

UNIVERSIDADE REGIONAL INTEGRADA DO ALTO URUGUAI E DAS MISSÕES
PRÓ-REITORIA DE ENSINO, PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
CÂMPUS DE ERECHIM
ÁREA DE ENGENHARIAS E CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

VAGNER BAGNARA VIEIRA

ATUALIZAÇÃO DO SISTEMA DE PROTEÇÃO DE UM TRANSFORMADOR DE
ALTA TENSÃO DE 138kV/44kV

ERECHIM - RS

2023

VAGNER BAGNARA VIEIRA

**ATUALIZAÇÃO DO SISTEMA DE PROTEÇÃO DE UM TRANSFORMADOR DE
ALTA TENSÃO DE 138kV/44kV**

**Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Elétrica como requisito parcial à obtenção
do título de Bacharel em Engenharia
Elétrica, Área de Engenharias e Ciência da
Computação da Universidade Regional
Integrada do Alto Uruguai e das Missões –
Câmpus de Erechim.**

Orientador: Prof. Me. Sérgio Bordignon

ERECHIM - RS

2023

VAGNER BAGNARA VIEIRA

**ATUALIZAÇÃO DO SISTEMA DE PROTEÇÃO DE UM TRANSFORMADOR DE
ALTA TENSÃO DE 138kV/44kV**

**Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Elétrica como requisito parcial à obtenção
do título de Bacharel em Engenharia
Elétrica, Área de Engenharias e Ciência da
Computação da Universidade Regional
Integrada do Alto Uruguai e das Missões –
Câmpus de Erechim.**

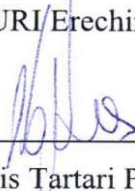
Erechim, 11 de dezembro de 2023.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Me. Sérgio Bordignon (Orientador)

URI Erechim



Prof. Fernando Luis Tartari Peres (Examinador)

URI Erechim



Prof.^a Me. Camila Sampaio Reis (Examinadora)

URI Erechim

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me permitir viver esse sonhado momento, e me dar forças nas horas difíceis.

Agradeço minha esposa Tania Cristina Conci Vieira e a minha filha Laís Conci Vieira pelo apoio incondicional na caminhada, pela compreensão ao meu propósito, sem vocês seria muito mais difícil.

Aos meus pais Valdir Vieira e Nelci Bagnara Vieira, que sempre me apoiaram e deram forças ao longo de minha vida, meus irmãos Erli, Cassiano e Aline que sempre torcem pelo meu sucesso.

Sou grato a todos os colegas de aula, pela amizade, parceria e troca de conhecimentos, a URI-Erechim, seus professores e funcionários. Agradecimento especial aos professores Adilson Stankiewicz pelo convite para graduação, Sergio Bordingnon orientador deste trabalho, Fernando Peres e Camila Reis que compuseram minha banca.

*Pensar é o trabalho mais difícil que existe.
Talvez por isso tão poucos se dediquem a ele.*

(Henry Ford)

RESUMO

Este trabalho tem o objetivo de realizar a atualização das proteções intrínsecas e externas de um transformador de alta tensão, 138kV / 44kV. Primeiramente conceitua-se a partir das bibliografias estudadas, a filosofia utilizada em sistemas de proteção e os equipamentos utilizados na sua configuração, com ênfase em proteção de transformadores. O contexto do trabalho parte das proteções existentes, que já estão obsoletas, e projeta a mudança delas por um sistema novo e mais tecnológico com relé digital que tem capacidade de processar muitas funções em paralelo, incrementando o sistema de proteção do transformador. O estudo demonstra as diversas funções de proteção a ser utilizada no projeto, passando pelas proteções externas e intrínsecas do transformador, demonstrando a sua importância dentro do contexto da aplicação. Também está presente a forma de cálculo das principais proteções e os métodos de testes a ser utilizado. A substituição de relés obsoletos por um relé com tecnologia de ponta, traz um enorme ganho e maior confiabilidade para o sistema de potência. A realização de testes em bancada é uma ferramenta que auxilia na descoberta de possíveis falhas que em testes reais, na futura instalação em campo, já estão superadas. Para os testes foi utilizado protocolo da norma IEC-61850, criando uma rede ethernet com a conexão dos equipamentos de teste e relé. Obteve-se resultados satisfatórios para os testes em bancada dando uma ótima prévia dos futuros testes em campo, que poderão sugerir alterações necessárias.

