima dessa curva e a região de não operação abaixo da curva.

ontos ocal da Fonte Enrolamento 1	G	argas			Correntes		-
Enrolamento1		irgas			conentes		
		odo: Nenhum	Ref:	In \vee		1Dif: 0.88 In	
ocal do Curto:						IRest: 2,94 In	
Enrolamento2							
ipo de Falta:							
A-B-C	×.						
							>
2							*
							53
IDif	IRest	Região	Operou	Tempo Nominal	Tempo Real	Status	^
0,584 In	2,9 <mark>4</mark> In	Não Operação	12	23	125	Não Testado	
0,884 In	2,94 In	Operação	-	0 s		Não Testado	
	ocal do Curto: Enrolamento2 Ipo de Falta: A-B-C : IDiff 0,584 In 0,884 In	IDif IRest 0,584 In 2,94 In 0,884 In 2,94 In	IDif IRest Região 0,584 In 2,94 In Operação	IDif IRest Região Operou 0.584 ln 2.94 ln Operação - 0,884 ln 2.94 ln Operação -	IDif IRest Região Operou Tempo Nominal 0.584 ln 2.94 ln Operação - 0 s	IDif IRest Região Operou Tempo Nominal Tempo Real 0.584 ln 2.94 ln Operação - 0 s -	IRest: [2,94 in IRest: [2,94 in IDif IRest Região Operou Tempo Real Status 0.584 in 2,94 in Operação - 0 s - Não Testado

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).



Figura 94 - Teste de ponto (Gráfico).

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

O último teste chama-se "teste de busca" (Figura 95), nele o objetivo é traçar retas que irão cortar a reta do *slope,* verificando assim se a inclinação está correta.

							1
					ntos	serir/Editar Po	Ins
			Cargas	a Fonte:	Local da	un Linha	Max
ef: In \vee	Ref	Nenhum	Modo: Ne	nento1 🔗	Enrolam		NON
				Curto;	Local de	equência	Se
				nento2 🔍	Enrolan		
				False.	Transfer	Remover	f
				raila:	npo de	nover Todos	Rem
					1044+P145	nover rouos	TICH
				181	1100	NECTOR NUMBER OF	
						ntos de Teste	Po
	itatus	4	IDifReal	IDifNom	IRest	intos de Teste 1 Testados Falta	Po Pontos Nº
	itatus Testado	d S	IDifReal -	IDifNom 0,832 In	IRest 3,33 ln	ntos de Teste Testados Falta ABC	Po Pontos Nº

Figura 95 - Teste de busca.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

Hardware da mala de testes hexafásica

Na Figura 97 pode ser visualizado a parte frontal do equipamento de teste utilizado. As entradas de corrente e tensão (Figura 98) possuem seis canais, o que facilita e flexibiliza os ensaios no relé de proteção. Na Figura 99 é mostrado as entradas binárias, elas têm como objetivo receber um sinal digital proveniente do relé de proteção, geralmente utilizado para a mala de corrente perceber um sinal de *trip* ou de *pick-up*.



Figura 97 - Mala de corrente hexafásica da fabricante Conprove.

Fonte: CONPROVE ENGENHARIA, (2014).



Figura 98 – Geração de sinais de corrente e tensão.

Fonte: CONPROVE ENGENHARIA, (2014).

Figura 99 - Entrada binária da mala de corrente.



Fonte: CONPROVE ENGENHARIA, (2014).

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Resultado do teste de sobrecorrente 50/51 (69kV)

Teste de pick-up

No teste de pick-up realizado foi aplicado uma corrente de curto-circuito trifásico, em que quando atingiu o valor de 7,37A o relé enviou um sinal de trip para a mala de corrente, esse valor de corrente é comparado ao valor de ajuste, verificando o erro que o relé possui, sendo esse valor dentro do tolerável, o equipamento encontra-se com o status de "Aprovado".

