



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
INFRAESTRUTURA E TERRITÓRIO –
ILATIT**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
INTERDISCIPLINAR EM ENERGIA E
SUSTENTABILIDADE**

**BANCADA DE REPRODUÇÃO DE FALHAS EM SISTEMAS DE PROTEÇÃO E
CONTROLE-POWERTS**

ADRIEL RODRIGUES DA SILVA



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
INFRAESTRUTURA E TERRITÓRIO –
ILATIT**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
INTERDISCIPLINAR EM ENERGIA E
SUSTENTABILIDADE**

**BANCADA DE REPRODUÇÃO DE FALHAS EM SISTEMAS DE PROTEÇÃO E
CONTROLE-POWERTS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Energia e Sustentabilidade.

Orientador: Dr. Jorge Javier Gimenez Ledesma.
Co-orientador: Dr. Oswaldo Hideo Ando Junior.

Foz do Iguaçu – PR
2022

Catálogo elaborado pelo Setor de Tratamento da Informação
Catálogo de Publicação na Fonte. UNILA - BIBLIOTECA LATINO-AMERICANA – PTI

S586

Silva, Adriel Rodrigues da.

Bancada de reprodução de falhas em Sistemas de Proteção e Controle-Powerts / Adriel Rodrigues da Silva.
- Foz do Iguaçu, 2022.

111 f.: il., color.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Instituto Latino-Americano de Infraestrutura e Território, Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Javier Gimenez Ledesma. Coorientador:
Prof. Dr. Oswaldo Hideo Ando Junior.

1. Proteção de sistemas elétricos. 2. Relé digital. 3. Bancada de teste. I. Gimenez Ledesma, Prof. Dr. Jorge Javier. II. Ando Junior, Prof. Dr. Oswaldo Hideo. III. Título.

CDU 621.3.04

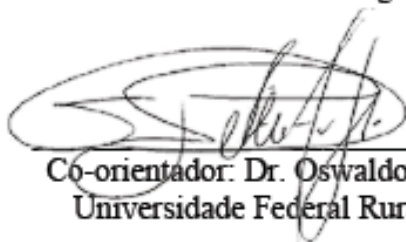
BANCADA DE REPRODUÇÃO DE FALHAS EM SISTEMAS DE PROTEÇÃO E CONTROLE-POWERTS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Energia e Sustentabilidade.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
gov.br JORGE JAVIER GIMENEZ LEDESMA
Data: 26/09/2022 22:58:02-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

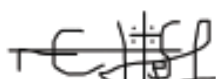
Orientador: Jorge Javier Gimenez Ledesma
Universidade Federal da Integração Latino-Americana



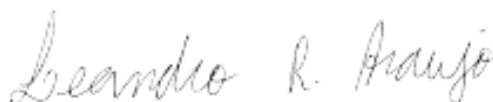
Oswaldo Hideo Ando Junior
Professor do Magistério Superior
SIAPE: 1155886

Co-orientador: Dr. Oswaldo Hideo Ando Junior
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Documento assinado digitalmente
gov.br CIDINEY JOSE DA SILVA
Data: 27/09/2022 18:31:29-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>



Dr. Cidiney José da Silva
Furnas Centrais Elétricas



Dr. Leandro Ramos de Araújo
Universidade Federal de Juiz de Fora



Dr. Fabiano Salvadori
Universidade Federal da Paraíba

Foz do Iguaçu, 25 de agosto de 2022.

RESUMO

Com a crescente evolução das técnicas de processamento digital aplicadas a dispositivos de proteção e o advento dos dispositivos eletrônicos inteligentes, estes passaram a ter parâmetros e funções mais complexas, as quais geraram mudanças nos cenários de testes. O conhecimento das lógicas implementadas nos relés e suas funções são de suma importância para a realização de testes. A realização de testes em sistemas de proteção e controle traz segurança para o sistema elétrico de potência: em uma atuação indevida ou uma falha de atuação podem ocorrer desligamentos indevidos, levando a um colapso do sistema. Tendo em vista os impactos causados pelas interrupções no fornecimento de energia elétrica, nota-se a importância de ferramentas para a realização de testes, manutenção e comissionamento dos dispositivos eletrônicos inteligentes. Em confluência com as exigências do cenário atual, os testes para verificação dos esquemas de proteção estão evoluindo cada vez mais para uma abordagem que represente o comportamento real da operação do sistema elétrico de potência. Neste contexto, uma bancada de reprodução de falha com o auxílio de uma caixa de ensaio se mostra um local adequado para realizar testes em dispositivos eletrônicos inteligentes, uma vez que permite a configuração de distintos *bays* de subestação, simulando sinais de equipamentos elétricos e permitindo a seus usuários a realização de testes nos sistemas de proteção de forma segura, sem riscos de acidentes pessoais e desligamentos acidentais. O objetivo deste trabalho é desenvolver uma bancada de reprodução de falhas, com o propósito de realizar ensaios em dispositivos eletrônicos inteligentes, atendendo aos novos cenários de teste, e contribuir para a qualificação de profissionais que atuam no sistema elétrico de potência. A bancada proporciona uma infraestrutura básica e com auxílio de uma caixa de ensaio, a realização de testes em sistemas digitais de proteção e controle, quando na necessidade de reprodução de falhas ocorridas no sistema, configuração e implementação de novas lógicas, comissionamento e manutenção. A metodologia aplicada nesta pesquisa se deu por meio de análise de resultados dos testes realizados em bancada em lógicas e funções de proteção. Os resultados apresentados foram satisfatórios, mostrando que a bancada simulou todos os sinais necessários para o funcionamento correto das lógicas e funções de proteção, atestando sua praticidade e eficiência.

Palavras-chave: proteção de sistemas elétricos, relé digital, simulação, subestação, bancada de teste.

RESUMEM

Con la creciente evolución de las técnicas de procesamiento digital aplicadas a los dispositivos de protección y el advenimiento de los dispositivos electrónicos inteligentes, estos pasaron a tener parámetros y funciones más complejas, lo que generó cambios en los escenarios de prueba. El conocimiento de las lógicas implementadas en los relés y sus funciones son de suma importancia para la realización de las pruebas. La realización de pruebas en los sistemas de protección y control brinda seguridad al sistema eléctrico de potencia: en caso de una actuación incorrecta o una falla de actuación, pueden ocurrir paradas indebidas, lo que lleva a un colapso del sistema. Ante los impactos ocasionados por las interrupciones en el suministro de energía eléctrica, se destaca la importancia de las herramientas para la realización de pruebas, mantenimiento y puesta en marcha de dispositivos electrónicos inteligentes. En confluencia con los requerimientos del escenario actual, las pruebas para verificar los esquemas de protección evolucionan cada vez más hacia un enfoque que represente el comportamiento real de la operación del sistema eléctrico. En este contexto, un banco de reproducción de fallas con la ayuda de una caja de prueba resulta un lugar adecuado para realizar pruebas en dispositivos electrónicos inteligentes, ya que permite configurar diferentes bahías de subestaciones, simulando señales de equipos eléctricos y permitiendo a sus usuarios realizar las pruebas de los sistemas de protección de forma segura, sin riesgo de accidentes personales y paradas accidentales. El objetivo de este trabajo es desarrollar un banco de reproducción de fallas, con el propósito de realizar pruebas en dispositivos electrónicos inteligentes, teniendo en cuenta los nuevos escenarios de prueba, y contribuir a la calificación de los profesionales que actúan en el sistema eléctrico de potencia. El banco proporciona una infraestructura básica y con la ayuda de una caja de prueba, prueba de sistemas de control y protección digital, cuando se necesita reproducción de fallas ocurridas en el sistema, configuración e implementación de nuevas lógicas, puesta en marcha y mantenimiento. La metodología aplicada en esta investigación se basó en el análisis de resultados de pruebas realizadas en banco en lógicas y funciones de protección. Los resultados presentados fueron satisfactorios, demostrando que el banco simuló todas las señales necesarias para el correcto funcionamiento de las lógicas y funciones de protección, dando fe de su practicidad y eficiencia.

Palabras clave: protección de sistemas eléctricos, relé digital, simulación, subestación, banco de pruebas.

ABSTRACT

With the increasing evolution of digital processing techniques applied to protection devices and the advent of intelligent electronic devices, these started to have more complex parameters and functions, in which there were changes in the test scenarios. The knowledge of the logics implemented in the relays and their functions are of paramount importance for carrying out the test. Conducting tests on protection and control systems brings security to the electrical power system: in the event of an improper actuation or a failure of actuation, undue shutdowns can occur, leading to a system collapse. In view of the impacts caused by interruptions in the supply of electric energy, the importance of tools for carrying out tests, maintenance and commissioning of intelligent electronic devices is noted. In confluence with the requirements of the current scenario, tests to verify protection schemes are increasingly evolving towards an approach that represents the real behavior of the operation of the electric power system. In this context, a fault reproduction bench with the aid of a test box proves to be a suitable place to carry out tests on intelligent electronic devices, since it allows the configuration of different substation bays, simulating signals from electrical equipment and allowing its users to carry out tests on the protection systems in a safe way, without the risk of personal accidents and accidental shutdowns. The objective of this work is to develop a fault reproduction bench, with the purpose of carrying out tests on intelligent electronic devices, considering the new test scenarios, and contributing to the qualification of professionals who work in the electrical power system. The bench provides a basic infrastructure and with the help of a protection test box, tests in digital protection and control systems, when there is a need to reproduce faults occurred in the system, configuration and implementation of new logics, commissioning, and maintenance. The methodology applied in this research was through analysis of test results performed on bench in logic and protection functions. The results were satisfactory, showing that the bench simulated all the necessary signals for the correct functioning of the logics and protection functions, attesting to the practicality and efficiency of the bench.

Keywords: protection of electrical systems, digital relay, simulations, substation, test bench.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Zonas de proteção	13
Figura 2- Dispositivo eletrônico inteligente	14
Figura 3-Testes em relés numéricos	15
Figura 4- Diagrama unifilar.....	18
Figura 5- Diagrama de impedância MHO.	22
Figura 6- Curva Características da proteção diferencial	24
Figura 7- Fluxograma para o desenvolvimento e concepção da bancada de teste	26
Figura 8- Bancada de teste.....	27
Figura 9- Diagrama funcional de teste	28
Figura 10- Diagrama unifilar da bancada.....	28
Figura 11- Testes em sistemas de proteção	30
Figura 12- Teste de simulação de falha no sistema.....	32
Figura 13- Diagrama unifilar dos equipamentos elétricos.....	33
Figura 14- Componentes da bancada.....	35
Figura 15- Painel em fase de preparação.....	36
Figura 16- Alimentação dos circuitos da bancada.....	37
Figura 17- Diagrama unifilar de um vão de linha de transmissão.....	38
Figura 18- Diagrama unifilar de um vão de autotransformador.....	39
Figura 19- Diagrama unifilar de barras de subestação	39
Figura 20- Bancada para reprodução de falhas	40
Figura 21-Teste na lógica de religamento automático.....	41
Figura 22- Sequência de estado no teste de religamento automático	42
Figura 23- Sinais analógicos	42
Figura 24- Sequência de estado no teste na lógica de monocanal.....	43
Figura 25-Teste na lógica de monocanal.....	44
Figura 26-Teste na lógica de fechamento sob-falta.....	45
Figura 27- Sistema montado na bancada para teste na proteção de barra	46
Figura 28- Sinais analógicos de correntes	47
Figura 29- Curva característica de teste da proteção diferencial de barras	47
Figura 30- Configuração do sistema para teste na proteção do transformador	48
Figura 31- Diagrama de teste na proteção do transformador	49
Figura 32- Curva característica de teste do transformador.....	49

Figura 33- Metodologia para análise dos testes e resultados.....	50
Figura 34- Circuito de alimentação do relé	52
Figura 35- Interface do software da caixa de teste omicron.....	52
Figura 36- Conexões de teste	53
Figura 37- Conexões entre a bancada, relé e caixa de teste	54
Figura 38- Diagrama unifilar do vão da linha de transmissão.....	55
Figura 39- Diagrama de teste.....	56
Figura 40- Resultado da simulação do teste	57
Figura 41- Eventos e oscilografia da lógica de religamento automático.....	58
Figura 42- Simulação do teste da falha de canal	58
Figura 43- Eventos e oscilografia do relé teste lógicas de teleproteção	60
Figura 44- Lógica de fechamento sob-falta.....	61
Figura 45- Eventos e oscilografia da lógica de fechamento sob-falta.....	62
Figura 46- Unifilar dos vãos montados na bancada	63
Figura 47- Diagrama da curva característica de operação fase A	64
Figura 48- Eventos e oscilografia da proteção diferencial fase A.....	65
Figura 49- Configuração da bancada para teste na proteção do autotransformador	66
Figura 50- Característica de operação fase A.....	67
Figura 51- Monitoramento de abertura dos disjuntores	68
Figura 52- Monitoramento de abertura dos disjuntores do lado do enrolamento de 765kV.....	69
Figura 53- Curva de teste realizado na função de sobrecorrente fase A	69
Figura 54- Curva de teste realizado na função de sobrecorrente fase A lado de 525kV.....	70
Figura 55- Monitoramento de abertura dos disjuntores do lado do enrolamento de 500kV.....	71
Figura 56- Curva de teste realizado na função de sobrecorrente fase A lado de 69kV.....	72
Figura 57- Monitoramento de abertura dos disjuntores do lado do enrolamento de 69kV.....	72
Figura 58- Portfólio bibliográfico	85
Figura 59- Relé Diferencial percentual	90
Figura 60- Curva característica de operação do relé de sobrecorrente.....	92
Figura 61- Esquema de proteção de barras.....	93
Figura 62- Curva característica da proteção diferencial.....	94
Figura 63- Impedância medida por um relé de distância.....	94
Figura 64- Diagrama de impedância	95
Figura 65- Curva característica MHO	96

Figura 66- Circuito de fechamento do disjuntor.....	97
Figura 67- Comando de abertura do disjuntor.....	97
Figura 68- Comando de fechamento das seccionadoras.....	98
Figura 69- Comando de abertura das seccionadoras	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Publicações correlatas ao tema da pesquisa	9
Tabela 2- Características funcionais dos relés de proteção	13
Tabela 3- Tipos de testes definido pela norma IEE C37.233	16
Tabela 4- Parâmetros de impedâncias.	19
Tabela 5- Parâmetros de impedâncias.	20
Tabela 6- Ajuste da proteção diferencial de barras	23
Tabela 7- Dados do transformador de potência.....	24
Tabela 8- Ajustes da função diferencial	25
Tabela 9- Função 51 lado 765kV	25
Tabela 10- Função 51 lado 500kV	25
Tabela 11- Função 51 lado 69kV.	25
Tabela 12- Componentes da bancada	34
Tabela 13- Custo de implantação da bancada	34
Tabela 14- Valores de tensão e corrente.....	45
Tabela 15- Ajuste do relé	55
Tabela 16- Valores de tensão e corrente para o teste de religamento automático.....	56
Tabela 17- Parametrização do relé	59
Tabela 18- Valores de tensão e corrente para teste na lógica de teleproteção.....	59
Tabela 19- Parâmetros da função de sobrecorrente.....	61
Tabela 20- Sinais analógicos injetados no relé.....	62
Tabela 21- Ajuste da proteção diferencial de barras	63
Tabela 22- Resultado do teste fase A	64
Tabela 23- Ajuste da função diferencial para teste na curva característica.....	66
Tabela 24- Corrente diferencial fase A.....	67
Tabela 25- Ajuste da função de sobrecorrente lado 765kV.....	68
Tabela 26- Atuação da função de sobrecorrente do lado de 765kV fase A.....	68
Tabela 27- Ajuste da função de sobrecorrente lado 525kV.....	70
Tabela 28- Atuação da função de sobrecorrente do lado de 525kV fase A.....	70
Tabela 29- Ajuste da função de sobrecorrente lado 69kV.....	71
Tabela 30- Atuação da função de sobrecorrente do lado de 69kV fase A.....	71
Tabela 31- Eixos, Palavras- Chaves, Constituição do Bancos de Artigos Bruto (BAB). ...	84
Tabela 32- Portfólio Bibliográfico, pesquisado em 29/04/2022.....	85

Tabela 33- Busca de anterioridades de patentes.....	89
Tabela 34- Portfólios de patentes	89
Tabela 35- Constantes de operação da função de sobrecorrente.....	92

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ATP	<i>Alterntive Transient Program</i>
BAB	Base de Artigos Brutos
CLP	Controlador Lógico Programável
EMTP	<i>Electromagnetic Transients program</i>
FPGA	<i>Flexible Programmable Logic Array</i>
GOOSE	<i>Generic Object-Oriented Substation Event</i>
IEC 61850	<i>International Electrotechnical Comiasion</i>
IED	<i>Intelligent Electronic Devices</i>
IHM	Interface Homem Máquina
INPI	<i>Instituto da Propriedade Intelectual</i>
LABMCDA	<i>Laboratório Development Process Construtivist</i>
MATLAB	<i>Matrix Laboratório</i>
PAC	<i>Proteção, Automação e Controle</i>
Proknow-C	<i>Knowledge Development Process – Construtivist</i>
POTT	<i>Permissive overreaching transfer trip</i>
RTAI	Interface em tempo Real
RTDS	<i>Real Time Digital Simulator</i>
SAT	Teste de Aceitação do Sistema em Campo
SE's	Subestação de Energia Elétrica
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SOTF	<i>Switching Onto a Fault</i>
TALV	Teste de Aceitação em Laboratório Virtual

LISTA DE VARIÁVEIS

IF	Corrente de falta máxima em pu da corrente nominal do TC
$I_{\text{pick-up}}$	Corrente de partida do relé
$I_{\text{primário}}$	Corrente que passa pelo enrolamento primário do TC
$I_{\text{secundário}}$	Corrente que passa pelo enrolamento secundário do TC
K	Dial de tempo
KG	Módulo do fator de compensação de sequência zero
KGang	Ângulo do fator de compensação de sequência zero
N_p	Número de espira do primário
N_s	Número de espira do secundário
RTC	Relação de transformação de corrente
RTP	Relação de transformação de tensão
REL	Relação de transformação de impedância
$V_{\text{primário}}$	Tensão no enrolamento primário
VS	Classe de tensão do TC
$V_{\text{secundário}}$	Tensão no enrolamento secundário
Z_{1L1}	Impedâncias da linha
Z_{0MAG}	Módulo da impedância de sequência zero da LT
Z_{0ang}	Ângulo da impedância de sequência zero da LT
Z_{1ang}	Ângulo da impedância de sequência positiva da LT
I_{diff}	Corrente diferencial
I_{op}	Corrente de operação
I_{res}	Corrente de restrição
I_n	Corrente nominal

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 OBJETIVOS	3
1.2 CONTRIBUIÇÃO DA PESQUISA.....	4
1.3 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA.....	4
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	5
1.5 PUBLICAÇÕES RELACIONADAS A ESTE TRABALHO	5
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	6
2.1 ESTADO DA ARTE.....	6
2.1.1 Revisão da Literatura	6
2.1.2 Revisão de Patentes.....	10
2.2 CONCEITOS E DEFINIÇÕES DE PROTEÇÃO	12
2.3 TESTES EM SISTEMAS DE PROTEÇÃO	15
3 MEMORIAL DE AJUSTE.....	18
3.1 PROTEÇÃO DE LINHA DE TRANSMISSÃO FUNÇÃO (21).....	18
3.2 PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE SUBESTAÇÃO (87)	23
3.3 PROTEÇÃO DE TRANSFORMADOR (87/50/51).....	24
4 DESENVOLVIMENTO DA BANCADA PROPOSTA.....	26
4.1 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO FUNCIONAL E LAYOUT DA BANCADA	26
4.1.1 Teste de Comissionamento Fábrica.....	29
4.1.2 Funções de Proteção.....	30
4.1.3 Lógicas de Proteção	31
4.1.4 Reprodução de Falha no Sistema	31
4.2 LEVANTAMENTO E AQUISIÇÃO DOS COMPONENTES DA BANCADA.....	32
4.3 CONCEPÇÃO DO PAINEL.....	35
4.4 MONTAGEM DA BANCADA.....	36
4.5 REALIZAR TESTES EM IED'S.....	38
5 PROCEDIMENTO DE TESTE	40
5.1 RELIGAMENTO AUTOMÁTICO	40
5.2 LÓGICA DE MONOCANAL	43
5.3 LÓGICA DE FECHAMENTO SOB-FALTA	44
5.4 PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE BARRAS	45
5.5 PROTEÇÃO DO AUTOTRANSFORMADOR	48
6 TESTES REALIZADOS	50
6.1 LÓGICAS DE PROTEÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO.....	54

6.2 PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE BARRAS	62
6.3 PROTEÇÃO DO AUTOTRANSFORMADOR	65
7 CONCLUSÕES.....	74
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77
APÊNDICE A – PEDIDO DE PATENTE DE INVENÇÃO	82
ANEXO A - PORTFÓLIOS BIBLIOGRÁFICOS E PATENTES	84
ANEXO B – PROTEÇÕES.....	90

1 INTRODUÇÃO

Diante das dificuldades de equipes de manutenção em reproduzir falhas ocorridas no sistema elétrico de potência, realizar testes, manutenção, comissionamento nos dispositivos de proteção, a bancada de teste se torna uma ferramenta adequada para suprir essas demandas que surgiram com a digitalização dos sistemas de proteção e controle.

Os IEDS são dispositivos eletrônicos inteligentes que desempenham várias funções como medição, proteção, execução de lógicas, comunicação com outros IEDS e outros equipamentos. A quantidade de entradas e saídas analógicas e digitais programáveis e a capacidade de processamento, viabilizaram a utilização dos relés digitais para a implementação de funções de automação (SEGUNDO, 2014).

A implantação dos relés digitais no sistema elétrico de potência facilitou o desenvolvimento de ferramentas computacionais que permitem mais confiabilidade e eficiência na proteção e controle dos equipamentos do sistema de potência, fornecendo informações em tempo real à operação do sistema, objetivando a tomada de decisão e permitindo a análise dos sinais elétricos diante de uma perturbação do sistema elétrico (MOUTINHO, 2011).

O teste em relés numéricos é realizado simulando falhas ocorridas no sistema elétricos de potência, gerando valores de defeito para tensão e corrente usando instrumentos de teste de injeção secundária. Dependendo da configuração programada do relé, a caixa de ensaio pode monitorar as saídas binárias ou os sinais de comunicação do equipamento testado. Todas as sequências de teste são gerenciadas e monitoradas pelo especialista em relés de proteção, tornando-as uma figura-chave em termos de testes periódicos de relés de proteção (JURISIC, et al., 2018).

Num comissionamento, a injeção dos sinais de tensão e corrente nas entradas analógicas dos relés, a monitoração das entradas e saídas digitais são feitas com uma caixa de ensaio, a caixa de teste é uma interface entre disjuntores, seccionadoras e o relé que está sendo testado. Para esses procedimentos, são necessários a isolação de todos os sinais que realizam disparos nos disjuntores, que ficam localizados nos painéis onde estão instalados os relés que estão sendo testado, para não ocorrer o risco de desligamentos acidentais. Esses testes são necessários para garantir que a lógica que foi implementada no relé funcione adequadamente (BENCZ, et al., 2017).

Os ensaios nos sistemas de proteção devem ter seus métodos adaptados

para serem capazes de avaliar as funcionalidades dos relés, utilizando a filosofia de teste que for mais adequada. A padronização que define as condições dos comissionamentos dos dispositivos de proteção depende de diferentes fatores, como objetivo do ensaio, capacidade técnica da equipe de avaliação e a cultura da empresa, dentre outros (FONTES, 2015).

É de suma importância a realização de testes para a avaliação do desempenho dos sistemas de proteção. De modo a validar os estudos de seletividades e coordenação, bem como avaliar o desempenho destes esquemas, diferentes ferramentas vêm sendo utilizadas para simulação, tendo como objetivo a representação fidedigna de perturbações (FILOMENA, 2011).

Os diversos tipos de ensaios são efetuados de forma a analisar e avaliar as características e comportamentos de um dispositivo de proteção nas subestações de energia elétricas, onde se pretende simular situações reais. As características e comportamentos dos sistemas de proteção e controle devem ser confirmados através da realização de ensaios (CARDOSO, 2013).

Os testes em sistemas de proteção são apropriados para se avaliarem as características gerais de operação das funções de medição da proteção. Esses ensaios, embora relativamente simples, são muito trabalhosos e exigem laboratórios bem equipados. Nesse ensaio é realizado o teste da função de proteção, como o da lógica inserida no relé. Para isso é necessário um local onde se simulem os sinais digitais tanto de entrada, quanto da saída do relé, para validar o teste realizado (GONÇALVES, 2012).

Nos testes em dispositivos de proteção se faz necessária a simulação de falhas, perturbações ocorridas no sistema elétrico. O sistema de teste deve simular os sinais de equipamentos elétricos de subestação e do sistema elétrico, sendo esses sinais enviados para as entradas digitais e analógicas do IED, com intuito de analisar o desempenho do sistema de proteção (ROFALSKI, et al., 2014).

A utilização de simuladores durante os testes de um sistema de controle e automação de subestação, mostrou-se muito vantajosa, uma vez que eles reduzem a probabilidade de problemas e permitem que os testes sejam executados por completo. Além da visível otimização do tempo necessário para os testes, um ambiente controlado e simulado reduz substancialmente a probabilidade de atuações e desligamentos indevidos (ADABO, et al., 2015).

A utilização de plataformas ou softwares em testes nos dispositivos de proteção e controle, permite a seus usuários realizarem simulações de falhas no sistema

elétrico de potência, em que podem verificar as características e o comportamento das proteções, analisando sua importância e impactos que podem ocorrerem no sistema elétrico de potência (LIMA, et al., 2016).

Com o objetivo de atender os novos cenários de testes em sistemas digitais de proteção e controle, na qual estão evoluindo para uma abordagem que representa um comportamento real à operação do sistema elétrico de potência, este trabalho apresenta o desenvolvimento e a elaboração de uma bancada de reprodução de falhas que simula sinais de equipamentos elétricos como disjuntores, seccionadoras e sinais de equipamentos de teleproteção, para reprisar falhas, testes e comissionamento em sistemas digitais de proteção e controle, de forma segura, sem risco para a operação do sistema elétrico e a integridade física dos profissionais de manutenção.

A bancada foi projetada e montada para testes em sistemas digitais de proteção e controle, permitindo a avaliação dos ajustes, lógicas, e as funcionalidades de todas as interfaces (entradas e saídas digitais, lógicas de proteção, entradas analógicas e os intertravamentos elétricos) com o sistema elétrico, sendo que bancada simula situações reais de operação tais como bay de linha de transmissão, bay de transformador e equipamentos que compõe o arranjo de uma barra de subestação.

Neste contexto, justifica-se a importância de uma ferramenta para testes em sistemas digitais de proteção e controle, na qual os resultados apresentados validaram o desenvolvimento da bancada proposta.

1.1 OBJETIVOS

Desenvolver e construir uma bancada que simula sinais de equipamentos elétricos de potência. Para reprodução, simulações de falhas e ensaios em dispositivos de proteção e controle. Atendendo aos novos cenários de testes em sistemas digitais de proteção e controle, na qual estão evoluindo para uma abordagem que representa o comportamento real à operação do sistema elétrico de potência.

Os seguintes tópicos compõem os objetivos específicos:

- 1) Realizar uma pesquisa de anterioridade de portfólios de trabalhos científicos e de patentes referente ao tema da pesquisa.
- 2) Desenvolver o projeto funcional e layout da bancada.
- 3) Realizar testes em funções e lógicas de proteção.
- 4) Validar a bancada que foi proposta através dos resultados dos testes que foram

realizados na proteção de linha de transmissão, mais especificamente nas lógicas de teleproteção, religamento automático, fechamento sob falta, proteção de transformador e proteção diferencial de barra.

- 5) Utilizar a bancada de teste para reproduzir falhas ocorridas no sistema elétrico de potência para analisar as atuações dos IED's.

1.2 CONTRIBUIÇÃO DA PESQUISA

A principal contribuição desta pesquisa é o desenvolvimento da bancada para realizar testes em sistemas digitais de proteção e controle, sendo algumas contribuições descritas abaixo:

- 1) Simulação de operação de equipamentos elétricos de potência, funcionando com distintas configurações de vãos de subestação, permitindo realizar testes em proteção de linha de transmissão, proteção de autotransformadores, proteção de barra de subestação.
- 2) Utilização da bancada para realizar capacitação de profissionais.
- 3) Possibilidade de testes de comissionamento em fábrica em sistemas de digitais de proteção e controle.
- 4) Modelo com baixo custo de implantação, cuja configuração da bancada é desenvolvida com relés estáticos, permitindo ainda acrescentar outras funcionalidades a bancada.

1.3 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

No cenário atual, a ausência de uma bancada de testes que simula sinais de equipamentos elétricos para ser utilizada como uma ferramenta de teste, permitindo a seus usuários realizar testes em dispositivos de proteção, de forma segura, sem riscos para o sistema elétrico de potência e acidentes pessoais, justificando o preenchimento desta lacuna. De acordo a esse cenário, justificou-se a necessidade de projetar, desenvolver uma bancada de testes para solucionar este problema adequando as necessidades de equipes que atuam nos sistemas elétricos de potência.

Para atender a uma demanda específica do setor elétrico, podemos evidenciar o aspecto de relevância desta pesquisa: é a utilização da bancada de teste para capacitação de profissionais e a inserção no meio acadêmico, permitindo aos estudantes de engenharia e cursos técnicos a aplicação prática de testes em sistemas de proteção e controle.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Essa dissertação está dividida em 6 capítulos. A seguir resumidamente são descritos cada um deles.

No capítulo 1, apresenta-se uma introdução referente ao tema da dissertação, apresentando os objetivos, contribuição, justificativa e a estrutura da dissertação.

No capítulo 2, é apresentado o estado da arte das revisões literárias e os portfólios de propriedade intelectual sobre o tema desta pesquisa. Descreve-se de forma sucinta a fundamentação teórica sobre os conceitos e definições de proteção, testes em sistemas de proteção.

No capítulo 3, são descritos o memorial de ajuste do sistema de proteção, servindo de referência para os testes, sendo apresentados apenas os ajustes que foram objetos de estudo desta pesquisa.

No capítulo 4, descrevem-se os principais passos para o desenvolvimento, concepção e montagem bancada de teste.

No capítulo 5 são descritos os procedimentos de testes, suas funcionalidades em seu âmbito de aplicação, materiais e equipamentos para sua utilização.

No capítulo 6, são apresentados os testes que foram realizados para apresentação da metodologia proposta. Analisa-se a atuação dos dispositivos de proteção (funções e lógicas) através dos sinais que foram simulados pela bancada.

No capítulo 7, são apresentadas as principais conclusões obtidas no desenvolvimento desta pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

1.5 PUBLICAÇÕES RELACIONADAS A ESTE TRABALHO

Relacionado a esta dissertação os seguintes trabalhos foram publicados:

- Pedido Nacional de Invenção, Dispositivo Para Testes e Simulações de Falhas em Proteção de Sistemas Elétricos de Potência, Depositante: Furnas Centrais Elétricas S/A Inventores: Adriel rodrigues da Silva, Jorge Javier Gimenez Ledesma, Osvaldo Hideo Ando Junior, Número do Processo: BR 10 2022 016842 3, Data do Depósito: 24/08/2022.
- Measurement, Sensor Systems and Applications Conference, Apresentação de um Poster “Failure Reproduction Bench in Digital Systems of Protection and Control” 24-26 de Agosto 2022, MeSSAC 2022- Elsevier.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são descritos o estado da arte das revisões literárias e os portfólios de propriedade intelectual, conceitos e definições de proteção de sistemas elétricos de potência aplicados ao tema desta proposta, bem como o conceito de testes e memorial de ajuste dos sistemas de proteção que foram testados para o desenvolvimento desta pesquisa.

2.1 ESTADO DA ARTE

Nesta seção são apresentados os procedimentos utilizados nas revisões literárias sobre o tema desta pesquisa, Projeto de Desenvolvimento de uma Bancada que Simula Sinais de Equipamentos Elétricos para Testes em Proteção de Sistemas Elétricos. A primeira revisão refere-se aos portfólios dos trabalhos científicos que foram publicados de acordo com o tema da pesquisa. A segunda revisão descreve os portfólios de propriedade intelectual, ou seja, as patentes publicadas referentes ao tema da pesquisa. São abordados, tanto na revisão bibliográfica quanto na revisão de patentes, conceitos fundamentais para o desenvolvimento da solução que foi proposta.

2.1.1 Revisão da Literatura

Em (MOUTINHO,2011), um simulador de relés de proteção, controle e supervisão, foi desenvolvido para aplicação em subestação de energia elétrica. O simulador dos relés de proteção consiste na reprodução de informações que são originadas pelos equipamentos de proteção e controle, e são enviadas para as interfaces homem-máquina, onde essas informações são reproduzidas em um aplicativo que simula as informações do sistema elétrico em tempo real. Essa ferramenta é utilizada para capacitação de operadores e são simuladas manobras em equipamentos de subestação, para analisar e avaliar as atividades de operação, e pode ser utilizada por profissionais de manutenção a fim de analisar as ocorrências no sistema elétrico.

No estudo de (HAZARIRA; SHUBHANGA, 2013), uma bancada de teste para relés, foi desenvolvida baseada em um aplicativo de tempo real-Linux. A bancada é constituída de software e hardware, onde são gerados sinais analógicos (tensão e corrente) em tempo real para realizar testes em relés estáticos e numéricos. É uma ferramenta de baixo custo, para ser utilizada em laboratórios para realizar testes e analisar o comportamento e as características dos relés. Essa ferramenta pode ser inserida em laboratórios de universidades e na capacitação de profissionais que atuam na área de proteção e controle.

(ALMEIDA, et al, 2016), desenvolveram a plataforma de teste protótipo labprotec, sendo uma plataforma didática de comissionamento de sistemas digitais de controle e proteção, compatível com a norma IEC 61850, simulando informações de equipamentos elétricos para o desenvolvimento de testes em algoritmo de IED's, lógicas de automatismo e intertravamento de proteção e controle. A plataforma pode ser inserida em laboratórios de universidades, qualificação de profissionais.

Segundo (PANDINI, et al., 2017), a bancada didática para automação industrial proporciona uma infraestrutura para que discentes de Engenharia possam realizar testes em laboratório em sistemas de automação industrial, nos quais pode ser desenvolvida programação de lógicas de CLP e realização de simulações de processos industriais. O projeto levou em consideração o custo de fabricação e a estruturação dos circuitos de proteção para preservação da segurança dos equipamentos que a compõem e de seus usuários. Podemos destacar o desenvolvimento de um recurso didático customizado e adequados às necessidades de ensino de automação industrial nos cursos de engenharia.

(ALI, 2017), desenvolveu uma técnica híbrida para testar IED's baseada na norma IEC 61850. Sendo desenvolvido um algoritmo no MATLAB para simulação de sinais de tensão e corrente, na qual esses sinais são convertidos no formato comtrade para serem injetados nos testes de IED's. Esses sinais são coletados em uma caixa de teste e são convertidos em sinais digitais através da norma IEC 61850 integrada no conjunto de teste, que são enviados ao IED no formato digital. Essa ferramenta pode ser utilizada em testes de IED's realizados em laboratórios.

(ENAYATI, et al., 2017), descreveram que um laboratório de proteção de sistemas elétricos de potência, além de oferecer um ambiente seguro e fácil para realização de testes em relés, permite ao aluno o aprimoramento sobre conhecimento de sistemas de proteção aliando a teoria com a prática. Pode-se evidenciar que esse laboratório pode ser inserido em testes de redes inteligentes.

Em (CHEN, et al., 2018), a plataforma virtual de simulação de equipamentos elétricos de subestação foi desenvolvida baseada na norma IEC 61850, com finalidade de avaliar o desempenho de interoperabilidade de uma subestação totalmente digital. O teste é dividido em três partes: a primeira consiste em uma plataforma virtual e de modelagem de subestação; a segunda parte consiste uma simulação de IED's em uma rede de comunicação e a interface homem-máquina fornecida pelos fabricantes; e a terceira parte consiste numa ferramenta de visualização de fluxo de dados enviados pelos IED's

conectados na rede. Com auxílio do Real Time Simulator simula-se uma subestação virtual, sinais analógicos e digitais para serem enviados aos IED's em teste. Os IED's, através das saídas digitais, enviam esses sinais ao RTDS para validar o teste. A plataforma pode ser inserida em laboratórios de empresas do setor elétrico para testes em IED's a fim de atender à norma IEC61850.

No estudo proposto por (JURISIC, et al., 2018), o teste dos relés numéricos é realizado simulando falhas no sistema elétrico, gerando valores de tensão, corrente, e com o auxílio de uma caixa de testes esses sinais são injetados nos IED's. Dependendo da configuração programada do relé, o instrumento de teste pode monitorar as saídas binárias ou os sinais de comunicação do objeto testado. Esta pesquisa trata de uma bancada de teste de laboratório para análise de tempo de reação de detecção de faltas de relés relacionados com a norma IEC61850 em diferentes topologias de subestação de energia elétrica.

Na pesquisa de (AWODELE, et al, 2019), uma bancada para testes em relés de proteção foi desenvolvida, tendo a norma IEC61850 como referência, na qual foi modelado um vão de transformador para testes em proteção de transformadores, sendo a sua utilização em laboratório de universidade, permitindo aos alunos o conhecimento de aplicação prática e estudos de sistemas de proteção.

Em (XIA, et al., 2020), um design de um sistema de teste automático de um dispositivo de proteção local foi proposto para atender a universalização dos testes em sistemas de proteção e controle. O sistema consiste em uma plataforma de teste, a fim de realizar testes malha fechada para vários dispositivos de proteção, ao mesmo tempo, de diferentes fabricantes. Nesta pesquisa foi abordado o automatismo de teste em dispositivo de proteção no local, ou seja, um conjunto de testes simultâneos em vários dispositivos de proteção, através de um design de software. É uma ferramenta que pode ser utilizada no teste de fábrica e teste de campo realizado em subestação de energia elétrica.

Já (CARLONE, et al., 2020), desenvolveram um laboratório portátil de proteção com a finalidade de ensinar conceitos práticos de proteção de sistemas elétricos a alunos de engenharia. O laboratório permite ao aluno parametrizar, enviar ajustes ao relé, realizar testes com auxílio de um simulador de falhas, para analisar os eventos e o comportamento do dispositivo de proteção nas falhas que foram simuladas no laboratório, contribuindo para formação profissional do discente.

