

FAILURE REPRODUCTION BENCH IN DIGITAL SYSTEMS OF PROTECTION AND CONTROL-POWERTS

Data de aceite: 03/04/2023

Adriel Rodrigues da Silva

Andrei Gomes Lopes

Cidiney José da Silva

Jorge Javier Gimenez Ledesma

Thiago Sousa Guimarães Peixoto

Oswaldo Hideo Ando Junior

ABSTRACT: This article presents the development of the project and the assembly of a test bench, which simulates signals from electrical power equipment, with different configurations of substation arrangements, intended for testing in digital protection and control systems. The knowledge of the logics implemented in the relays and their functions are of paramount importance for carrying out tests. The performance of tests in protection and control systems brings security to the electrical power system, an improper performance or non-performance can occur undue shutdowns leading to a system collapse. Therefore, it is necessary to carry out tests, when changing settings, configuration, implementation of new logics, reproduction of faults that occur in the

electrical system, safely and without risk to its users. The bench was structured with a basic infrastructure and with the aid of a test box, testing logic and protection settings, commissioning and performing maintenance on protection systems. The same can be inserted in the training of professionals, in university laboratories for practical application in protection and control systems. To validate the bench, transmission line protection tests, substation bar protection and transformer protection were carried out, and the results presented validated the bench design and development, and its feasibility of application in the academic environment and professional training.

KEYWORDS: Protection of electrical systems, Digital relay, Simulations, Substation, Test bench.

1 | INTRODUÇÃO

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 [1]. A função dos relés de

proteção consiste em manter a estabilidade do sistema e continuidade dos serviços de eletricidades, 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 [2].

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 diminuindo a vida útil dos equipamentos, causando prejuízos financeiros às concessionárias de energia elétrica e aos consumidores [3].

Com a crescente evolução das técnicas de processamento digitais aplicada aos dispositivos eletrônicos inteligentes estes passaram a ter parâmetros mais complexos. Os IED's executam funções de controle de subestações através das lógicas implementadas, funções de proteção e comunicação com outros IED's apresentando um caráter multifuncional [4].

Os testes nos dispositivos de proteção se fazem necessários 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 [5].

Com a evolução dos relés eletromecânicos aos relés digitais multifuncionais, os testes nos dispositivos de proteção sofreram alterações no decorrer dos últimos anos. Os equipamentos de testes acompanharam essa evolução, saindo de equipamentos analógicos para modernos equipamentos com tecnologia microprocessada, atendendo aos novos requisitos dos modernos sistemas de proteção [6].

A utilização de plataformas de testes no ensino de proteção de sistemas elétricos de potência para os cursos de engenharia elétrica é de suma importância para a qualificação de profissionais capacitados para a inserção no mercado de trabalho, contribuindo com o ensino acadêmico e prático no estado da arte de proteção de sistemas elétricos [7].

A plataforma híbrida para ensino de proteção de sistemas elétricos de potência, desenvolve simulações computacionais com modelagem matemática, na qual modela um esquema de proteção e um sistema elétrico, bem como os testes a serem realizados nos dispositivos de proteção [8].

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 e os testes que serão realizados.

Dado a esse cenário, foi um dos grandes motivadores para o desenvolvimento deste projeto, pois se entende que o uso de uma bancada que reproduz falhas em sistemas

digitais de proteção e controle, irá possibilitar a realização de testes em dispositivos de proteção de forma segura, sem risco para o sistema elétrico e seus usuários.

Podemos evidenciar o aspecto de relevância deste trabalho é a utilização desta bancada para capacitação de profissionais e a inserção dela no meio acadêmico, permitindo aos estudantes de engenharia elétrica a aplicação prática de testes em sistemas digitais de proteção e controle.

Diante dessa questão este trabalho apresenta o desenvolvimento e a elaboração de uma bancada de reprodução de falhas, que simula sinais de equipamentos elétricos de potência, com distintas configurações de arranjos de subestação, sinais 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 de um vão de linha de transmissão, vão transformador ou mesmo vãos de barra de subestação.

Neste contexto, o artigo apresenta os testes que foram realizados, para validar a bancada que foi proposta, através de testes em proteção de linha de transmissão, mais especificamente na lógica de religamento automático, proteção de transformadores e proteção de barras de subestação.