/ mse	erir/Editar Po	ontos							
nserir/	Editar	Ponto de	e Teste						
	tar Ponto	В	abilitar o teste d	le DropOut					
Nov	o Ponto 🗸		Tipo de Falta:	A-B-C	\sim				
Se	equência								
R	emover								
Remo	over Todos								
Remo	over Todos								
Remo	over Todos tos de Teste	e							
Remo Pon Pontos	over Todos tos de Testo Testados	e							
Remo Pon Pontos	over Todos tos de Testo Testados Falta	Angulo	Curva de Referência	Pickup Nominal	Pickup Min	Pickup Max	Pickup Real	Status	
Remo Pon Pontos Nº Nº	over Todos tos de Testa Testados Falta A-B-C	e Ángulo	Curva de Referência 2_Fase	Pickup Nominal 7,36 A	Pickup Min 6,99 A	Pickup Max 7.73 A	Pickup Real 7,37 A	Status Aprovado	

Figura 100 - Teste de pick-up da função 50/51 (69kV).

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).



Figura 101 - Gráfico do teste de pick-up da função 50/51 (69kV).

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

Teste de tempo

No teste de tempo, são aplicadas correntes de curto-circuito em um intervalo de tempo e de magnitude em relação a corrente nominal do sistema, quando o relé atuar nesses pontos, é definida sua curva de atuação, fazendo assim com que a mala de corrente detecte se sua curva de atuação está igual a curva parametrizada. Outros valores que são confrontados é o tempo de resposta do relé para cada nível de corrente, como pode-se ver na Figura 102 em que possuímos os valores de tempo nominal (que é o tempo teórico em que o relé deveria atuar) e os valores de tempo real (que é o tempo em que o relé de fato enviou o sinal de *trip* para a mala de corrente). Se após a realização dos testes a curva de resposta do relé plotada no *software* for a mesma que foi parametrizada no relé e seus tempos de atuação para os determinados níveis de curto-circuito estiverem dentro da margem de tolerância o equipamento encontra-se aprovado.

_								
Pont	os de Test	e						
Pontos T	estados							
N⁰	Falta	Múltiplo Rel a	Múltiplo	Região	Atuou	Tempo Nominal	Tempo Real	Status
01	AE	Corrente Nominal	1.00	Operação	Sim	2,23 s	2.28 s	Aprovado
02-01	AE	Corrente Nominal	9,00	Operação	Sim	0,920 s	0,928 s	Aprovado
02-02	AE	Corrente Nominal	9,00	Operação	Sim	100,0 ms	107,1 ms	Aprovado
03	BE	Corrente Nominal	1,00	Operação	Sim	2,23 s	2.23 s	Aprovado
04-01	BE	Corrente Nominal	5.00	Operação	Sim	1,09 s	1,14 s	Aprovado
04-02	BE	Corrente Nominal	5,00	Operação	Sim	100,0 ms	107,9 ms	Aprovado

Figura 102 - Teste de tempo da função 50/51 (69kV).

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

Figura 103 - Teste de tempo	da funçao	50/51	(69KV).
-----------------------------	-----------	-------	---------

Pont	tos de Test	e							
Pontos T	festados								
Nº	Falta	Múltiplo Rel a	Múltiplo	Região	Atuou	Tempo Nominal	Tempo Real	Status	
08-02	CE	Corrente Nominal	9.00	Operação	Sim	100,0 ms	103,0 ms	Aprovado	
09	A-B-C	Corrente Nominal	1,00	Operação	Sim	2,23 s	2,29 s	Aprovado	
10-01	A-B-C	Corrente Nominal	5,00	Operação	Sim	1,09 s	1,16 s	Aprovado	
10-02	A-B-C	Corrente Nominal	5.00	Operação	Sim	100,0 ms	102,8 ms	Aprovado	
11-01	A-B-C	Corrente Nominal	9,00	Operação	Sim	0.920 s	0,929 s	Aprovado	
11-02	A-B-C	Corrente Nominal	9,00	Operação	Sim	100,0 ms	105,3 ms	Aprovado	

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).



Figura 104 - Gráfico do teste de tempo da função 50/51 (69kV).

4.2 Resultado do teste de sobrecorrente 50/51 (13,8kV)

Teste de pick-up

No teste de pick-up realizado foi aplicado corrente de curto-circuito trifásico e monofásico, em que quando atingiu o valor de 5,03A o relé enviou um sinal de trip para a mala de corrente, esse valor de corrente é comparado ao valor de ajuste, verificando o erro que o relé possui, sendo esse valor dentro do tolerável, o equipamento encontra-se com o status de "Aprovado".