Em (MORALES, et al., 2021), uma abordagem híbrida para ensino de

proteção de sistemas elétricos, destinados a estudantes de engenharia elétrica foi desenvolvida baseada em simulações computacionais de modelos matemáticos, nas quais modela-se um esquema de proteção e um sistema elétrico, bem como o teste a ser realizado nos dispositivos de proteção. A ferramenta proposta é destinada para aplicação ao ensino de engenharia, permitindo aos alunos configurar um sistema de potência com os dispositivos de proteção, para realização dos testes e analisar os resultados obtidos através das simulações.

A Tabela 1 exibe os principais temas que se identificam com o tema da pesquisa.

Tabela 1-Publicações correlatas ao tema da pesquisa.

	Pesquisas Analisadas	Diferença com o PowerTS
(ALMEIDA, et al, 2016)	Plataforma Didática Compatível com a norma IEC 61850.	O PowerTS não é compatível com a norma IEC-61850, o PowerTS simula sinais de equipamentos elétricos, a plataforma didática simula sinais de comunicação de dados.
(PANDINI et al., 2017)	Design of a Didatic Workbench of industrial Automation System for Enginnering Education.	O PowerTS não é compatível para automação industrial, o PowerTs simula sinais de equipamentos elétricos, a bancada didática simula sinais de sensores e atuadores.
(ALI, 2017)	Hybrid Technique for Testing IEC 61850Based IED's of Distance Protection.	O PowerTS não contempla testes em ambientes computacionais relacionados com a norma IEC61850.
(ENAYATI, et al., 2017)	Development of a Power System Protection Laboratory/Testbed at Clarkson University.	O PowerTS não é compatível para testes de protocolos de comunicações, a pesquisa analisada simula sinais de protocolos de comunicações, o PowerTs simula sinais de equipamentos elétricos.
(CHEN et al., 2018)	Virtual site acceptance test platform for IEC61850 based substation with mult-vendor bay solutions.	O PowerTS foi estruturado para simular sinais de equipamentos elétricos, a pesquisa analisada simula sinais de protocolo de comunicações.
(JURIÍĆ et al., 2018)	Laboratory Test Bed for Analyzing Fault-Detection Reaction Times of Protection Relays in Different Substation Topologies.	O trabalho desenvolvido, foi de uma bancada que simula equipamentos elétricos, sendo uma ferramenta de testes para IED's, em lógicas e funções de proteção.
(AWODELE, et al, 2019)	Design of AN IEC 61850 Based Substation Automation and Protection Panel.	O PowerTS simula não é compatível para testes de topologia de comunicações da norma IEC 61850, apenas simula sinais de equipamentos elétricos.
(XIA, et al., 2020)	Research on Automatic Test System of On-site Relay Protection Device.	O PowerTS foi estruturado para testar funções e lógicas de proteção, a pesquisa analisada é um software para teste da norma IEC 6850.
(CARLONE, et al., 2020)	Teaching Protective Relaying Using a Portable Relay Training Laboratory.	O PowerTS é uma ferramenta de teste que pode ser inserida em laboratórios de proteção e controle de universidade.
(MORALES, et al., 2021)	Undergraduate Teaching of Electric Network Protection Using Simulations and Lab Experiments.	A bancada simula sinais de equipamentos elétricos de potência, a pesquisa analisada simula modelos matematicos em ambientes computacionais.

Fonte: O autor, (2022).

Das pesquisas que compõem o portfólio bibliográfico não foram identificados trabalhos que contemplam, ao mesmo tempo, uma ferramenta que proporciona testar, comissionar, simular falhas ocorridas no sistema elétrico de potência, manutenção em proteção de sistemas elétricos, utilizá-la para capacitação de profissionais e a inserção no meio acadêmico.

Salienta-se que a análise destas pesquisas realizadas no Brasil e em outros países comprovou sua originalidade. De modo geral, observa-se que existem poucas publicações sobre o tema da pesquisa. Há de se ressaltar que estas publicações abordam estudos em testes em proteção de sistemas elétricos, simulações de proteção para analisar o desempenho da norma IEC61850, treinamentos de profissionais que atuam no setor elétrico e ferramentas computacionais voltadas para o meio acadêmico. Porém, estas bibliografias são de suma importância para o desenvolvimento do tema proposto, pois servem de referencial para o desenvolvimento da bancada proposta e os testes que serão realizados.

Dado a esse cenário, constatou-se a necessidade de se projetar e desenvolver uma bancada de testes para solucionar este problema, adequando as necessidades de equipes de manutenção de sistemas elétricos de potência. Na próxima seção será apresentada uma revisão dos pedidos de patentes de propriedade intelectual, pedidos no Brasil e internacionalmente.

2.1.2 Revisão de Patentes

Em (RIBEIRO, 2009), um equipamento e método para análise das condições de operação de linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica: foi desenvolvido com a finalidade de detectar distúrbios ocorridos no sistema elétrico, para estimar os parâmetros das componentes fundamentais harmônicas, interharmônicas, subharmônicas e transitórios, com objetivo de identificar as fontes geradoras desses evento. Essa invenção está associada à qualidade de energia, pois está dotada de um programa de computador para análise das condições de operação do sistema elétrico (transmissão e distribuição de energia elétrica), deixando lacunas em testes de proteção de sistemas elétricos.

De acordo com (ISHIDA, et al., 2013), o dispositivo de teste de relé digital consiste em uma ferramenta e método para realizar teste em relé digital. É um procedimento para verificar o hardware da proteção digital, ou seja, é uma ferramenta que testa todo o circuito analógico e a operacionalidade do relé, deixando lacuna em testes de ajustes, funções

e lógicas de relés digitais.

Em (KLIEN, et al., 2013), refere-se a um método e monitoramento de sistema de automação de subestações de energia elétrica. Esse sistema compreende monitorar as mensagens que IED's trocam através da rede de comunicação, as quais são avaliadas para detectar falhas em sistema de automação. Como desvantagem, podemos destacar que é uma ferramenta limitada à monitoração de sistemas de automação, deixando lacunas em testes, comissionamentos em IED's.

No estudo de (GUIMARÃES, et al., 2014), desenvolveram uma plataforma de testes de interoperabilidade e qualidade de energia, sendo um equipamento para testes em protocolo de comunicação. A ferramenta é composta por um computador interligado à infraestrutura de comunicação, para monitorar e realizar testes funcionais em equipamentos de qualidade de energia, deixando lacunas em testes em equipamentos de proteção e controle.

(DIAS, et al., 2015), desenvolveram um método para realizar religamento automático de linha de transmissão, identificando o instante da extinção do defeito e o bloqueio para faltas permanentes, esta ferramenta detecta a falta e verifica a sua natureza, reduzindo o tempo de abertura e fechamento do disjuntor. Nela também é realizada a comparação de tensão nos extremos da linha de transmissão para realizar o religamento automático. Esse método é destinado apenas a religamento de linha de transmissão, deixando lacunas em testes, simulação de falhas em sistemas de proteção e controle.

Em (FAIRCHILD, et al., 2017), foi desenvolvido um simulador de expedição dinâmica, sendo uma ferramenta destinada para treinamento de operadores, simulando transitórios ocorridos nos sistemas elétricos de potência. Podemos destacar as lacunas deixadas por essa invenção, visto ser uma ferramenta voltada para treinamento de operadores de sistemas elétricos de potência, não atendendo a testes, simulação de falhas em proteção e controle e treinamento de profissionais de proteção de sistemas elétricos.

(SIMÕES, 2017), propôs uma metodologia para parametrização, testar e implantar uma aplicação SCADA, destacando-se por seu baixo custo de implantação e o tempo reduzido para entrar em operação, através de controladores, o método obtém as informações necessárias para tomar as decisões em relação ao sistema elétrico. Outro ponto de destaque seria a grande variedade da sua aplicação, por exemplo: subestações, usinas de geração de energia elétrica e centro de operação de sistemas elétricos. Como desvantagem, pode-se destacar que é uma ferramenta limitada a gerenciamento de eventos, deixando

lacunas em proteção de sistemas elétricos.

Nestas invenções foram apresentadas as características de funcionamento, os métodos empregados no desenvolvimento das invenções e dispositivos físicos. De acordo com o que foi relatado, nenhuma das patentes apresentadas abordam de forma completa todos os aspectos de testes, manutenções em uma única solução.

2.2 CONCEITOS E DEFINIÇÕES DE PROTEÇÃO

O sistema elétrico de potência é uma das ferramentas para converter e transportar energia. O sistema de potência consiste em três divisões: geração, transmissão e distribuição. As linhas de transmissão consistem no elo de ligação entre a geração e o sistema de distribuição e interligando a outros sistemas de potência através de interconexões (STEVENSON, 1986).

No sistema elétrico de potência podem ocorrer falhas não previstas em seus componentes, resultando em interrupções de energia elétrica aos consumidores. Na grande maioria dos casos, o defeito mais comum é o curto-circuito, que provoca corrente elétrica de alta amplitude na região afetada, podendo causar danos irreparáveis nos circuitos e equipamentos (BERNARDES, 2018).

Os componentes elétricos de um sistema de potência devem ser protegidos contra os curtos-circuitos ou condições anormais de operação, geralmente provocadas pelos próprios curtos-circuitos, caso em que os transformadores de corrente e de potencial transformam em grandezas secundárias as correntes e tensões, enviando essas informações para o relé, que compara o valor medido com o ajustado. A operação do relé ocorrerá sempre que o valor medido exceder o valor ajustado, atuando sobre um disjuntor, para isolar a parte defeituosa do sistema (FREITAS, et al., 2015).

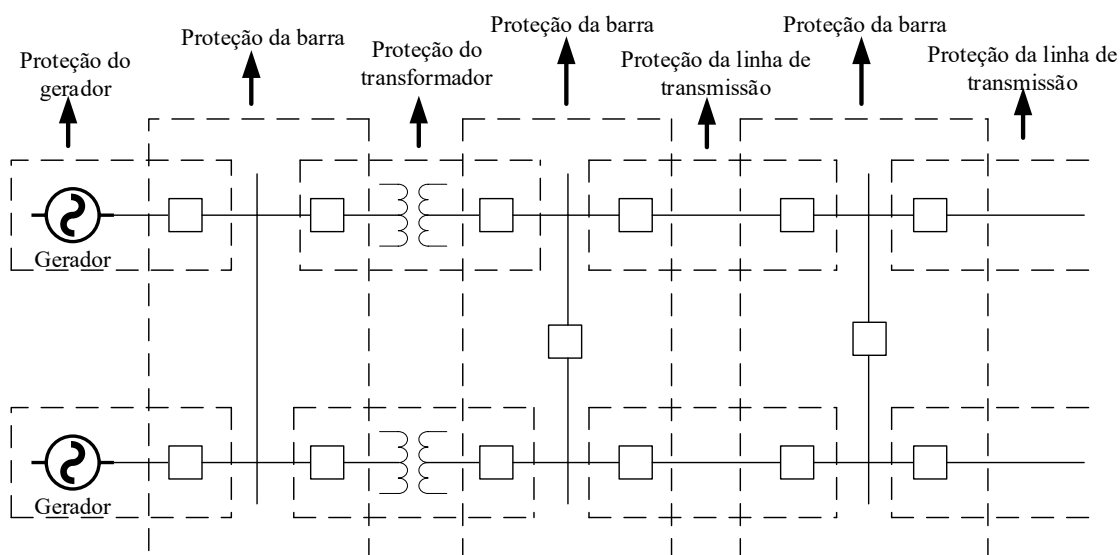
Os dispositivos de proteção são projetados e instalados para eliminarem falhas que ocorrem no sistema elétrico de potência, prover proteção pessoal e limitar danos aos equipamentos na ocorrência de falhas e condições anormais de funcionamento (IEEE, 2009). A função dos relés de proteção consiste em manter a estabilidade do sistema e continuidade dos serviços de eletricidade, atuando o mais rápido possível para eliminar o elemento faltoso com o tempo mínimo de operação, atuando de forma seletiva, garantindo que apenas a parte defeituosa seja isolada (MALIK, et al., 2011).

Os relés de proteção, principais equipamentos de proteção dos sistemas elétricos, são encarregados da retirada rápida do elemento (equipamento, barra ou seção de

linha) quando este está em curto-circuito ou operação anormal de funcionamento, impedindo que o problema se propague a outros elementos do sistema. Os relés devem informar a localização da falta com o objetivo da rápida manutenção ou reposição do elemento causador da falta e, portanto, o rápido religamento. É importante também que haja o registro de informações do relé, como grandezas analógicas e digitais, possibilitando a análise da falta e da atuação da proteção usada (COTOSCK, 2007).

A filosofia geral de um esquema de relés de proteção consiste em dividir o sistema em zonas de proteção de modo que uma proteção adequada seja assegurada, bem como a garantia de que apenas uma pequena parte do sistema seja desligada no caso de uma falta. Na Figura 1 podemos observar que as zonas de proteção se sobrepõem umas às outras de maneira a não existirem zonas desprotegidas (GIOVANINI, 2005).

Figura 1-Zonas de proteção.



Fonte: O autor ,(2022).

Todo o sistema de proteção bem projetado e eficiente deve atender aos critérios relacionados de acordo a Tabela 2 (DUARTE, 2018).

Tabela 2- Características funcionais dos relés de proteção.

Sensibilidade	Os sistemas de proteção devem ser sensíveis para detectar todas as falhas internas nos componentes.
Seletividade	Somente os componentes defeituosos devem ser isolados.
Velocidade	Os sistemas devem ser rápidos para minimizar os danos nos componentes.
Confiabilidade	Devem operar para todas as falhas internas e não operar para falhas externas.

Fonte: Adaptado de Duarte,(2018).

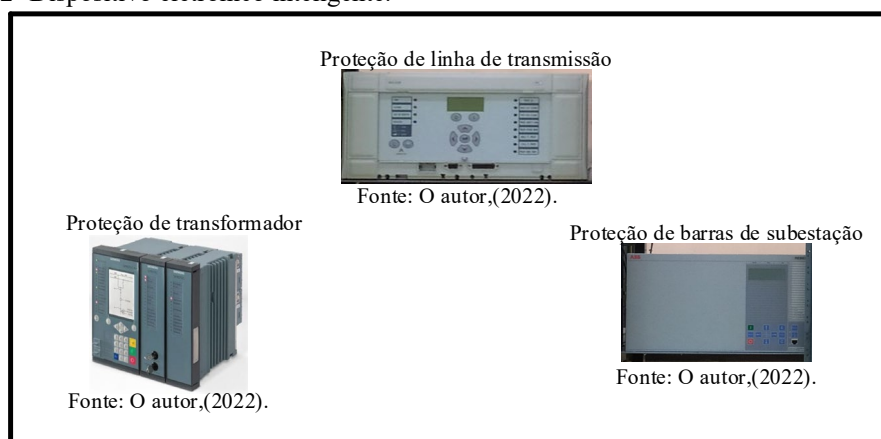
O sistema de proteção e controle de uma subestação é composto por *bays*.

Cada *bay* deverá possuir um dispositivo de proteção e um equipamento de disjunção, com a finalidade de protegê-lo contra faltas no sistema (SILVA, 2011).

A coordenação em um sistema de proteção pode ser realizada entre relés-relés, entre elos fusíveis, entre disjuntores, entre disjuntores e elos fusíveis, envolvendo religadores, entre religadores da subestação e seccionadores, entre religadores da subestação, seccionadores e elos fusíveis, entre outros (BERNARDES, 2018).

Os IEDS ilustrados na Figura 2 são equipamentos eletrônicos inteligentes utilizados para controlar, automatizar e monitorar as condições dos sistemas elétricos. Estes equipamentos permitem configurações lógicas e parametrização que direcionam a forma de atuar no sistema e possibilitam a inclusão de rede de comunicação para controle de dados, a fim de que todas as informações sejam enviadas e compartilhadas com outros equipamentos (SOUZA, 2015).

Figura 2- Dispositivo eletrônico inteligente.



Fonte: O autor,(2022).

Esquemas de proteção frequentemente envolvem o uso da lógica para determinar as condições sob as quais atuam os disjuntores (RUSH, 2011). Podemos exemplificar a lógica de fechamento sob falta, que permite o disparo no disjuntor da linha de transmissão quando na energização sob uma falha. Esta lógica é ativada na condição de linha morta, ou seja, por meio do estado aberto do disjuntor da linha de transmissão, ausência de tensão e corrente na linha (DUARTE, 2018).

Os esquemas de teleproteção, também conhecidos como esquemas de comparação de estados, são sistemas que, através de telecomunicações, conseguem melhorar a seletividade e o tempo de respostas dos esquemas de comunicação entre relés nos dois terminais da linha de transmissão. Seu princípio de funcionamento é baseado no uso de canais de comunicação, que permitem aos relés de proteção trocar informações lógicas entre os terminais de uma linha de transmissão (GUERRERO, 2011).

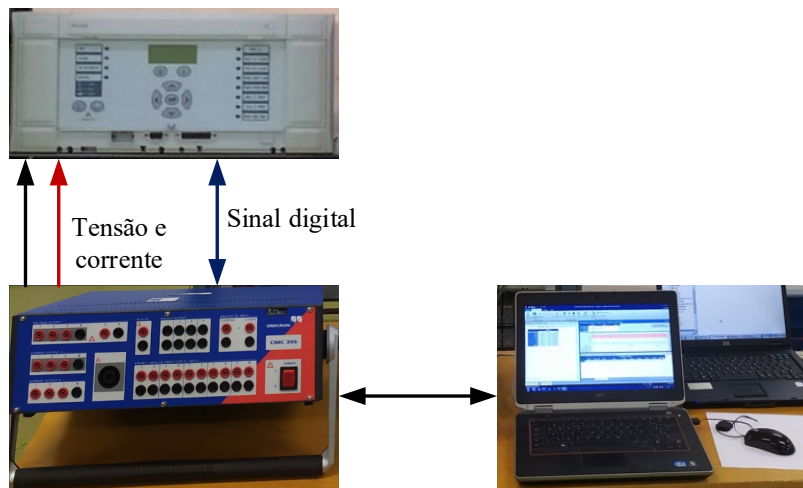
Na subseção subsequente são explicados conceitos básicos sobre testes em sistemas de proteção, que servirão de referência para os testes que foram realizados nos IED's objeto deste trabalho, com o objetivo de validar o estudo proposto por essa pesquisa de mestrado.

2.3 TESTES EM SISTEMAS DE PROTEÇÃO

A falha de um dispositivo de proteção pode impactar na confiabilidade do sistema elétrico, o que pode resultar em desligamentos acidentais, aumento de danos e diminuir a vida útil dos equipamentos, causando prejuízos financeiros às concessionárias de energia elétrica e aos consumidores (HILBER, et al., 2019).

Os testes de relés de proteção têm sofrido diversas alterações ao longo dos últimos anos, com a evolução dos relés eletromecânicos em relés digitais multifuncionais, aumentando a complexidade desses dispositivos. O teste do IED não se resume apenas na verificação de suas interfaces físicas como entradas analógicas e saídas digitais, por exemplo, mas também deve ser testada a unidade lógica com a parametrização de trabalho deste dispositivo. Esta parametrização é elaborada de acordo com os cálculos da proteção do sistema elétrico, seus parâmetros e condições específicas. A Figura 3 ilustra testes em relés numéricos (PAULINO, et al., 2013).

Figura 3-Testes em relés numéricos.



Fonte: O autor, (2022).

A manutenção em sistemas de proteção e controle é realizada por meio de testes nos dispositivos de proteção, com auxílio de uma caixa de teste para realizar injeção de sinais analógicos nos relés, teste funcional do painel de proteção e controle, simulando condições operacionais para verificar se as funções de controle e intertravamento estão funcionando corretamente (SEGUNDO, 2014).

A norma IEE/IECC37.233 aborda os procedimentos de testes para os componentes do sistema de proteção. A norma descreve os métodos, extensão e tipo de testes a serem realizados nos dispositivos de proteção. Nela os procedimentos se concentram separadamente em testes de: certificação, aplicação, comissionamento, manutenção e desempenho do sistema de proteção. A Tabela 3 apresenta os tipos de testes definidos pela norma IEE/IEC C37.233 (IEEE, 2009).

Tabela 3-Tipos de testes definido pela norma IEE C37.233.

Tipo de Teste	Objetivo	Aplicação do Teste
Certificação	Avaliar o desempenho do relé de acordo com o projeto ou sua aplicação. Nestes testes são avaliados software e hardware do sistema de proteção.	Feito por uma entidade de certificação, sendo utilizado registro de oscilografia ou uma modelagem matemática de acordo o estudo de curto-circuito, para aplicação no sistema de proteção.
Aplicação	Avaliar o desempenho do relé no sistema no qual será utilizado, para adequação dos ajustes e lógicas a serem inseridos no relé, de acordo com o projeto específico de um sistema de proteção.	Realizados em laboratórios ou pelo usuário, pode-se utilizar registros oscilográficos, sinais simulados em caixa de ensaio ou mesmo simuladores em tempo real.
Comissionamento	Verificar o sistema de proteção conforme o projeto e a instalação em campo, garantindo que toda a funcionalidade do sistema de proteção esteja de acordo com o projeto.	Feito no local da instalação.
Manutenção	Detectar possíveis falhas no sistema de proteção, verificar entradas e saída digitais dos relés numéricos e se estão funcionando corretamente.	Realizado no local da instalação, de acordo a periodicidade de manutenção.
Testes após uma falha ocorrida no sistema	Realizado após uma perturbação no sistema elétrico, para avaliar o desempenho da proteção durante uma falha no sistema.	Utilizar registros oscilográficos de perturbação para testar o sistema de proteção, simulando um sistema que pode ser uma linha de transmissão em operação, vão de transformador ou barra de subestação, de acordo a falha ocorrida.

Fonte: Guia IEEE, (2009).

A seguir serão detalhados 5 testes que foram definidos de acordo a norma IEE C37.233, para serem realizados nos dispositivos de proteção que são objeto de estudo deste trabalho. A finalidade destes testes é validar a pesquisa proposta, que é o projeto, montagem da bancada de reprodução de falhas em sistemas de proteção:

a) Teste de Religamento Automático.

O teste na lógica de religamento automático da linha de transmissão tem por objetivo verificar a atuação e o funcionamento correto desta lógica. O religamento automático é inicializado exclusivamente por atuação da proteção de distância. Para isso se faz necessário simular uma falha na linha de transmissão, a fim de que ocorrer a atuação da função de distância e iniciar o processo de religamento automático.

b) Teste de Lógicas de Teleproteção de Linhas de Transmissão.

Este teste tem por objetivo avaliar a lógica de monocanal, ou seja, quando ocorrer uma falha de um canal de teleproteção, verificar o envio de transferência direta de disparo para o terminal remoto. Esta lógica visa atender ao Submódulo 2.5 do Procedimento de rede do Operador Nacional de Sistemas Elétrico, que por sua vez visa a observar os requisitos mínimos dos sistemas de proteção, supervisão, controle e de telecomunicações, nos quais se deve prever meios de envio de transferência de disparo para abertura do disjuntor no terminal remoto, quando ocorrer uma falha em um dos canais de teleproteção.

c) Teste de Fechamento Sob Falta de uma Linha de Transmissão.

Este teste tem por objetivo testar a lógica de fechamento sob falta da linha de transmissão. Esta lógica permite o disparo do disjuntor por meio da função de sobrecorrente, ou seja, para uma falta ocorrida na linha de transmissão durante a energização. Simula-se para o relé a condição da linha desenergizada através de combinação do estado dos disjuntores abertos e as seccionadoras do vão e da linha de transmissão fechadas; também é simulado o comando de fechamento disjuntor para ativação desta lógica.

d) Teste em Proteção Diferencial de Barras de Subestação.

Seu objetivo é testar a proteção diferencial de barras REB 670 da ABB que protege a barra de 500kV da subestação de Furnas em Foz do Iguaçu. Para a realização deste teste foram montados na bancada dois vãos de barra de subestação, simulando os equipamentos elétricos que compõem esses vãos, como disjuntores e seccionadoras.

e) Teste em Proteção de transformadores.

Tem por objetivo monitorar as saídas binárias do relé, nas quais são simuladas faltas na condição da rede, utilizando-se a caixa de teste para a injeção de sinais analógicos de corrente e monitorados as saídas binárias do relé para a avaliação e validação do teste. É de suma importância a realização desses testes para detectar possíveis falhas potenciais não detectadas pelos autotestes do IED, nos quais são monitoradas as entradas e saídas digitais e as entradas analógicas.

No próximo capítulo serão detalhados os estudos de curtos-circuitos, que foram definidos para a parametrização dos relés. Esse memorial de curto-circuito também serviu de referência para a aplicação dos sinais analógicos que foram simulados na caixa de ensaios, para a reprodução de falha nos dispositivos de proteção.

3 MEMORIAL DE AJUSTE

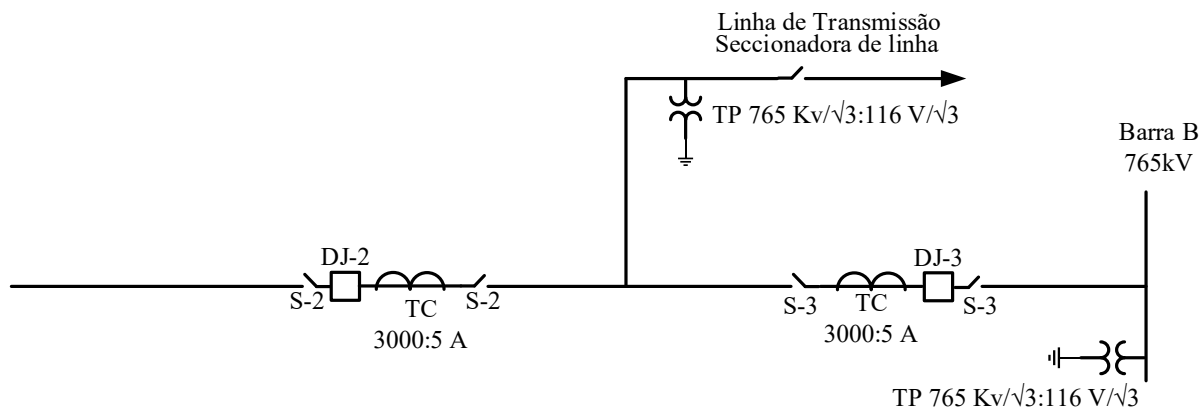
Neste capítulo apresentaremos o memorial de ajuste que foi definido para a parametrização dos dispositivos de proteção. Como os relés de proteção apresentam uma gama de funcionalidades, serão detalhados somente os estudos que foram objeto desta pesquisa.

3.1 PROTEÇÃO DE LINHA DE TRANSMISSÃO FUNÇÃO (21)

Os sinais de tensão, corrente, que foram injetados no relé pela caixa de teste, foram baseados no estudo de curto-circuito das linhas de transmissão de 765 kV entre Foz do Iguaçu-Ivaiporã, onde o lado de Ivaiporã é o terminal líder e o lado de Foz do Iguaçu o terminal seguidor. Os cálculos de curto-circuito trifásico e fase terra foram elaborados através do programa de curto-circuito da ASPEN e o ano-base utilizado como referência foi 2006. O comprimento da linha é de 322 km e o valor de impedância esta em por cento de 100 MVA.

A Figura 4 ilustra o diagrama unifilar do vão da linha de transmissão que serviu de referência para os cálculos de curto-circuito.

Figura 4-Diagrama unifilar.



Fonte: O autor, (2022).

Esse estudo de curto-circuito serviu de referência para os testes nas lógicas de religamento automático da linha de transmissão, lógicas de teleproteção e fechamento sob-falta de uma linha de transmissão.

A relação de transformação de corrente (RTC) é dada pela Equação 1.

$$RTC = \frac{N_p}{N_s} = \frac{I_p}{I_s} = \frac{3000}{5} = 600 \quad (1)$$

Onde:

N_p	Número de espira do primário.
N_s	Número de espira do secundário.
$I_{\text{primário}}$	Corrente que passa pelo enrolamento primário do TC.
$I_{\text{secundário}}$	Corrente que passa pelo enrolamento secundário do TC.

A relação de transformação de potencial é dada pela Equação 2.

$$RTP = \frac{N_p}{N_s} = \frac{V_p}{V_s} = \frac{759000/\sqrt{3}}{115/\sqrt{3}} = 6600 \quad (2)$$

Onde:

N_p	Número de espira do primário.
N_s	Número de espira do secundário.
$V_{\text{primário}}$	Tensão no enrolamento primário do TP.
$V_{\text{secundário}}$	Tensão no enrolamento secundário do TP.

Relação de transformação de impedância é dada pela Equação 3.

$$Rel = \frac{RTP}{RTC} = 11 \quad (3)$$

Cálculo da corrente base e impedância base é dado pelas Equações 4 e 5, nas quais foi considerado que a V_{base} é 765 kV, $V_{\text{nom}} = V_{\text{base}}$ e S_{base} é 100 MVA.

$$I_{\text{base}} = \frac{S_{\text{base}}}{\sqrt{3} \times V_{\text{base}}} = 75,47(A) \quad (4)$$

$$Z_{\text{base}} = \frac{(V_{\text{base}})^2}{S_{\text{base}}} = 5,85 \times 10^3(\Omega) \quad (5)$$

Na Tabela 4 são ilustradas as impedâncias de sequência zero (Z_0), sequência positiva(Z_1) e impedância mútua (Z_M), servindo de referência para os cálculos de transformação em impedância de valores primários para secundários.

Tabela 4-Parâmetros de impedâncias.

Parâmetro	Ajuste
Impedância Sequencia Positiva (Z_1)	0,076+1,85i (Ω)
Impedância Sequencia Zero (Z_0)	0,87+7,38i (Ω)
Impedância Mútua	0,80+4,2 i (Ω)

Fonte: O autor, (2022).

A transformação de impedâncias em valores primário para valores secundário são definidas pelas equações abaixo.

$$Z_{\text{prim}} = \left(\frac{Z}{100}\right) \times Z_{\text{base}} \quad (6)$$

$$Z_{\text{sec}} = \frac{Z_{\text{prim}}}{\text{Rel}} \quad (7)$$

Na Tabela 5 são ilustrados os valores de impedâncias em valores primários e secundários, que foram calculados pelas equações 6 e 7.

Tabela 5-Parâmetros de impedâncias.

Parâmetros	Ajustes
Impedância Sequencia Positiva (Z_1) primário	4,45+108,27i (Ω)
Impedância Sequencia Positiva (Z_1) secundário	0,4+9,84i (Ω)
Impedância Sequencia Zero (Z_0) primário	50,91+431,9i (Ω)
Impedância Sequencia Zero secundário	4,63+39,26i (Ω)
Impedância Mútua primário	46,82+246,38i (Ω)
Impedância Mútua secundário	4,26+22,4i (Ω)
Módulo e Ângulo de Z_1	9,85 \angle 87,65° (Ω)
Módulo e Ângulo de Z_0	39,4 \angle 83,28° (Ω)
Módulo e Ângulo de Z_m	22,8 \angle 79,24 (Ω)

Fonte: O autor, (2022).

Cálculo da impedância para carga máxima pelas equações abaixo: levou-se em consideração o limite do cabo e uma condição de subtensão de 0,90VN e uma corrente de carga máxima de 2780 A e Xcap do banco de capacitor é -43,81i.

$$X_{\text{capsec}} = \frac{X_{\text{cap}}}{\text{Rel}} = 3,98i \quad (8)$$

$$\text{Carga}_{\text{max}} = \sqrt{3} \times V_{\text{nom}} \times I_{\text{max}} = 3,68 \times 10^9 (\text{VA}) \quad (9)$$

$$Z_{\text{cargasec}} = \frac{(V_{\text{nom}})^2}{(\text{Carga}_{\text{max}} \times \text{Rel})} = 14,44 (\Omega) \quad (10)$$

$$Z_{\text{cargamaxsec1}} = \frac{(0,9 \times V_{\text{nom}})^2}{(\text{Carga}_{\text{max}} \times \text{Rel})} = 11,7 (\Omega) \quad (11)$$

Corrente de carga máxima em emergência de 3150 A por 4 horas.

$$\text{Carga}_{\text{max}} = \sqrt{3} \times V_{\text{nom}} \times I_{\text{max}} = 4,17 \times 10^9 (\text{VA}) \quad (12)$$

$$Z_{\text{cargasec}} = \frac{(V_{\text{nom}})^2}{(\text{Carga}_{\text{max}} \times \text{Rel})} = 12,75 (\Omega) \quad (13)$$

$$Z_{\text{cargamaxsec2}} = \frac{(0,9 \times V_{\text{nom}})^2}{(\text{Carga}_{\text{max}} \times \text{Rel})} = 10,32 (\Omega) \quad (14)$$

Cálculo da compensação de sequência zero.

$$KGLKG_{\text{ang}} = \frac{Z0_{\text{mag}} \angle Z0_{\text{ang}} - Z1_{\text{mag}} \angle Z1_{\text{ang}}}{(3 \times (Z1_{\text{mag}} \angle Z1_{\text{ang}}))} \quad (15)$$

Onde:

KG	Módulo do fator de compensação de sequência zero.
KG _{ang}	Ângulo do fator de compensação de sequência zero.
Z0 _{mag}	Módulo da impedância de sequência zero da LT.
Z0 _{ang}	Ângulo da impedância de sequência zero da LT.
Z1 _{mag}	Módulo da impedância de sequência positiva da LT.
Z1 _{ang}	Ângulo da impedância de sequência positiva da LT.

Os parâmetros da linha de transmissão considerados nos cálculos são descritos nas equações abaixo.

$$K_{01} = \frac{I_m(Z_{011} - Z_{111})}{3 \times I_m(Z_{111})} = 0,996 \quad (16)$$

$$K_g = a_{\tan} \left(\frac{I_m(Z_{011} - Z_{111})}{R_e(Z_{011} - Z_{111})} \right) - a_{\tan} \left(\frac{I_m(Z_{111})}{R_e(Z_{111})} \right) \quad (17)$$

$$= -5,818^\circ$$

$$K_{01A} = \frac{(Z_{011} - Z_{111})}{3 \times Z_{111}} = 1 - 0.1i \quad (18)$$

$$AK_{01A} = \text{arq}(K_{1A}) = -5,82^\circ \quad (19)$$

Cálculo da compensação de sequência zero mútua.

$$KM_{11} = \frac{(Z_{011} - Z_{111})}{3 \times Z_{111}} = 1 - 0.1i \quad (20)$$

$$KM_{11A} = \frac{I_m(ZM_{11})}{3I_m(Z_{111})} = 0,76 \quad (21)$$

$$AKM_{11A} = \text{arq}(KM_{11}) = -8,41^\circ \quad (22)$$

Definições de ajustes das unidades de alcance de distância.

- Zona 1: o critério de ajuste para zona 1 é equivalente a 80% da impedância da linha compensada.

$$X_{1\text{sec}1} = 0,8I_m(Z_{1\text{lsec}} + X_{\text{cap}_{\text{sec}}}) = 4,69 \quad (23)$$

$$X_{1\text{sec}} = \frac{X_{1\text{sec}} \times 100}{I_m(Z_{1\text{lsec}})} = 3,79 \quad (24)$$

Onde, $Z_{21_lreal} = X_{1\text{sec}2}$

$$\text{Alcance} = \frac{X_{1\text{sec}2} \times 100}{I_m(Z_{1\text{lsec}})} = 38,256\% \quad (25)$$

- Zona 2: a unidade de zona 2 protege toda a extensão da linha de transmissão, ou seja, ela tem um alcance de 150% da impedância da linha de transmissão.

$$X2_{\text{sec}} = 1,5I_m(Z1_{\text{sec}}) = 14,76(\Omega) \quad (26)$$

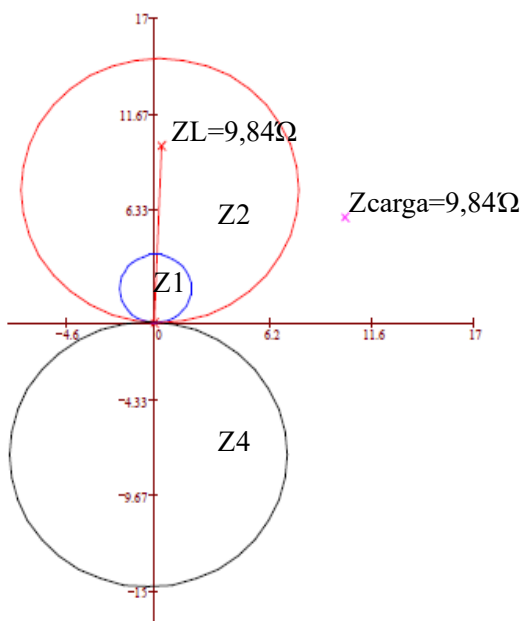
$$\text{Alcance} = \frac{X_{2\text{sec}} \times 100}{I_m(Z_{1\text{lsec}})} = 150\% \quad (27)$$

A equação 38 define os valores de corrente que foram ajustados no relé e que serviram de referência para realização do teste de fechamento sob falta da linha de transmissão, em que se levou em consideração uma corrente de curto-circuito mínimo de 9000 A. e a relação de transformação 600:1 A.

$$I_{\text{pick-up}} = \frac{I_{\text{ccmin}}}{\text{RTC}} = \frac{9000}{600} = 15\text{A} \quad (28)$$

O esquema de teleproteção definido na proteção de linha de transmissão é o esquema permissivo de transferência de disparo em sobrealcançe (POR ou POTT) e desbloqueio por perda de canal. A Figura 5 ilustra o diagrama de impedância que foi definido para a proteção de distância com as zonas de alcance e impedâncias de carga e da linha. A característica escolhida foi do tipo MHO.

Figura 5-Diagrama de impedância MHO.



Fonte: Manual Técnico de Furnas, (2022).

3.2 PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE SUBESTAÇÃO (87)

A seguir será apresentado o memorial de cálculo de ajuste da proteção de barra de 500kV da subestação de Furnas em Foz do Iguaçu. Para entendimento, na barra chegam 4 linhas de Itaipu na tensão de 500kV e são conectados na barra 5 autotransformadores.

O estudo de curto-circuito forneceu subsídios para o ajuste na proteção e os testes que foram realizados na proteção diferencial de barra, com a bancada simulando os sinais necessários para o levantamento da curva da função diferencial.

A máxima corrente de curto-circuito é de $40094,1\angle -87.6^\circ$ A, que ocorre para um curto-circuito fase terra na barra de 500kV da subestação de Foz do Iguaçu. A especificação do TC é 10B800, classe de exatidão de 10%, tensão secundária de 800V e impedância de carga de $8(\Omega)$.

Para o cálculo de ajuste da função diferencial considerou-se um carregamento das linhas que interligam a usina de Itaipu com a subestação de Furnas de 1650MVA. O critério de ajuste foi de 110% da corrente de carga das linhas, correspondente a aproximadamente 90% da menor contribuição para um curto-circuito na barra, que são as correntes dos autotransformadores no valor de 2450 A.