O artigo está organizado da seguinte forma: Fundamentação Teórica na seção II. Desenvolvimento da bancada proposta III. As análises e discussões na seção IV e na seção V as considerações finais.

2 I FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Destaca-se 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 [9].

O projeto de uma bancada de teste, tendo como referência a norma IEC 61850 utilizando relés de proteção, na qual foi modelado um vão de transformador, sendo a sua utilização em laboratório de universidade, permitindo aos alunos o conhecimento de aplicação prática e estudos de sistemas de proteção [10].

A técnica híbrida para testar IED's foi desenvolvida tendo como referência a norma IEC 61850, sendo que um algoritmo foi desenvolvido no mat-lab simulando sinais de tensão e corrente, na qual esses sinais são injetados nos IEDS's com o auxílio de uma caixa de

teste [11].

Um sistema de teste automático em IED foi proposto para atender a universalização de teste em dispositivos de proteção e controle, o sistema consiste em uma plataforma de teste na qual são realizados ensaios de malha fechada em vários dispositivos de proteção simultaneamente e de diferentes fabricantes, o sistema de testes podem modificar os valores de configuração dos IED'S e analisar o desempenho, reduzindo o tempo de testes [12].

Um simulador matemático foi desenvolvido para realizar testes em relés numéricos, simulando falhas ocorridas no sistema elétrico de potência, na qual esses sinais são injetados nos IED's, com intuito de analisar o comportamento dos relés de proteção na ocorrência de falhas que ocorrem no sistema elétrico [13].

O laboratório portátil de proteção foi desenvolvido 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 [14].

Podemos observar que diversos autores têm publicado sobre testes em laboratorios ou bancada de testes para sistemas de proteção e controle. 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.

3 | DESENVOLVIMENTO DA BANCADA PROPOSTA

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 *bays* 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.

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.

A Fig. 1 ilustra um fluxograma para o desenvolvimento e concepção da bancada de teste, onde são descritos os principais passos para o desenvolvimento, concepção e montagem da bancada, para serem executados testes, comissionamento, simulação de

falhas ocorridas no sistema elétrico, em sistemas digitais de proteção e controle.

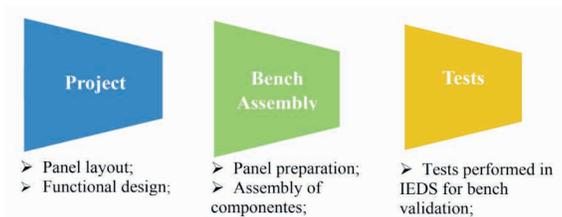


Fig. 1. Fluxograma para o desenvolvimento e concepção da bancada.

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 Fig. 2.



Fig. 2. Diagrama funcional de teste.

A. Layout da Bancada de Teste

O projeto do *layout* da bancada tem como referência uma subestação de transmissão de energia elétrica de extra alta tensão, em vista da necessidade de realização testes em proteção de transformadores, proteção de barra e proteção de linha de transmissão.

A configuração do projeto para a concepção da bancada foi de barramento de disjuntor e meio como ilustrado na Fig. 3, mas o arranjo da subestação pode ser alterado

de acordo a necessidade de teste, arranjo e nível de tensão da subestação, sendo que a montagem da bancada foi desenvolvida em um painel modular, permitindo essa flexibilização de alteração do tipo de configuração de subestação.

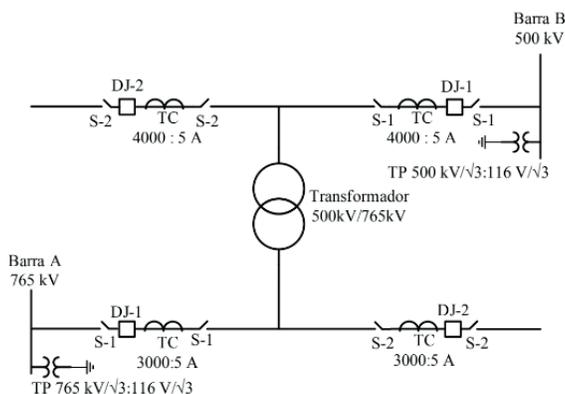


Fig. 3. Diagrama unifilar da bancada.