Palavras-chave: Atualização. Proteção. Equipamento. Projeto. Teste.

ABSTRACT

This study aims to update the intrinsic and external protections of a 138kV/44kV high voltage transformer. Initially, the paper delves into the conceptual framework derived from the reviewed literature, outlining the philosophy employed in protection systems and the equipment utilized in their configuration, with a specific focus on transformer protection. The project context stems from the existing, outdated protections and envisions their replacement with a new, more technologically advanced system employing digital relays capable of processing multiple functions concurrently, enhancing the transformer protection system. The study highlights various protection functions to be implemented in the project, covering both external and intrinsic aspects of transformer protection, and emphasizing their significance within the application context. The paper also presents the calculation methodology for key protections and the testing methods to be employed. The replacement of obsolete relays with cutting-edge technology contributes significantly to increased efficiency and reliability in the power system. Bench testing serves as a valuable tool in uncovering potential issues that can be addressed before actual field installation. For testing purposes, the IEC-61850 protocol was employed, establishing an Ethernet network for connecting testing equipment and relays. Satisfactory results were obtained from bench testing, providing a valuable preview of future field tests that may suggest necessary adjustments.

Keywords: Update. Protection. Equipment. Project. Testing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Transformador de corrente	16
Figura 2 – Transformador de potência indutivo	17
Figura 3 – Funcionamento do relé elementar	18
Figura 4 – Evolução do relé eletrônico ou estático	19
Figura 5 – Hardware do relé digital.....	20
Figura 6 – Representação de um sistema geração, transmissão e distribuição.....	21
Figura 7 – Transformador e TC's	23
Figura 8 – Relés de proteção existentes.....	24
Figura 9 – Configuração das proteções do transformador.....	25
Figura 10 – UPC Relé SEL-487E.....	25
Figura 11 – Identificação do projeto.....	26
Figura 12 – Lógica SEL-487E.....	27
Figura 13 – Relé de gás	28
Figura 14 – Relé de fluxo	29
Figura 15 – Termômetro PT 100	30
Figura 16 – Zona da proteção diferencial 87T	36
Figura 17 – Proteção diferencial em condição de não atuação.....	37
Figura 18 – Esquema de proteção diferencial para transformador de dois enrolamentos	37
Figura 19 – Rede para teste	38
Figura 20 – Caixa de Teste CMC256-6.....	39
Figura 21 – Oscilografia de corrente da proteção instantânea.....	40
Figura 22 – Oscilografia de corrente e tensão da proteção instantânea.....	41
Figura 23 – Oscilografia da corrente de proteção temporizada.....	41
Figura 24 – Oscilografia de corrente e tensão da proteção temporizada.....	42
Figura 25 – Oscilografia da proteção 87T	43
Figura 26 – Oscilografia de corrente e tensão da proteção 87T	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

kV	kilovolts
TC	Transformador de corrente
TP	Transformador de potencial
kVA	kilovoltsampere
N	Neutro
MVA	Megavoltsampere
T	Transformador
C	Comutador
CDC	Comutador com Derivação em Carga
RTC	Relação de transformação do TC
GOOSE	Generic object oriented substation event