O ajuste de pick-up, levando-se em consideração o TC aberto, ficou em 20% da corrente nominal primária do TC. O nível de ajuste da corrente diferencial, a partir da qual o algoritmo do relé irá permitir novamente a operação da proteção diferencial, foi definido em 130% da corrente nominal primária do TC.

A relação de TC escolhida foi de 4000-5 A para minimizar os efeitos de saturação de corrente em função do elevado nível de curto-circuito e a elevada relação X/R responsável pela componente DC. A Tabela 6 ilustra os ajustes que foram parametrizados no relé e que serviram de referência para o teste na proteção diferencial.

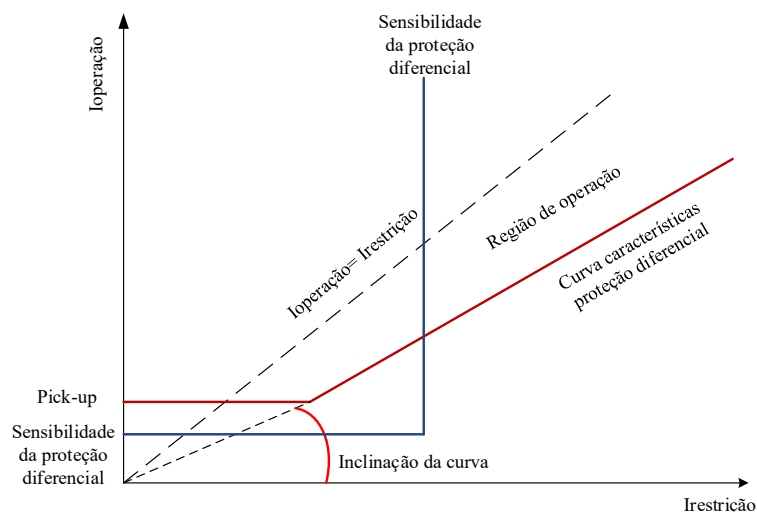
Tabela 6-Ajuste da proteção diferencial de barras.

Idiff pick-up	Idiff=1,10 x 2000=2200 A	(29)
Pick-up TC aberto	TC=4000 x 20%=800 A	(30)
Idiff	Idiff=1,3 x 4000=5200 A	(31)

Fonte: Manual Técnico ABB REB 670, (2022).

A Figura 6 ilustra curva característica da função diferencial.

Figura 6-Curva Características da proteção diferencial.



Fonte: Adaptado Manual Técnico ABB REB 670, (2022).

3.3 PROTEÇÃO DE TRANSFORMADOR (87/50/51)

Os sinais analógicos de corrente injetados no relé foram definidos de acordo com o estudo de ajuste da proteção dos autotransformadores. Esse estudo serviu de referência para a realização dos testes de levantamento da curva característica das funções de sobrecorrente 51 e diferencial 87, e nesses testes foram monitoradas as saídas binárias referentes às respectivas funções da proteção 7UT87. A Tabela 7 ilustra os dados gerais do transformador que serviram de referência para o estudo de ajustes e testes realizados.

Tabela 7-Dados do transformador de potência.

Dados do Transformador de Potência		
Potência	1650MVA (Primário e Secundário) 15 MVA Terciário	
Tensão (Fase-Fase)	765 kV/525 kV/69 kV	
Corrente	1245 A/ 1815 A/72,5 A	
Relação do TC-765kV	3000-5 A	
Relação do TC-500kV	4000-5 A	
Relação do TC-69kV	1500-5 A	
Impedância	AT	10,23% base (1650 MVA – 765 kV/525 kV)
		70,29% base (1650MVA – 765 kV/69 kV)
		56,10% base (1650 MVA – 525 kV/69 kV)

Fonte: O autor ,(2022).

A Tabela 8 ilustra os ajustes da função diferencial 87, a qual serviu de referência para o teste de levantamento da curva característica.

Tabela 8-Ajustes da função diferencial.

Threshold (Pick-up)	0,2 In
Slope 1	0,3
Intersection 1	0,67In
Slope 2	70%
Intersection 2	2,5 In
Threshold add-on stabiliz	2,0In
Threshold (Sem restrição)	11In

Fonte: O autor, (2022).

Os testes na função de sobrecorrente residual 51HR, que protege o lado do enrolamento de 765kV, foram realizados de acordo com o estudo de ajustes implementados no relé. A corrente de pick-up foi calculada em 20% da corrente nominal do transformador, ilustrada na tabela 9.

Tabela 9-Função 51 lado 765kV.

Potência do transformador	1650 MVA
Tensão	765 kV
Corrente	1245 A
RTC	3000:5 A
I pick-up	0,42 A
Tipo da curva característica	Muito inversa
Dial de tempo	1,13

Fonte: O autor, (2022).

Os testes da função de sobrecorrente residual 51MR, que protege o lado de 500kV, foram realizados de acordo com o estudo de ajustes implementados no relé, a corrente de pick-up foi calculada em 20% da corrente nominal do transformador, ilustrada na Tabela 10.

Tabela 10-Função 51 lado 500kV.

Potência do transformador	1650 MVA
Tensão	500 kV
Corrente	1815 A
RTC	4000:5 A
I pick-up	0,45 A
Tipo da curva característica	Muito inversa
Dial de tempo	1,04

Fonte: O autor, (2022).

Os testes da função de sobrecorrente residual 51T, que protege o lado de 69kV, foram realizados de acordo com o estudo de ajustes implementados no relé ilustrado na Tabela 11.

Tabela 11-Função 51 lado 69kV.

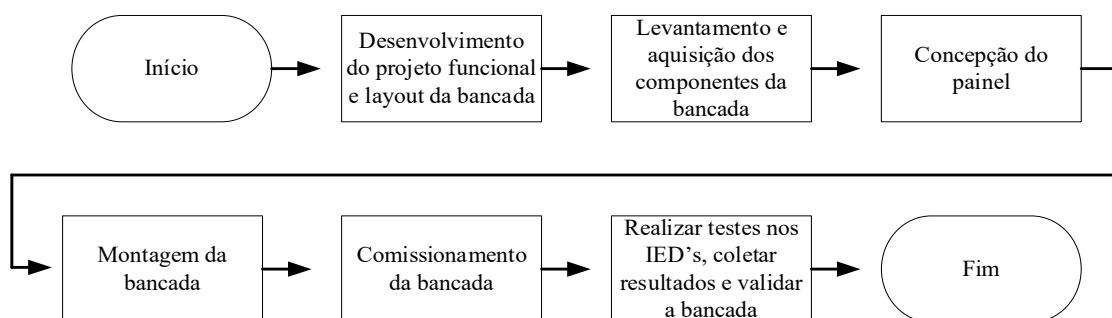
Potência do transformador	15 MVA
Tensão	69 kV
Corrente	126 A
RTC	1500:5 A
I pick-up	1,26 A
Tipo da curva característica	Muito inversa
Dial de tempo	1,13

Fonte: O autor, (2022).

4 DESENVOLVIMENTO DA BANCADA PROPOSTA

Neste capítulo são descritos os principais passos para o desenvolvimento do projeto e montagem da bancada, na qual serão executados testes, comissionamento e simulação de falhas ocorridas no sistema elétrico, nos dispositivos digitais de proteção e controle. A Figura 7 ilustra um fluxograma para o desenvolvimento e concepção da bancada de teste.

Figura 7-Fluxograma para o desenvolvimento e concepção da bancada de teste.



Fonte: O autor, (2022).

4.1 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO FUNCIONAL E LAYOUT DA BANCADA

O desenvolvimento do projeto da bancada foi elaborado em um painel de proteção que atendeu a todos os requisitos para realizar a montagem dos componentes que compõem a bancada, sendo uma ferramenta para realizar testes em relés digitais, com custo acessível e de fácil utilização. Esse projeto foi desenvolvido no laboratório de manutenção de proteção de sistemas elétricos de potência, localizado na subestação de Furnas Centrais Elétricas, na cidade de Foz do Iguaçu - PR.

Desenvolveu-se uma infraestrutura na bancada, na qual possam ser monitorados as entradas e saídas de relés digitais, quando na necessidade de testar, comissionar, reproduzir falhas em funções, lógicas de sistemas de proteção e controle regidas pela norma IEEE/ IEC37.233, que aborda procedimentos de testes em sistemas de proteção.

Foram montados na bancada relés estáticos que simulam sinais de equipamentos elétricos (disjuntores, seccionadora e sinais de teleproteção), com o auxílio de uma caixa de teste de proteção para gerar sinais analógicos (corrente e tensão) configuráveis em amplitude, frequência e defasamento angular para a consolidação dos conceitos básicos de testes em relés de proteção, conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8- Bancada de teste.

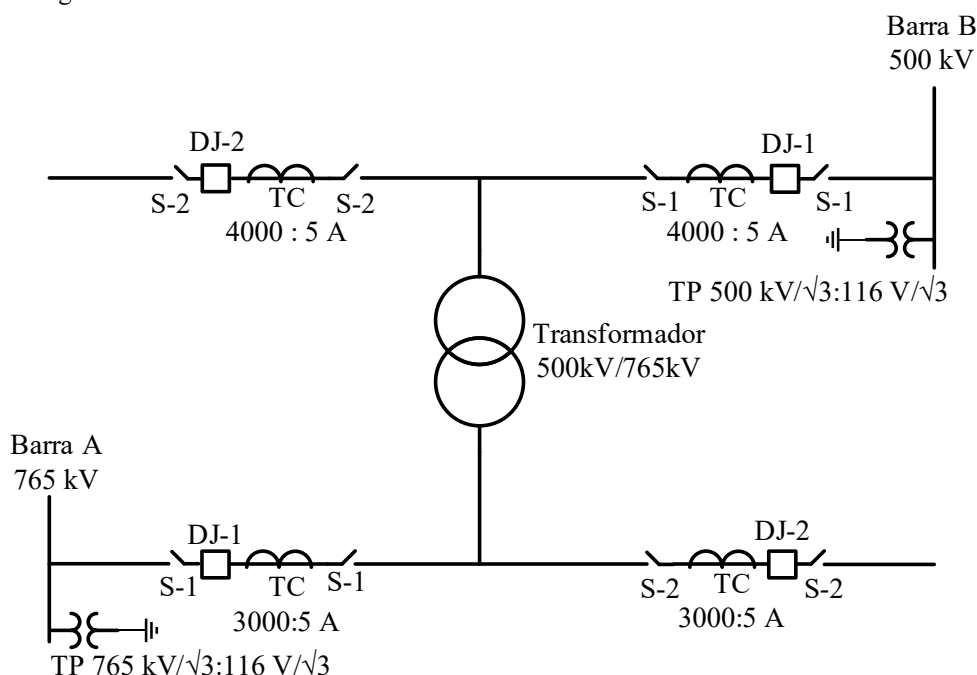


Fonte: O autor, (2022).

A Figura 9 ilustra um diagrama funcional de teste de proteção de transformador, na qual a bancada simula um bay de transformador, ou seja, a fonte de alimentação alimenta todos os circuitos de comando da bancada em 125Vcc, onde são realizadas manobras nos relés estáticos que simulam os sinais dos equipamentos elétricos como disjuntores e seccionadoras, os contatos auxiliares dos relés estáticos enviam esses sinais em 125Vcc para as entradas digitais do IED, informando que os disjuntores e seccionadoras que compõem o vão do transformador estão fechados, simulando o vão em operação.

Com essas informações a lógica inserida no relé processa todas essas informações do vão em operação e com o auxílio de uma caixa de teste simulando os sinais de correntes, são realizados os testes na função de proteção e no hardware do IED através das entradas e saídas digitais e dos canais analógicos de corrente.

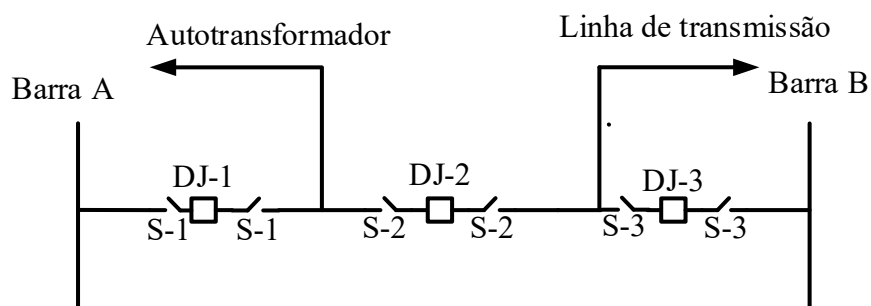
Figura 9-Diagrama funcional de teste.



Fonte: O autor ,(2022).

O projeto do *layout* da bancada tem como referência a subestação de Furnas localizada em Foz do Iguaçu - PR, tendo em vista a necessidade de realizar testes em proteção de transformador, proteção de barra e proteção de linha de transmissão de acordo como descrito no capítulo 2, subseção 2.3. A configuração do projeto para a concepção da bancada foi de barramento de disjuntor e meio como ilustrado na Figura 10 , mas o arranjo da subestação pode ser alterado conforme a necessidade de teste e configuração da subestação, pois o projeto da bancada foi desenvolvido em um painel modular, permitindo essa flexibilização de alteração do tipo de arranjo de subestação.

Figura 10-Diagrama unifilar da bancada.



Fonte: O autor, (2022).

Nas subseções 4.11 a 4.1.4 discute-se sobre a aplicação da bancada de testes de acordo a norma IEEE/IECC37.233, que trata de metodologia de teste em sistema de proteção e controle, a qual serviu de referência para o desenvolvimento do projeto,

concepção e montagem da bancada de teste.

4.1.1 Teste de Comissionamento Fábrica

Os testes de comissionamento de fábrica são realizados por fabricantes de relés ou por empresas do setor elétrico quando na modernização e entrada de novo projeto de um sistema de proteção. Nesta etapa, o objetivo é testar as funcionalidades do relé (ajustes, lógicas) com intuito de verificar se todo o esquema de proteção e características do dispositivo atendem às especificações do sistema e do projeto desenvolvido.

A norma IEEE/IEC 60255-121 especifica os requisitos para a avaliação funcional e avaliação de desempenho da função de distância de linha de transmissão. Esses testes são realizados para certificar que o esquema de proteção desenvolvido foi projetado e instalado corretamente antes de entrar em operação. Todos os aspectos do esquema de proteção são cuidadosamente verificados desde a instalação do relé, circuito de fiação de controle e a verificação de operação dos ajustes da proteção, terminando com o teste completo do esquema de proteção de distância.

A norma IEEE/IEC37.234-, que trata de aplicações de relé de proteção de barramento, descreve sobre a disponibilidade e a localização de disjuntores, TC's e chaves seccionadoras, bem como o tipo de barramento, aplicação da proteção de barras e as características de um sistema de proteção:

- ✓ Rapidez para extinguir a falta.
- ✓ Seletividade para desligar o menor número de elementos conectados nos barramentos.
- ✓ Segurança para não operar diante de faltas fora da zona de operação da proteção do barramento.

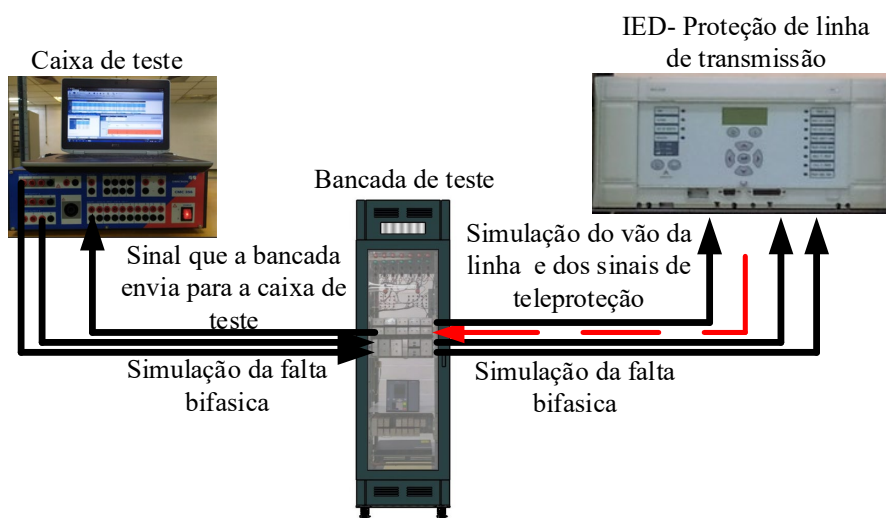
A norma IEEE /IEC37.91-2008 descreve sobre a filosofia de proteção e aplicações práticas de proteção de transformadores de potência, afirmando que a proteção diferencial é a proteção mais adequada para transformadores de potência pela rapidez na detecção de falhas internas e a sua isolação.

Já a norma IEEE/IEC37.103-2015 descreve uma metodologia para estabelecer uma sistemática de testes, a fim de verificar a integridade e as conexões do sistema de proteção diferencial de transformadores.

Com a evolução das tecnologias aplicadas aos relés, as normas também evoluíram para atender as exigências das tecnologias embarcadas nos relés, em que os testes

de comissionamentos em fábrica exigem uma abordagem real à operação do sistema elétrico. Com a inserção da bancada de teste é possível atender as normas citadas acima, pois ela simula sinais de equipamentos elétricos de potência (disjuntores, seccionadoras e sinais de teleproteção). Para enviar essas informações às entradas digitais dos IED's, e com o auxílio de uma mala de teste simulando os sinais analógicos, é possível testar as funções de proteção e todo os circuitos que compõem o esquema de proteção, conforme ilustrado na Figura 11.

Figura 11- Testes em sistemas de proteção.



Fonte: O autor, (2022).

No teste de comissionamento da bancada foram verificados todos os requisitos de segurança, adequação dos componentes de acordo com os diagramas funcionais, verificando-se os intertravamentos elétricos dos circuitos da bancada e garantindo que a bancada simulará condições reais de campo para testes em dispositivos de proteção de acordo a norma IEEE/IEC37.233.

4.1.2 Funções de Proteção

O teste tem como objetivo verificar o ajuste, características e tempo de operação dos relés, ou seja, verificar os ajustes que foram implementados nos relés através dos estudos de curto-circuito, com a tecnologia embarcadas nos IED's. Esses testes exigem uma condição real do sistema, como as informações de equipamentos elétricos (disjuntores e seccionadoras).

Os relés de proteção são classificados quanto à função e segundo a numeração que a norma IEEE/IEC37.2 normatizou para simbolizar as funções dos relés. As funções que serão objetos de testes desta pesquisa são: a função 21, proteção de distância de linha de transmissão, e função 87, proteções diferenciais de barra de subestação e proteção

diferencial de transformador.

4.1.3 Lógicas de Proteção

Tem como objetivo verificar o correto funcionamento do relé após ter sido programado com sua lógica, como visto no capítulo 2 na subseção 2.2 que trata da lógica de SOTF (Fechamento Sob Falta). Esta lógica, de forma resumida, permite o disparo no disjuntor da linha de transmissão quando na energização da linha de transmissão sob uma falha. Esta lógica é ativada por meio do estado do disjuntor aberto da linha de transmissão, ausência de tensão e corrente na linha de transmissão.

Com a tecnologia embarcada nos IED's os testes realizados necessitam das informações reais dos equipamentos elétricos. Para o teste de fechamento sob falta é necessário enviar para as entradas digitais do IED os sinais das seccionadoras do vão da linha de transmissão, seus respectivos disjuntores e da seccionadora de linha de transmissão. Com a caixa de teste é simulado um curto-circuito; esse sinal é enviado para a entrada analógica do relé; com esses sinais enviados para o relé, ele processa todas as informações através da lógica que foi montada no IED e ativa uma saída binária, enviando um sinal de disparo para os disjuntores, eliminando a falta. A bancada de teste simula todo o cenário do vão da linha de transmissão com todos os equipamentos elétricos.

4.1.4 Reprodução de Falha no Sistema

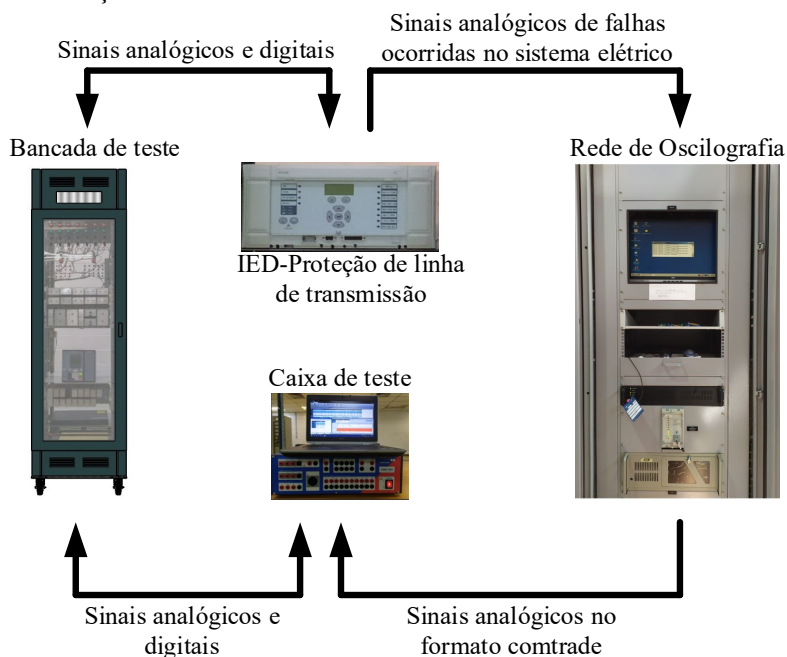
Este teste consiste em simular uma falha ocorrida no sistema para verificar se a função de proteção, a lógica que foi programada no relé, atuou corretamente, de acordo com o estudo de curto-circuito. Para a execução deste teste é necessário simular a operação do sistema durante a ocorrência da falha.

Para simular os sinais analógicos de falha, é necessário exportar os sinais da rede de oscilografia dos supervisórios de proteção, nos quais se concentram os distúrbios ocorridos no sistema elétrico. Com esses sinais e a simulação de uma linha de transmissão em operação é possível simular a ocorrência de falha no sistema ou teste em malha aberta.

A próxima etapa é a simulação dos defeitos, em que o equipamento de teste gera os sinais de falta para o relé e são avaliadas as respostas do dispositivo, comparando-as com valores que foram ajustados e implementados nos relés. A partir dessas informações são produzidos relatórios de testes, para analisar o desempenho do sistema de proteção em relação ao distúrbio ocorrido no sistema. A Figura 12 ilustra o teste de

simulação de falha.

Figura 12- Teste de simulação de falha no sistema.



Fonte: O autor ,(2022).

4.2 LEVANTAMENTO E AQUISIÇÃO DOS COMPONENTES DA BANCADA

Nesta seção serão descritos os principais passos realizados para o levantamento e aquisição dos componentes da bancada. O levantamento realizado, acrescido da característica da bancada que é atender todas as suas funcionalidades apontou as seguintes necessidades:

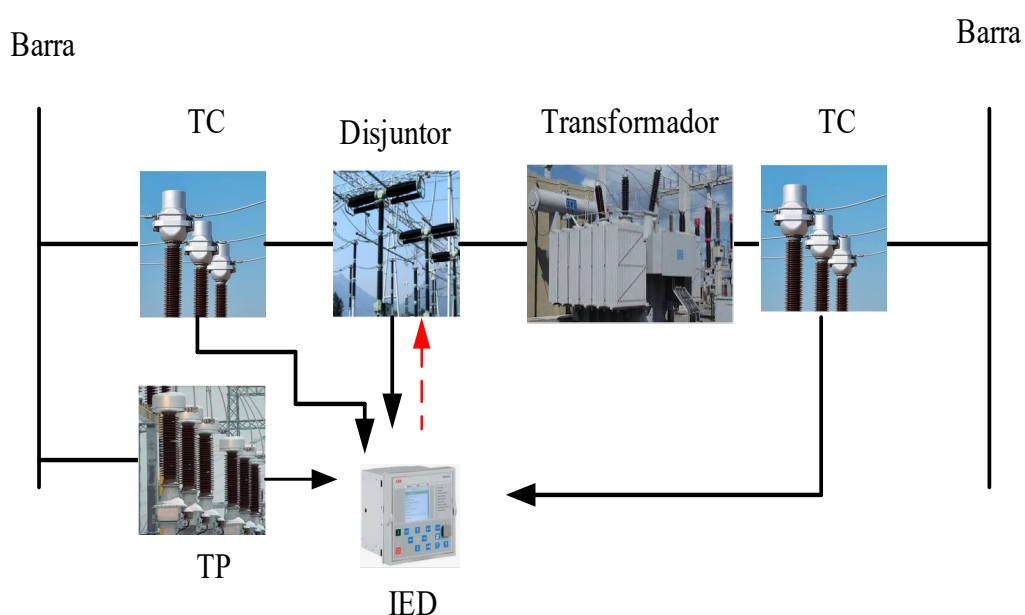
- Atender a todos os requisitos necessários da NR-10 para garantir a segurança de seus usuários.
- Dispor de disjuntor de alimentação para proteção contra uma falha interna na bancada.
- Possuir um bloco que injeta sinais analógicos, tais como corrente e tensão para entrada analógica do relé digital.
- Disponibilizar relés auxiliares que simulam equipamentos elétricos (disjuntores e seccionadoras), sinais de teleproteção, para enviar esses sinais para as entradas digitais dos IED's e relés que efetuarão disparos nos disjuntores.
- Disponibilizar sinalização dos equipamentos elétricos (disjuntores e seccionadoras) na interface da bancada, através de lâmpadas de sinalização, em que as cores vermelhas sinalizam esses equipamentos fechados, ou seja, em operação, e

as cores verdes sinalizam esses equipamentos abertos, ou seja, fora de operação.

f) Possuir relé digital que será testado, switch de comunicação para realizar a comunicação dos IED's com um sistema supervisorio de alarmes e a fonte de alimentação para alimentar todos os circuitos de comandos, relé digital e funcionalidade da bancada.

Os componentes da bancada têm a responsabilidade para simulação real de campo. Na Figura 13 é ilustrado um modelo do diagrama unifilar dos equipamentos elétricos.

Figura 13-Diagrama unifilar dos equipamentos elétricos.



Fonte: O autor ,(2022).

Na Tabela 12 são descritos os componentes que foram montados na bancada e suas características de operação dentro da funcionalidade da bancada. A bancada contém componentes que proporciona uma infraestrutura básica para o desenvolvimento de testes em funções, lógicas de proteção, intertravamentos e automatismo de sistemas digitais de proteção e controle. São contemplados na bancada componentes que simulam os sinais de equipamentos elétricos como disjuntores, seccionadora, sinais de teleproteção e os dispositivos de abertura dos disjuntores e fechamento de disjuntores.

Tabela 12-Componentes da bancada.

Componentes	Funcionalidades
Relé auxiliar	Utilizado para simular sinais de teleproteção.
Relé biestável	Simulam sinais de disjuntores e seccionadoras.
Relé de bloqueio	Utilizado para realizar abertura e bloqueio de fechamento de disjuntores.
Relé auxiliar	Relé que efetua a abertura dos disjuntores.
Lâmpadas de sinalização	Utilizadas para sinalizar disjuntores e seccionadoras abertos e fechados.
Chave de comando	Efetua comando de abertura e fechamento dos disjuntores e seccionadoras.
Bornes	Ponto de onde conecta a fiação elétrica do painel.
Bloco de testes	Local para conectar sinais analógicos como corrente e tensão quando nos testes dos IED's.
Disjuntor de alimentação	Utilizado para proteção e alimentação do painel.
Switch	Permitirá a comunicação entre os relés digitais e o sistema supervisório.
Painel	Local onde foram montados todos os componentes da bancada.
Fiação elétrica	Utilizada para montar todo o circuito elétrico da bancada.
Terminais	Utilizados para se colocar na fiação, para garantir a segurança da instalação e estética da bancada.
Caixa de Teste Omicron	CMC 256 equipamentos de teste para relés, com 6 canais de corrente, 3 de tensões, entradas e saídas binárias.
Fonte de alimentação	Para alimentar todos os componentes da bancada tensão de entrada 110 a 220 Vca e tensão de saída em 125 Vcc 6 A 750W.

Fonte: O autor (2022).

A tabela 13 ilustra o orçamento final, incluindo a caixa de teste Omicron.

Tabela 13-Custo de implantação da bancada.

Custo Orçamentário da Bancada de Teste				
Item	Discriminação dos Componentes	Und	R\$ Unit	Subtotal
1	Relé Auxiliar (Sinais de teleproteção)	4	600	2.400
2	Relé Biestável (sinais de equipamentos elétricos)	9	600	5.400
3	Relé Auxiliar 86 (abertura e bloqueio de fechamento de disjuntores)	3	1500	4.500
4	Relé Auxiliar 94 (abertura de disjuntores)	2	750	1.500
5	Lâmpadas de Sinalização	10	18	180
6	Chave de comando (comandos de abertura e fechamentos de disjuntores e seccionadora)	18	16	288
7	Bornes (ponto onde se conecta a fiação elétrica do painel)	20	11.25	225
8	Bloco de Teste (conexão dos sinais analógicos)	3	500	1.500
9	DJ de Alimentação (proteção e alimentação da bancada)	1	60	60
10	Switch (comunicação entre o IED e o sistema supervisório)	1	7000	7.000
11	Fonte de alimentação (alimentação dos componentes da bancada)	1	4000	4.000
12	Painel Elétrico (local para montagem dos componentes da bancada)	1	4500	4.500
13	Fiação Elétrica 2,5mm ² (utilizada para montar todo o circuito da bancada) em metros	200	2	400
14	Terminal Olhal (utilizado nas fiações elétricas)	200	0.25	50
15	Caixa de teste Omicron	01	400000	400.000
16	Terminal Tipo pino (Utilizado nas fiações elétricas)	200	0.35	60
Total do Custo da Bancada (R\$)				612.063

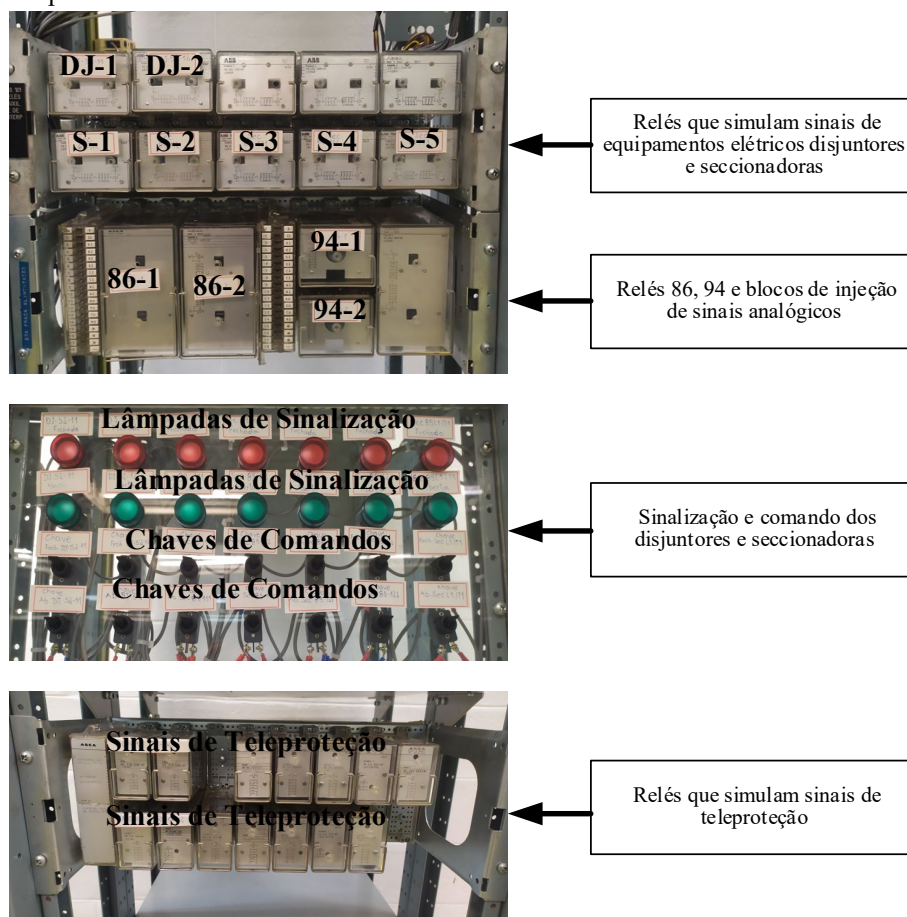
Fonte: O autor ,(2022).

4.3 CONCEPÇÃO DO PAINEL

Para o desenvolvimento da bancada de teste utilizou-se um painel modular a fim de atender as aplicações dos componentes da bancada, que pode ser facilmente expandido quando no surgimento de melhorias e expansão do layout da bancada, de acordo com as melhorias que vão surgindo ou mesmo inserção de tecnologia embarcada.

No painel da bancada foram montados os componentes que simularão todas as condições para realizarem testes: simulação de falhas, comissionamento em fábrica, atendendo todos os requisitos que foram descritos no capítulo 4, conforme ilustrado na Figura 14.

Figura 14- Componentes da bancada.



Fonte: O autor ,(2022).

Para realizar manobras nesses relés estáticos que simulam disjuntores e seccionadoras, o painel da bancada possui chaves de pulsos liga/desliga, os quais recebem um sinal de 125 Vcc para realizarem essas manobras. Como esses equipamentos mudam de posição (abertos/ fechados), foram utilizadas lâmpadas de sinalização, sendo que as verdes sinalizam esses equipamentos abertos e as vermelhas sinalizam os equipamentos fechados

ou em operação.

Também foram concebidos no painel relés estáticos que simulam os sinais de equipamentos de teleproteção, haja vista que serão realizados os testes em proteção de linha de transmissão. A função desses relés estáticos é simular os sinais para realizarem as lógicas de envios e recepção de transferência de disparo, ou mesmo outros testes que envolvam sinais de teleproteção.

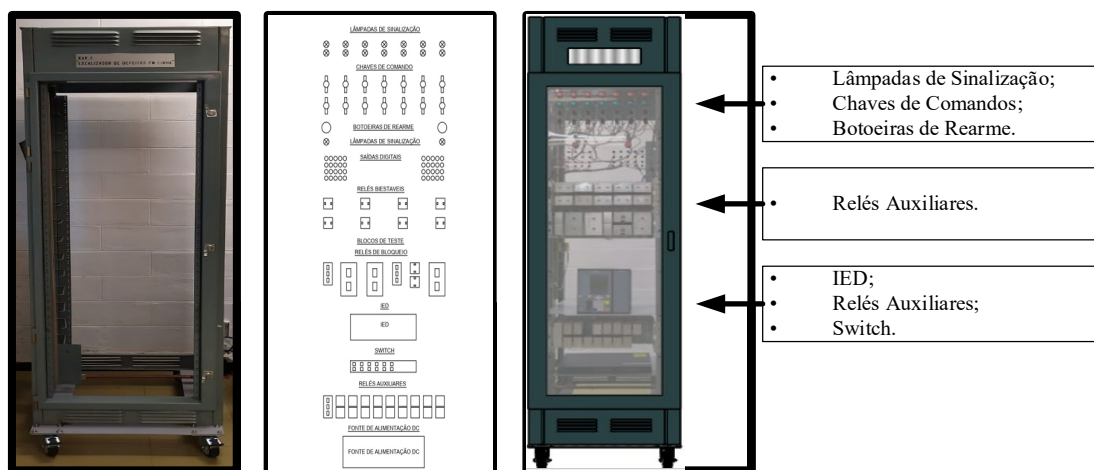
4.4 MONTAGEM DA BANCADA

Depois da concepção do projeto funcional, foi realizado levantamento de componentes necessários para montagem da bancada e solicitada a aquisição desses componentes, diagramas de comandos elétricos e definição do layout (posição dos componentes na bancada). A montagem da bancada foi realizada em 3 etapas:

- Etapa 1 - Montagem do painel

Para a montagem da bancada, reaproveitou-se um painel de proteção desativado devido à modernização das proteções da subestação, definindo-se o tamanho da bancada e o layout do painel para a montagem dos componentes. As dimensões do painel compreendem 2,30m x 0,60m x 0,60 m, ilustradas na Figura 14.

Figura 15-Painel em fase de preparação.



Fonte: O autor ,(2022).

- Etapa 2 - Montagem dos componentes da bancada

Depois de definidos a concepção do projeto, a adaptação do painel, diagramas de comandos e aquisição dos componentes, iniciou-se a montagem da bancada. Foram montados todos os componentes da bancada, relés estáticos, switch, chave liga/desliga, lâmpadas de sinalização e fonte de alimentação. Depois, seguindo os diagramas

de comandos, foram realizadas as ligações necessárias para o funcionamento da bancada.

Na parte superior foram fixadas as lâmpadas de sinalização que indicam os estados dos equipamentos (disjuntores e seccionadoras) aberto e fechado, chaves de manobras de abertura e fechamento dos disjuntores e seccionadoras. No centro da bancada colocaram-se os relés estáticos que simulam os estados dos equipamentos elétricos, blocos de testes dos sinais analógicos, relés que efetuarão abertura nos disjuntores e relés que bloqueiam o fechamento de um disjuntor, quando na ocorrência de uma falha em um equipamento ou alguma lógica que necessita de relé de bloqueio. Esses relés de bloqueio têm a finalidade de efetuar abertura em disjuntores e bloquear seu fechamento.

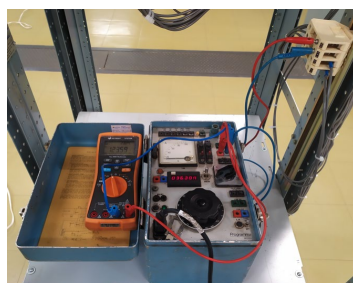
E, por fim, na parte inferior da plataforma, foram dispostos os relés estáticos que simulam os sinais de teleproteção, suporte para o relé digital, switch e fonte de alimentação.

- Etapa 3 - Montagem dos circuitos de comando e controle

Para a montagem dos circuitos elétricos da bancada foram desenvolvidos diagramas de comandos elétricos, para que pudessem ser realizadas manobras nos componentes que simulam sinais de equipamentos elétricos como disjuntores, seccionadoras e sinais de teleproteção. Foram considerados os circuitos de intertravamento elétrico, respeitando-se todas as características dos componentes da bancada e a segurança de seus usuários.

O diagrama de comando é alimentado por uma fonte de corrente contínua na tensão de 125 Vcc, a qual irá alimentar todos os componentes e circuitos da bancada, e os sinais que irão para as entradas digitais e alimentação dos IED's. A Figura 16 ilustra a fonte de alimentação da bancada.

Figura 16-Alimentação dos circuitos da bancada.