B. Levantamento e Aquisição dos Componentes da Bancada

Na tabela 1 são descritos os componentes da bancada e suas características de operação, dentro de suas funcionalidades, na qual esses componentes proporciona uma infraestrutura básica para o desenvolvimento de lógicas de acionamentos, intertravamentos e acionamentos elétricos. Os componentes da bancada atendem a todos os requisitos de segurança de seus usuários e dos componentes que foram montados.

Componentes da Bancada	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 supervisorio

Painel	Local onde foi montado todos os componentes da bancada
Fiação elétrica flexível 2,5mm	Utilizada para montar todo o circuito elétrico da bancada
Terminais	Utilizados para colocar na fiação, para garantir a segurança da instalação e estética da bancada
Fonte de alimentação	Para alimentar todos os componentes da bancada

Tabela I - Componentes da bancada

Os componentes da bancada têm a responsabilidade do total funcionamento e simulação dos estados de equipamentos elétricos, permitindo simular os sinais destes equipamentos (disjuntores e seccionadoras) para enviar essas informações para os IED's quando na necessidade de realizar testes, simulações de falhas e manutenção, de forma segura sem riscos para seus usuários e para o sistema elétrico de potência.

C. Concepção do Painel

Para o desenvolvimento da bancada de teste foi utilizado um painel modular para atender as aplicações dos componentes da bancada, que pode ser facilmente expandido quando no surgimento de melhorias, expansão do layout da bancada, de acordo as melhorias que vão surgindo ou mesmo inserção de tecnologia embarcada.

A Fig. 4 ilustra os componentes que foram montados na bancada que simularão todas as condições para realizarem testes, simulação de falhas, comissionamento em fábrica.

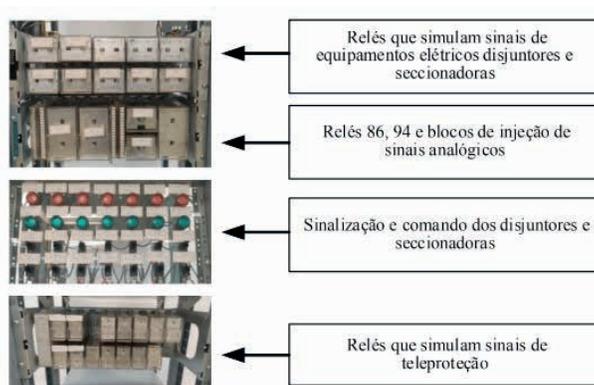


Fig. 4. Relés estáticos que simulam sinais de equipamentos elétricos.

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.

D. Montagem da Bancada

Para a montagem da bancada foi reaproveitado um painel de proteção desativado devido a modernização das proteções da subestação, definindo 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, ilustrado na Fig. 5.

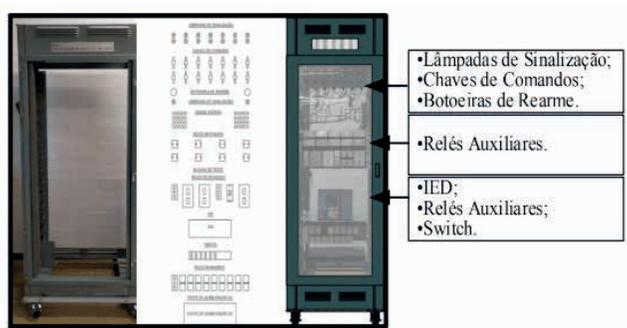


Fig. 5. Painel em fase de preparação.

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.

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

E. Realizar Testes em IEDS

A bancada 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 *bay* de linha de transmissão, *bay* transformador ou mesmo *bays* de barra de subestação.

No arranjo ilustrado na Figura 6 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.