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Objetivos	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 Proteção de Sistemas Elétricos.....	14
2.2 Filosofia de proteção	15
2.3 Transformadores de Medição	15
2.3.1 Transformadores de Corrente.....	16
2.3.2 Transformadores de Potencial	17
2.4 Relés de Proteção.....	18
2.4.1 Relés Eletromecânicos	18
2.4.2 Relés Eletrônicos ou Estáticos	19
2.4.3 Relés Digitais.....	19
2.5 Transformador de Potência.....	20
2.6 Proteção de Transformadores.....	21
3 METODOLOGIA.....	23
3.1 Configuração Atual.....	23
3.2 Relé digital	25
3.2.1 Definição do Novo Relé	25
3.2.2 Configuração do relé.....	26
3.3 Proteção.....	27
3.3.1 Proteções Intrínsecas	27
3.3.1.1 Proteção de Gás 63T (Relé Bucholz)	27
3.3.1.2 Proteção de fluxo 63C	29
3.3.1.3 Termômetro do óleo	30
3.3.1.4 Termômetro de Imagem Térmica (49)	30
3.3.2 Proteções Externas.....	31
3.3.2.1 Proteção Instantânea de Fase (50).....	31
3.3.2.2 Proteção Temporizada de Fase e Neutro (51/51N)	32
3.3.2.3 Proteção de Bloqueio (86T)	34
3.3.2.4 Proteção Diferencial do Transformador (87T).....	35
3.4 Testes	38
3.4.1 Teste proteção instantânea (50)	39

3.4.2	Teste proteção temporizada (51 / 51N)	41
3.4.3	Teste proteção diferencial.....	42
3.4.4	Avaliação dos testes.....	44
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	45
	REFERÊNCIAS	46

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de proteção estão cada vez mais modernos e robustos, atualmente muitas funções podem ser atendidas por apenas um relé e com tempos de resposta e confiança infinitamente maiores do que uma ou duas décadas atrás. A tecnologia de proteção de sistemas evoluiu de equipamentos eletromecânicos até poderosos equipamentos microprocessados capazes de realizar a medição de diferentes grandezas e atuar no sistema no instante da falha (OLIVEIRA et al., 2021).

Os curtos-circuitos e sobrecargas são inerentes ao sistema elétrico de potência, e mesmo que tomamos medidas para evitar tais eventos, eles podem acontecer com consequências irrelevantes ou desastrosas, e essa diferença depende de um bom projeto de proteção (MAMEDE FILHO, 2020).

Segundo Mamede Filho (2020), a principal função de um sistema de proteção é assegurar a desconexão do sistema elétrico ou parte dele submetido a qualquer anormalidade que o faça operar fora dos limites previstos. Por isso um sistema de proteção deve isolar a falta no menor tempo possível, sem deixar causar danos aos equipamentos protegidos.

O transformador de potência é o equipamento mais importante em uma subestação, e por isso deve receber especial atenção no estudo de proteção para se manter íntegro e desempenhar sua função sem interrupções indesejadas e que lhe causem danos. As proteções que precisam ser aplicadas num transformador dependem da sua capacidade nominal e da importância da carga que alimenta (MAMEDE FILHO, 2020).

Seguindo a linha da evolução dos equipamentos de proteção aplicados ao sistema elétrico de potência, há sistemas que continuam funcionando e atendendo cargas que são importantes para o sistema, mas que necessitam de atualização no seu projeto de proteção com o intuito de oferecer maior confiabilidade e melhor tempo de resposta na ocorrência de faltas.

A proposta desse trabalho é realizar o estudo e projeto para a atualização do sistema de proteção de um transformador de alta tensão de 138 kV / 44 kV, com a futura substituição dos relés de proteção existentes por apenas um relé que vai concentrar todas as funções de proteção que são atendidas atualmente, para sobrecorrente por relés eletromecânicos e para corrente diferencial de corrente por relé eletrônico.

1.1 Objetivos

A elaboração desse estudo tem como objetivo geral a atualização do sistema de proteção de um transformador de alta tensão de 138 kV / 44 kV.

Para desenvolver o objetivo geral no projeto, serão abordados os objetivos específicos listados abaixo:

- Realizar pesquisa acerca de sistemas de proteção e equipamentos que auxiliam na configuração de um sistema de proteção.
- Apresentar a atual configuração física, de equipamentos e proteção.
- Apresentar o equipamento que será empregado no projeto, assim como as funções que vai desempenhar.
- Caracterizar o emprego das proteções que serão configuradas.
- Evidenciar os métodos e equipamento utilizados nos testes de proteção.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta o estudo sobre sistemas de proteção, com foco em proteção de transformadores. Será apresentado também os equipamentos necessários para configuração da proteção de transformadores e suas funções básicas.