Fonte de Alimentação 125 Vcc

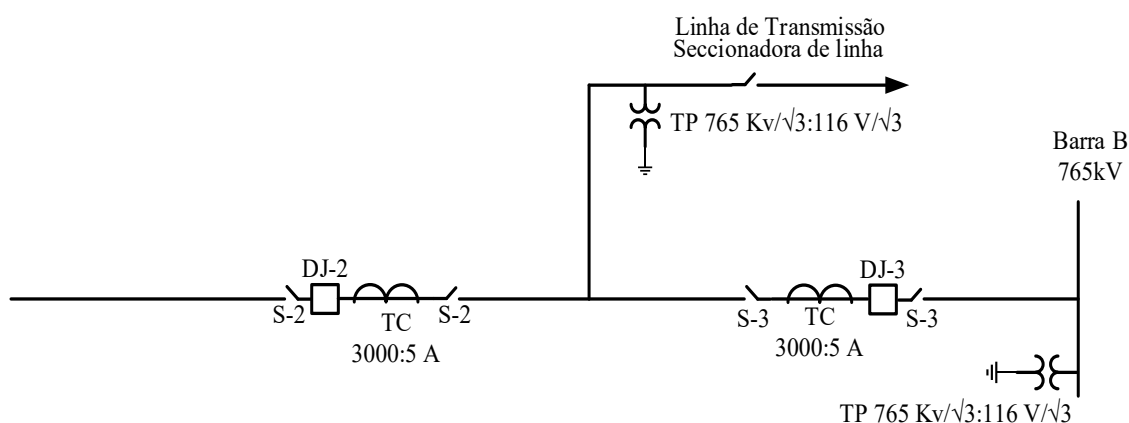
4.5 REALIZAR TESTES EM IED'S

A bancada POWERTS foi estruturada para a realização de testes em (i) proteção de linha de transmissão, (ii) proteção de autotransformador, (iii) proteção de barras de subestação. Contudo, para isso é necessário dispor de uma mala de testes que tenha a capacidade de simular 6 sinais analógicos de corrente, configuráveis em termo de amplitude, frequência e defasamento angular para que a proteção seja testada.

Como os relés são desenvolvidos das mais diversas formas e condições de utilização, a cada novo projeto, nos testes de comissionamento são avaliados os ajustes, lógicas, e as funcionalidades de todas as interfaces (entradas e saídas digitais, lógicas de operação, entradas analógicas e os intertravamentos elétricos) com o sistema. A bancada de testes pode simular um sistema, como um vão de linha de transmissão, vão transformador ou mesmo vãos de barra de subestação.

A Figura 17 representa o diagrama unifilar de testes da proteção de linha de transmissão. Com essa configuração foi possível realizar testes nas lógicas da proteção de linha de transmissão, como religamento automático, lógica de monocanal ou falha de canal e fechamento sob falta (*SOFT*), para validação da bancada de teste, na qual a bancada simula os equipamentos que compõe o *bay* da linha de transmissão em operação, sendo enviados esses sinais para as entradas digitais do relé.

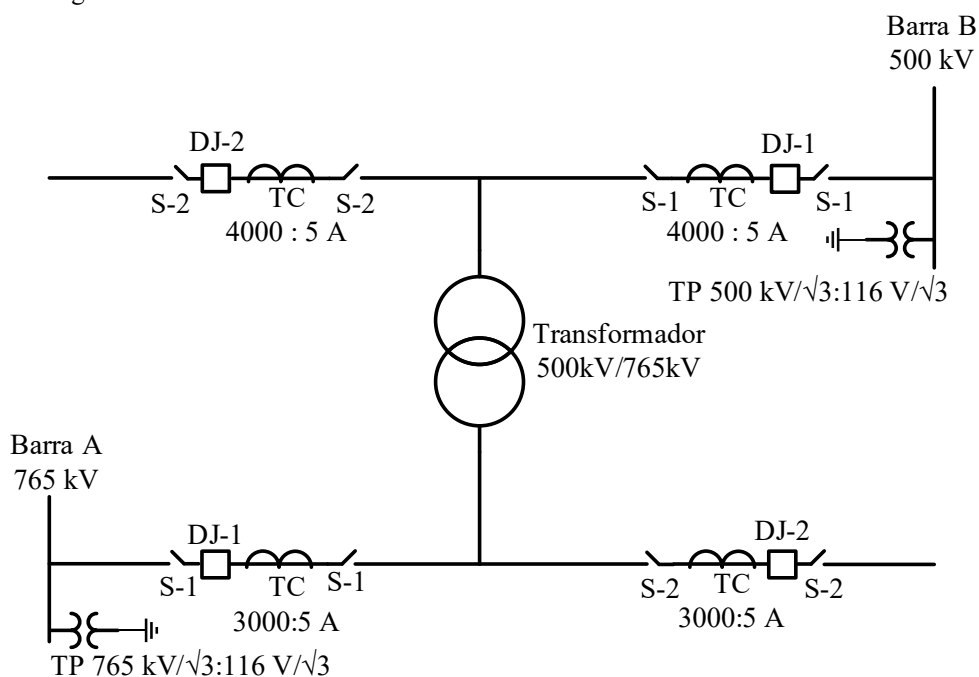
Figura 17-Diagrama unifilar de um vão de linha de transmissão.



Fonte: O autor, (2022).

O diagrama unifilar representado pela Figura 18 representa uma configuração para testar a proteção de autotransformador, sendo que esse arranjo destaca o lado de alta e baixa do transformador.

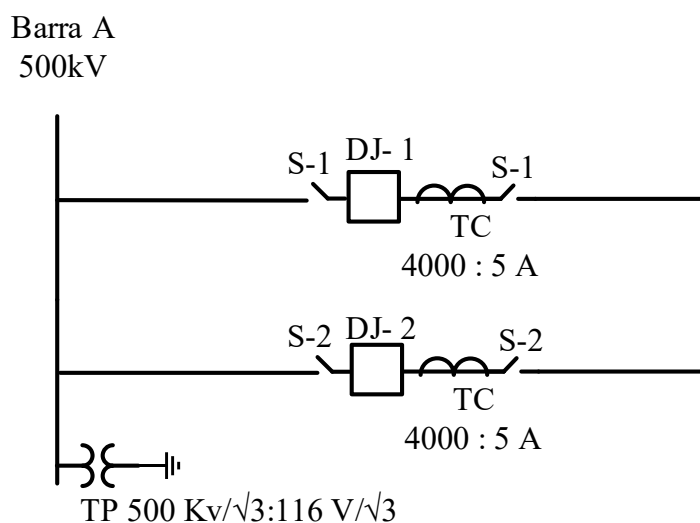
Figura 18-Diagrama unifilar de um vão de autotransformador.



Fonte: O autor, (2022).

No arranjo ilustrado na Figura 19 destaca-se uma configuração de barra de subestação, configurada com dois vãos, em que é possível testar uma proteção de barras de subestação. Esses testes que são realizados na bancada trazem segurança ao sistema elétrico de potência, por não interferirem no sistema e não provocarem desligamentos indesejados.

Figura 19- Diagrama unifilar de barras de subestação.



Fonte: O autor ,(2022).

5 PROCEDIMENTO DE TESTE

Este capítulo tem por objetivo descrever os procedimentos de testes a serem implantados, descrevendo suas funcionalidades, seu âmbito de aplicação, materiais e equipamentos para sua utilização. Tal procedimento foi desenvolvido de forma a fornecer um roteiro para a realização de testes com a utilização da bancada e auxílio de uma caixa de teste, em proteção de linha de transmissão de 765kV nas lógicas de religamento automático, de monocal e fechamento sob-falta, proteção de transformadores e proteção diferencial de barras de subestação. A Figura 20 ilustra a bancada para realização dos testes.

Figura 20-Bancada para reprodução de falhas.



Fonte: O autor ,(2022).

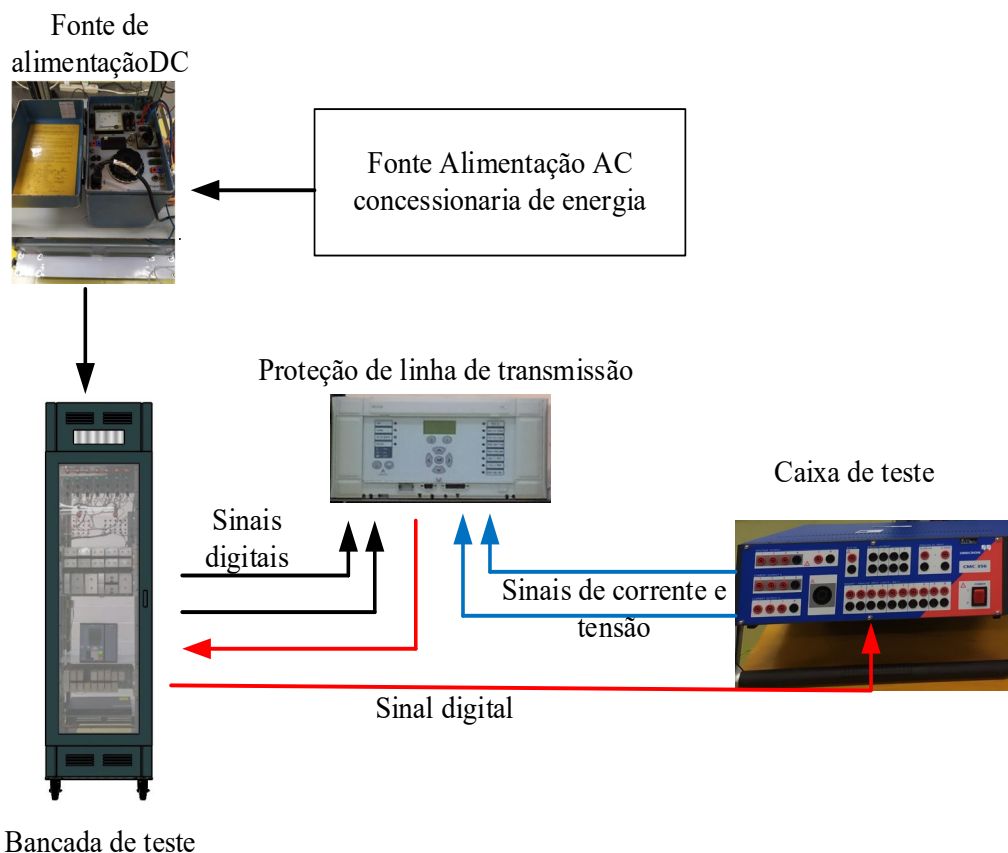
5.1 RELIGAMENTO AUTOMÁTICO

A lógica de religamento automático serve para a atuação exclusiva após a eliminação de faltas por proteções de altas velocidades ou instantâneas. Para realizar o teste de religamento tripolar é necessário simular uma falta monofásica AN em Z_1 e ativar as variáveis internas do IED, através das entradas digitais do relé P443 proteção de linha de transmissão.

Para ativação destas variáveis internas simula-se pela bancada o vão da linha de transmissão em operação, como disjuntores, seccionadoras, no estado fechados e disjuntor selecionado para o religamento automático, sendo esses sinais enviados para as entradas digitais do relé, ativando as variáveis internas do relé, como ilustrado na Figura 21,

após a atuação do relé, este irá enviar um sinal para a bancada, efetuando a abertura dos disjuntores da linha de transmissão.

Figura 21-Teste na lógica de religamento automático.



Fonte: O autor ,(2022).

Com o auxílio de uma caixa de testes são simulados os sinais analógicos de tensão e corrente para serem injetados nas entradas analógicas do relé. Esses sinais representam a linha de transmissão em condição normal de operação, sendo injetados no relé valores secundário de acordo com a relação de transformação dos TC's e TP's apresentados no capítulo 3.

A Figura 22 ilustra a sequência de estados simulados no software da caixa de ensaios para realização do teste na lógica de religamento automático, na qual são injetados as 3 fases de tensão com valor nominal de 66,6 V com defasamento angular de 120° entre as fases, esses valores são em níveis secundários do TP conforme o nível de tensão da linha de transmissão, também são injetados as 3 fases de correntes com valor nominal de 1 A com defasamento angular de 120° em valores secundários do TC, respeitando a relação de transformação de 3000 : 5 A e dentro do limite máximo de corrente da linha de transmissão.

Figura 22-Sequência de estado no teste de religamento automático.

OMICRON State Sequencer - [teste de religamento bancada de teste 2021]

Arquivo Página Inicial Estados Vista

Objeto de Teste Configuração do Hardware Mais... Setup de teste

Trigger de tempo

Iniciar/Continuar Parar Pausa Apagar Saída estática todos estados em Loop Ajustes do Relatório Avaliação Manual... Comentário Documentação de teste

Execução de teste

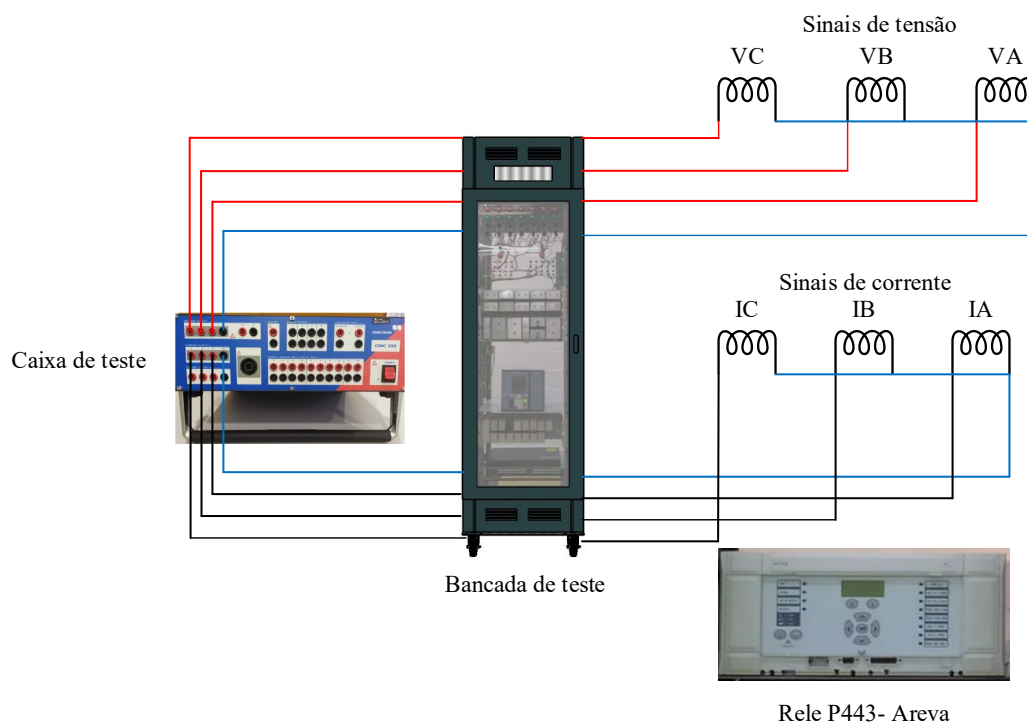
Visualização de Tabela: teste de religamento bancada de teste 2021

	1			2			3			4			5		
Nome	Estado 1			Estado 2			Estado 3			Estado 4			Estado 5		
V C-II	66.40 V	0.00 *	60.000 Hz	66.40 V	0.00 *	60.000 Hz	66.40 V	0.00 *	60.000 Hz	66.40 V	0.00 *	60.000 Hz	66.40 V	0.00 *	60.000 Hz
V B-II	66.40 V	-120.00 *	60.000 Hz	66.40 V	-120.00 *	60.000 Hz	66.40 V	-120.00 *	60.000 Hz	66.40 V	-120.00 *	60.000 Hz	66.40 V	-120.00 *	60.000 Hz
V A-II	66.40 V	120.00 *	60.000 Hz	66.40 V	120.00 *	60.000 Hz	1.224 V	88.00 *	60.000 Hz	66.40 V	120.00 *	60.000 Hz	66.40 V	120.00 *	60.000 Hz
I C	0.000 A	0.00 *	60.000 Hz	1.000 A	0.00 *	60.000 Hz	1.000 A	0.00 *	60.000 Hz	0.000 A	0.00 *	60.000 Hz	1.000 A	0.00 *	60.000 Hz
I B	0.000 A	-120.00 *	60.000 Hz	1.000 A	-120.00 *	60.000 Hz	1.000 A	-120.00 *	60.000 Hz	0.000 A	-120.00 *	60.000 Hz	1.000 A	-120.00 *	60.000 Hz
I A	0.000 A	120.00 *	60.000 Hz	1.000 A	120.00 *	60.000 Hz	2.000 A	0.00 *	60.000 Hz	0.000 A	200.00 *	60.000 Hz	1.000 A	200.00 *	60.000 Hz
V(t)-I	66.40 V	240.00 *	60.000 Hz	66.40 V	-120.00 *	60.000 Hz	0.000 V	0.00 *	60.000 Hz	66.40 V	-120.00 *	60.000 Hz	66.40 V	-120.00 *	60.000 Hz
CMC Rel	0 output(s) active			0 output(s) active			0 output(s) active			0 output(s) active			0 output(s) active		
Trimmer	1.000 s			1.000 s						1.500 s			2.000 s		

Fonte: O autor ,(2022).

No segundo estágio simula-se uma falta monofásica em Z_1 , atuando a função de distância e ativando uma saída binária do relé, energizando a bobina de relé 94 montado na bancada de teste. O contato auxiliar do relé 94 efetuará os disparos nos disjuntores da linha de transmissão que foram simulados na bancada de teste. Após esta etapa inicia-se o processo de religamento automático. A Figura 23 ilustra o circuito analógico para o teste na lógica de religamento automático e nos testes das lógicas de monocanal e fechamento sob-falta.

Figura 23-Sinais analógicos.



Fonte: O autor ,(2022).

5.2 LÓGICA DE MONOCANAL

A lógica de monocanal inserida no relé tem por objetivo atender o procedimento de rede 2.2 do ONS, a permissão de disparo da proteção de linha de transmissão quando na perda de um canal de teleproteção. O teste na lógica de monocanal tem por objetivo verificar a recepção de transferência de disparo nos disjuntores da linha de transmissão, quando na falha de um canal de teleproteção.

Quando o software *State Sequencer* da caixa de teste omicrom simular uma falta bifásica nas entradas analógicas do relé, a bancada de teste irá simular uma perda de canal, os sinais de envio, recepção de transferência de disparo e o *bay* da linha de transmissão em operação, como disjuntores, seccionadoras, enviando esses sinais para as entradas digitais do relé, para ativação da lógica de monocanal. A Figura 24 ilustra a sequência de estado no teste na lógica de monocanal.

Figura 24-Sequência de estado no teste na lógica de monocanal.

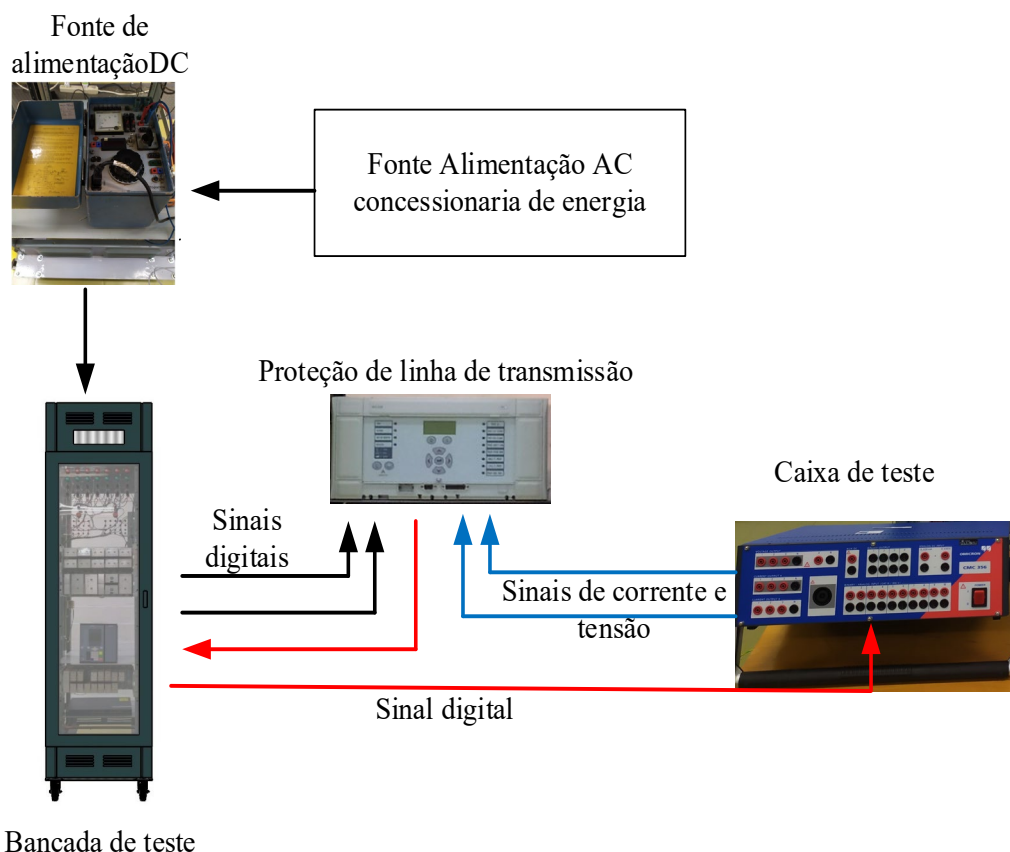


	1			2			3			4			5		
Nome	Estado 1			Estado 2			Estado 3			Estado 4			Estado 5		
V C-II	66.40 V	0.00 *	60.000 Hz	66.40 V	0.00 *	60.000 Hz	66.40 V	0.00 *	60.000 Hz	66.40 V	0.00 *	60.000 Hz	66.40 V	0.00 *	60.000 Hz
V B-II	66.40 V	-120.00 *	60.000 Hz	66.40 V	-120.00 *	60.000 Hz	66.40 V	-120.00 *	60.000 Hz	66.40 V	-120.00 *	60.000 Hz	66.40 V	-120.00 *	60.000 Hz
V A-II	66.40 V	120.00 *	60.000 Hz	66.40 V	120.00 *	60.000 Hz	1.224 V	88.00 *	60.000 Hz	66.40 V	120.00 *	60.000 Hz	66.40 V	120.00 *	60.000 Hz
I C	0.000 A	0.00 *	60.000 Hz	1.000 A	0.00 *	60.000 Hz	1.000 A	0.00 *	60.000 Hz	0.000 A	0.00 *	60.000 Hz	1.000 A	0.00 *	60.000 Hz
I B	0.000 A	-120.00 *	60.000 Hz	1.000 A	-120.00 *	60.000 Hz	1.000 A	-120.00 *	60.000 Hz	0.000 A	-120.00 *	60.000 Hz	1.000 A	-120.00 *	60.000 Hz
I A	0.000 A	120.00 *	60.000 Hz	1.000 A	120.00 *	60.000 Hz	2.000 A	0.00 *	60.000 Hz	0.000 A	200.00 *	60.000 Hz	1.000 A	200.00 *	60.000 Hz
V(I)-I	66.40 V	240.00 *	60.000 Hz	66.40 V	-120.00 *	60.000 Hz	0.000 V	0.00 *	60.000 Hz	66.40 V	-120.00 *	60.000 Hz	66.40 V	-120.00 *	60.000 Hz
CMC Rel	0 output(s) active			0 output(s) active			0 output(s) active			0 output(s) active			0 output(s) active		
Trigger	1.000 s			1.000 s			1.500 s			1.500 s			2.000 s		

Fonte: O autor, (2022).

A bancada teste simula o vão da linha de transmissão em operação, os sinais de teleproteção, falha de canal e a recepção de transferência de disparo, enviando esses sinais para as entradas digitais do relé para ativação das variáveis internas. A caixa de teste simula a falta na linha de transmissão, enviando esses sinais para as entradas analógicas do relé para atuação da função de distância. A Figura 25 ilustra o sistema montado na bancada para o teste na lógica de monocanal.

Figura 25-Teste na lógica de monocanal.



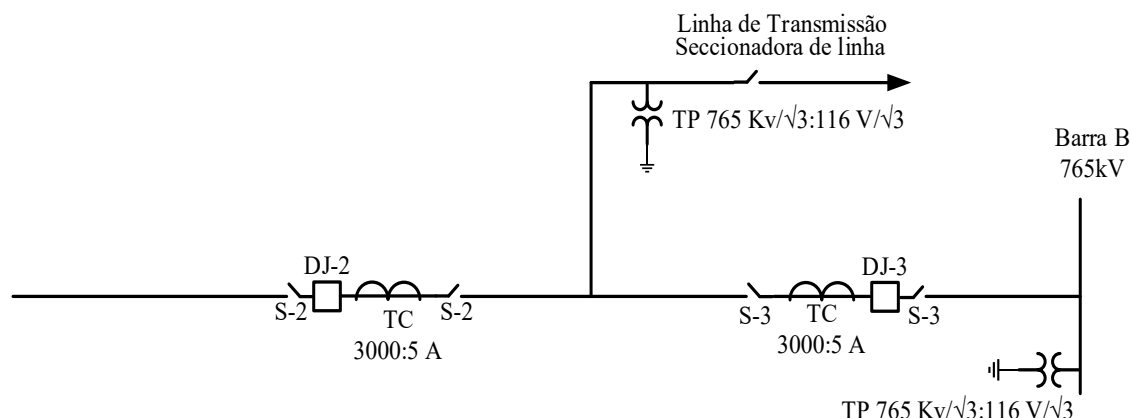
Fonte: O autor, (2022).

5.3 LÓGICA DE FECHAMENTO SOB-FALTA

Este teste tem por objetivo testar a lógica de fechamento sob falta da linha de transmissão, na qual são simulados para o relé a condição da linha desenergizada através de combinação do estado dos disjuntores abertos e as seccionadoras do *bay* e da linha de transmissão fechada. Também se simula o comando de fechamento disjuntor para ativação desta lógica.

Para realizar o teste na lógica de fechamento sob-falta, deve-se conhecer as condições de polo morto dos disjuntores da linha de transmissão, ou seja, a bancada simula as condições de disjuntores da linha de transmissão abertos e seccionadoras fechadas, enviando esses sinais para as entradas digitais do IED, ativando as variáveis internas do relé. A Figura 26 ilustra o diagrama de teste na lógica de fechamento sob falta.

Figura 26-Teste na lógica de fechamento sob-falta.



Fonte: O autor ,(2022).

Através do software *State Sequencer* da caixa de teste omicrom, injeta-se uma tensão com a caixa de teste em um primeiro estágio com o disjuntor aberto, em um segundo estágio deve-se efetuar o comando de fechamento dos disjuntores da linha de transmissão e aplicar uma falta em Zona 2 com a caixa de teste, conforme ilustrado na Tabela 14. Para atuação da lógica de fechamento de fechamento sob falta, será ativada uma saída binária do relé que energizará a bobina do relé 94, o contato auxiliar do relé 94 efetuará os disparos nos disjuntores da linha de transmissão que foram simulados na bancada.

Tabela 14- Valores de tensão e corrente.

Sinais Analógicos	Pré- Falta	Falta na Linha
VA	66,6L120° V	10L120° V
VB	66,6L240° V	66,6L240° V
VC	66,6L0° V	15L0° V
IA	1L120° A	3L120° A
IB	1L240° A	1L240° A
IC	1L0° A	2L0° A

Fonte: O autor ,(2022).

5.4 PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE BARRAS

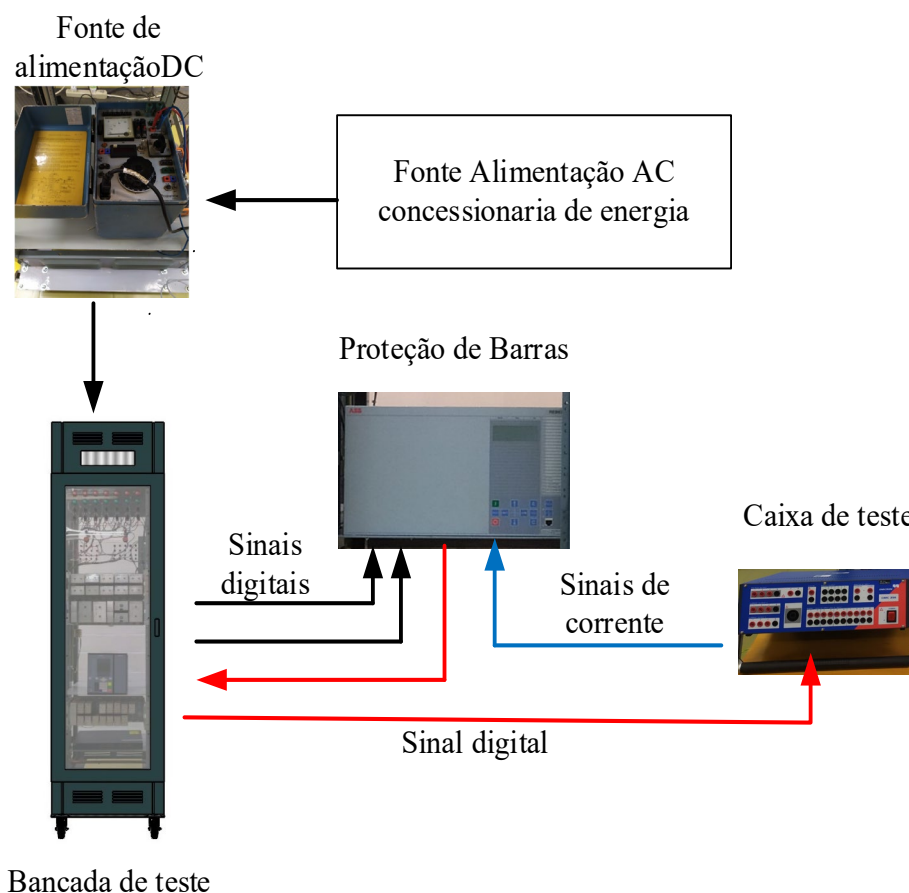
O objetivo deste teste é ensaiar a proteção diferencial de barras, devido à função diferencial ter sido ajustada para não atuar por aparecimento de correntes diferenciais falsas, faz-se necessário informar ao relé as situações dos equipamentos que compõe o arranjo da barra, como disjuntores e seccionadoras, ou seja, deve-se simulado pela bancada sinais destes equipamentos em operação e enviá-los para as entradas digitais do relé.

A bancada simula os sinais dos disjuntores e seccionadoras do bay para

ativar a função diferencial. Com o auxílio da caixa de teste simulando os 6 sinais de corrente, para serem injetados nas entradas analógicas do IED, é possível fazer o teste na função diferencial de barra.

Deve-se configurar as conexões de teste simulando os sinais dos equipamentos elétricos que compõem o vão barra nas entradas digitais do IED, e simular a falta na barra, injetando esses sinais nas entradas analógicas do relé, a lógica em conjunto com o ajuste processará essas informações operando a função diferencial e ativando a saída binária do relé que energizará a bobina do relé 94 montado na bancada. O contato auxiliar do relé 94 enviará um sinal para a caixa de teste, para verificar a precisão da curva do relé. O resultado será extraído do relatório gerado pela caixa de teste, conforme ilustrado na Figura 27.

Figura 27-Sistema montado na bancada para teste na proteção de barra.

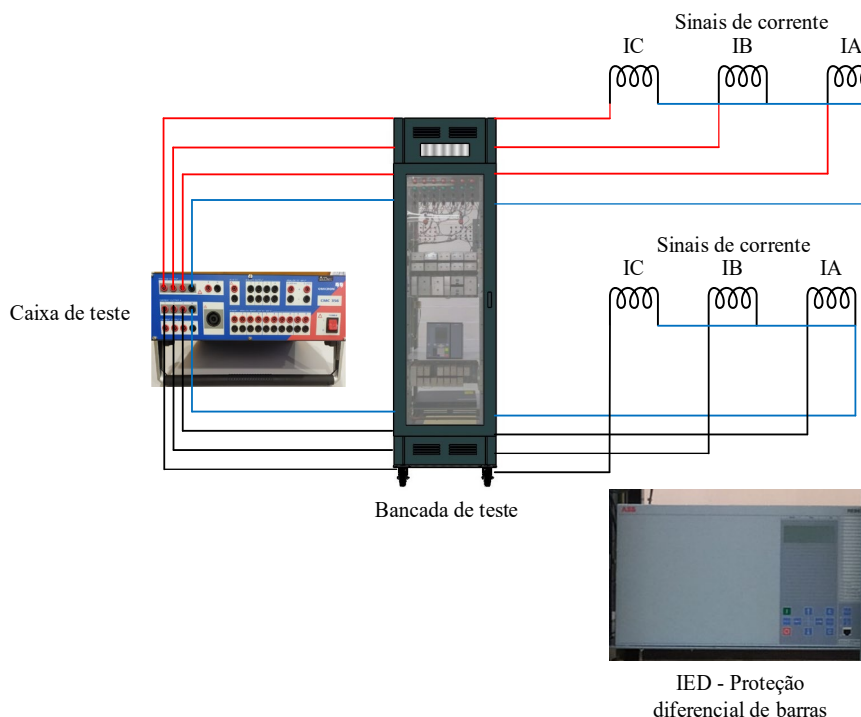


Fonte: O autor ,(2022).

Para aplicação dos sinais analógicos nas entradas analógicas do relé, é necessário montar o circuito de corrente, simulando os sinais de corrente de dois vãos em operação da barra. A Figura 28 ilustra o diagrama de ligação dos canais de corrente para

serem configurados na caixa de ensaio, para a realização deste teste.

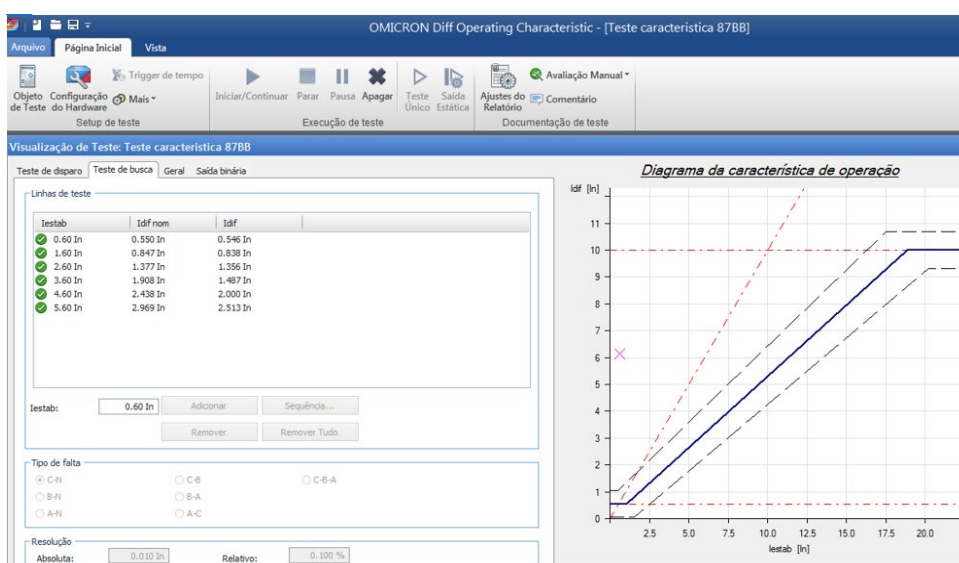
Figura 28-Sinais analógicos de correntes.



Fonte: O autor ,(2022).

A Figura 29 ilustra a curva característica de teste. Essa configuração no software da caixa de teste se faz necessária para simular uma corrente de curto-circuito a ser injetado na entrada analógica do relé. Essa corrente nada mais é que a corrente diferencial que fará operar a função diferencial da proteção.

Figura 29-Curva característica de teste da proteção diferencial de barras.

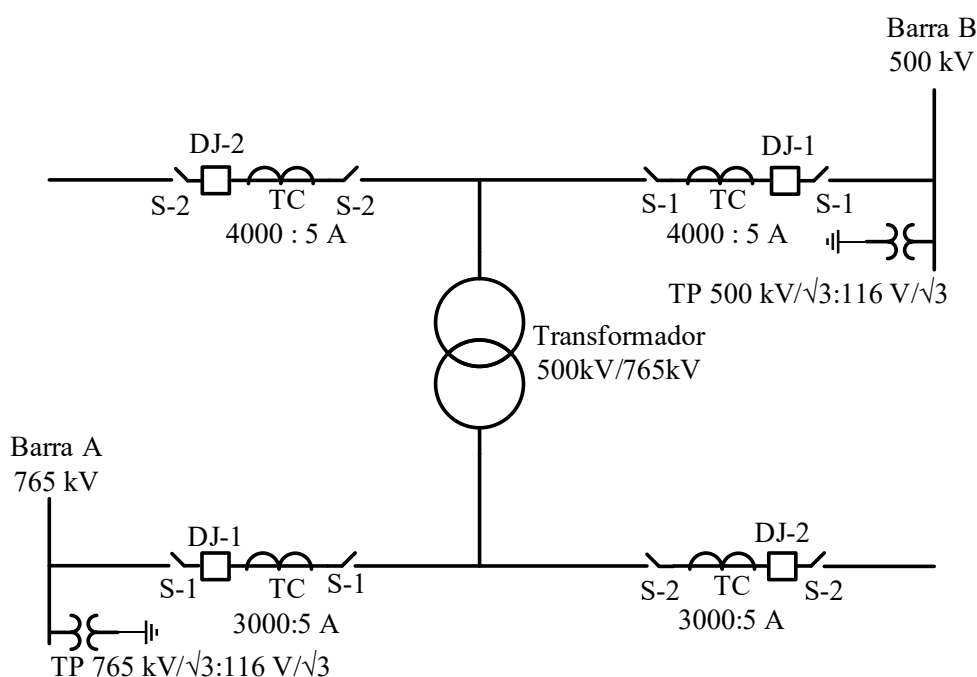


Fonte: O autor (2022).

5.5 PROTEÇÃO DO AUTOTRANSFORMADOR

Este teste consiste em verificar as entradas e saídas binárias do IED. O relé foi configurado de acordo o arranjo do TC. A Figura 30 ilustra o sistema para o teste na proteção do transformador.

Figura 30-Configuração do sistema para teste na proteção do transformador.