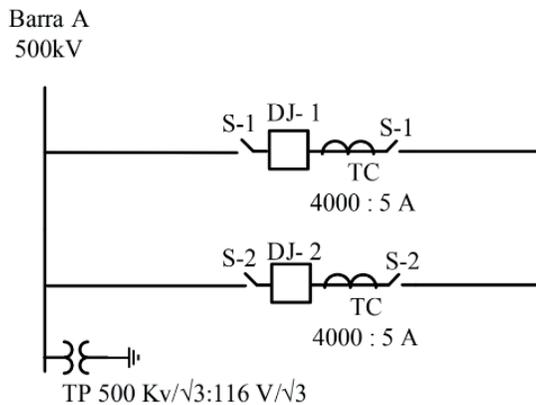


Fig. 6. Diagrama unifilar de um vão de barra.

4 | ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

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 ensaio simulando os sinais de tensão e corrente, configurados em termos de amplitude, frequência e defasamento angular.

Nesta seção são apresentados os resultados dos testes da proteção de linha de transmissão com nível de tensão de 765kV (lógica de religamento automático de linha de transmissão) fabricante Areva, proteção diferencial de barras de 500kV fabricante ABB e proteção de autotransformadores de 500/765kV fabricante Siemens.

F. Teste de Religamento Automático de Linha de Transmissão

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, para ocorrer a atuação da função de distância e iniciar o processo de religamento automático, a Fig. 7 ilustra a simulação do teste na lógica de religamento automático da linha de transmissão.

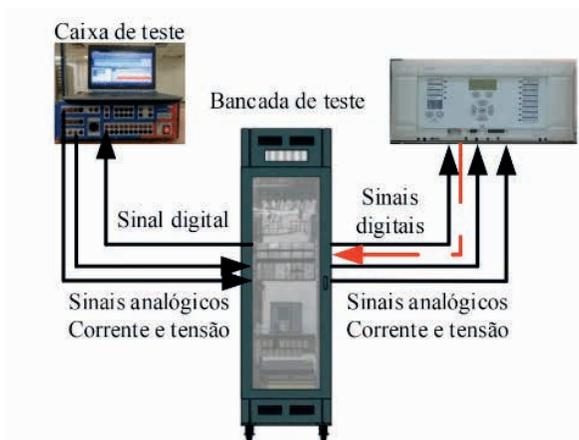


Fig. 7. Simulação do teste de religamento automático.

Para a execução do teste na lógica de religamento automático da linha de transmissão, foi considerado a linha de transmissão em operação, ou seja, a bancada simulou os sinais dos equipamentos elétricos que compõe o vão da linha de transmissão, como disjuntores, chave seccionadoras, enviando esses sinais para as entradas digitais do relé.

Com ajuda da caixa de teste foi simulado uma falha na linha de transmissão em Z1 atuando a função de distância, 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.

Na tabela 2 são ilustrados os valores de tensão e corrente que foram ajustados e injetados pela caixa de teste, para simular uma falta na linha de transmissão em Z1. Esses valores foram injetados no relé durante o teste na lógica de religamento automático e foram simuladas no *software* da caixa de teste omicron State *Sequencer*.

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

Tabela II - Valores de Tensão e Corrente

Após a simulação do teste, foram obtidos os resultados dos testes, sendo que a bancada simulou todos os sinais necessários para o funcionamento correto da lógica de religamento automático.

A Fig. 8 ilustra os resultados do teste na lógica de religamento automático, na qual o relé detectou uma falha na fase A, sendo uma falta em Z1, tendo a atuação da função de distância, após esta etapa é iniciado pela lógica o religamento automático, sendo realizado o check-sincronismo pela função de sincronismo, na qual a função de sincronismo faz a comparação das tensões Vref que simula a barra da subestação, com a tensão da fase B da linha de transmissão que simula o terminal líder.

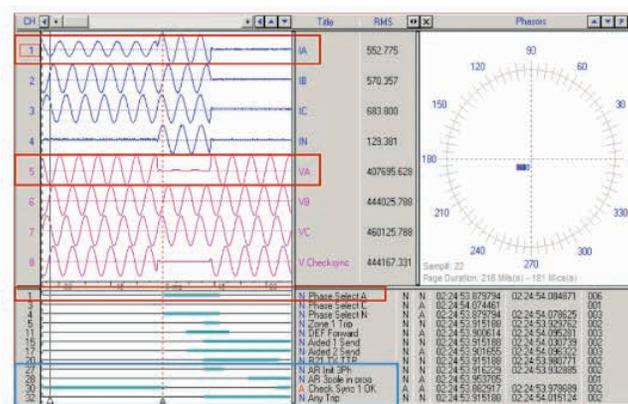


Fig. 8. Eventos e oscilografia do relé.