Pon	tos de Test	e							
Nº	Falta	Ângulo	Curva de Referência	Pickup Nominal	Pickup Min	Pickup Max	Pickup Real	Status	
01	AE	825	1_Fase	5,0 <mark>2 A</mark>	4.77 A	5,27 A	5,03 A	Aprovado	
02	BE	~	1_Fase	5,02 A	4.77 A	5,27 A	5,03 A	Aprovado	
03	CE	840	1_Fase	5,02 A	4.77 A	5,27 A	5,03 A	Aprovado	
04	A-B-C		1_Fase	5,02 A	4.77 A	5.27 A	5,03 A	Aprovado	

Figura 105 - Teste de pick-up da função 50/51 (13,8kV).

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).



Figura 106 - Gráfico do teste de pick-up da função 50/51 (13,8kV).

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

De maneira análoga ao item 4.1.2, foram aplicadas correntes de curto-circuito em um intervalo de tempo e de magnitude em relação a corrente nominal do sistema (Figura *107*, Figura *108* e Figura *109*), quando o relé atuar nesses pontos, é definida sua curva de atuação, fazendo assim com que a mala de corrente detecte se sua curva de atuação está igual a curva parametrizada (Figura *110*).

Inse	erir/Editar P	ontos							
Pontos T	tos de Test Testados	e							
N⁰	Falta	Múltiplo Rel a	Múltiplo	Região	Atuou	Tempo Nominal	Tempo Real	Status	
01	AE	Corrente Nominal	1.00	Não Operação	Não			Aprovado	
02	AE	Corrente Nominal	5,00	Operação	Sim	1,93 s	1,99 s	Aprovado	
03	AE	Corrente Nominal	9,00	Operação	Sim	0,966 s	0.969 s	Aprovado	
04	BE	Corrente Nominal	1,00	Não Operação	Não	-	-	Aprovado	
05	BE	Corrente Nominal	5,00	Operação	Sim	1,93 s	2,01 s	Aprovado	
06	BE	Corrente Nominal	9,00	Operação	Sim	0,966 s	0.973 s	Aprovado	
		Corrente		Não					

Figura 107 - Teste de tempo da função 50/51 (13,8kV).

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

Pont Pontos T	t os de Test Festados	e							
Nº	Falta	Múltiplo Rel a	Múltiplo	Região	Atuou	Tempo Nominal	Tempo Real	Status	
06	BE	Corrente Nominal	9,00	Operação	Sim	0,966 s	0,973 s	Aprovado	
07	CE	Corrente Nominal	1,00	Não Operação	Não		12	Aprovado	
80	CE	Corrente Nominal	5,00	Operação	Sim	1,93 s	2,02 s	Aprovado	
09	CE	Corrente Nominal	9,00	Operação	Sim	0,966 s	0,970 s	Aprovado	
10	A-B-C	Corrente Nominal	1,00	Não Operação	Não	5	ā	Aprovado	
11	A-B-C	Corrente	5,00	Operação	Sim	1,93 s	1,94 s	Aprovado	

Figura 108 - Teste de tempo da função 50/51 (13,8kV).

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

Figura 109 - Teste de tempo da função 50/51 (13,8kV).

Pontos	<mark>tos de Teste</mark> Testados	•						
Nº	Falta	Múltiplo Rel a	Múltiplo	Região	Atuou	Tempo Nominal	Tempo Real	Status
07	CE	Corrente Nominal	1,00	Não Operação	Não	-		Aprovado
08	CE	Corrente Nominal	5,00	Operação	Sim	1,93 s	2,02 s	Aprovado
09	CE	Corrente Nominal	9,00	Operação	Sim	0,966 s	0,970 s	Aprovado
10	A-B-C	Corrente Nominal	1,00	Não Operação	Não	-	-	Aprovado
11	A-B-C	Corrente Nominal	5,00	Operação	Sim	1,93 s	1,94 s	Aprovado
12	A-B-C	Corrente Nominal	9,00	Operação	Sim	0,966 s	0,970 s	Aprovado

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).



Figura 110 - Gráfico do teste de tempo da função 50/51 (13,8kV).