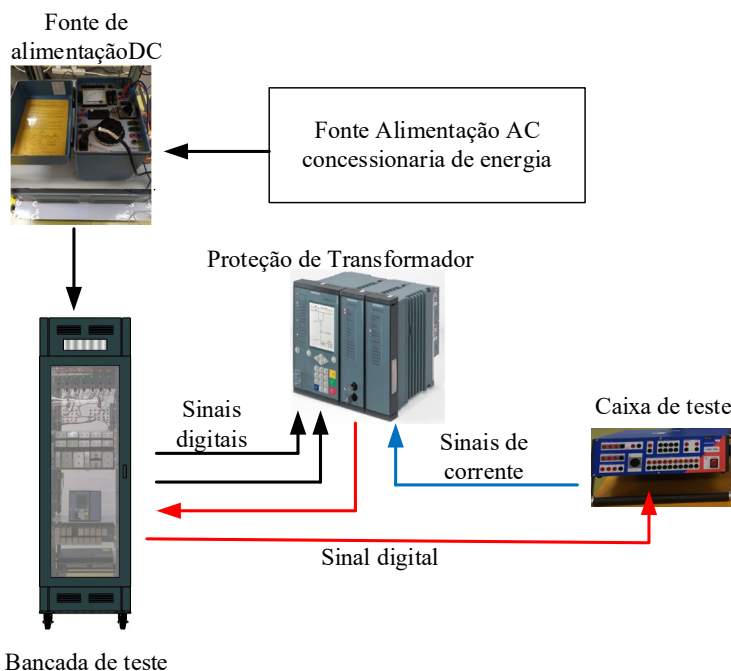


Fonte: O autor ,(2022).

A figura 31 ilustra um diagrama funcional de teste de proteção de transformador, onde a bancada simula o vão do transformador através dos sinais de equipamentos elétricos (disjuntores, seccionadoras) do lado de alta e baixa do transformador. Devido a tecnologia embarcada nos relés de proteção, são necessários esses sinais para que a lógica inserida em conjunto com as funções de proteção, possa atuar corretamente durante o teste ou comissionamento.

Com o auxílio de uma caixa de teste para simular 6 sinais de corrente, configuráveis em termo de amplitude, frequência e defasamento angular para serem injetadas nas entradas analógicas do IED, simulando uma curto-circuito no transformador para que a proteção do transformador seja testada. Os contatos de saídas do IED enviam sinais para bancada, para realizar a abertura dos disjuntores, e ao mesmo tempo a bancada envia um sinal através de relés auxiliares que foram montados na bancada, para parar a caixa de teste e validar o teste que foi realizado.

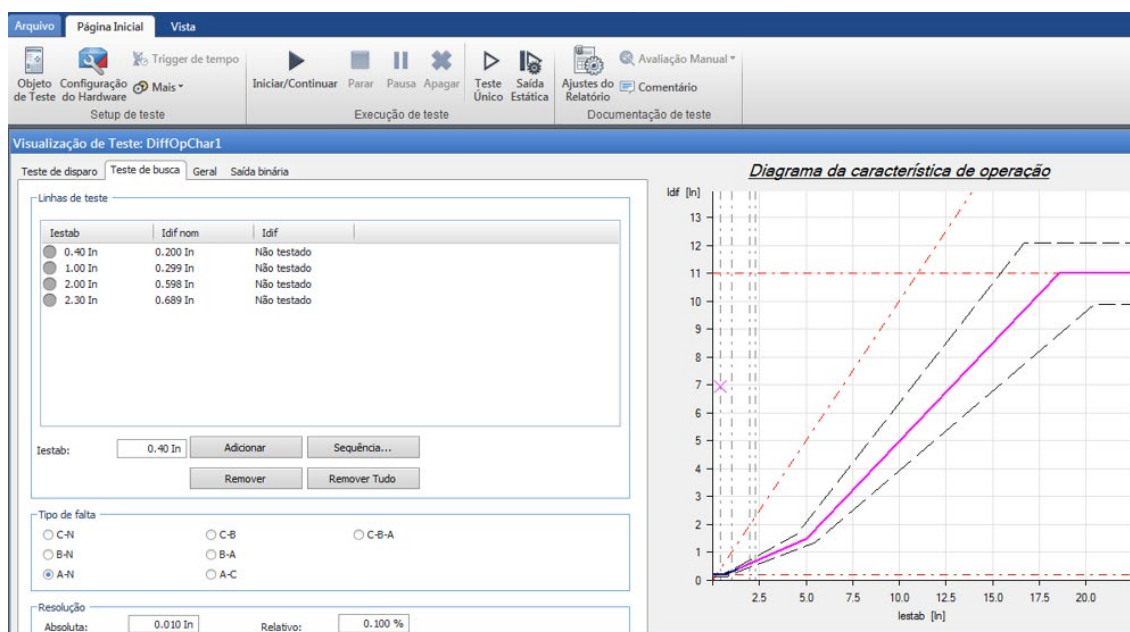
Figura 31-Diagrama de teste na proteção do transformador.



Fonte: O autor ,(2022).

Para este teste deve ser configurada a curva característica do relé na caixa de ensaio de acordo com o memorial de ajuste apresentado no capítulo 2, seção 2.4, para atuação das funções de sobrecorrente e diferencial que foram parametrizadas no IED. A Figura 32 ilustra a curva característica de teste.

Figura 32-Curva característica de teste do transformador.



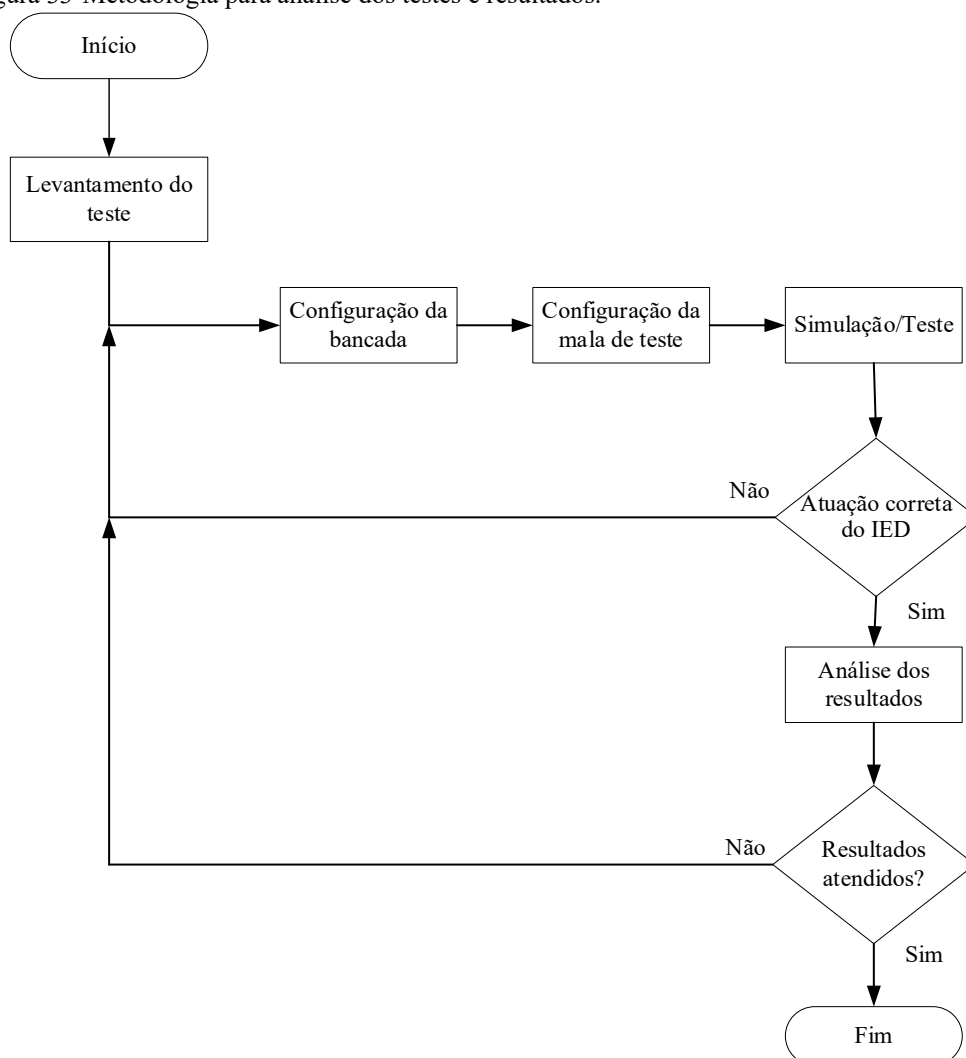
Fonte: O autor, (2022).

6 TESTES REALIZADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados e as análises dos testes que foram realizados para a validação desta pesquisa. Os testes realizados compreendem a lógica de religamento automático, lógica de operação de monocanal de teleproteção e lógica de fechamento sob falta. Essas lógicas compõem a proteção de distância das linhas de transmissão de 765kV de Furnas, testes na função 87 da proteção de barras de 500kV da subestação de Furnas de Foz do Iguaçu e testes na proteção de autotransformadores.

A metodologia para efetuar os testes e sua análise está ilustrada na Figura 33, resumindo-se nas seguintes etapas:

Figura 33-Metodologia para análise dos testes e resultados.



Fonte: O autor ,(2022).

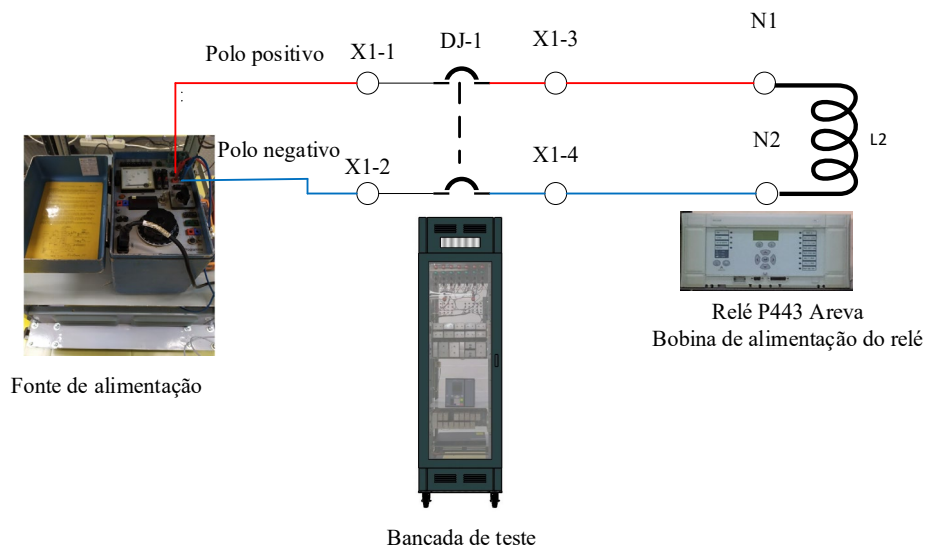
1. Levantamento do teste: definição da função, lógica de proteção que serão testados.
2. Configuração da bancada: configurar o arranjo do vão da subestação de acordo com a função de proteção a ser testada, a fim de simular os sinais de equipamentos elétricos (disjuntores, seccionadoras e sinais de teleproteção), para serem enviados e receber os sinais do IED sob teste
3. Configuração da mala de teste: configurar os sinais de corrente e tensão, em termos de amplitude, frequência e defasagem angular, para consolidação dos conceitos de teste. Modelar o software da caixa de teste de acordo com o tipo de teste, e as conexões físicas de fiação da caixa de teste como os sinais de tensão e corrente que serão injetados no IED.
4. Simulação/ Teste: nesta etapa é realizado o teste no IED, de acordo com o que foi descrito nas etapas 1, 2 e 3 do fluxograma, em que a bancada simula os sinais de equipamentos elétricos de acordo com as necessidades do teste, para monitorar as entradas e saídas binárias de controle. Uma mala de teste simula os sinais analógicos de corrente e tensão para serem aplicados ao IED, no qual se testam as funções de proteção ou as lógicas que foram inseridas nos IED's.
5. Análise dos resultados: esta etapa tem por objetivo analisar e validar os testes realizados nos IED's. Comprovar que todos os sinais simulados pela bancada validaram os testes realizados. Essa comprovação se dará pelos eventos, oscilografia, extraídos dos IED's ou relatórios de teste gerados pela caixa de teste.

Este fluxograma foi definido conforme descrito no capítulo 2, subseção

2.1.1. Os testes em IED's não se resumem apenas na verificação de suas interfaces físicas, como entradas analógicas e saídas digitais, por exemplo, mas também devem ser testadas as unidades lógicas implementadas e as parametrizações de trabalho destes dispositivos. Essas parametrizações são elaboradas de acordo com os cálculos da proteção do sistema elétrico de potência, seus parâmetros e condições específicas. Estas informações são obtidas nos projetos dos sistemas de proteção e controle (PAULINO, et al., 2013).

Para a realização dos testes, o primeiro passo foi energizar a bancada com a sua fonte de alimentação em 125 Vcc, na qual foram alimentados todos os circuitos da bancada e o IED que seria testado. Depois desta etapa foi realizada a configuração do software da caixa de teste omicron, as conexões de fiação entre a mala de teste, a bancada e o IED. A Figura 34 ilustra a fonte de alimentação da bancada alimentando o IED.

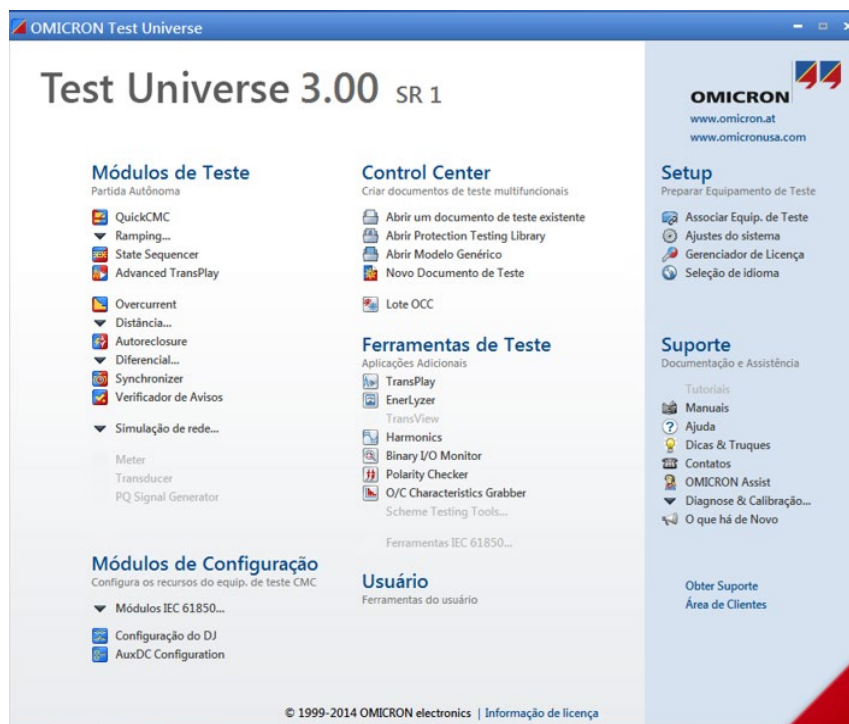
Figura 34- Circuito de alimentação do relé.



Fonte: O autor ,(2022).

Para iniciar os procedimentos de ensaio, foi realizada a conexão da caixa de teste com o computador no qual está o instalado software *Test Universe* da omicron, bem como a configuração do software para a realização dos testes. A Figura 35 ilustra a interface do software da mala de teste omicron.

Figura 35- Interface do *software* da caixa de teste omicron.

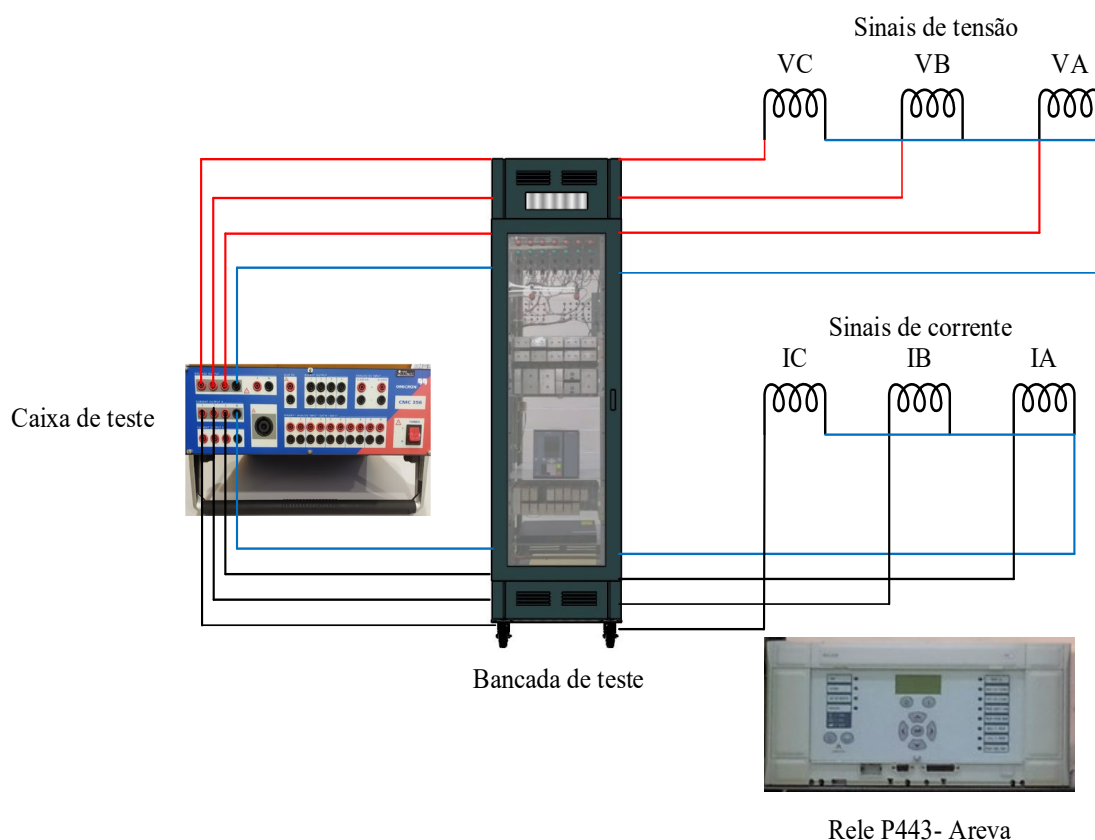


Fonte: O autor ,(2022).

Para que os sinais de tensão e corrente sejam aplicados ao relé é necessário

fazer as conexões físicas entre a caixa de teste, bancada e o relé. Onde a bancada é a interface entre o relé e a mala de teste, a fiação é montada de acordo com o teste que será realizado. A Figura 36 ilustra as conexões das fiações que foram montadas para testar as lógicas da proteção de linha de transmissão.

Figura 36- Conexões de teste.

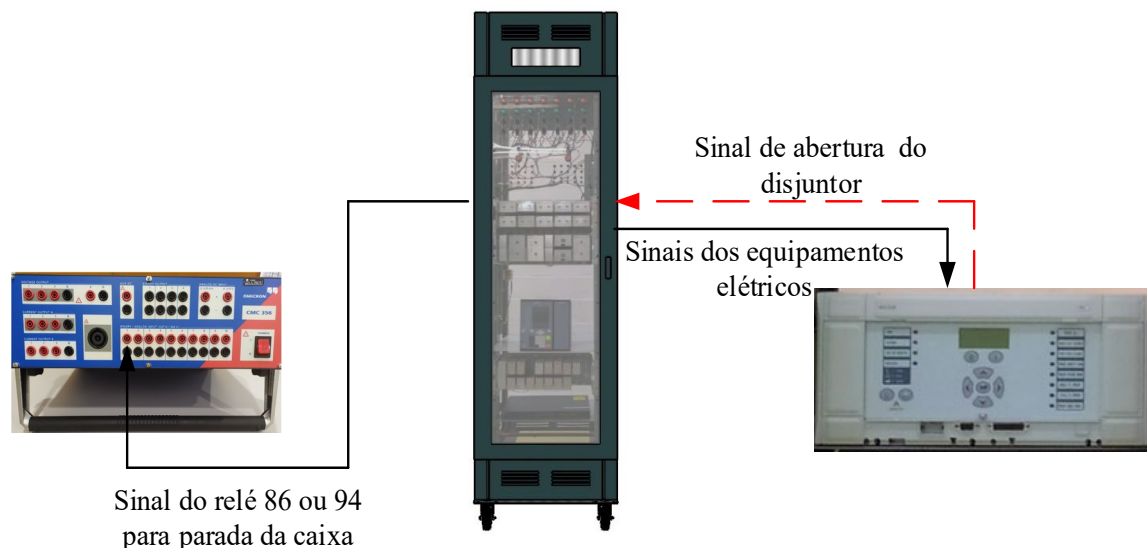


Fonte: O autor ,(2022).

Para a parada da caixa de teste se faz necessário simular as saídas dos relés que efetuam abertura nos disjuntores, ou seja, relés 94 e 86, que acionam as bobinas de abertura do disjuntor. Esses sinais são simulados por relés que foram montados na bancada de teste, de forma a simular da melhor forma possível as condições reais de operação do sistema elétrico. São de suma importância para a análise e validação do teste que foi realizado.

A Figura 37 ilustra a conexão das saídas e entradas binárias do IED com a bancada e caixa de teste, em que a bancada simula toda as condições do sistema, como disjuntores, seccionadoras, sinais de teleproteção e os relés que efetuam abertura nos disjuntores.

Figura 37-Conexões entre a bancada, relé e caixa de teste.



Fonte: O autor ,(2022).

Na próxima seção são apresentados os testes e os resultados da metodologia proposta, em que se procura validar todos os sinais de equipamentos elétricos que a bancada simulou e analisar os resultados dos testes nas lógicas, funções e os dispositivos físicos (saídas binárias) dos relés de proteção.

Os testes foram executados com a bancada simulando os sinais dos equipamentos elétricos (disjuntores, seccionadoras, sinais de teleproteção e relé auxiliares), com o auxílio de uma caixa de teste omicron CMC 256 simulando os sinais de tensão e corrente, configurados em termos de amplitude, frequência e defasamento angular. Os testes compreendem testar a proteção de linha de transmissão fabricante Areva do tronco de 765 kV de Furnas Centrais Elétricas, proteção diferencial de barras de 500kV fabricante ABB e proteção de autotransformadores de 500/765kV fabricante Siemens. Dentro deste estudo serão abordados:

- 1) Religamento automático da linha de transmissão.
- 2) Fechamento sob falta da linha de transmissão (*SOTF*) e.
- 3) A lógica de monocal canal quando perde um canal de teleproteção.
- 4) Teste da função diferencial de barras.
- 5) Teste nas funções de sobrecorrente e diferencial de autotransformadores.

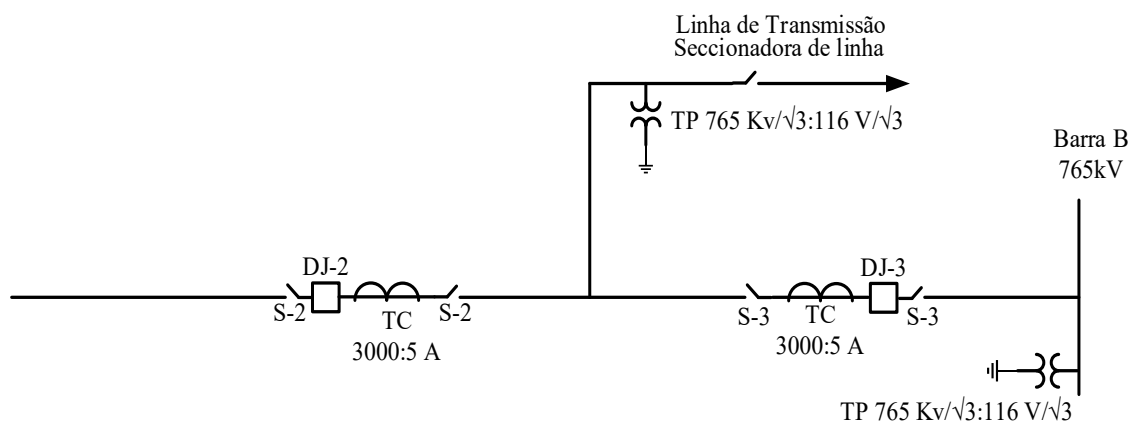
6.1 LÓGICAS DE PROTEÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

- Religamento Automático

A Figura 38 apresenta o sistema que será analisado. Trata-se de um vão de

linha de transmissão de 765kV circuito entre Foz do Iguaçu-PR e Ivaiporã-PR, tronco de transmissão do sistema Itaipu, simulados pela bancada de teste, em que esta simula todos os sinais dos equipamentos elétricos que compõem o vão da linha de transmissão em operação e os sinais de teleproteção, como disjuntores e seccionadoras, para serem enviados às entradas digitais do relé de proteção de linha de transmissão. Neste sistema serão testados a lógica de religamento automático, lógica de teleproteção - mais especificamente a falha de canal - e o fechamento sob-falta da linha de transmissão.

Figura 38-Diagrama unifilar do vão da linha de transmissão.



Fonte: O autor, (2022).

A Tabela 15 apresenta os dados do sistema que foram implementados no relé através do memorial de ajuste apresentado no capítulo 3. Esses dados servirão de referência para simulação de curto-circuito nos testes na lógica de religamento automático. Os sinais de tensão e corrente que a caixa de teste injetou no relé foram ajustados de acordo com os dados dessa tabela.

Tabela 15-Ajuste do relé.

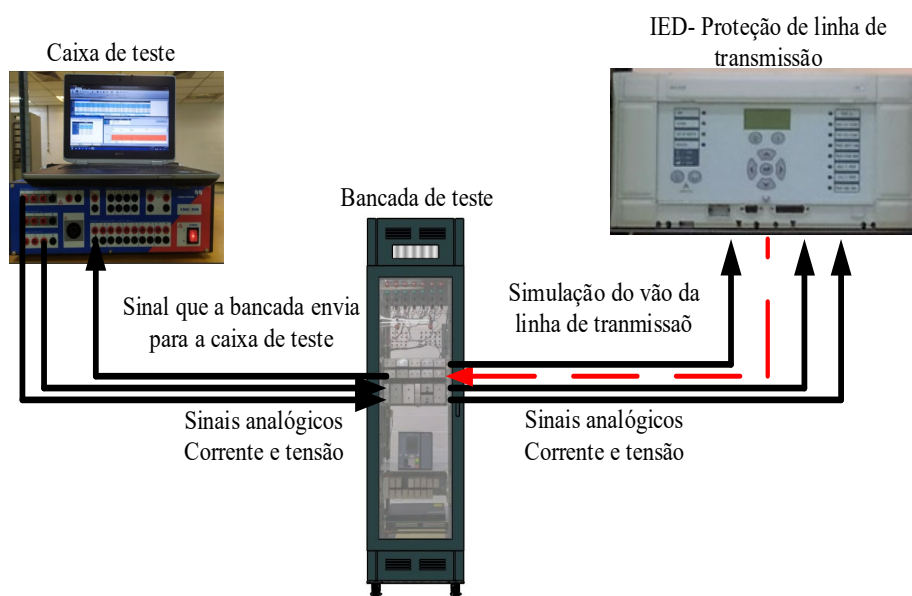
Equação	Variável	Parâmetro	Ajuste
1	RTP	Relação de transformação	6600
2	RTC	Relação de transformação	600
12	Z Linha	Impedância da linha	9,85Ω
13	Ø	Ângulo da linha	88°
34	X1sec	Impedância Z1	3,79Ω
35	Z1 %	% alcance em Z1	38,5%

Fonte: O autor, (2022).

Para a execução do teste na lógica de religamento automático da linha de transmissão, considerou-se a linha de transmissão em operação, ou seja, a bancada simulou os sinais dos equipamentos elétricos que compõem o vão da linha de transmissão, como disjuntores, chaves seccionadoras, enviando esses sinais para as entradas digitais do relé. A

Figura 39 ilustra o digrama de teste.

Figura 39-Diagrama de teste.



Fonte: O autor ,(2022).

Com ajuda da caixa de teste simulou-se uma falha na linha de transmissão em Z1 atuando a função de distância. Na Tabela 10 estão ilustrados os valores de tensão e corrente que foram injetados no relé para simulação do curto-circuito.

Foram consideradas 5 etapas de injeção dos sinais analógicos: pré-falta sem carga na linha, uma pré-falta com carga na linha, curto-circuito monofásico na linha, tensão de sincronismo e a normalização da linha. Essas etapas foram simuladas no software da caixa de teste omicron *State Sequencer* de acordo com o memorial de ajuste apresentado no capítulo 3 e na tabela 16.

Tabela 16-Valores de tensão e corrente para o teste de religamento automático.

Sinais Analógicos	Pré-falta	Pré-falta	Falta na linha	Sincronismo	Normalização
VA	66,6L120° V	66,6L120° V	1,224L88° V	66,6L120° V	66,6L120° V
VB	66,6L240°V	66,6L240° V	66,6L240° V	66,6L240° V	66,6L120° V
VC	66,6L0°V	66,6L0° V	66,6L0°V	66,6L0°V	66,6L0°V
IA	0L120°A	1L120°A	2L0°A	0L120°A	1L120°A
IB	0L120°A	1L240°A	0L240°A	0L240°A	1L240°A
IC	0L0°A	1L0°A	0L0°A	0L0°A	1L0°A
Vref.	66,6L240°V	66,6L240°V °	66,6L240°V	66,6L240°V °	66,6L240°V

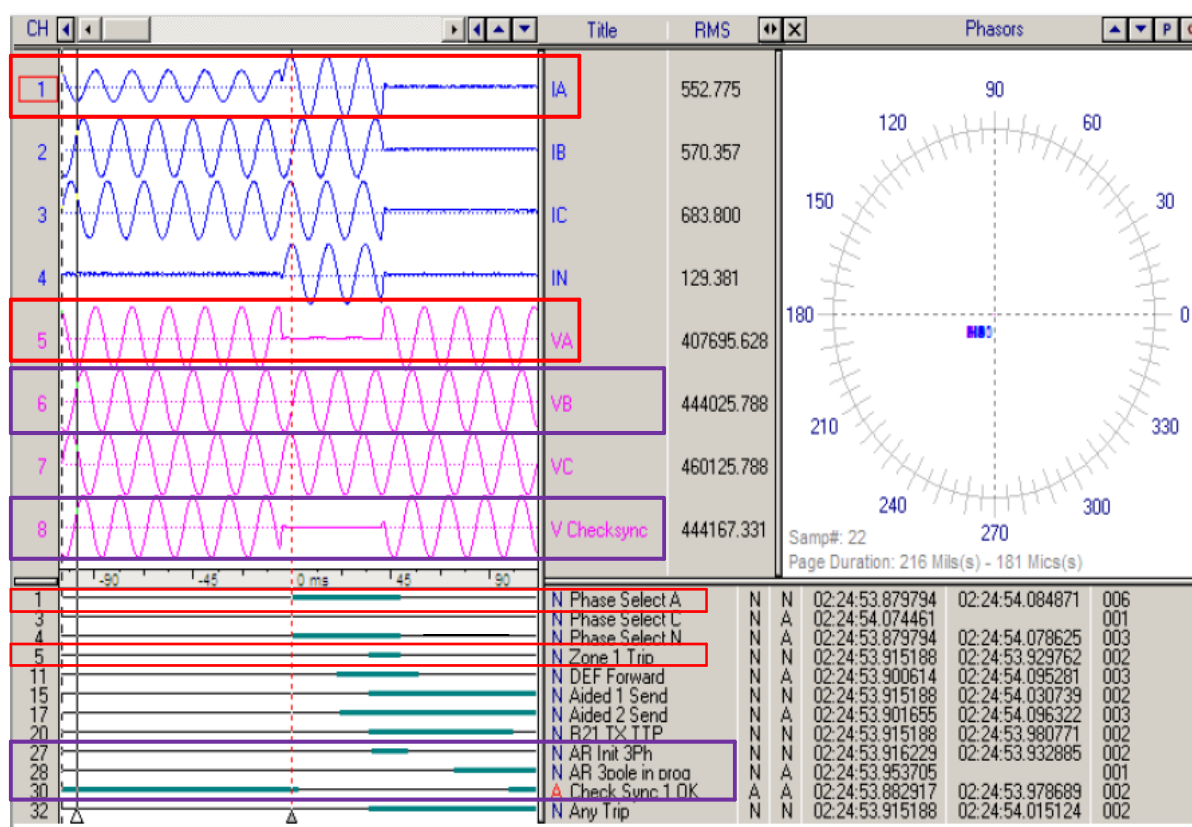
Fonte: Micom S1 Ajustes, (2022).

No mesmo instante o relé envia um sinal de disparo para os disjuntores que foram simulados na bancada. A bancada envia um sinal para as entradas digitais do relé,

sinalizando que os disjuntores da linha foram desenergizados, neste instante é iniciado o processo de religamento automático, conforme ilustrado na figura 44.

A bancada de teste simulou todos os sinais necessários para o funcionamento correto da lógica de religamento automático, de forma que ela atendeu a todos os requisitos para a atuação correta da lógica de religamento automático. A figura 44 ilustra o resultado do teste, de modo que podemos observar a atuação do relé em Z_1 e o sinal que ele enviou à bancada para abertura dos disjuntores da linha de transmissão após a detecção da falha nessa linha. Esses eventos estão destacados em vermelho e em roxo na Figura 40, podemos observar o início do processo de religamento automático, em que o relé faz a comparação da tensão da barra com a tensão da linha da fase e se iniciam check-sincronismos, conforme ilustrados na figura 40.

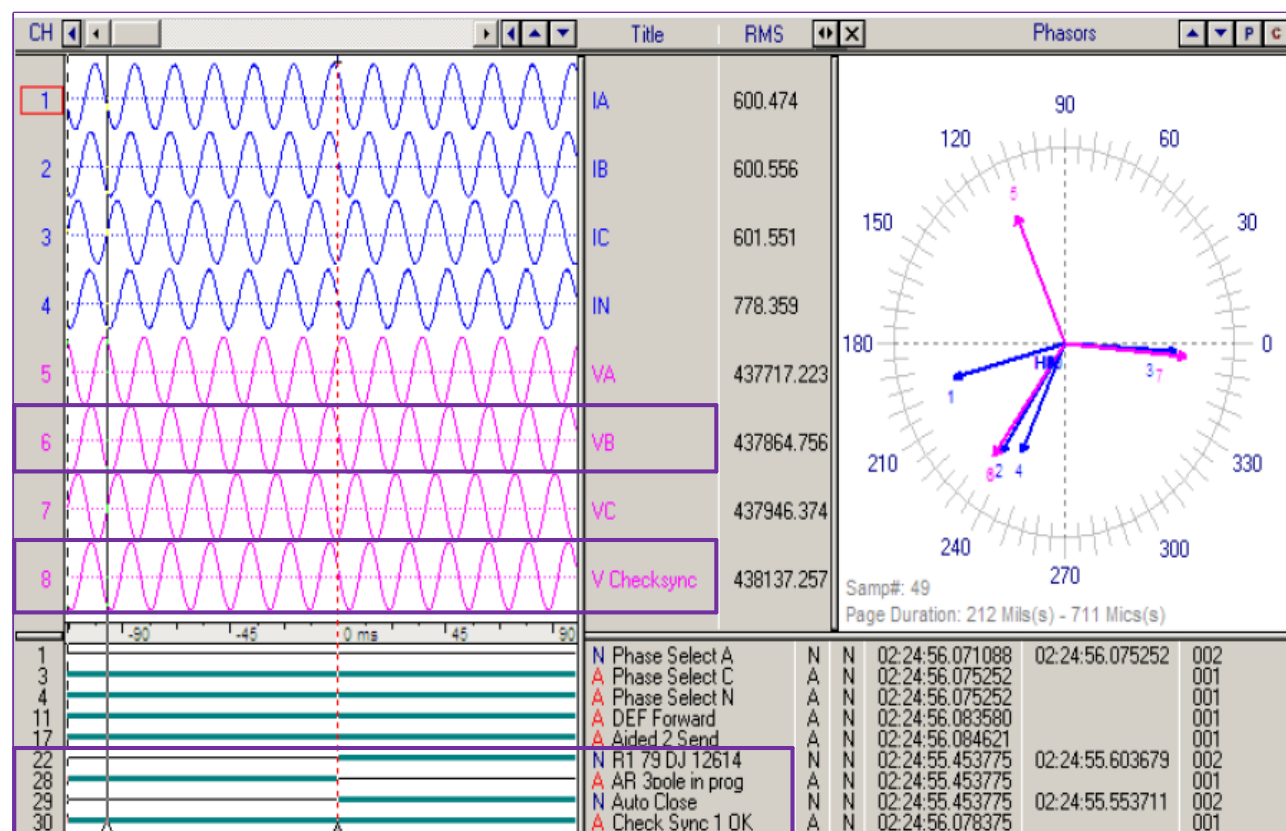
Figura 40-Resultado da simulação do teste.



Fonte: O autor, (2022).

A Figura 41 ilustra o processo de religamento automático efetuado com sucesso, no qual podemos observar que a função de sincronismo atuou corretamente e o disjuntor da linha de transmissão foi religado automaticamente, conforme destacados em roxo na figura 40.

Figura 41-Eventos e oscilografia da lógica de religamento automático.

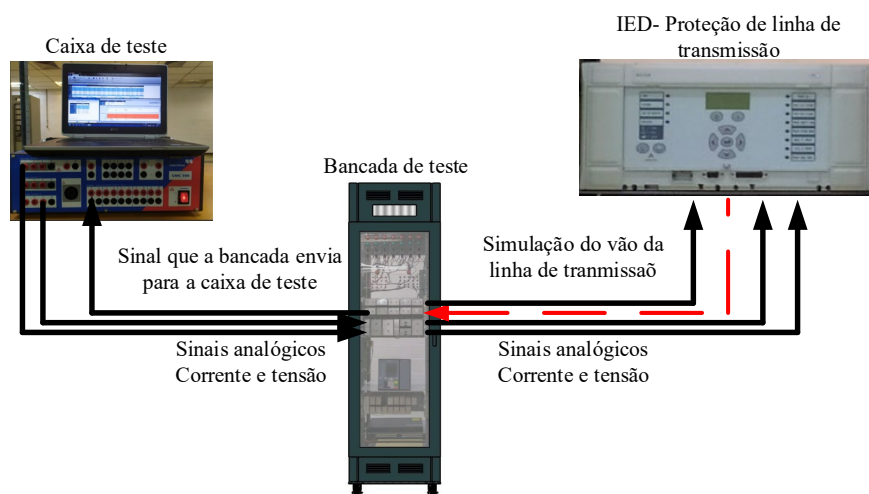


Fonte: O autor, (2022).

- Lógica de Monocanal

O teste na lógica de monocanal tem por objetivo verificar a recepção de transferência de disparo nos disjuntores da linha de transmissão, quando na falha de um canal de teleproteção, a Figura 42 ilustra a simulação do teste na lógica de monocanal.

Figura 42-Simulação do teste da falha de canal.



Fonte: O autor, (2022).