G. Teste na Proteção Diferencial de Barras de Subestação

Para a realização deste teste foram configurados na bancada dois vãos que compõe uma barra de subestação, simulando os sinais dos equipamentos elétricos que compõe esses vãos, como disjuntores e seccionadoras, esses sinais foram enviados para as entradas digitais do relé.

Essa simulação se faz necessária devido a função diferencial ter sido ajustada

para não atuar por correntes diferenciais falsas, essas informações são processadas pela lógica inserida no relé e em conjunto com a função diferencial faz com que o relé opere corretamente, a Fig. 9 ilustra o arranjo que foi configurado para a simulação do teste.

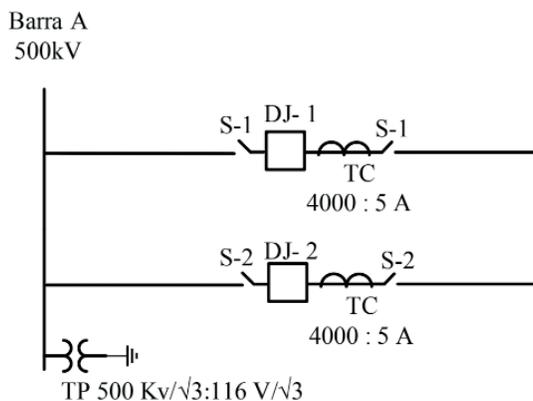


Fig. 9. Arranjo de teste.

Na tabela 3 são apresentados os resultados do teste do levantamento de curva da função diferencial, esses valores que estão nas tabelas são correntes de curto-circuito, que foram injetadas no relé.

lestab	ldiff Nominal	ldif real	Resultado
0.60 In	0.550 In	0.546 In	Aprovado
1.60 In	0.847 In	0.844 In	Aprovado
2.60 In	1.377 In	1.368 In	Aprovado
3.60 In	1.908 In	1.487 In	Aprovado
4.60 In	2.438 In	2.000 In	Aprovado
5.60 In	2.969 In	2.287 In	Aprovado

Tabela III - Resultado do teste

A Fig. 10 apresenta o diagrama da curva características de operação da proteção diferencial referente a fase A, onde I_{diff} corresponde a corrente diferencial de operação do relé e a I_{estb} a corrente de estabilização, os pontos na curva são a operação da proteção referente a um curto-circuito.

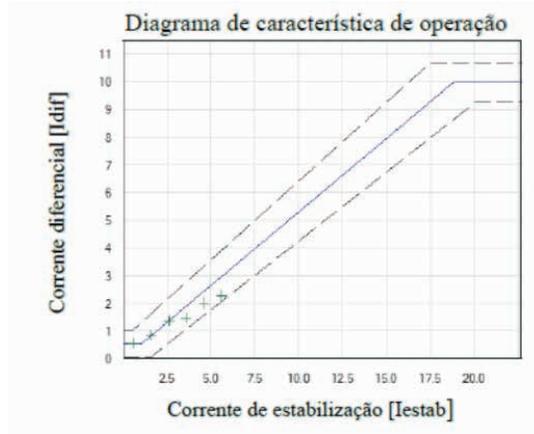


Fig. 10. Diagrama da característica de operação do relé.

A Fig. 11 ilustra os eventos e oscilografia que foram extraídos do relé após a realização do teste referente a fase A, onde podemos observar que a proteção diferencial atuou corretamente com as informações que a bancada enviou para o relé.

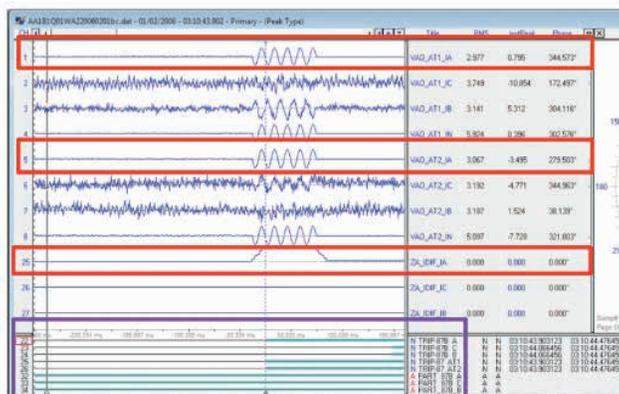


Fig. 11. Eventos e oscilografia da proteção diferencial.