4.3 Resultado do teste de proteção diferencial

Teste de configuração

No teste de configuração, é feita a validação das ligações e interface do relé, verificando também se os ajustes foram colocados corretamente.

Inserir/Editar Pontos Opções Gerais Inserir/Editar Pontos Opções Gerais Editar Ponto Entrada de Dados: Novo Ponto Inserir/Editar Ponto: Local da Fonte: Cargas Local da Fonte: Cargas Enrolamento 1 Modo: Novo Ponto Inserir/Editar Ponto Sequência Local do Curto: Fremlamento 2 Pontos de Teste Pontos de Teste Pontos de Teste Pontos Testados V 1 ABC A: 100 In A: 200 In 1 ABC A: 100 In A: 200 In 1 ABC B: 100 In C: 1.00 In C: 1.00 In C: 2.00 In Operação Sim Aprovado	Teste	de Configu	ração	Teste de Ponto	Teste de Bus	ca Con	figurações dos Te	stes			
Insert/Editar Pontos Editar Ponto Novo Ponto Cargas Editar Ponto Local da Fonte: Enrolamento 1 Local do Curto: Firmilamento 2 Pontos de Teste Pontos de Teste 1 ABC A: 100 In B: 200 In C: 1.00 In C: 2.00 II	In	serir/Editar	Pontos								-
Editar Ponto Entrada de Dados: IDif e IRest Correntes Novo Ponto Local da Fonte: Cargas IDif: 1.00 ln Sequência Local do Curto: Frimlamento 2 IDif: 1.00 ln Ventos de Teste Pontos de Teste IDif IRest Região Nº Falta IDif IRest Região Operou Status 1 As: 1.00 ln A: 2.00 ln Coreração Sim 1 ABC A: 1.00 ln B: 2.00 ln Operação Sim Aprovado	Inserir/	Editar Pontos	opçõ	es Gerais							^
Novo Ponto Local da Fonte: Enrolamento 1 Cargas Correntes Sequência Local do Curto: Frendamento 2 Modo: Nenhum Ref: in v IDif: 1.00 in IRest: 2.00 in Ventos de Teste Pontos de Teste Ventos Testados Ventos International de Curto: Frendamento 2 Ventos de Teste Nº Falta IDif IRest Região Operou Status Sinto In A: 2.00 in Dperação Sim 1 ABC A: 1.00 in B: 2.00 in Operação Sim	Edi		Entr	ada de Dados:	IDif e IRest	\sim					
Novo Ponto Enrolamento 1 Modo: Nenhum Ref: IDif: 1.00 In Sequência Local do Curto: Finnihamento 2 IDif: 1.00 In IRest: 2.00 In Pontos de Teste		- T	Local	da Fonte:	Cargas			Correntes -			
Sequència Local do Curto: Frandamento 2 IRest: 2.00 In Pontos de Teste - - Pontos de Teste - - Pontos Testados - - Nº Falta IDif IRest Região Operou 1 ABC A: 100 In A: 200 In Cperação Sim Aprovado	Nov	o Ponto	Enro	lamento1 🔍 🗸	Modo: Neni	num 🗸	Ref: In 🖂		IDif:	1,00 In	_
Pontos de Teste ~ Pontos de Teste ~ Pontos Testados ~ Nº Falta IDif IRest Região Operou Status 1 ABC B:100 ln C:200 ln Operação Sim Aprovado	Sec	quência	Local	do Curto:					Rect	2.00 lp	—
✓ ✓ ✓ Pontos de Teste - - Pontos Testados - - Nº Falta IDif IRest Região Operou Status 1 ABC A: 1.00 ln A: 2.00 ln Operação Sim Aprovado			Enro	lamento2 🗸					micar.	12,00 11	~
Pontos de Teste - Pontos Testados - Nº Falta IDif IRest Região Operou Status 1 ABC A: 1.00 ln B: 2.00 ln C: 1.00 ln C: 2.00 ln Operação Sim Aprovado	<									_	>
Nº Falta IDif IRest Região Operou Status 1 ABC B: 100 ln A: 2.00 ln Operação Sim Aprovado	Po	ntos de Tes	te								•
Nº Falta IDif IRest Região Operou Status 1 ABC A: 100 ln B: 100 ln C: 1.00 ln C: 2.00 ln A: 2.00 ln B: 2.00 ln C: 2.00 ln Operação Sim Aprovado	Pontos	Testados									
A: 1.00 In A: 2.00 In B: 2.00 In Circle of the section Circle of the section Circle of the section Aprovado	Nº	Falta	IDif	IRest	Região	Operou	Status				
C: 1,00 In C: 2,00 In	1	ABC	A: 1,00 In B: 1,00 In	A: 2,00 In B: 2,00 In	Operação	Sim	Aprovado				
			C: 1,00 In	C: 2,00 In							