Para a realização do teste da lógica de monocanal, a bancada simulou os

sinais dos equipamentos elétricos que compõem o vão da linha de transmissão, conforme o sistema apresentado no início desta seção, como disjuntores, chave seccionadoras, sinais de teleproteção e a falha de canal, enviando esses sinais para as entradas digitais do relé. E a caixa de teste simulou o sinais de tensão e corrente para simular uma falta na linha de transmissão, enviando esses sinais para as entradas analógicas do relé.

A Tabela 17 apresenta os dados do sistema que foram implementados no relé através do memorial de ajuste que foi apresentado no capítulo 3. Esses dados servirão de referência para simulação de curto-circuito no teste na lógica de falha de canal.

Tabela 17-Parametrização do relé.

Equação	Variável	Parâmetro	Ajuste
1	RTP	Relação de transformação	6600
2	RTC	Relação de transformação	600
12	Z Linha	Impedância da linha	9,85 Ω
13	\emptyset	Ângulo da linha	88°
34	X _{1sec}	Impedância Z ₂	14,76 Ω
35	Z ₁ %	% alcance em Z ₂	150%

Fonte: Micom S1 Ajustes,(2022).

Na Tabela 18 pode-se observar os valores de tensão e corrente, que foram injetados no relé para a realização do teste na lógica de monocanal e ajustados de acordo com o memorial de ajuste apresentado no capítulo 3 e os dados da tabela acima, a fim de simular uma falta bifásica na linha de transmissão em Z₂. Para isso considerou-se um cenário de pré-falta e outro com uma falta na linha de transmissão. Na coluna que está sombreada em vermelho temos os valores de tensão e corrente no cenário de falta na linha de transmissão. Essas etapas foram simuladas no software caixa de teste omicron, o *State Sequencer*.

Tabela 18-Valores de tensão e corrente para teste na lógica de teleproteção.

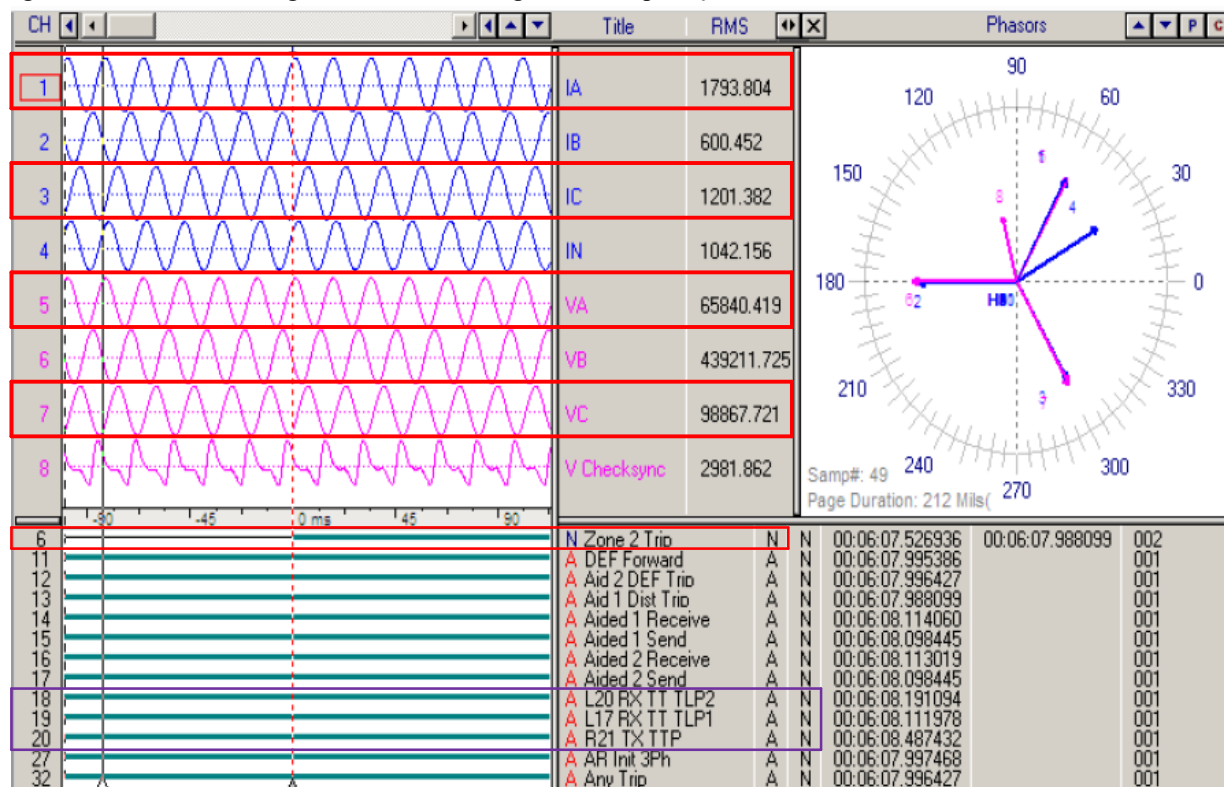
Sinais Analógicos	Pré- Falta	Falta na Linha
VA	66,6L120° V	10L120° V
VB	66,6L240° V	66,6L240° V
VC	66,6L0° V	15L0° V
IA	1L120° A	3L120° A
IB	1L240° A	1L240° A
IC	1L0° A	2L0° A

Fonte: O autor, (2022).

A Figura 43 ilustra o resultado do teste da lógica de monocanal. O relé detectou uma falta bifásica em Z₂, com destaque em vermelho, de forma que podemos observar um curto-circuito envolvendo as fases A e C. No destaque em roxo pode-se

evidenciar que a lógica de monocanal funcionou corretamente durante a realização do teste, ressaltando-se que a bancada simulou os sinais necessários para a validação da operação da lógica de monocanal, garantindo que o teste foi realizado conforme os parâmetros e ajustes inseridos no relé.

Figura 43-Eventos e oscilografia do relé teste lógicas de teleproteção.



Fonte: O autor ,(2022).

- Fechamento Sob-Falta

Tem por objetivo testar a lógica de fechamento sob-falta da linha de transmissão. Esta lógica permite o disparo do disjuntor por meio da função de sobrecorrente, ou seja, para uma falta ocorrida na linha de transmissão durante a energização. A bancada simula para o relé a condição da linha desenergizada através de combinação do estado dos disjuntores abertos e as seccionadoras do vão e da linha de transmissão fechadas. Também simula-se pela bancada o comando de fechamento disjuntor para ativação desta lógica. São ilustrados na Tabela 19 os valores de corrente que foram ajustados no relé de acordo com o memorial de ajuste apresentado no capítulo 3.

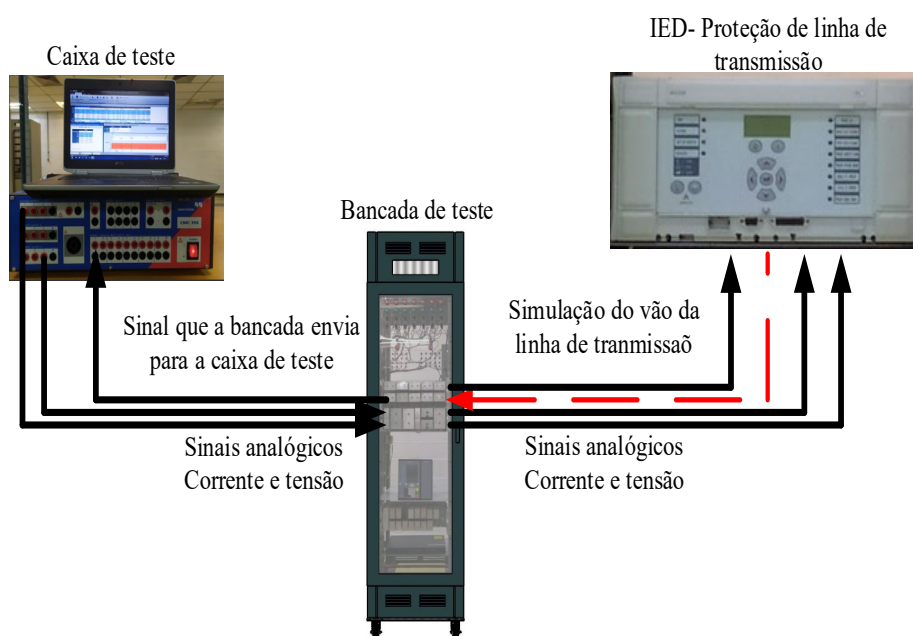
Tabela 19-Parâmetros da função de sobrecorrente.

Equação	Variável	Parâmetro	Ajuste
	RTC	Relação de transformação	600:1
38	Pick-up	Corrente de curto-circuito mínimo	15A
	T	Tempo de atuação	Instantâneo

Fonte: Micom S1 Ajustes, (2022).

A Figura 44 ilustra a simulação do teste da lógica de fechamento sob-falta de acordo com o sistema apresentado no início desta seção, sendo simulados pela bancada todos os sinais dos estados dos equipamentos elétricos, como chave seccionadoras e disjuntores que compõem o vão da linha de transmissão, e esses sinais são enviados para as entradas digitais do relé, também simulou-se na bancada o comando de fechamento do disjuntor para a realização do teste.

Figura 44- Lógica de fechamento sob-falta.



Fonte: O autor, (2022).

Através do módulo *State Sequence do software* da caixa de teste omicron, foram simulados os sinais analógicos enviados ao relé. Em primeiro estágio simulou-se uma condição normal de pré-falta com o disjuntor da linha de transmissão aberto.

Após esta etapa simulou-se uma condição de energização sob-falta, realizando-se o comando de fechamento do disjuntor da linha de transmissão. Esse comando foi simulado pela bancada, que enviou os sinais para as entrada digitais do relé. No mesmo instante a caixa de teste simulou um curto-circuito no relé, e nela verificou-se a atuação da função de *Switching onto a fault (SOTF)* do relé P443 Areva, que enviou o sinal de abertura do disjuntor para a bancada de teste, e esta enviou um sinal para caixa, validando o teste.

Na Tabela 20 podem ser observados os sinais analógicos que foram injetados no relé de acordo com os parâmetros e ajuste do relé ilustrados na tabela 19, em que na primeira coluna está o cenário de pré-falta e na segunda coluna o cenário de energização sob-falta.

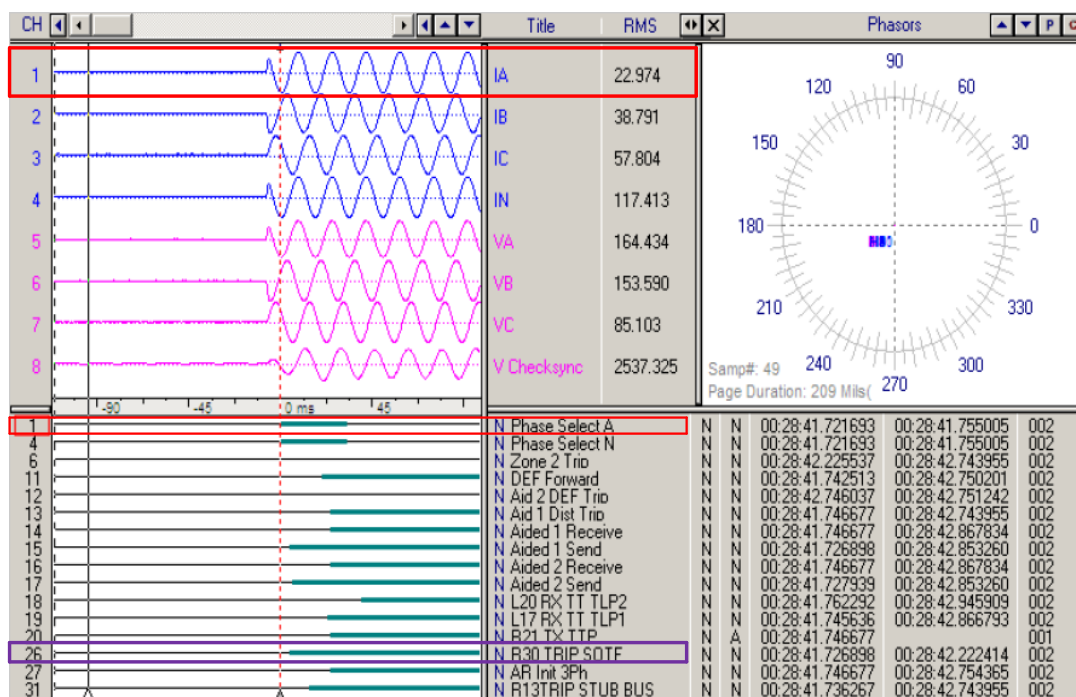
Tabela 20-Sinais analógicos injetados no relé.

Sinais Analógicos	Pré-falta	Energização sob-falta
VA	66,6L120° V	5L120° V
VB	66,6L240° V	66,6L240° V °
VC	66,6L0° V	66,6L0° V
IA	1L120° A	15L120° A
IB	1L240° A	1L240° A
IC	1L0° A	1L0° A

Fonte: O autor ,(2022).

Apresenta-se, na Figura 45, o resultado do teste da lógica de fechamento sob-falta, de forma que podemos observar que a bancada simulou todos os sinais necessários para a validação do teste. O relé detectou uma falta na fase A, destacada em vermelho, e a atuação da lógica de fechamento sob-falta, destacada em roxo.

Figura 45- Eventos e oscilografia da lógica de fechamento sob-falta.



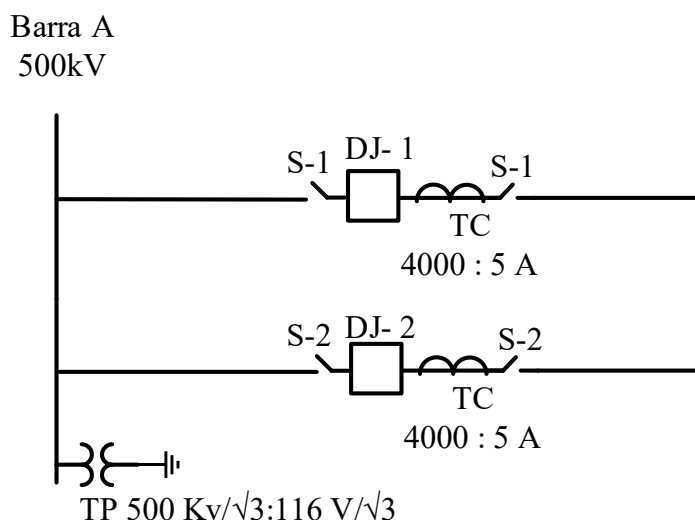
Fonte: O autor ,(2022).

6.2 PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE BARRAS

A Figura 46 ilustra um diagrama unifilar dos vãos da barra que a bancada

simulou para a realização deste teste, devido ao fato de a função diferencial ter sido ajustada para não atuar por aparecimento de correntes diferenciais falsas. Para isso faz-se necessário informar ao relé as situações dos vãos, como disjuntores e seccionadoras, essas informações são processadas pela lógica inserida no relé e, em conjunto com a função diferencial, faz com que o relé opere corretamente.

Figura 46-Unifilar dos vãos montados na bancada.



Fonte: O autor, (2022).

Na Tabela 21 são apresentados os ajustes que foram parametrizados na proteção diferencial de barra, servindo de referência para o teste na função diferencial, de acordo com o memorial de ajuste apresentado no capítulo 3.

Tabela 21-Ajuste da proteção diferencial de barras.

Equação	Variável	Parâmetro	Ajuste
	RTC	Relação de transformação	4000:5 A
40	Idiff	Ajuste da função diferencial	2200A
41	OCTO	Mínimo valor de pick-up	800A
42	OCTReleaselev	Nível de ajuste da Idiff	5200A
43	IdAlarmlev	Nível de alarme da Idiff	400 A
35	IinAlarmlev	Nível de alarme de corrente entrando na barra	4000A

Fonte: Memorial de cálculo de ajuste da proteção de barras de 500kV, (2022).

Na Tabela 22 são apresentados os resultados do teste do levantamento de curva da função diferencial da barra de 500kV, sendo que neste teste simulou-se um curto-circuito na barra com dois vãos em operação. Esses valores que estão nas tabelas são correntes de curto-circuito, considerando-se o defeito curto-circuito monofásico. Para efeito de apresentação do resultado, será apresentado apenas o resultado da fase A, visto que os resultados das outras fases apresentaram-se iguais devido ao fato de o sistema de teste ser equilibrado.

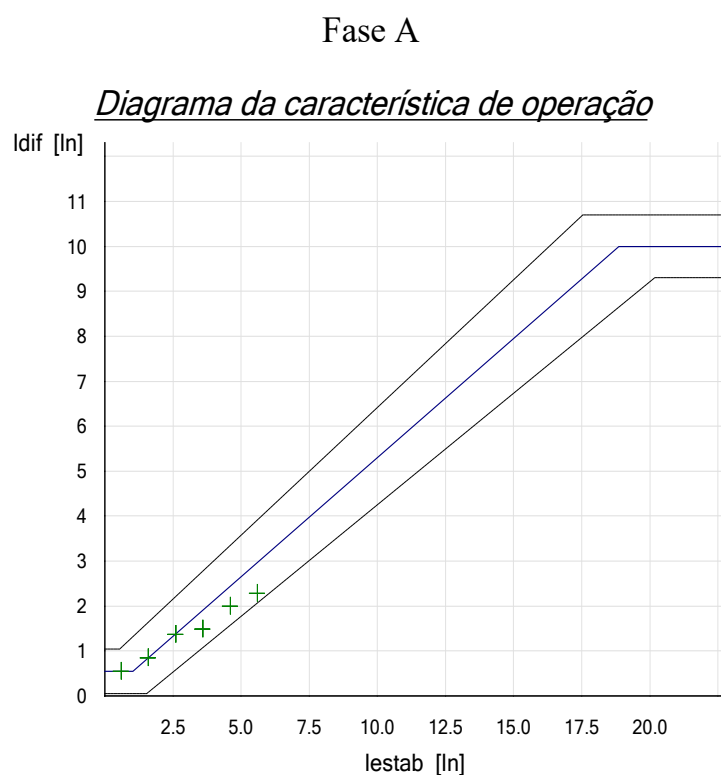
Tabela 22-Resultado do teste fase A.

I _{estab}	I _{diff} Nominal	I _{diff} real	Estado	Resultado
0.60 In	0.550 In	0.546 In	Testado	Aprovado
1.60 In	0.847 In	0.844 In	Testado	Aprovado
2.60 In	1.377 In	1.368 In	Testado	Aprovado
3.60 In	1.908 In	1.487 In	Testado	Aprovado
4.60 In	2.438 In	2.000 In	Testado	Aprovado
5.60 In	2.969 In	2.287 In	Testado	Aprovado

Fonte: O autor, (2022).

A figura 47 apresenta o diagrama da curva característica de operação da proteção diferencial referente à fase A, em que as curvas de operação do relé estão referenciadas com a curva característica apresentada nesta subseção, sendo que I_{diff} corresponde à corrente diferencial de operação do relé e a I_{estb} à corrente de estabilização. Os pontos na curva são a operação da proteção referente a um curto-circuito.

Figura 47- Diagrama da curva característica de operação fase A.

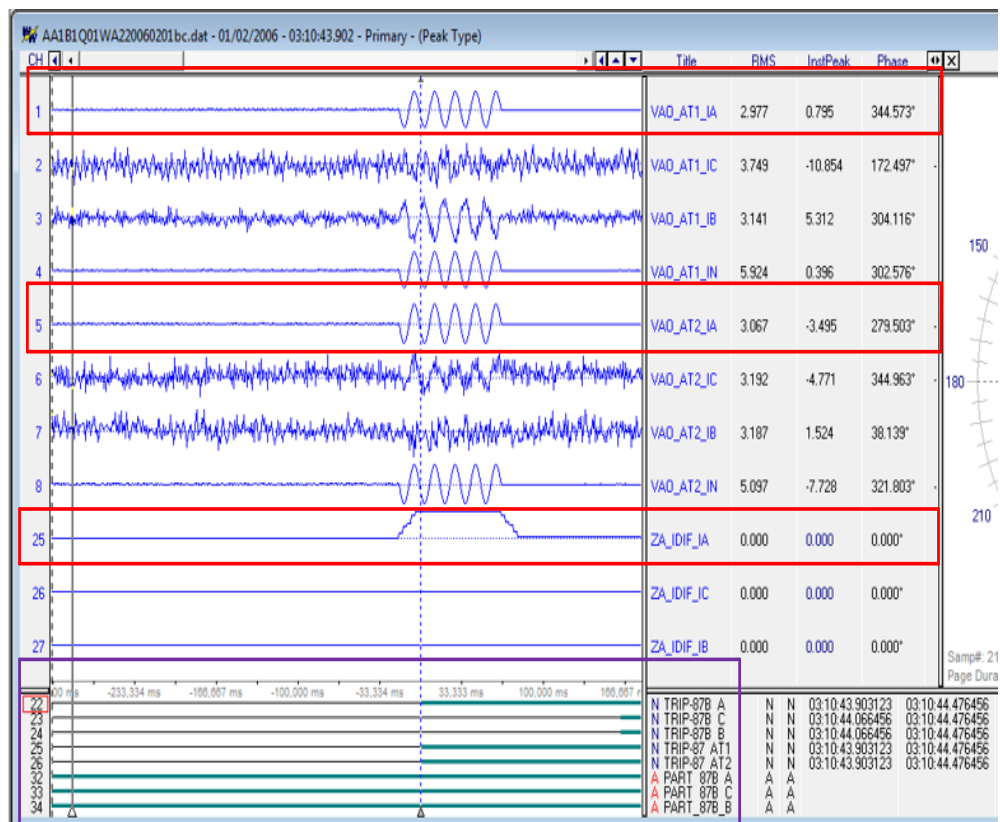


Fonte: O autor (2022).

A Figura 48 apresenta a oscilografia e os eventos que foram extraídos do relé após a realização do teste referente à fase A, no qual podemos observar que a proteção diferencial atuou corretamente com as informações que a bancada enviou para o relé. Pode-

se notar que a proteção diferencial atuou para um curto-circuito monofásico entre os vãos que foram simulados na bancada. Em vermelho temos a atuação da proteção diferencial e em roxo a saída de disparo que o relé efetuou, enviando esses sinais para a bancada, onde o teste foi validado.

Figura 48- Eventos e oscilografia da proteção diferencial fase A.

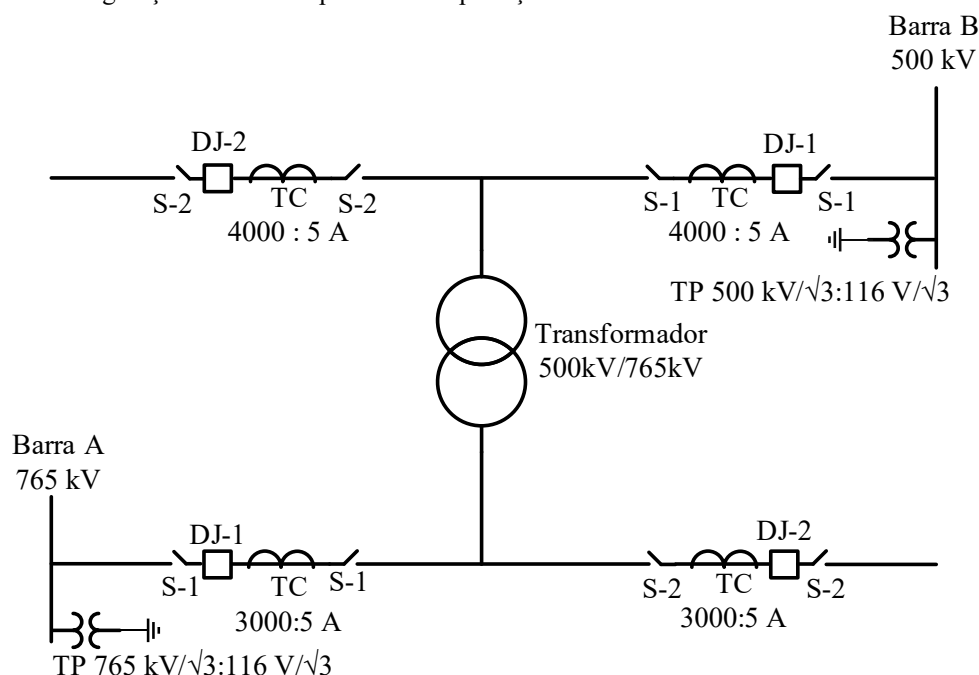


Fonte: O autor ,(2022).

6.3 PROTEÇÃO DO AUTOTRANSFORMADOR

Nesta seção serão apresentados os testes que foram realizados na proteção 7UT87 da Siemens, dos bancos de autotransformadores 500/765/69kV da subestação de Furnas em Foz do Iguaçu, onde foram realizados os testes na função diferencial 87, sobrecorrente 51, correspondentes aos lados de 765,500 e 69kV do autotransformador. A Figura 49 ilustra o sistema configurado na bancada para os testes na proteção do transformador.

Figura 49- Configuração da bancada para teste na proteção do autotransformador.



Fonte: O autor, (2022).

- Função Diferencial

Na Tabela 23 são apresentados os ajustes da função diferencial para o teste de levantamento da curva característica da proteção diferencial. Esses ajustes foram parametrizados de acordo com o memorial de ajuste apresentado no capítulo 3. A caixa de teste foi parametrizada de acordo com os ajustes e a curva característica do relé. Os testes foram realizados envolvendo uma falta monofásica entre o enrolamento primário e secundário do transformador.

Tabela 23-Ajuste da função diferencial para teste na curva característica.

Threshold (Pick-up)	0,2 In
Slope 1	0,3
Intersection 1	0,67In
Slope 2	70%
Intersection 2	2,5 In
Threshold add-on estabiliz	2,0In
Threshold (Sem restrição)	11In

Fonte: O autor, (2022).

Na Tabela 24 são apresentados os resultados dos testes realizados na proteção diferencial com os respectivos valores da corrente diferencial de cada fase do transformador, para o seguinte tipo de defeito: curto-circuito monofásico e teste do enrolamento de alta contra o enrolamento de baixa.

No caso das colunas das tabelas, as quais apresentam as correntes de diferenciais, a corrente de estabilização e a corrente real de operação da proteção diferencial

que foram injetadas pela caixa de teste no relé para o levantamento da curva característica da função diferencial 87, será apresentado apenas o resultado da fase A, visto que os resultados das outras fases apresentaram-se iguais, devido ao fato de o sistema de teste ser equilibrado.

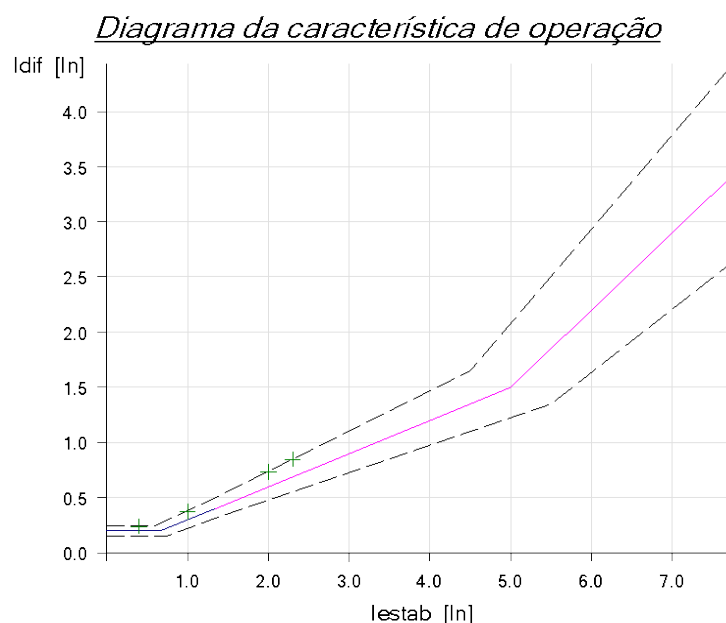
Tabela 24-Corrente diferencial fase A.

I_{estab}	I_{diff} Nominal	I_{diff} real	Resultado
0.40 In	0.200 In	0.241 In	Aprovado
1.00 In	0.299 In	0.370 In	Aprovado
2.00 In	0.598 In	0.735 In	Aprovado
2.30 In	0.689 In	0.846 In	Aprovado

Fonte: O autor ,(2022).

A Figura 50 apresenta o diagrama da curva característica de operação da proteção diferencial referente à fase A, em que as curvas de operação estão referenciadas com a curva característica da proteção diferencial. O I_{diff} corresponde à corrente diferencial de operação do relé e a I_{estb} à corrente de estabilização, os pontos na curva são a operação da proteção referente a um curto-circuito.

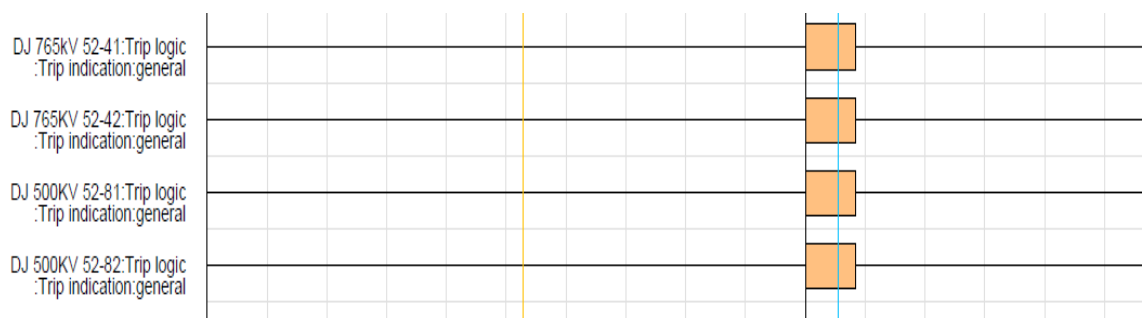
Figura 50-Característica de operação fase A.



Fonte: O autor, (2022).

Os sinais de abertura dos disjuntores monitorados pela bancada de teste são ilustrados na Figura 51, em que se observa que a função diferencial enviou os sinais de abertura para os disjuntores de alta e de baixa, de acordo com a parametrização da função diferencial. O método deste teste é realizar a atuação da proteção do transformador para analisar os comportamentos das saídas binárias do relé, as quais atuaram corretamente.

Figura 51- Monitoramento de abertura dos disjuntores.



Fonte: O autor, (2022).

- Função 51 HR lado 765kV

Na Tabela 25 são apresentados os ajustes da função de sobrecorrente 51HR, os quais referenciaram os testes realizados nesta função. A curva característica da função de sobrecorrente também foi definida de acordo com o memorial de ajuste da função de sobrecorrente ilustrado no capítulo 3, como os sinais analógicos que a caixa de teste injetou para realização do teste na função de sobrecorrente, a qual foi configurada levando-se em consideração os ajustes e a curva característica da função de sobrecorrente.

Tabela 25-Ajuste da função de sobrecorrente lado 765kV.

Potência do transformador	1650MVA
Tensão	765kV
Corrente	1245 A
RTC	3000:5A
I pick-up	0,42 A
Tipo da curva característica	Muito inversa
Dial de tempo	1,13

Fonte: O autor,(2022).

Na Tabela 26 são apresentados os resultados dos testes realizados na função de sobrecorrente, com os respectivos valores de corrente e tempo de atuação da função de sobrecorrente. Esta função atua como uma proteção de retaguarda da função diferencial e protege o enrolamento de 765 kV do transformador, no qual o tipo de defeito foi um curto-circuito monofásico. Será apresentado apenas o resultado da fase A, visto que os resultados das outras fases apresentaram-se iguais devido ao fato de o sistema de teste ser equilibrado.

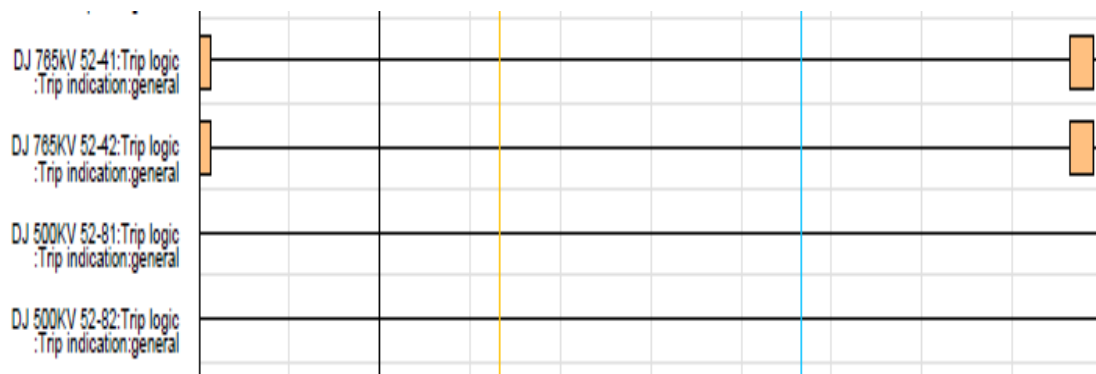
Tabela 26-Atuação da função de sobrecorrente do lado de 765kV fase A.

Tipo	Fator	Magnitude	Tnom	T atual	Resultado
A-N	2.000	0.84 A	15.26 s	15.31 s	Aprovado
A-N	3.000	1.26 A	7.628 s	7.683 s	Aprovado
A-N	4.000	1.68 A	5.085 s	5.154 s	Aprovado
A-N	5.000	2.10 A	3.814 s	3.874 s	Aprovado
A-N	5.000	2.10 A	3.814 s	3.879 s	Aprovado

Fonte: O autor, (2022).

Os sinais de abertura dos disjuntores monitorados pela bancada de teste são ilustrados pela Figura 52, na qual se observa que a função de sobrecorrente enviou os sinais de abertura para os disjuntores do enrolamento de alta, de acordo com o que foi parametrizado no relé.

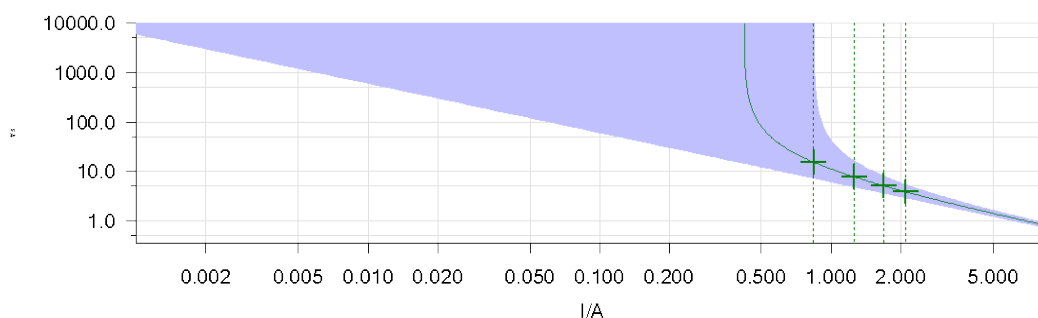
Figura 52-Monitoramento de abertura dos disjuntores do lado do enrolamento de 765kV.



Fonte: O autor ,(2022).

A Figura 53 ilustra a curva característica da função de sobrecorrente que foi levantada durante o teste na função de sobrecorrente. Na curva são ilustrados os tempos de atuação da função de sobrecorrente em relação ao nível de corrente que foi aplicada no relé durante o teste.

Figura 53-Curva de teste realizado na função de sobrecorrente fase A.



Fonte: O autor (2022).

- Função 51MR lado 500kV

Na Tabela 27 são apresentados os ajustes da função de sobrecorrente 51MR do lado de 500kV, na qual os testes realizados foram referenciados por esses ajustes ilustrados no capítulo 3.

Tabela 27-Ajuste da função de sobrecorrente lado 525kV.

Potência do transformador	1650MVA
Tensão	500kV
Corrente	1815 A
RTC	4000:5A
I pick-up	0,45A
Tipo da curva característica	Muito inversa
Dial de tempo	1,04

Fonte: O autor ,(2022).

O resultado do teste realizado na função de sobrecorrente do lado de 500kV é mostrado na Tabela 28, na qual são apresentados os respectivos valores de correntes e tempos de atuação da função de sobrecorrente. Esta função atua como uma proteção de retaguarda da função diferencial e protege o enrolamento de 500 kV do transformador, sendo que o tipo de defeito foi um curto-circuito monofásico. Será ilustrado apenas o resultado da fase A, visto que os resultados das outras fases apresentaram-se iguais devido ao fato de o sistema de teste ser equilibrado, o que demonstra que o relé atuou corretamente.

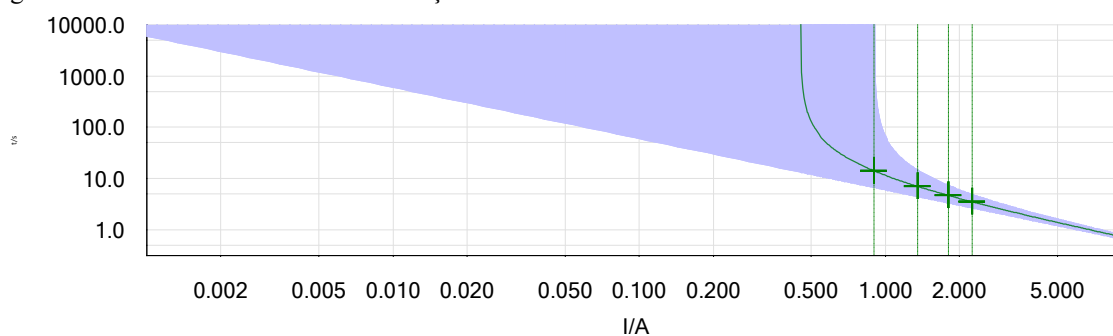
Tabela 28-Atuação da função de sobrecorrente do lado de 525kV fase A.

Tipo	Fator	Magnitude	T nom	T atual	Resultado
A-N	2.000	0.90 A	14.04 s	14.08 s	Aprovado
A-N	3.000	1.35 A	7.020 s	7.075 s	Aprovado
A-N	4.000	1.80 A	4.680 s	4.741 s	Aprovado
A-N	5.000	2.25 A	3.510 s	3.580 s	Aprovado

Fonte: O autor ,(2022).

A Figura 54 ilustra as curvas características da função de sobrecorrente que foram levantadas durante o teste na função de sobrecorrente. Nas curvas são apresentados os tempos de atuação da função de sobrecorrente em relação ao nível de corrente que foi aplicada no relé durante o teste. O método deste teste é realizar a atuação da proteção do transformador para analisar os comportamentos das saídas binárias do relé.

Figura 54-Curva de teste realizado na função de sobrecorrente fase A lado de 525kV.