H. Teste na Proteção do Autotransformador

Estes testes têm por objetivos monitorar as saídas binárias do relé, na qual foram simuladas faltas na condição da rede utilizando a caixa de ensaios para a injeção de sinais analógicos de corrente.

A bancada monitorou as saídas binárias do relé para a avaliação e validação do teste, sendo de suma importância a realização destes testes para detectar possíveis falhas potenciais não detectadas pelos autoteste do IED, na qual são monitorados as entradas e saídas digitais do IED a Fig. 12 ilustra o cenário de teste.

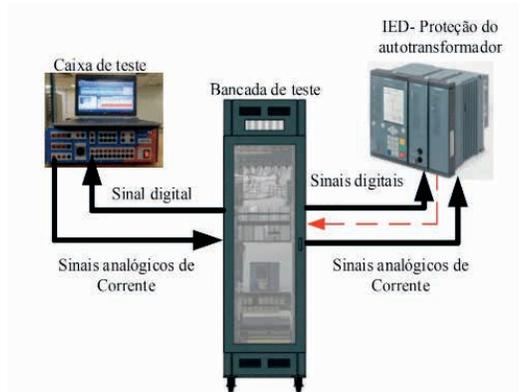


Fig. 12. Cenário de teste na proteção do autotransformador.

A tabela 4 ilustra o resultado do teste realizado na proteção diferencial do transformador, para o seguinte tipo de defeito: curto-circuito monofásico fase A e teste do enrolamento de alta contra o enrolamento de baixa.

lestab	Idiff Nominal	Idif 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

Tabela IV - Resultado do teste

Na Fig. 13 é ilustrado o diagrama da curva características de operação da proteção diferencial referente a fase A, o qual as curvas de operação estão referenciadas com a curva característica da proteção diferencial.

Sendo que a I_{diff} corresponde a corrente diferencial de operação do relé e a I_{estab} a corrente de estabilização, os pontos na curva são a operação da proteção referente a um curto-circuito.

O método deste teste é realizar a atuação da proteção do transformador para analisar os comportamentos das saídas binárias do relé, onde podemos observar que as saídas binárias atuaram corretamente.

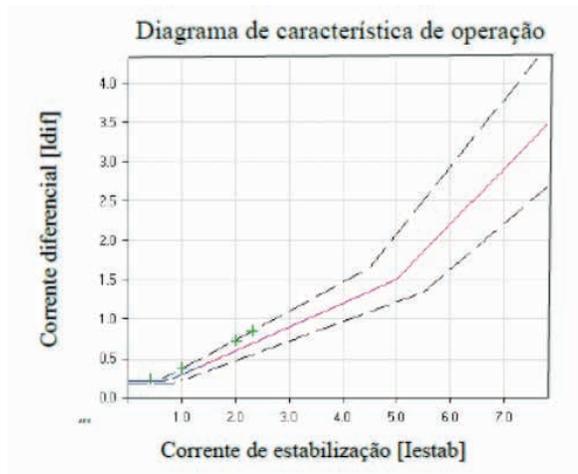


Fig. 13. Diagrama característica de operação.

Os sinais de abertura dos disjuntores monitorado pela bancada de teste é ilustrado na Fig. 14, na qual é observado que a função diferencial enviou os sinais de abertura para os disjuntores de alta e de baixa de acordo a parametrização da função diferencial.



Fig. 14. Monitoramento de abertura dos disjuntores.

Neste artigo 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.

5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho apresentou-se o desenvolvimento, concepção e o projeto concretizado de uma bancada de teste, sendo está uma ferramenta para realizar testes em funções e lógicas de relés digitais, simulações de falhas ocorridas no sistema elétrico de potência, comissionamento de sistemas de proteção e controle.