Figura 111 - Resultado do teste de configuração.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).



Figura 112 - Gráfico do teste de configuração.

Teste de ponto

No teste de ponto, é feito a análise dos tempos de operação do relé para diversas situações de correntes de restrição e de operação, haverá regiões de não operação do relé (abaixo do *slope*) e regiões de operação (acima do *slope*), se o relé se comportar de maneira adequada ele estará aprovado no teste. Pode-se notar que na Figura 114 há uma faixa em azul, em que os pontos em verde são os pontos de teste do relé e a faixa em azul é a tolerância de erro de operação do relé, recomenda-se inserir os pontos de teste (em verde) no limite entre a faixa de tolerância azul e a região de operação. Pode-se observar que na Figura 113 há a existência de quatro pontos de teste, em que o ponto 1 e ponto 3 (abaixo da curva) estará em uma região de não operação, significando assim que o relé não deverá atuar, nos pontos 2 e 4 (acima da curva) temos a região de operação em que o relé de proteção deverá realizar sua atuação.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

/ Ins	serir/Edita	Pontos							
vo Pon	to 🗸	Local da Fonte	Ca	irgas		Terraneta (lorrentes		_
		Enrolamento 1	M	odo: Nenhum	Ref:	In ~		IDif. 0,88 In	
equênc	ia	Local do Curto						IRest: 2,94 In	_
<									3
Por	ntos de Te	este							
Pontos	Testados	-ste							
Fontos	Testados								
NIO	E-lt-	IDF	IRect	Dogião	Onorm	Tempo	Tempo	Status	
14-	Гана	101	Inest	negiau	Operou	Nominal	Real	Jidus	
4	APC	405 0 mln	2 50 lm	Não	Não		1	Actual C	
	ADC	455,5 1111	2,50 m	Operação	1400		-	Aprovado	
2	ARC	0.70C lp	2.56 lp	Onoraño	Cim	0.0	0.775 ma	Annorda	
2	ADC	0,700 m	2,30 11	Operação	Jun	0.5	0,7751115	Aprovado	
2	ADC	0.5041-	2041-	Não	M2			\$00.07 M	
3	ADC	0,364 In	2,94 In	Operação	Nao	-	-	Aprovado	
	ADC	0.0041-	2041-	0	e	0	0.701		
1 MA	ABC	0,884 IN	2,94 m	Operação	Sim	US	0,761 ms	Aprovado	

Figura 113 - Resultado do teste de ponto.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).



Figura 114 - Gráfico do teste de ponto.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

Teste de busca

Por fim, no teste de busca (Figura *115* e Figura *116*) é verificado se o valor de pick-up do relé corresponde ao valor que foi parametrizado no mesmo.

leste	de Configuração	o Test	te de Ponto	Teste de Busc	 Configurações dos Testes 	S
Ins	serir/Editar Por	ntos				
No	un Linha	Local da	a Fonte:	Cargas		
NO		Enrolan	nento1 🗸 🗸	Modo: Nenhu	ım ∨ <mark>Re</mark> f: In ∨	
Se	equência	Local do	Curto:			
-	-	Enrolam	nento2 🗸 🗸			
	Remover	Tipo de	Falta			
Ren	nover Todos	A-B-C	· •			
:						2
Po	ntos de Teste	<u>ר</u>				2
Pontos	ntos de Teste]				>
Portos	ntos de Teste Testados]				
Pontos Nº	ntos de Teste Testados Falta	IRest	IDifNom	IDifReal	Status	(
Pontos Nº	ntos de Teste s Testados Falta	IRest	IDifNom	IDifReal	Status	(
Pontos Nº 1	ntos de Teste s Testados Falta ABC	IRest 3,33 In	IDifNom 0,832 In	IDifReal 0,836 In	Status Aprovado	
Pontos Nº 1	ntos de Teste s Testados Falta ABC	IRest 3.33 In	IDifNom 0,832 In	IDifReal 0,836 In	Status Aprovado	
Pontos Nº 1 2	ntos de Teste Testados Falta ABC ABC	IRest 3,33 In 4,24 In	1DifNom 0,832 In 1,06 In	IDifReal 0.836 In 1.06 In	Status Aprovado Aprovado	