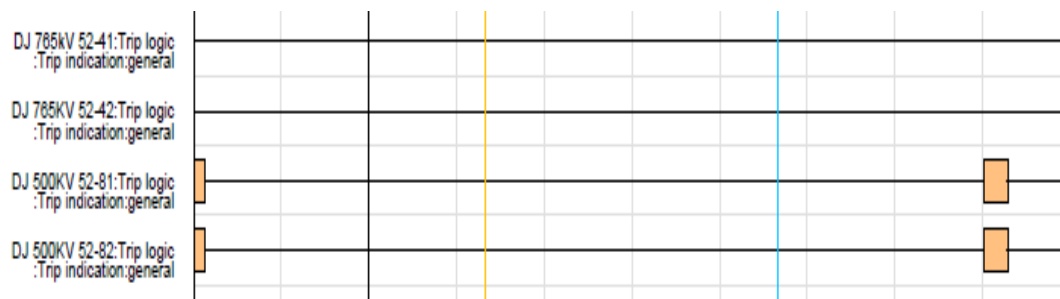


Fonte: O autor (2022).

Na figura 55 são apresentados os sinais de abertura dos disjuntores que foram monitorados pela bancada. Esses sinais foram efetuados pelo relé durante o teste na

função de sobrecorrente, e podemos observar que essa função enviou o sinal de abertura para os disjuntores do lado baixa do transformador, de acordo com a parametrização do relé.

Figura 55-Monitoramento de abertura dos disjuntores do lado do enrolamento de 500kV.



Fonte: O autor ,(2022).

- Função 51 T lado 69kV

Na Tabela 29 são ilustrados os ajustes da função de sobrecorrente 51T. Os testes realizados nesta função foram referenciados por esses ajustes, ilustrados no capítulo 3.

Tabela 29-Ajuste da função de sobrecorrente lado 69kV.

Potência do transformador	15MVA
Tensão	69kV
Corrente	126 A
RTC	1500:5A
I pick-up	1,26A
Tipo da curva característica	Muito inversa
Dial de tempo	1,13

Fonte: O autor (2022).

Na Tabela 30 são ilustrados os resultados do teste realizado na função de sobrecorrente com os respectivos valores de corrente e tempo de atuação da função de sobrecorrente. Esta função protege o enrolamento de 69 kV do transformador, em que o tipo de defeito foi um curto-circuito monofásico. Será apresentado apenas o resultado da fase A, visto que os resultados das outras fases apresentaram-se iguais devido ao fato de o sistema de teste ser equilibrado, demonstrando que o relé atuou corretamente.

Tabela 30-Atuação da função de sobrecorrente do lado de 69kV fase A.

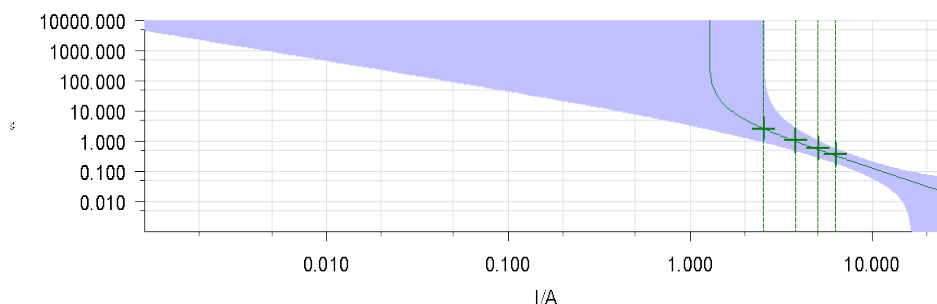
Tipo	Fator	Magnitude	T nom	T atual	Resultado
A-N	2.000	2.52 A	2.667 s	2.739 s	Aprovado
A-N	3.000	3.78 A	1.000 s	1.080 s	Aprovado
A-N	4.000	5.04 A	533.3 ms	611.3 ms	Aprovado
A-N	5.000	6.30 A	333.3 ms	391.9 ms	Aprovado

Fonte: O autor, (2022).

Na Figura 56 são apresentadas as curvas características da função de

sobrecorrente que foram levantadas durante o teste na proteção do transformador. Na curva são ilustrados os tempos de atuação da função de sobrecorrente em relação ao nível de corrente que foi aplicada no relé durante o teste.

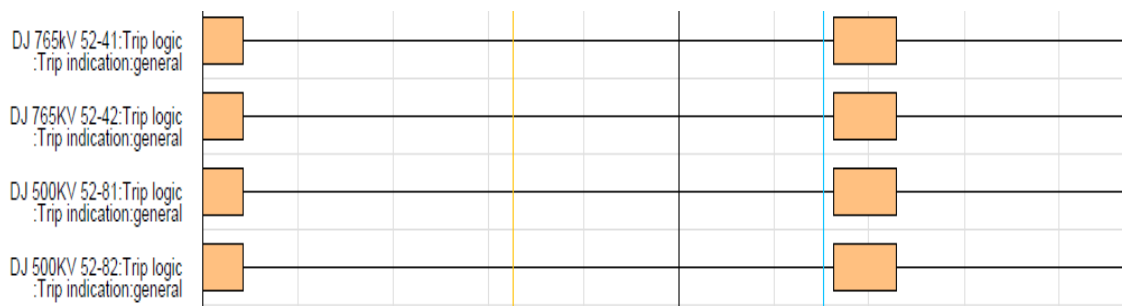
Figura 56-Curva de teste realizado na função de sobrecorrente fase A lado de 69kV.



Fonte: O autor ,(2022).

Na Figura 57 são mostradas as saídas dos sinais de abertura que o relé efetuou durante a realização do teste na função 51 T, no lado de 69 kV. Podemos observar que essa função efetuou abertura nos disjuntores do lado do enrolamento de alta e baixa do transformador. Para eliminar um curto-circuito no enrolamento do lado de 69kV é necessária a abertura de todos os disjuntores que compõem o vão do autotransformador.

Figura 57-Monitoramento de abertura dos disjuntores do lado do enrolamento de 69kV.



Fonte: O autor ,(2022).

Neste capítulo foram apresentados os principais resultados da metodologia proposta, de modo que para cada teste foi elaborado um cenário para sua realização, testando-se as funções e lógicas de proteção, para avaliação do comportamento da bancada em relação aos testes que foram realizados. Ressalta-se que foram simuladas na bancada condições operativas de vãos de subestações como sinais de equipamentos elétricos com disjuntores, seccionadoras e sinais de equipamentos de teleproteção para cada teste que foi realizado.

A metodologia proposta foi o desenvolvimento de uma bancada de teste para ser utilizada como uma ferramenta por equipes de manutenção de proteção de sistemas

elétricos de potência, simulações de falhas ocorridas nos sistemas elétricos de potência, comissionamento de sistemas digitais de proteção e controle.

7 CONCLUSÕES

Neste trabalho apresentou-se o desenvolvimento, concepção e o projeto concretizado de uma bancada de teste, que foi concebida com equipamentos no seu estado da arte e que simula sinais de equipamentos elétricos como disjuntores, seccionadoras e sinais de equipamentos de teleproteção. Trata-se de uma ferramenta para realizar testes em funções e lógicas de relés digitais, simulações de falhas ocorridas no sistema elétrico de potência e comissionamento de sistemas de proteção e controle. Além disso, pode-se utilizar a bancada de teste para atender uma demanda específica do setor elétrico, na capacitação de profissionais de manutenção, operação de subestações e usinas de geração de energia elétrica.

A metodologia, aplicada por meio da análise de resultados de testes em lógicas e funções de proteção de sistemas elétricos, teve o propósito de atender o objetivo desta pesquisa em validar o desenvolvimento da bancada de teste.

O trabalho apresentou conceitos do estado da arte de testes em sistemas de proteção de sistemas elétricos de forma contextualizada e memorial de ajustes de uma maneira prática, uma vez que foram realizados testes de comissionamento da bancada, testes em lógicas e funções de proteção de sistemas elétricos de potência.

O trabalho desenvolvido mostrou a análise de resultados dos testes realizados em lógicas em proteção de linha de transmissão, em funções de proteção de barras de subestação e autotransformadores, demonstrando que a bancada simulou todos os sinais necessários para o funcionamento correto das lógicas inseridas nos relés e para a atuação corretas das funções de proteção.

Podemos destacar as configurações de diagramas unifilares que foram estruturados na bancada, atendendo as mais diversas formas e condições de aplicação a cada projeto novo e testes de comissionamento, permitindo a avaliação de ajustes, lógicas e as funcionalidades de todas as interfaces (entradas e saídas digitais, entradas analógicas e intertravamentos elétricos). A bancada de testes atendeu aos requisitos de normas internacionais que abordam procedimentos de testes em sistemas de proteção.

Apresentaram-se os procedimentos de testes a serem realizados na bancada, descrevendo-se as funcionalidades e sua aplicação, de modo a fornecer um roteiro para a utilização da bancada em laboratório de teste.

Uma característica que difere a metodologia proposta desta pesquisa das demais existentes na literatura é a possibilidade de testar, comissionar e simular falhas ocorridas no sistema elétrico, em funções, lógicas de sistemas de proteção e controle, em distintas configurações de vãos de subestações, de forma prática e detalhada, para ser utilizada em laboratórios de manutenção, na capacitação dos profissionais que atuam na área de manutenção e operação das empresas do setor elétrico.

A pesquisa mostra-se inovadora visto que desenvolveu uma bancada didática que pode ser aplicada em testes e capacitação de profissionais. Para isso foi realizada busca de patentes na literatura, para comprovar a inexistência de uma bancada similar, efetuou-se um depósito de propriedade intelectual. Desse modo, contribui-se para fomentar uma ferramenta prática e adequada às necessidades de profissionais de proteção de sistemas elétricos, para difundir conhecimentos aos profissionais que atuam no sistema elétrico de potência.

A capacidade de se realizar testes em sistemas digitais de proteção e controle, simulando sinais de equipamentos elétricos de um *bay* de uma linha de transmissão, *bays* de barras de subestações ou *bay* de autotransformadores, de forma segura, sem riscos de desligamentos acidentais de uma linha de transmissão ou equipamentos de subestações e dando segurança para os profissionais que estão executando os testes, atesta a praticidade e a eficiência da bancada.

O trabalho apresentado teve como objetivo o desenvolvimento de uma bancada de teste, sendo está uma ferramenta para ser utilizada em testes de proteção e controle de sistemas elétricos e capacitação de profissionais das empresas do setor elétrico. Algumas sugestões de trabalhos futuros são sugeridas a seguir:

- A inclusão da bancada em testes de proteção e controle de sistemas de transmissão de corrente contínua.
- A interação da bancada de teste com o sistema aberto de gerenciamento de energia elétrica (SAGE).
- Teste em proteção diferencial de linha de transmissão simulando os dois terminais da linha de transmissão.
- A inclusão do cenário de realidade virtual na bancada para testes a distância em sistemas de proteção e controle e a capacitação de profissionais.
- Desenvolvimento de tecnologia para inclusão de registros de perturbações e análise de defeitos em sistemas elétricos de potência.

- Integração das funcionalidades da mala de testes e das fontes a bancada.
- A inserção da bancada de teste em laboratórios de universidades.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBOUD, R., GOLDMAN, F. L., SOARES, W.F. Desafios e Soluções na Proteção de uma Linha de Transmissão longa, XIX SNPTEE SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, Rio de Janeiro, 2007, Furnas Centrais Elétricas, Schweitzer Engineering Laboratories.

ADABO, J., JUNIOR, P.R.A.S., PEREIRA, C.A.J.G., PIAZEZETA, D.L., Simulador de IED's Utilizando Arquivos ICD/SCD, XI SIMPÓSIO DE AUTOMAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS – SIMPASE, Campinas, 2015.

ALI, M, A. Hybrid Technique for Testing IEC 61850 Based IEDs of Distance Protection. In: 2017. (Elsayed, AM, Org.)2017 Nineteenth International Middle East Powe System Conference (MEPCON), Shoubra, Egito, 2017. p. 353–358.

ALMEIDA, M. A. D., FONTES, M. C., OLIVEIRA, A. V. C. Plataforma Didática Compatível com A Norma IEC61850 Para Comissionamento de Sistema Digital de Controle e Proteção de Subestações. Anais do VI Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Natal, p. 1–6, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.20906/cps/sbse2016-0159>.

AWODELE, K., JANKEE, P. Design of An Iec61850 Based Substation Automation and Protection Panel : Including Peer to Peer Relay Communication, Proc. - 2019 South. African Univ. Power Eng. Conf. Mechatronics/Pattern Recognit. Assoc. South Africa, SAUPEC/RobMech/PRASA 2019, pp. 570–575, 2019. DOI: 10.1109/Robomech.2019.8704775.

BERNARDES, W. M. S. Análise da Proteção de Sistemas de Energia Elétrica Utilizando Técnicas Modernas de Otimização Heurística, Tese Apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Doutor em Ciências - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, São Carlos, 2018.

BENCZ, E. CRUZ I., León H.; 2017_TESTES E COMISSIONAMENTO EM SUBESTAÇÕES_METODOLOGIAS_IEC61850. In: 2017. Facilitando as Etapas de Testes e Comissionamentos em Subestações Através das Novas Metodologias Propostas pela IEC61850, Curitiba, 2017. p. 1689–1699.

C37.233 IEEE Guide for Power System Protection Testing, 2009.

CARDOSO, P.E.P., Avaliação do Impacto em Comissionamento e Testes de Funcionamento numa Subestação com Protocolo CEI 61850. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores Major Energia, Universidade do Porto, 2013.

CHEN, L., Virtual Site Acceptance Test Platform for IEC 61850 Based Substations with Multi-vendor Bay Solutions. Journal of Engineering-Joe, Manchester, Reino Unido, n. 15, p. 791–795, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1049/joe.2018.0167>.

COTOSCK, K.R. Proteção de Sistemas Elétricos: Uma Abordagem Técnico-Pedagógica. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, Belo Horizonte, 2007.

CARLONE, M., GANDHI, A., KULKARNI, C., MORINEC, A.G., PRABHAKAR, M.C., SUMMERFORD, Z., VERNA, T., A. Teaching Protective Relaying Using a Portable Relay Training Laboratory, 2020 52nd North Am. Power Symp. NAPS 2020, 2021. DOI: 10.1109/NAPS50074.2021.9449762.

DIAS, O. F.R., MAGRIN, F.G.S., TAVARES, M.C.D., F. MÉTODO DE RELIGAMENTO MONOPOLAR E TRIPOLAR ADAPTATIVO RÁPIDO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO. Depositante: Luciana Alboccino Barbosa BR102015020352-7 24/08/2015 Deposito: 24/08/2015 Concessão: 24/04/2018.

DUARTE, A. C. R. Equipamentos de Geração e Transmissão: Conceitos e Critérios, Ed.: Artliber, São Paulo, 2018 – ONS.

ENAYATI, A., ORTMEYER, T.H., A. Development of a power system protection Laboratory/Test-Bed at Clarkson University,” *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, vol. 2018-Janua, pp. 1–5, 2018. DOI; 10.1109/PESGM.2017.8274351.

ENSSLIN, L; ENSSLIN, S. R, PINTO, H, M. Processo de Investigação e Análise Bibliométrica: Avaliação da Qualidade dos Serviços Bancários. *Revista de Administração Contemporânea*, Florianópolis, v. 17, n. 3, p. 325–349, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1415-65552013000300005>.

ENSSLIN, S. R. et al., Processo Estruturado de Revisão da Literatura e Análise Bibliométrica Sobre Avaliação de Desempenho de Processos de Implementação de Eficiência Energética. *Revista Brasileira de Energia*, Florianópolis, v. 20 n.1, p. 21–50, 2014.

FAIRCHILD, R., GIRI, J., PARASHAR, M., SRINIVASAN, R. Simulador de Treinamento de Expedição Dinâmica, Depositante: General Electric Technology GMBH BR 102017021147-9, Deposito: 02/10/2017 Concessão: 06/11/2018.

FILHO.I.S. S., Hardware Dedicado à Proteção Diferencial de Transformador de Potência. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, UNB, Brasília, 2016.

FILHO, JOÃO, M. Manual de Equipamentos Elétricos. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2005, 3º Edição.

FILOMENA, A. D. Ensaio em RTDS: A Experiência da CEEE-GT. In: 2011. GRUPO DE ESTUDO GRUPO DE ESTUDO PROTEÇÃO E CONTROLE - GPC. Florianópolis, 2011. p. 1689–1699.

FONTES, M. C. Projeto de Plataforma Didática Compatível com a Norma IEC61850 Para Comissionamento de Sistema Digital de Controle e Proteção de Subestação de Energia Elétrica. Dissertação de Mestrado em engenharia Elétrica, UFRN, Natal, 2015.

FREITAS, W., SATO, F. Análise de Curto-Circuito e Princípios de Proteção em Sistemas de Energia Elétrica Fundamentos e Prática. Rio de Janeiro: Editora Elsevier, 2015, 1º Edição.

GIOVANINI, R. Uma Plataforma para Avaliação de Novas Tecnologias Baseadas em Agentes para Proteção de Sistemas elétricos de Potência – Tese apresentada à escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos - 2005.

GONCALVES, E.M. Metodologias para Validação de Proteções de Linhas de Transmissão. Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica, Belo Horizonte, 2012.

GUERRERO, C.A.V. Uso do RTDS em Testes de Esquemas de Teleproteção Aplicando o Padrão IEC 61850. Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica UNIFEI, Itajuba, 2011.

GUIMARÃES, D. S. JUNIOR, J. M., LACERDA, R. N., LEITÃO, C. A. M. PLATAFORMA DE TESTES DE INTEROPERABILIDADE E QUALIDADE DE ENERGIA, Depositante: Sâmia Batista Amin BR 102014029366-3, Depósito :25/11/2014 Concessão: 21/06/2016.

HAZARIKA, P., SHUBHANGA, K. N., Development of a Relay Test Bench and an Arbitrary Waveform Generator in RTAI-Linux Platform. 2013 IEEE International Conference on Emerging Trends in Computing, Communication and Nanotechnology, ICE-CCN 2013, Surathkal, India, n. Iceccn, p. 595–600, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ICE-CCN.2013.6528569>.

HILBER, P., JURGENSEN, J. H., J. H., NORDSTROM, L., Estimation of Individual Failure Rates for Power System Components Based on Risk Functions, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 34, no. 4, pp. 1599–1607, 2019. DOI: 10.1109/TPWRD.2019.2913777.

IEEE Std C37.2-2008, IEEE Standard for Electrical Power System Device Function Numbers, Acronyms, and Contact Designations.

IEC 60255-121-2014: Measuring Relays and Protection Equipment – Part 121: Functional requirements for Distance Protection.

IEEE Guide for Differential and polarizing Relay Circuit Testing C37.103-2015.DOI: 10.1109/IEEESTD.2015.7362086.

IEEE Guide for Protection Relay Applications to Power System Buses-C37.234-2009.DOI:10.1109/IEEESTD.2009.5325912.

IEEE Guide for Protective Relay Applications to Power Transformers-C37.91-2008.DOI:10.1109/IEEESTD.2009.5325912.

ISHIDA, S., NAKAMURA, S., WAKAMATSU, N., DISPOSITIVO DE TESTE DE RELÉ DE PROTEÇÃO DIGITAL E MÉTODO DE TESTE DE RELÉ DE PROTEÇÃO DIGITAL. Depositante: Kabushiki Kaisha Toshiba BR112015002668-0 31/07/2013 Depósito: 31/07/2013 Concessão: 04/07/2017.

JURISIC, G HAVELK, J., CAPUDER, T., Laboratory Test Bed for Analyzing Fault Detection Reaction Times of Protection Relays in Different Substation Topologies – 18 September 2018 MDPI Energies 2018,11(9), 2482; doi:10.3390/en11092482.

KLIEN, A., MARINESCU, C., METODO PARA MONITORAR OPERAÇÃO DE UM SISTEMA DE ENERGIA ELETRICA, Depositante: Omicron Electronic GMBH BR 10 2013 015753-8, Data do Deposito : 21/06/2013 Concessão: 23/12/2014.

LIMA, A. A. F., NUNES, F. R. S., PAIVA, A. T. S., PINTO, V. P., SILVA, C. E. A., SOUZA, J. J. I. Proposição de um Simulador para Ensino em Proteção de Sistemas Elétricos de Potência. VI Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, SBSE-2016, Natal, Rio Grande do Norte.

MORALES, C. A., HERNANDEZ, C., ARJONA, M.A., Undergraduate Teaching of Electric Network Protection Using Simulations and Lab Experiments, vol. 19, no. 5, pp. 807–814, 2021.DOI: 10.1109/TLLA.2021.9448315.

MALIK, O. M. P., SALLAM, A. A., Electric Distribution Systems. 2018. John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA, 2011.

MOUTINHO, J.A.P. Simulador Digital de Sistemas de Proteção, Controle e Supervisão: Uma Ferramenta para Capacitação da Operação e Manutenção, VIII Simpósio de Automação de Sistemas Elétricos Cigré - Brasil, 2011.

PANDINI, et al., Design of a Didatic Workbench of Industrial Automation Systems for Engineering Education. IEEE Latin America Transactions, Criciuma, v. 15, n. 8, p. 1384–1391, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TLA.2017.7994783>.

PAULINO, M. E. C. Penariol, G.S., Automação de Testes de Dispositivos de Proteção de Sistemas Elétricos - XXII SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Brasília, 2013. Grupo de Estudo de Proteção, Medição, Controle e Automação em Sistemas de Potência.

RIBEIRO, M. V. EQUIPAMENTO E MÉTODO PARA ANÁLISE DAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DA REDE DE TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. Depositante: Universidade Federal de Juiz de Fora PI0904833-2 Data do Deposito:05/10/2009 Concessão: 14/06/2011.

ROFALSKI, K.H., SCHALABACH, J., Power System Engineering, Planning, Design and Operation of Power Systems and Equipment -11/04/2014 . DOI: 10.1002/9783527679065.

RUSH, P. Livro de Proteção e Automação de Redes, Conceitos e Aplicações. Editora Blucher- Schneider Electric, 1º Edição – 2011, São Paulo.

SEGUNDO, E. A. A. Proposta, Aplicação em Subestação Real e Treinamento em Metodologia para Testes Rotineiros em Sistemas de Automação Baseados no Padrão IEC 61850, Salvador, 2014. Disponível em: doi.org/http://repositorio.ufba.br/ri/handle/ri/28757

SILVA, C. H. C. Desenvolvimento de um Laboratório Virtual para Capacitação Tecnológica à Distância em Proteção de Sistemas Elétricos. Dissertação de Mestrado apresentada à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2011.

SIMÕES, C. MÉTODO DE PARAMETRIZAÇÃO, TESTE E IMPLANTAÇÃO DE UMA APLICAÇÃO SCADA. Depositante: Spin Engenharia de Automação LTDA BR 1020170031900 16/02/2017 Depósito: 16/02/2017 Concessão: 30/10/2018.

STEVENSON, W.D., Elemento de Análise de Sistema de Potência, 2º ed. São Paulo, Editora Mac Graw Hill, São Paulo, 1986.

SOUZA, E. B. Aplicação de Equipamentos Eletrônicos Inteligentes via IEC 61850/GOOSE em Sistemas de Média Tensão. Dissertação apresentada ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo para obtenção do Título de Mestre em Automação e Controle de Processos. São Paulo, 2015.

SOUZA, J. R. M. S. Redução de Conjunto de Casos Avaliados em Testes de Aplicação de Relés de Proteção Utilizando Grafo de Gabriel. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica UFMG, Belo Horizonte, 2019.

XIA, Y., et al. Research on Automatic Test System of on-Site Relay Protection Device. 2020 2nd International Conference on Smart Power and Internet Energy Systems, SPIES 2020, Beijing, China, p.5963, 2020. Disponível em: doi.org.10.1109/SPIES48661.2020.9243114.

APÊNDICE A – PEDIDO DE PATENTE DE INVENÇÃO

Neste apêndice será apresentado o processo de pedido do registro de patente, pois entende-se que é um projeto inovador devido às lacunas encontradas em uma ferramenta para testes e simulações e mesmo para realizar treinamentos com profissionais do setor elétrico de potência. Foi levantado todo o portfólio de registro de patente e, por meio destas pesquisas, observou-se que este projeto pode ser registrado como um produto inovador, devido à inexistência de similaridade.

Esta pesquisa nasceu entre a necessidade de uma ferramenta para profissionais de manutenção de proteção e controle de sistema elétrico de potência e o projeto de mestrado em Energia & Sustentabilidade da Universidade Federal Latino Americana – UNILA, em conjunto com os professores Dr. Jorge Javier, Osvaldo Hideo e Furnas Centrais Elétricas. Este projeto também foi vencedor do programa de inovação de Furnas Centrais Elétricas em 2020.

Este pedido inicial de patente está sendo realizado por Furnas Centrais Elétricas através do escritório de Vilage Marcas e Patentes. Foram respondidas algumas perguntas iniciais e o escritório contratado por Furnas está fazendo a revisão do pedido. Abaixo estão os nomes dos inventores, título do técnico para o pedido da patente e o seu campo de aplicação.

QUESTIONÁRIO PARA REDAÇÃO DE PATENTE INFORMAÇÕES INICIAIS

TÉCNICO RESPONSÁVEL

NOME: Adriel Rodrigues da Silva

TELEFONE: 45-991128044

E-MAIL: adriel@furnas.com.br

DATA DE PREENCHIMENTO: 25/04/2021

Inventor 1

NOME: Adriel Rodrigues da Silva

TELEFONE: 45-991128044

E-MAIL: adriel@furnas.com.br

DATA DE PREENCHIMENTO: 25/04/2021

Inventor 2

NOME: Oswaldo Hideo Ando Junior

TELEFONE: 51-98178-42.34

E-MAIL: osvaldo.junior@unila.edu.br

DATA DE PREENCHIMENTO: 25/04/2021

Inventor 3

NOME: Jorge Javier Gimenez Ledesma

TELEFONE: 45-9855-7557

E-MAIL: jorge.ledesma@unila.edu.br

DATA DE PREENCHIMENTO: 25/04/2021

Inventor 4

NOME: Thiago Sousa Guimaraes Peixoto

TELEFONE: 21-98234-0334

E-MAIL: tpeixoto@furnas.com.br

DATA DE PREENCHIMENTO: 25/04/2021

1 - Sugerir um título técnico para o pedido de patente

Power Rack de Testes e Simulações (PowerTS)

2 Campo de aplicação

A presente invenção se refere à elaboração de uma Plataforma para Testes e Simulações em Proteção de Sistemas Elétricos de Potência, simulando equipamentos de subestações (disjuntores, seccionadoras) e sinais de equipamentos de teleproteção, utilizando caixa de teste hexáfásico para a aplicação de sinais analógicos (corrente e tensão) nos IEDs, para aprovação da aplicabilidade prática no estado da arte de proteção e controle do sistema de potência para aplicação industrial. Também pode ser utilizada para treinamentos de profissionais, pois a invenção foi preparada como um simulador de uma subestação de transmissão (disjuntores, seccionadoras e simulação de sinais de equipamentos de teleproteção) de energia elétrica, como possibilidade de manobras de equipamentos de subestação, respeitando todos os itens de intertravamento para manobrar uma seccionadora e um disjuntor, conforme descrito em normas de operação de Furnas Centrais.

ANEXO A - PORTFÓLIOS BIBLIOGRÁFICOS E PATENTES

O método Proknow-C tem por objetivo sistematizar e identificar, de maneira estruturada e eficiente, um portfólio bibliográfico com os artigos científicos mais relevantes do tema de uma pesquisa (ENSSLIN; ENSSLIN; PINTO, 2013). Para realizar essa busca por portfólios bibliográficos foram definidas as seguintes etapas: seleção dos portfólios bibliográficos, análise bibliométrica do portfólio bibliográfico, análise sistêmica do portfólio bibliográfico e pergunta de pesquisa.

Avaliando estes processos foi executado o Proknow-C com o tema da pesquisa Power Rack de Testes e Simulações, com os seguintes eixos de pesquisa.

Após definidos os eixos de pesquisa, foram selecionadas as seguintes palavras-chave:

Eixo 1: Proteção de sistemas elétricos, Comissionamento, IED e Treinamento.

Eixo 2: Subestação, IEC 61850, Proteção digital, Simulador, Bancada de teste e Digitalização.

Com as palavras-chave definidas, foi possível definir as combinações lógicas dessas palavras com os eixos de pesquisas, com isso, a pesquisa foi realizada nas seguintes bases de dados: *Web of Science* e *Science direct*. Todas essas informações e o resultado quantitativo da pesquisa estão exibidos na Tabela 31, gerando uma Base de Artigos Brutos (BAB) com 788 títulos.

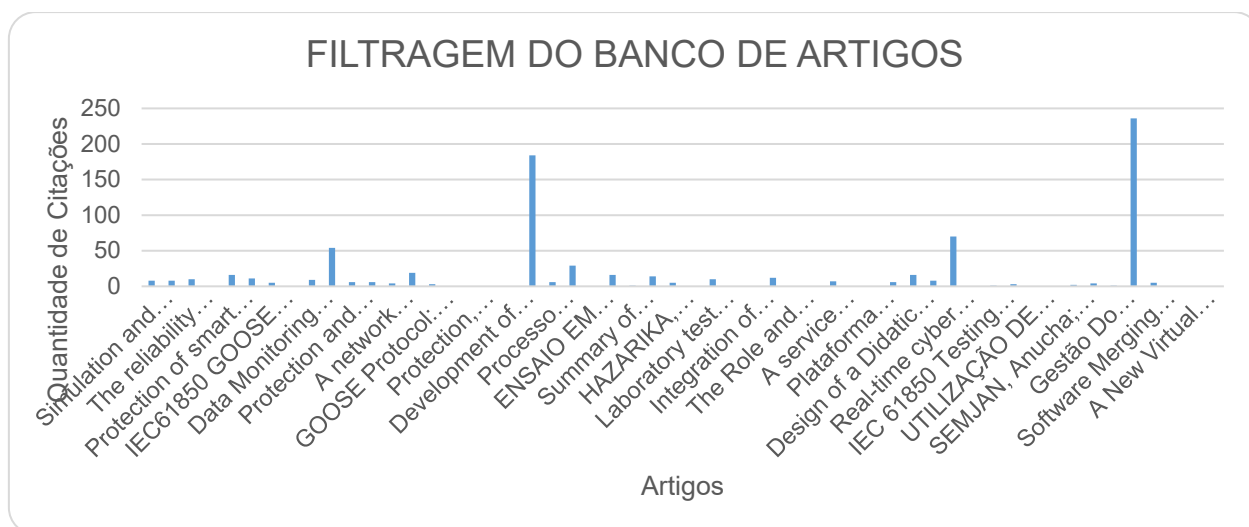
Tabela 31-Eixos, Palavras- Chaves, Constituição do Bancos de Artigos Bruto (BAB).

Palavras-Chave (PC)	Science Direct	Web of Science
Substation AND (Protection of electrical power systems)) AND (Commissioning) AND(IED) AND (Training))	20	18
(IEC 61850 AND (Protection of electrical power systems)) AND (Commissioning) AND(IED) AND (Training))	2	1
(Digital protection AND (Protection of electrical power systems)) AND (Commissioning) AND(IED) AND (Training))	67	5
(Simulator AND (Protection of electrical power systems)) AND (Commissioning) AND(IED) AND (Training))	390	32
(Test bench AND (Protection of electrical power systems)) AND (Commissioning) AND(IED) AND (Training))	78	39
(Scan AND (Protection of electrical power systems)) AND (Commissioning) AND(IED) AND (Training))	58	78
Total de Artigos	615	173
Base de Dados de Artigos Brutos (BAB)	788	

Fonte: O autor, (2022).

Após realizado o processo de seleção do Banco de Artigos, foram realizadas as seguintes etapas do método Proknow-C: filtragem do Banco de artigos, remoção dos artigos duplicados, exclusão dos artigos que desalinhados com o tema da pesquisa, levantamento dos artigos por meio de consulta do número de citações no site Google Acadêmico e remoção dos artigos que não tiveram reconhecimento científico confirmado, conforme ilustrado na Figura 58.

Figura 58-Portfólio bibliográfico.



Fonte: O autor, (2022).

Para executar essas atividades foi utilizada a ferramenta de gestão de referências bibliográficas Mendeley. Após executadas todas as etapas do Proknow-C, obtivemos um portfólio bibliográfico de 54 artigos relevantes ao tema no período de 2009 a 2022, conforme ilustrado na Tabela 32.

Tabela 32-Portfólio Bibliográfico, pesquisado em 29/04/2022.

Portfólio Bibliográfico (PB) – 54 Artigos Mais Relevantes	Ano
ABDOLKHALIG, Ahmed; ZIVANOVIC, Rastko. Simulation and Testing of the Over-Current Protection System based on IEC 61850 Process-Buses and Dynamic Estimator. Sustainable Energy, Grids and Networks, [s. l.], v. 2, p. 41–50, 2015. Disponível em: doi.org/10.1016/j.segan.2015.04.001.	2015
ADEWOLE, A C; TZONEVA, R. Impact of IEC 61850-9-2 Standard-Based Process Bus on the Operating Performance of Protection IEDS: Comparative Study. IFAC Proceedings Volumes, [s. l.], v. 47, n. 3, p. 2245–2252, 2014. Disponível em:doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.00598.	2014
AGHILI, Sayed Javad; HAJIAN-HOSEINABADI, Hamze. The Reliability Investigation Considering Data Uncertainty; anapplication of Fuzzy Transformation Method in substation protection. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, [s. l.], v. 63, p. 988–999, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.06.067.	2014
ALI, Mohamed A. Hybrid Technique for Testing IEC 61850 Based IED's of Distance Protection. In: 2017. (Elsayed, AM, Org.)2017 NINETEENTH INTERNATIONAL MIDDLE EAST POWER SYSTEMS CONFERENCE (MEPCON). [S. l.: s. n.], 2017. p. 353–358.	2017

ALI, N H et al. Protection of Smarts Substation Based on WLAN Complies with IEC 61850 Using Traveling Wave Analysis. Electric Power Systems Research, [s. l.], v. 140, p. 20–26, 2016. Disponível em: doi.org/10.1016/j.epsr.2016.07.004.	2016
ALI, N.H. et al. Performance of Communication networks for Integrity Protection Systems based on Travelling Wave with IEC 61850. International Journal of Electric al Power & Energy Systems, [s. l.], v. 95, p. 664–675, 2018. Disponível em: doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.09.024.	2018
AMJADI, Sajad; KALAM, Akhtar. IEC61850 GOOSE Performance in Real Time and Challenges Facedby Power Utilities. In: 2015. 2015 IEEE EINDHOVEN POWERTECH. [S. l.: s. n.], 2015.	2015
BENCZ, E. CRUZ I., León H.; 2017_TESTES E COMISSONAMENTO EM SUBESTAÇÕES_METODOLOGIAS_IEC61850. In: 2017. Facilitando as Etapas de Testes e Comissionamentos em Subestações Através das Novas Metodologias Propostas pela IEC61850. [S. l.: s. n.], 2017. p. 1689–1699.	2017
BOAROLI, Lucas et al. Data Monitoring and Hardware Control for App Android by Bluetooth Communication for Laboratory Teaching in Electrical Engineering Courses. IEEE Latin America Transactions, [s. l.], v. 15, n. 1, p. 31–39, 2017. Disponível em: doi.org/10.1109/TLA.2017.7827885.	2017
CELEITA, David et al. Implementation of an Educational real-time platform for relaying automationon smart grids. Electric Power Systems Research, [s. l.], v. 130, p. 156–166, 2016. Disponível em: doi.org/https://doi.org/10.1016/j.epsr.2015.09.003.	2016
CHANG, Jack; VINCENT, Blair; REYNEN, Michael. Protection and Control System Upgrade Based on IEC-61850 and PRP. In: 2014. 2014 67TH ANNUAL CONFERENCE FOR PROTECTIVE RELAY ENGINEERS. [S. l.: s. n.], 2014. p. 496–517.	2014
CHEN, Linnaeite al. Virtual site accept an cetest platform for IEC 61850 based substation swith multi-vendor bay solutions. JOURNAL OF ENGINEERING-JOE, [s. l.], n. 15, p. 791–795, 2018. Disponível em: doi.org/10.1049/joe.2018.0167.	2018
CLAVEL, Fanny et al. A network simulator for IEC61850 e architect tur. In: 2013. 2013 CONFERENCE RECORD PCIC EUROPE (PCIC EUROPE). [S. l.: s. n.], 2013.	2013
CLAVEL, Fanny et al. INTEGRATION OF A NEW STANDARD A network simulator of IEC 61850 architectures for electrical substations. IEEE INDUSTRY APPLICATIONS MAGAZINE, [s. l.], v. 21, n. 1, p. 41–48, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1109/MIAS.2014.2345798.	2015
CLAVERIA, Joevis; KALAM, Akhtar. GOOSE Protocol: IED's Smart Solution for Victoria University Zone Substation (VUZS) Simulator Based on IEC61850 Standard. In: , 2018. 2018 IEEE PES ASIA-PACIFIC POWER AND ENERGY ENGINEERING CONFERENCE (APPEEC). [S. l.: s. n.], 2018.	2018
COKIC, Adnan; CEKIC, Sanjin; SELIMIC, Armin. The migration of substation automation technology from classical to digital. In: 2018. 2018 IEEE PES INNOVATIVE SMART GRID TECHNOLOGIES CONFERENCE EUROPE (ISGT-EUROPE). [S. l.: s. n.], 2018.	2018
CORREIA, Rafaela et al. Protection, Automation and Control Systems and the IEC 61850 Paradigm - New Testing and Maintenance Challenges. In: 2016. 2016 51ST INTERNATIONAL UNIVERSITIES POWER ENGINEERING CONFERENCE (UPEC). [S. l.: s. n.], 2016.	2016
DAI, Wei et al. A Model and Application of Collaborative Simulation Training System for Substation Based on Virtual Reality. In: v2018. (Park, JJ and Loia, V and Yi, G and Sung, Y, Org.) ADVANCES IN COMPUTER SCIENCE AND UBIQUITOUS COMPUTING. [S. l.: s. n.], 2018. p. 610–616. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-981-10-7605-3_100.	2018
DU, Zongzhan. Development of Virtual Reality Simulation Training System for Substation. In: , 2016. (Kuang, A and Gong, S, Org.) PROCEEDINGS OF THE6TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHATRONICS, MATERIALS, BIOTECHNOLOGY AND ENVIRONMENT (ICMMBE 2016). [S. l.: s. n.], 2016. p. 207–212.	2016
ENSSLIN, Leonardo; ENSSLIN, Sandra Rolim; PINTO, Hugo de Moraes. Processo de investigação e análise bibliométrica: avaliação da qualidade dos serviços bancários. Revista de Administração Contemporânea, [s. l.], v. 17, n. 3, p. 325–349, 2013. Disponível em: https://doi.org/10.1590/s1415-65552013000300005.	2013
ENSSLIN, Sandra Rolim et al. Processo Estruturado de Revisão da Literatura e Análise Bibliométrica Sobre Avaliação de Desempenho de Processos de Implementação de Eficiência Energética. Revista Brasileira de Energia, [s. l.], v. 20 n.1, p. 21–50, 2014.	2014
FATHTABAR, Hamed; BARFOROUSHI, Taghi; SHAHABI, Majid. Dynamic long-termexpansion planning of generation resources and electric transmission network in multi-carrier energy	2018

- systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, [s. l.], v. 102, p. 97–109, 2018. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.04.014>.
- FILOMENA, Andre Daros. ENSAIO EM RTDS: A EXPERIÊNCIA DA CEEE-GT. In: 2011 GRUPO DE ESTUDO GRUPO DE ESTUDO PROTEÇÃO E CONTROLE - GPC. [S. l.: s. n.], 2011. p. 1689–1699.
- GARCÍA-GRACIA, M et al. Novel protection scheme based on IEC61850. *Electric Power Systems Research*, [s. l.], v. 81, n. 12, p. 2178–2187, 2011. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.epsr.2011.07.017>.
- GUANGWEI, Yan; WENJUAN, Li. Summary of Substation Training Simulation System. In: 2009 ASIA-PACIFIC POWER AND ENERGY ENGINEERING CONFERENCE (APPEEC), VOLS 1-7. [S. l.: s. n.], 2009. p. 2844–2847.
- HAMMAD, Eman; EZEME, Mellitus; FARRAJ, Abdallah. Implementation and development of an offline co-simulation test bed for studies of power systems cyber security and control verification. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, [s. l.], v. 104, p. 817–826, 2019. Disponível em: doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.07.058.
- HAZARIKA, Pragyan Pratim; SHUBHANGA, K. N. Development of a relay testbench and an arbitrary wave form generator in RTAI-Linux platform. 2013 IEEE International Conference on Emerging Trends in Computing, Communication and Nanotechnology, ICE-CCN 2013, [s. l.], n. Ice ccn, p. 595–600, 2013. Disponível em: doi.org/10.1109/ICE-CCN.2013.6528569.
- HUANG, Wei. The Realization of the Substation Operation Training System Based on Configuration Database. In: 2013 (T Gao, S and Hu, Org.) MECHANICAL ENGINEERING, MATERIALS AND ENERGY II. [S. l.: s. n.], 2013. p. 573+. Disponível em: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.281.573>.
- JURIĆ, Goran et al. Laboratory test bed for analyzing fault-detection reaction times of protection relays in different substation topologies. *Energizes*, [s. l.], v. 11, n. 9, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en11092482>.
- KARIYAWASAM, Sach in tha; WICKREMASURIYA, Ach int ha; RAJAPAKSE, Athula. Teaching IEC 61850 Based Substation Automation Through Hands-on Experiences. In: 2017 IEEE ELECTRICAL POWER AND ENERGY CONFERENCE (EPEC). [S. l.: s. n.], 2017. p. 326–331.
- KEZUNOVIC, M. Integration of Substation Data. *IFAC Proceedings Volumes*, [s. l.], v. 44, n. 1, p. 12861–12866, 2011. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.02654>.
- KOWALIK, Ryszard; RASOŁOMAMPIONONA, Désiré D; JANUSZEWSKI, Marcin. Laboratory testing of process bus equipment and protection functions in accord a with IEC 61850 standard. Part I: Electrical arrangement and basic protection functions tests. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, [s. l.], v. 90, p. 54–63, 2017. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.01.024>.
- KUFFEL, Rick; FORSYTH, Paul; PETERS, Cyprian. The Role and Importance of Real Time Digital Simulation in the Development and Testing of Power System Control and Protection Equipment. *IFAC-Papers On Line*, [s. l.], v. 49, n. 27, p. 178–182, 2016. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.10.739>.
- LI, Cheng; WANG, Ning; ZHU, Jie. The Unified Management Platform of IEC61850 Configuration Files Based Plug-In. *Energy Procedia*, [s. l.], v. 17, p. 1441–1446, 2012. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.02.264>.
- LIM, Seon gil. A service interruption free testing methodology for IEDs in IEC 61850-based substation automation systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, [s. l.], v. 87, p. 65–76, 2017. Disponível em: doi.org/10.1016/j.ijepes.2016.11.007.
- MACHADO, Jose Rubens da Silva et al. Testes de Aceitação em Laboratório Virtual - (Subestações Full Digital - IEC 61850). *Xxv Snptee*, [s. l.], v. 55, n. GPC-11, 2019.
- MARCOS ANTÔNIO DIAS DE ALMEIDA; MARCEL DA COSTA FONTES; ARRHENIUS VINICIUS DA COSTA OLIVEIRA. Plataforma Didática Compatível Com A Norma IEC61850 Para Comissionamento de Sistema Digital de Controle e Proteção de Subestações. *Anais do VI Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, [s. l.], p. 1–6, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.20906/cps/sbse2016-0159>.
- NEUMAN, P. Models of synchronous generator and transformers for Dispatch Training Simulators and Real Time Digital Simulators. *IFAC Proceedings Volumes*, [s. l.], v. 42, n. 9, p.