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

O trabalho desenvolvido mostrou análise de resultados dos testes realizados em lógicas de proteção de linha de transmissão, em funções de proteção de barras de subestação e autotransformadores, mostrando 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.

A capacidade de se realizar testes em sistemas digitais de proteção e controle, simulando sinais de equipamentos elétricos de um vão de uma linha de transmissão, vãos de barras de subestações ou vão 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.

Algumas aplicações a serem desenvolvidas em trabalhos futuros, a inclusão de realidade virtual para testes em dispositivos de proteção e controle, a utilização em testes de proteção e controle de sistemas de transmissão de corrente contínua.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade (PPGIES) e a UNILA pelo incentivo a pesquisa e a Furnas Centrais Elétricas por disponibilizar a infraestrutura para o desenvolvimento pesquisa.

REFERÊNCIAS

[1] I. Power System Relaying Committee of the IEEE Power and E. Society, *IEEE Guide for Power System Protection Testing IEEE Power & Energy Society*, vol. 233, no. December. 2009. DOI: 10.1109/IEESTD.2009.5352213

- [2] A. A. Sallam and O. P. Malik, *Electric distribution systems*. 2018. John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA, 2011.
- [3] J. H. Jurgensen, L. Nordstrom, and P. Hilber, "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.
- [4] S. Kariyawasam, A. Wickremasuriya, and A. Rajapakse, "Teaching IEC 61850 Based Substation Automation Through Hands-on Experiences," in *2017 IEEE ELECTRICAL POWER AND ENERGY CONFERENCE (EPEC)*, 2017, pp. 326–331. DOI: 10.1109/EPEC.2017.8286217.
- [5] K. Rofalski, *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems , Second Edition Power System Economics Power System Control and Stability , Second Edition Encyclopedia of Electrical & Electronics Eng Online Electromechanical Energy Devices and Power Systems*. DOI: 10.1002/9783527679065
- [6] G. . Paulino, M. E. C. Penariol, "AUTOMAÇÃO DE TESTES DE DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO DE SISTEMAS ROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS," *XXII SNPTTE*, 2013.
- [7] Marcos Antônio Dias de Almeida, Marcel da Costa Fontes, and Arrhenius Vinicius da Costa Oliveira, "Plataforma Didática Compatível Com A Norma IEC61850 Para Comissionamento de Sistema Digital de Controle e Proteção de Subestações," *An. do VI Simpósio Bras. Sist. Elétricos*, pp. 1–6, 2016. DOI:10.20906/cps/sbse2016-0159.
- [8] C. A. Morales, C. Hernandez, M. A. Arjona, and S. Member, "Undergraduate Teaching of Electric Network Protection Using Simulations and Lab Experiments," vol. 19, no. 5, pp. 807–814, 2021. DOI: 10.1109/TLA.2021.9448315.
- [9] A. Enayati and T. H. Ortmeyer, "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.
- [10] P. Jankee and K. Awodele, "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.
- [11] M. A. Ali, "Hybrid Technique for Testing IEC 61850 Based IEDs of Distance Protection," in *2017 NINETEENTH INTERNATIONAL MIDDLE-EAST POWER SYSTEMS CONFERENCE (MEPCON)*, 2017, vol. 0, pp. 353–358. DOI: 10.1109/MEPCON.2017.8301205, Cairo, Egypt.
- [12] Y. Xia, W. Li, X. Zhang, C. Kang, H. Zhou, and B. Zheng, "Research on automatic test system of on-site relay protection device," *2020 2nd Int. Conf. Smart Power Internet Energy Syst. SPIES 2020*, pp. 59–63, 2020. DOI: 10.1109/SPIES48661.2020.9243114.
- [13] G. Jurić, J. Havelka, T. Capuder, and S. Sučić, "Laboratory test bed for analyzing fault-detection reaction times of protection relays in different substation topologies," *Energies*, vol. 11, no. 9, 2018. DOI:10.3390/en11092482
- [14] A. Gandhi et al., "Teaching Protective Relaying Using a Portable Relay Training Laboratory," *2020 52nd North Am. Power Symp. NAPS 2020*, 2021. DOI: 10.1109/NAPS50074.2021.9449762