Figura 115 - Resultado do teste de busca.





Figura 116 - Gráfico do teste de busca.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, (2024).

5 CONCLUSÃO

Este trabalho proporcionou uma análise detalhada e abrangente da proteção de transformadores em uma subestação de 69 kV, com foco na parametrização e aferição do relé de proteção.

Após a simulação, os resultados obtidos foram analisados e avaliados, verificando-se a eficácia e precisão dos ajustes parametrizados. Concluiu-se que a proteção do transformador está adequadamente dimensionada e configurada para garantir a segurança e confiabilidade do sistema elétrico, proporcionando uma operação eficiente e livre de falhas.

Em resumo, este trabalho demonstrou a importância da correta parametrização e aferição do relé de proteção para o correto funcionamento do transformador em uma subestação de 69 kV, contribuindo para a segurança e estabilidade do sistema elétrico como um todo.

Com base no trabalho realizado há algumas possibilidades de melhorias futuras que podem ser consideradas para aprimorar ainda mais a proteção e a eficiência do sistema elétrico. Algumas dessas melhorias podem incluir a implementação de sistema supervisório (que permitiria monitorar e controlar os relés de proteção de forma remota, facilitando a detecção precoce de falhas e agilizando a resposta a eventos de proteção) e a atualização de protocolos de comunicação (migrando para protocolos de comunicação mais avançados e padronizados, como o IEC 61850, poderia simplificar a integração e a interoperabilidade entre os dispositivos de proteção, facilitando a configuração, o monitoramento e o diagnóstico de problemas).

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6855**: Transformador de potencial indutivo com isolação sólida para tensão máxima igual ou inferior a 52 kV - Especificações e Ensaios. 4°. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6856**: Transformador de corrente com isolação sólida para tensão máxima igual ou inferior a 52 kV - Especificações e Ensaios. 4°. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

KINDERMAN, Geraldo. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência.** 2. ed. Florianóplois: Edição do autor, 2005.

MAMEDE FILHO, João. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

MARDEGAN, Cláudio. **Proteção e Seletividade em Sistemas Elétricos Industriais**. 2. ed. Santa Catarina: Marfraf, 2022.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Evolução da Capacidade Instalada no SIN**. Rio de Janeiro: ONS, 2023. *Online*. Disponível em: https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros. Acesso em: 22 Fev. 2024.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Relatório Executivo do Programa Mensal de Operação**. 1. ed. Rio de Janeiro: ONS,2023.*E-book*. Disponível em:

https://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/RELATORIO-PMO-21_12%20a%2027_12.pdf. Acesso em: 20 Jan. 2024.

SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES. **SEL 487E-3,-4 Transformer Protection Relay**. 2. ed. São Paulo: Scheweitzer, 2023. *E-book*. Disponível em: https://selinc.com/products/487E/docs/. Acesso em: 15 Jan. 2024.

SIEMENS. **SIPROTEC 4 Differential Protection 7UT6x**. 4. ed. São Paulo: Siemens, 2016. *E-book*. Disponível em: https://support.industry.siemens.com/cs/document/109743415/siprotec_4_7ut6x_

https://support.industry.siemens.com/cs/document/109743415/siprotec-4-7ut6xdifferential-protection?dti=0&lc=en-BR. Acesso em: 03 Fev. 2024.

DA SILVA, Mauren. **Proposta de modelagem e simulação para análise de distorção harmônica**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014. Disponível em: https://lume.ufrgs.br/handle/10183/103732. Acesso em: 15 Fev. 2024.

UMANS, Stephen. **Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.