398–403, 2009. Disponível em: https://doi.org/https://doi.org/10.3182/20090705-4-SF-2005.00070 .	
PANDINI, Muriel Martinhago et al. Design of a Didatic Workbench of Industrial Automation Systems for Engineering Education. <i>IEEE Latin America Transactions</i> , [s. l.], v. 15, n. 8, p. 1384–1391, 2017. Disponível em: doi.org/10.1109/TLA.2017.7994783 .	2017
PEREZ, Ernesto; DE LA REE, Jaime. Development of a real time simulator based on ATP-EMTP and sampled values of IEC61850-9-2. <i>International Journal of Electrical Power & Energy Systems</i> , [s. l.], v. 83, p. 594–600, 2016. Disponível em: doi.org/10.1016/j.ijepes.2016.06.001 .	2016
POUDEL, Shiva; NI, Zhen; MALLA, Naresh. Real-time cyber physical system testbed for power system security and control. <i>International Journal of Electrical Power & Energy Systems</i> , [s. l.], v. 90, p. 124–133, 2017. Disponível em: doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.01.016 .	2017
QUINTEROS, Milton et al. Test Plan Automation for Power Transformer Protective Relay Commissioning. In: 2015. 2015 68TH ANNUAL CONFERENCE FOR PROTECTIVE RELAY ENGINEERS. [S. l.: s. n.], 2015. p. 536–545.	2015
RICCARDO JR., Antonio. IEC 61850 Testing and Commissioning Advantages Using GOOSE Messaging. In: 2019. 2019 72ND ANNUAL CONFERENCE FOR PROTECTIVE RELAY ENGINEERS (CPRE). [S. l.: s. n.], 2019.	2019
SAADUN, Niraetal. Modelling and Implementation of Intelligent Electronic Devices (IED) in Real-Time Hardware-in-the-Loop (HIL) Test System. <i>JOURNAL OF ELECTRICAL SYSTEMS</i> , [s. l.], v. 13, n. 3, p. 444–456, 2017.	2017
SALGE, G S. UTILIZAÇÃO DE UMA PLATAFORMA SUL-AMERICANA DE SIMULAÇÃO PARA ESTUDOS ENVOLVENDO SISTEMAS DE TRANSMISSÃO CA E CC Conprove Indústria Brasil C. M. Martins Conprove Indústria Brasil P. S. P. Junior Conprove Indústria Brasil P. S. Pereira Conprove Engen. [s. l.], p. 1–9, 2019.	2019
SEGUNDO, Edmilson Almeida de Assis. Proposta, Aplicação em Subestação Real e Treinamento em Metodologia para Testes Rotineiros em Sistemas de Automação Baseados no Padrão IEC 61850. Salvador: [s. n.], 2014. Disponível em: doi:orgrepositorio.ufba.br/ri/handle/ri/28757 .	2014
SEMJAN, Anucha; JI, Naibo. Experience Sharing - Challenges and Solutions on IEC 61850 Substation Commissioning and Supervision in Thailand. In: 2019. 2019 IEEE PES GTD GRAND INTERNATIONAL CONFERENCE AND EXPOSITION ASIA (GTD ASIA). [S. l.: s. n.], 2019. p. 228–234.	2019
SILVA, R.C. Um sistema de realidade virtual para treinamento de operadores de subestações elétricas. Dissertação de Mestrado da Universidade Federal de Uberlândia [S. l.: s. n.], 2012.	2012
SHOBOLE, Abdul fetahet al. Protection Coordination in Electrical Substation Part-2 Unit Protections (Differential and Distance Protection) -Case Study of Siddik Kardes ler Substation (SKS), Istanbul, Turkey. <i>GAZI UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i> , [s. l.], v. 30, n. 4, p. 163–178, 2017.	2017
SOUZA, Marcel Viana de. Gestão Do Portfólio De Produtos Por Meio Do Apoio À Decisão Multicritério: Um Estudo De Caso Em Uma Empresa Multinacional De Eletrodomésticos. Ufsc, [s. l.], 2013.	2013
VALSAN, Simi P; SWARUP, K S. Wave lettrans form based digital protection for transmission lines. <i>International Journal of Electrical Power & Energy Systems</i> , [s. l.], v. 31, n. 7, p. 379–388, 2009. Disponível em: doi.org/10.1016/j.ijepes.2009.03.024 .	2009
WU, Yiminget al. Software Merging Unit based IED Functional Test Platform. In: 2015. 2015 IEEE POWER & ENERGY SOCIETY GENERAL MEETING. [S. l.: s. n.], 2015.	2015
XIA, Ye et al. Research on automatic test system of on-site relay protection device. 2020 2nd International Conference on Smart Power and Internet Energy Systems, SPIES 2020, [s. l.], p. 59–63, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1109/SPIES48661.2020.9243114 .	2020
ZHAO, Yao et al. A New Virtual Relay Protection Simulation System of Substation Based on IEC61850 Standard. In: 2016. 2016 IEEE PES ASIA-PACIFIC POWER AND ENERGY ENGINEERING CONFERENCE (APPEEC). [S. l.: s. n.], 2016. p. 252–256.	2016
ZHIJUN, Tang et al. A New Technique for Visualizing Smart Substation IED Interactive Processes. In: 2017. (Xu, B, Org.) PROCEEDINGS OF THE 2017 2ND JOINT INTERNATIONAL INFORMATION TECHNOLOGY, MECHANICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING CONFERENCE (JIMEC 2017). [S. l.: s. n.], 2017. p. 235–239.	2017

Fonte: O autor, (2022).

Este processo de busca fora realizado utilizando-se a base de dados do Instituto da Propriedade Industrial (INPI), órgão que regulamenta os pedidos de patente e responsável pelos depósitos de patentes e a plataforma do Google Patents. Nesta seção será apresentado o processo de busca de anterioridade de patentes pertinentes e relacionadas ao tema da pesquisa: *power rack de testes e simulações*.

Para realizar essa busca foram utilizadas as seguintes palavras-chave: Testes em IED's, Simulação, Plataforma de Testes, Treinamento e Proteção de Sistemas Elétricos, conforme ilustrado na Tabela 33.

Tabela 33-Busca de anterioridades de patentes.

Tema: Power Rack de Testes e Simulações		
Palavras-Chave	Google Patents	INPI
Proteção de sistemas elétricos and simulador	10	0
Testes em IED's and simulação and plataforma de testes and treinamento and proteção de sistemas elétricos	0	42

Fonte: O autor ,(2022).

Baseada nas pesquisas realizadas no INPI e no Google Patents, foi elaborada uma seleção das patentes encontradas, sendo selecionadas aquelas que estavam alinhadas ao título da pesquisa. Fez-se uma varredura nos títulos e resumos das patentes, sendo escolhidas as pertinentes ao título desta pesquisa, e excluídos e não selecionados os temas que não eram pertinentes ao estudo. A Tabela 34 ilustra os portfólios de patentes.

Tabela 34-Portfólios de patentes.

Pedido	Data de Deposito	Invenção
PI0904833-2	05/10/2009	EQUIPAMENTO E MÉTODO PARA ANÁLISE DAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DA REDE DE TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.
BR112015002668-0	31/07/2013	DISPOSITIVO DE TESTE DE RELÉ DE PROTEÇÃO DIGITAL E METÓDO DE TESTE DE RELÉ DE PROTEÇÃO DIGITAL.
BR 1020170031900	16/02/2017	MÉTODO DE PARAMETRIZAÇÃO, TESTE E IMPLANTAÇÃO DE UMA APLICAÇÃO SCADA.
BR102015020352-7	24/08/2015	MÉTODO DE RELIGAMENTO MONOPOLAR E TRIPOLAR ADAPTATIVO RÁPIDO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO.
BR 10 2013 015753-8	21/06/2013	MÉTODO PARA MONITORAR OPERAÇÃO DE UM SISTEMA DE ENERGIA ELÉTRICA.
BR 102014029366-3	25/11/2014	PLATAFORMA DE TESTES DE INTEROPERABILIDADE E QUALIDADE DE ENERGIA.
BR 102017021147-9	02/10/2017	SIMULADOR DE TREINAMENTO DE EXPEDIÇÃO DINÂMICA

Fonte: O autor, (2022).

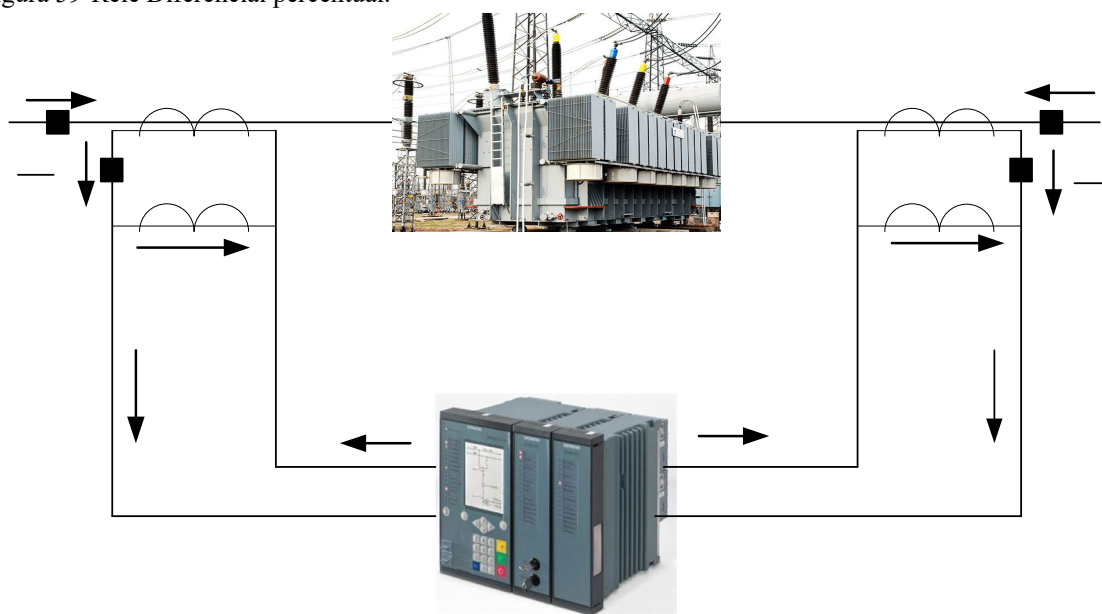
ANEXO B – PROTEÇÕES

PROTEÇÃO DE TRANSFORMADORES

O princípio básico de atuação da proteção diferencial numérica consiste em, a partir da leitura das correntes nos lados primário e secundário do transformador, ou terciário quando o transformador for de 3 enrolamentos, aplicar a Lei de Kirchhoff das correntes. O relé diferencial atua de 2 maneiras distintas, ou seja: se a somatória fasorial das correntes de entrada e de saída do transformador for igual a zero, teremos as condições normais de operação ou uma falta externa, caso a somatória fasorial das correntes seja diferente de zero e maior que a corrente de ajuste do relé, teremos uma condição de falta interna e atuação da proteção diferencial (FILHO, 2016).

Nos relés diferenciais percentuais, a corrente de operação, também chamada de corrente diferencial (I_{op}), é obtida pela soma fasorial das correntes que entram e saem do transformador conforme ilustrado na Figura 59 (DUARTE, 2018).

Figura 59-Relé Diferencial percentual.



Fonte: Adaptado de Duarte, (2018).

As Equações 29 e 30 ilustram os cálculos da corrente diferencial e da corrente de restrição, obtidos pela soma fasorial das correntes que entram e saem do transformador.

$$I_{op} = |I_{sec1} - I_{sec2}| \quad (29)$$

$$I_{res} = \text{Max} \times (|I_{sec1}|, |I_{sec2}|) \quad (30)$$

$$I_{\text{Pick-up}} = I_{\text{pick-up}} = (\text{Slope} \times I_{\text{res}}) \quad (31)$$

O relé de sobrecorrente tem por finalidade a detecção de correntes acima de níveis pré-estabelecidos e condições anormais de funcionamento no sistema elétrico, retirando de operação os equipamentos envolvidos (DUARTE, 2018). Existem dois tipos de corrente que podem ser detectadas:

- corrente de fase: apresenta um valor superior à corrente nominal do equipamento e ocorre em função de uma falha ou um curto-circuito.
- corrente de Terra: ocorre em decorrência de um curto-circuito entre fase e a terra.

As características de resposta dos relés de sobrecorrente são alocadas em um gráfico em função de múltiplos da corrente de tape x tempo (segundos), para cada ajuste do dial de tempo. No que diz respeito à característica de tempo existem duas opções: o relé pode ser de atuação instantânea (50) ou temporizada (51) (SATO, 2016). O relé de atuação instantânea atua no mesmo instante com a detecção da corrente de pick-up. Os relés temporizados operam segundo uma curva tempo x corrente e são denominados por:

- tempo definido.
- tempo normal inverso.
- tempo muito inverso
- tempo extremamente inverso;

As curvas características dos relés temporizados são modeladas pela Equação 32.

$$t = \frac{k \times DT}{\left(\frac{I}{I_s}\right)^\alpha - 1} \quad (32)$$

Em que,

I	Corrente no relé
I _s	Corrente de atuação ajustada no relé
DT	Dial de tempo
K	Constantes conforme a tabela 33
α	Constantes conforme a tabela 33

A Tabela 35 ilustra as constantes de operação da função de sobrecorrente.

Tabela 35-Constantes de operação da função de sobrecorrente.

Curvas IEC	k	α
Normal Inversa	0,14	0,02
Muito Inversa	13,5	1,0
Extremamente Inversa	80	2,0

Fonte: O autor, (2022).

A corrente de pick-up da unidade de sobrecorrente residual temporizada do transformador deve ser ajustada da forma mais sensível possível. Normalmente, deve-se ajustar entre 10 e 20% da corrente nominal do transformador. A Equação 33 ilustra o cálculo de ajuste da corrente de pick-up.

$$I_{\text{pick-up}} = (0,1 \text{ a } 0,2) \times \frac{I_{n\text{transformador}}}{RTC} \quad (33)$$

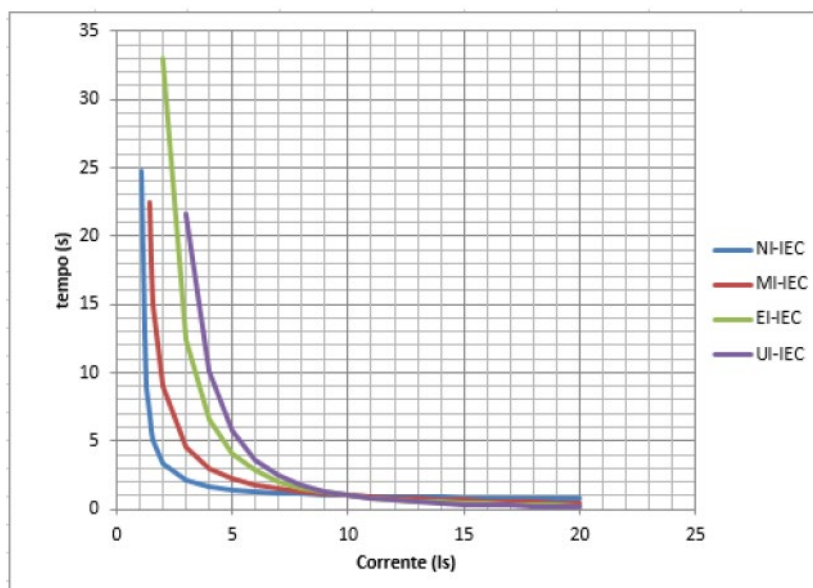
Em que,

$$\frac{I_{\text{pick-up}}}{I_n} = \frac{\text{Corrente mínima de operação do relé}}{\text{Corrente nominal do transformador}}$$

$$\frac{RTC}{\text{Relação de transformação do transformador de corrente}}$$

A Figura 60 ilustra a curva característica de operação do relé de sobrecorrente.

Figura 60-Curva característica de operação do relé de sobrecorrente.



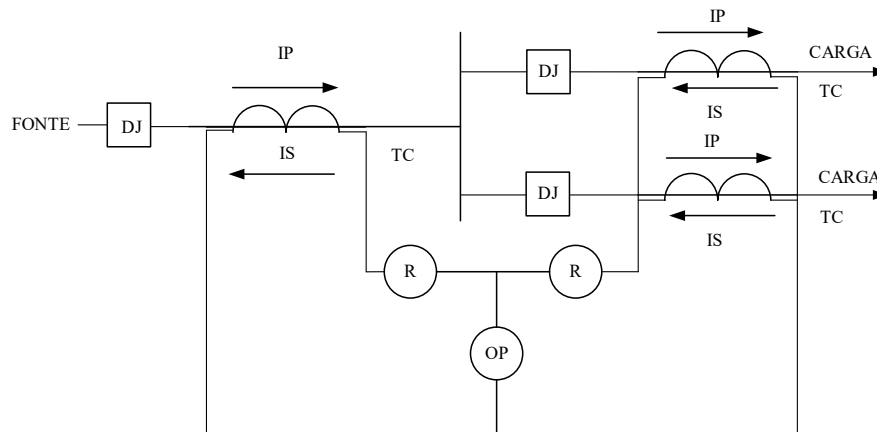
Fonte: Adaptado de Duarte, (2018).

PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE BARRAS

A proteção de barramento de uma subestação tem como fundamento a aplicação da lei de Kirchhoff, a qual estabelece que a soma vetorial das correntes que chegam e saem de um determinado ponto de um circuito é nula. Na Figura 61 é representado um esquema de proteção diferencial de barramento, sendo que nele podemos observar que temos

a bobina de operação e bobina de restrição da proteção. A bobina de restrição tem por finalidade restringir a atuação incorreta da proteção durante uma falta fora da zona de alcance da proteção. A somatória das correntes que circulam na bobina de operação será nula, pois a bobina de restrição filtrará a corrente de curto-circuito externa (FILHO, 2005).

Figura 61-Esquema de proteção de barras.



Fonte: Adaptado de Filho,(2015).

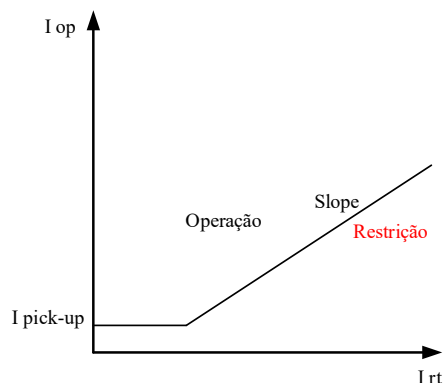
O relé diferencial de barras de baixa impedância soma vetorialmente as correntes de todas as entradas para detectar a corrente diferencial (I_{op}) resultante de uma falha interna. Ou seja: interna a zona definida pela localização de todos os TC's. A corrente de operação (I_{op}) é comparada com a corrente de restrição (I_{rt}) e o relé atua quando I_{op} excede um valor mínimo de ajuste e uma porcentagem de I_{rt} definida como *slope*. As Equações 34 e 35 ilustram as correntes de operação e restrição da proteção diferencial percentual (DUARTE, 2018).

$$I_{op} \quad I_{op} = |\bar{I}_1| + |\bar{I}_2| + |\bar{I}_3| \dots |\bar{I}_n| \quad (34)$$

$$I_{rt} \quad I_{rt} = |\bar{I}_1| + |\bar{I}_2| + |\bar{I}_3| + \dots |\bar{I}_N| \quad (35)$$

A Figura 62 ilustra a curva característica de atuação da proteção diferencial. Pode-se observar que *slope* define a região de operação e não operação da proteção diferencial.

Figura 62- Curva característica da proteção diferencial.

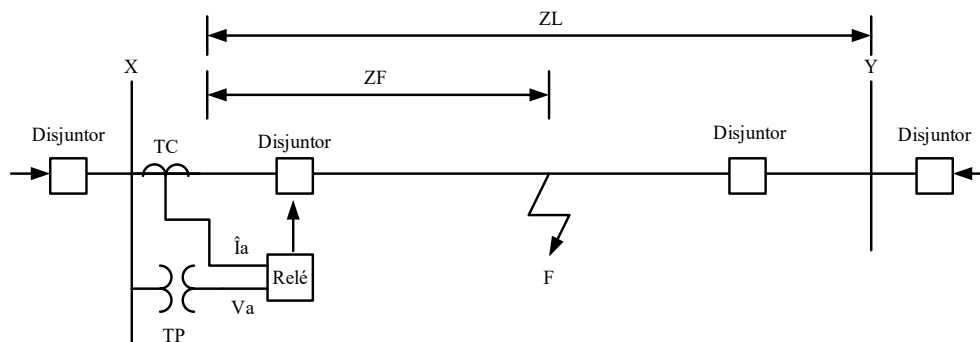


Fonte: O autor,(2022).

PROTEÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Os relés de distância medem a relação entre a tensão e a corrente no ponto de aplicação para determinar se existe ou não uma falha dentro de sua zona de operação. Os relés de distância medem aproximadamente a distância entre o ponto de aplicação e a falha. A Figura 63 ilustra um relé de distância localizado na subestação X, e as Equações 36 a 38 ilustram a impedância de falha que o relé irá medir (DUARTE, 2018).

Figura 63-Impedância medida por um relé de distância.



Fonte: Adaptado de Freitas et al ,(2015).

$$Z_{\text{medido}} = \frac{V_a}{I_a} \quad (36)$$

$$V_a = \frac{V_p}{RT_P} \quad (37)$$

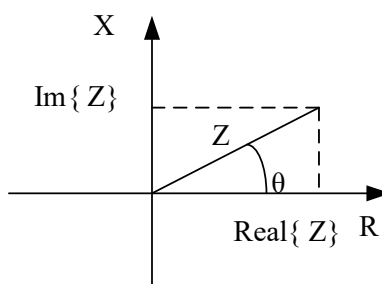
$$I_a = \frac{I_p}{RT_C} \quad (38)$$

Essas equações permitem concluir que o relé irá medir a impedância de

sequência positiva da linha (ZF), refletida nos secundários dos transformadores de potência e de corrente. Ao ocorrer um curto-circuito, a corrente aplicada ao relé aumenta e a tensão diminui, de modo que a relação $Z_f = \frac{V_a}{I_a}$ tende a diminuir (DUARTE, 2018).

Devido ao intercâmbio de informações lógicas (binárias), os esquemas básicos de teleproteção por sinais são denominados no Brasil de lógicas ou esquemas de teleproteção. A função de distância (21) é a mais adequada para a aplicação em teleproteção, pois seu alcance fixo permite o estabelecimento de lógicas baseadas em sobrealcance ou subalcance. O diagrama R-X é utilizado para apresentar as características da função de distância; a utilização do diagrama implica quais as características do relé em termo de impedância. A Figura 64 exhibe o diagrama de impedância (GONCALVES, 2012).

Figura 64-Diagrama de impedância.



Fonte: Adaptado de Duarte, (2018).

Onde o diagrama é obtido dividindo-se o valor RMS da tensão pelo valor RMS da corrente, obtém-se a impedância Z . As Equações abaixo exemplificam as componentes resistiva e reativa Z (DUARTE, 2018).

Sendo,

- 1) R – Componente resistiva, a parte real.
- 2) X – Componente reativa, a parte imaginária.

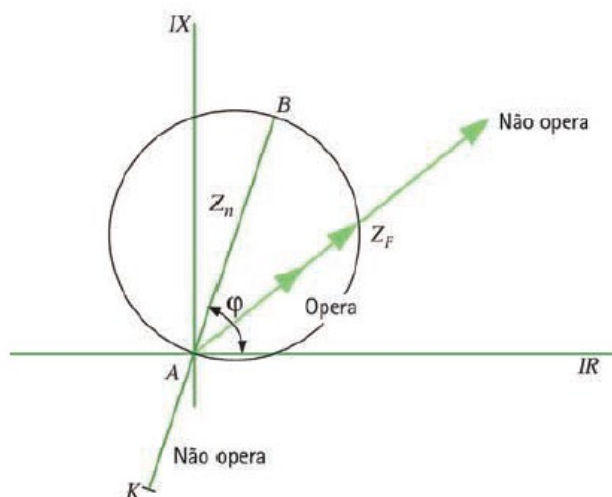
$$R = Z \times \cos \phi$$

$$X = Z \times \sin \phi$$

O elemento *MHO* é normalmente conhecido como tal, pois sua característica é uma discriminação em um diagrama de admitância. O diagrama *MHO* combina tanto o controle de alcance quanto o controle direcional. A curva característica do elemento *mho*, quando traçada em um diagrama R/X , é um círculo cuja circunferência tangencia a origem onde pode se observar que o relé irá operar somente para faltas à frente do relé, a impedância é ajustada configurando Z_n , a impedância de alcance, ao longo do diâmetro e o ângulo θ de deslocamento do diâmetro do eixo R , o relé atua para valores de

impedância de falta Z_f dentro dessa característica, conforme ilustrado na Figura 65 (RUSH, 2011).

Figura 65-Curva característica MHO.



Fonte: Rush, (2011).

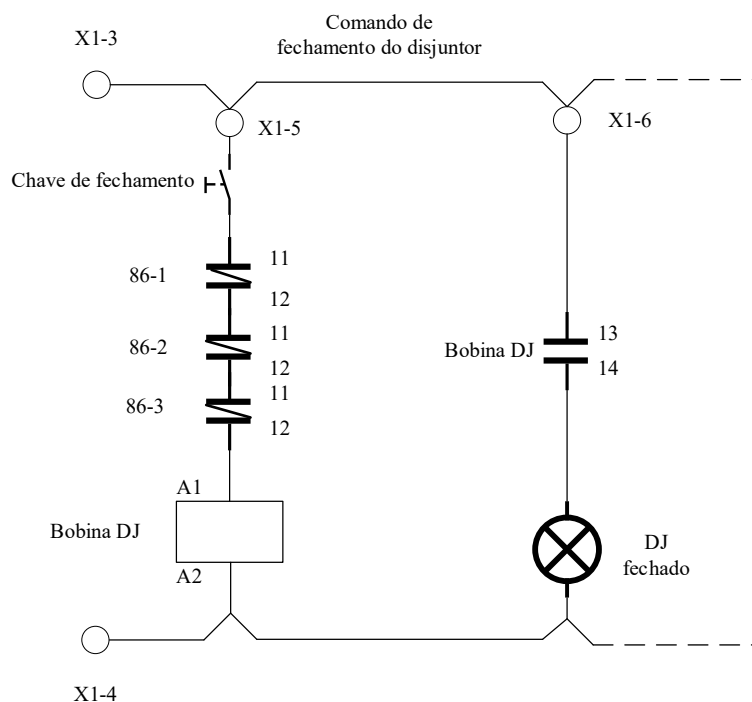
O elemento de transferência permissiva de disparo por sobrealcance (POTT) usa o elemento de sobrealcance de 2ª zona para enviar o sinal de operação permissivo para o terminal remoto. A transmissão do sinal de trip ocorre quando a unidade de medida $Z2$ detecta uma falta dentro do seu alcance (GONÇALVES, 2012).

Um religamento com sucesso é extremamente benéfico para a estabilidade do sistema, porque estabelece a topologia original da interligação entre sistemas, recuperando a capacidade de transmissão e colaborando com a qualidade do suprimento de energia elétrica, enquanto um religamento sem sucesso pode ser desastroso para a estabilidade do sistema. Assim, busca-se aumentar as chances de sucesso no religamento e abortá-lo sempre que se mostre indesejado ou de sucesso improvável (ABBOUD, et al., 2007).

CIRCUITOS DE COMANDOS ELÉTRICOS DA BANCADA

Esta etapa providenciou a montagem do circuito do comando de fechamento e abertura dos disjuntores, levando em consideração as lógicas de bloqueio de fechamento, respeitando os intertravamentos elétricos no circuito de fechamento quando na atuação do relé de bloqueio, pois ele impede o fechamento do disjuntor. A Figura 66 ilustra o circuito de fechamento do disjuntor.

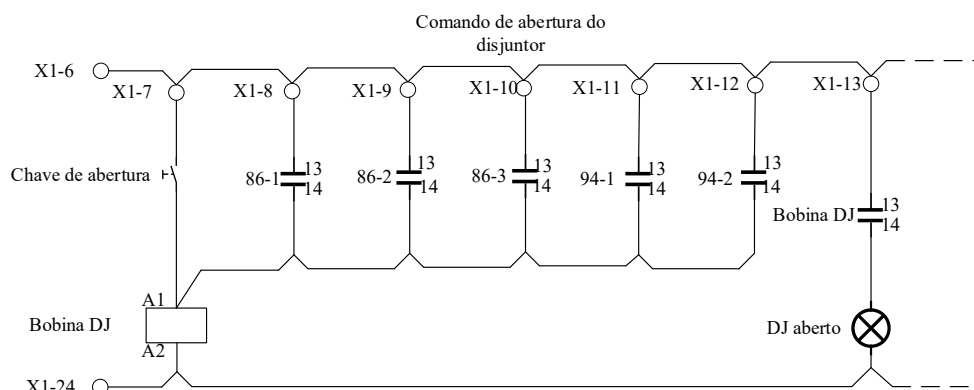
Figura 66-Circuito de fechamento do disjuntor.



Fonte: O autor, (2022).

Para o circuito de abertura foi levado em consideração às lógicas de aberturas, onde os relés que efetuarão abertura estão em paralelo e dispostos no circuito. A Figura 67 representa o comando de abertura.

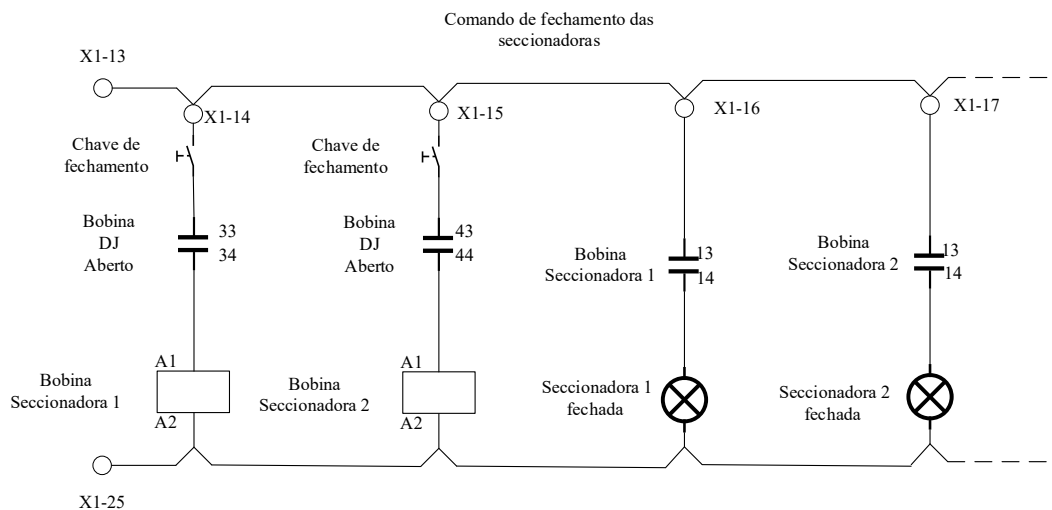
Figura 67-Comando de abertura do disjuntor.



Fonte: O autor, (2022).

A Figura 68 ilustra o circuito de fechamentos das seccionadoras, foi levado em consideração os circuitos de intertravamento elétrico onde as seccionadoras não podem ser manobradas com os disjuntores fechados, para isso é necessário colocar nos circuitos de comandos contatos dos disjuntores na posição aberto e sinalização de equipamento fechado.

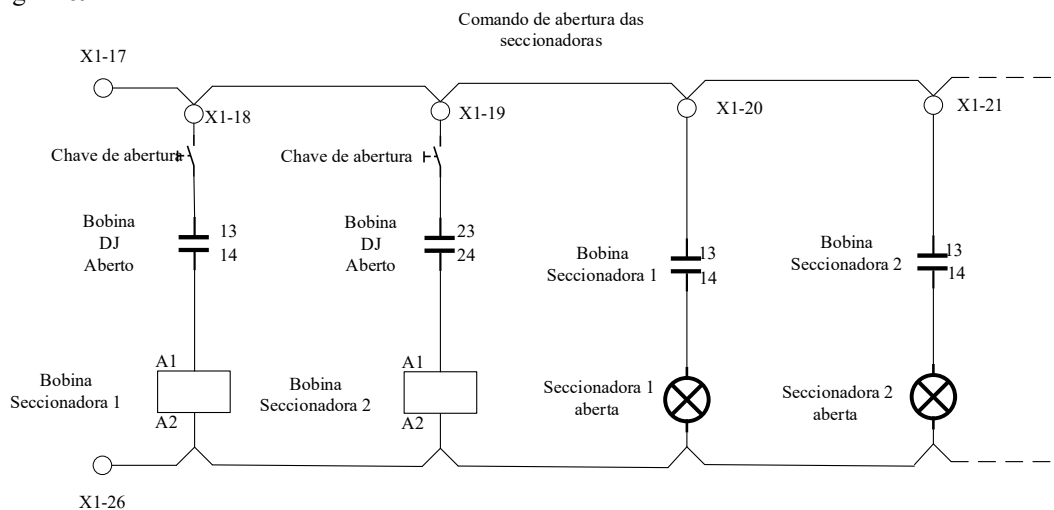
Figura 68-Comando de fechamento das seccionadoras.



Fonte: O autor, (2022).

A Figura 69 ilustra o circuito de abertura das seccionadoras, foi levado em consideração os circuitos de intertravamento elétrico onde as seccionadoras não podem ser manobradas com os disjuntores fechados.

Figura 69-Comando de abertura das seccionadoras.



Fonte: O autor, (2022).