2.1 Proteção de Sistemas Elétricos

Os sistemas elétricos estão sujeitos a falhas em seus equipamentos de proteção, que causam transtornos para o sistema, e afetam a qualidade do serviço prestado.

Segundo Mamede Filho (2020) dentre os problemas que podem ocasionar falhas no sistema elétrico, temos o curto-circuito, que proporciona elevadas correntes circulando pelos componentes ligados no sistema, a sobrecarga que também é nociva ao sistema, subtensões, sobretensões. As manobras também podem ocasionar problemas quando feitas de forma errada, pois um erro de manobra pode ocasionar danos irreparáveis aos equipamentos manobrados.

A principal função de um sistema de proteção é assegurar a desconexão de todo sistema elétrico ou parte dele submetido a qualquer anormalidade que o faça operar fora dos limites previstos (MAMEDE FILHO, 2020). Por isso um sistema de proteção bem configurado, pode evitar perdas de equipamentos e diminuição do tempo das faltas ocasionadas pelos fatores expostos acima.

A proteção tem um papel muito importante para um sistema confiável e se deve levar em consideração no planejamento dos testes, é projetada para que forneça uma alta segurança e continuidade operacional, proteção pessoal e evitar danos a equipamentos em condições anormais de funcionamento (ROCHA DUARTE, 2018).

A atualização das proteções do sistema estudado, utiliza relé de proteção, que deve atuar em disjuntores fazendo com que seja isolada a falha o mais rápido possível. Os relés sempre devem atuar sobre o equipamento responsável pela desconexão do circuito elétrico afetado, normalmente o disjuntor ou o religador (MAMEDE FILHO, 2020).

Os critérios que geralmente são utilizados para detectar um defeito, segundo Mamede Filho (2020), são a elevação de corrente, elevação e redução de tensão, inversão do sentido de corrente, alteração da impedância do sistema e comparação de módulo e ângulo de fase na entrada e na saída do sistema. Ainda conforme Mamede Filho (2020) devemos considerar algumas variáveis do cotidiano técnico para compreender a estrutura de proteção, sendo elas, corrente nominal, corrente de ajuste, corrente de acionamento, corrente máxima admissível,

consumo, potência nominal, tensão nominal, tensão de serviço, tensão máxima admissível e temporização.

2.2 Filosofia de proteção

Conforme Oliveira et al. (2021), a primeira usina hidrelétrica do Brasil é datada de 5 de setembro de 1889. A partir daí os sistemas de proteção foram evoluindo na proporção do avanço da energia elétrica no país, partindo para sistemas cada vez mais autônomos, o que não impede que até os dias de hoje ainda sejam utilizados relés eletromecânicos, que apesar de obsoletos funcionam de maneira satisfatória, porém não permitem automação.

Na concepção de um projeto e sua operação, segundo Rocha Duarte (2018) devemos considerar a condição normal de operação, a prevenção de falhas elétricas e a redução dos efeitos das falhas. O relé tem a função de captar falhas e distúrbios, minimizando seus efeitos e conseqüentemente fornecendo confiabilidade e continuidade ao sistema.

Um sistema de proteção tem por princípio de operação diminuir ou evitar risco de morte a operadores e à população em geral, bem como evitar danos materiais ao sistema durante a sua atuação em caso de uma anomalia (OLIVEIRA et al., 2021). Uma falta deve ser eliminada no menor tempo possível, independentemente de sua magnitude e com o menor transtorno possível para seus clientes e população.

Partindo dessa premissa, o sistema de proteção deve ter uma lógica que consiga realizar a interação entre os diversos componentes do sistema. Para Oliveira et al. (2021), os requisitos básicos de um sistema de proteção devem proporcionar, coordenação e seletividade, rapidez, sensibilidade, confiabilidade e custo adequado.

2.3 Transformadores de Medição

Transformadores de medida são equipamentos que permitem aos instrumentos de medição e proteção funcionar adequadamente sem que seja necessário possuírem correntes e tensões nominais de acordo com a corrente de carga e a tensão do circuito principal (MAMEDE FILHO, 2020). Transformador de corrente (TC) e transformador de potencial (TP), são os equipamentos utilizados para dar segurança na medição de sistemas de proteção, fazendo com que as correntes e tensões sejam diminuídas a níveis seguros para se trabalhar a proteção.

2.3.1 Transformadores de Corrente

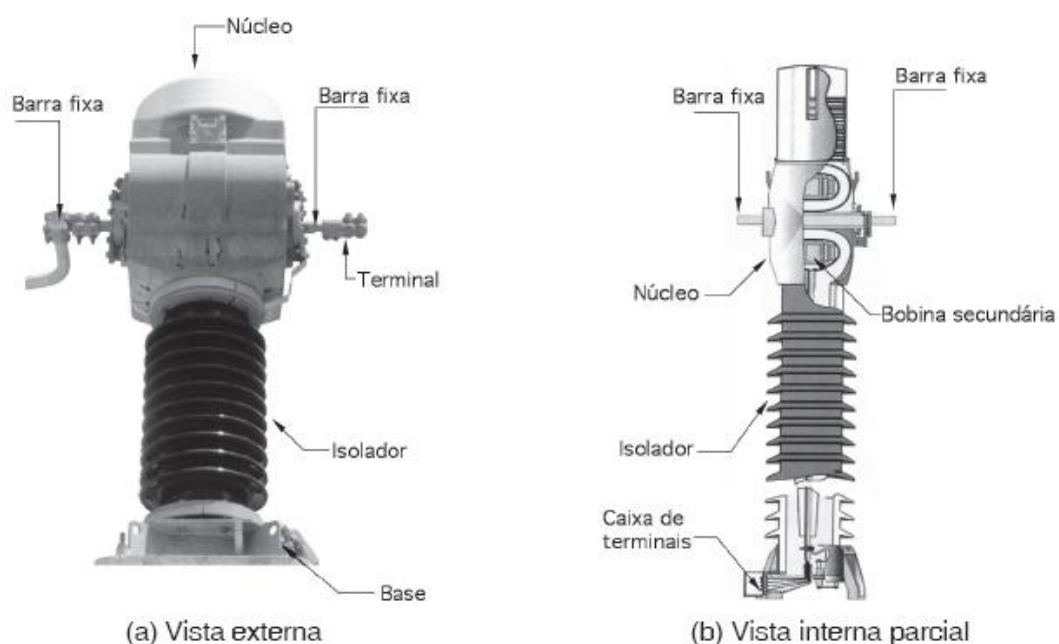
Os transformadores de corrente são equipamentos que permitem aos instrumentos de medição e proteção funcionar adequadamente sem que seja necessário possuírem correntes nominais de acordo com a corrente de carga do circuito ao qual estão ligados (MAMEDE FILHO, 2020). São usados para aparelhos com baixas correntes elétricas dos quais podemos destacar os relés de proteção.

Os TCs devem ser capazes de reproduzir as correntes de zero a 20 vezes a corrente nominal, mantendo a classe de exatidão garantida pelo fabricante (ROCHA DUARTE, 2018). Existem diversos tipos de transformadores de corrente:

- Transformador de corrente tipo bucha;
- Transformador de corrente tipo pedestal;
- Transformadores de corrente tipo barra;
- Transformadores de corrente toroidal (janela).

A Figura 1 (a) mostra um transformador de corrente tipo pedestal da classe 72,5 kV utilizado em sistemas de proteção de subestações. Já a figura 1 (b) mostra um transformador de corrente similar ao da figura 1(a) mostrando seus componentes internos. Esse é o tipo de transformador de corrente utilizado para proteção do transformador em que será atualizado o sistema de proteção.

Figura 1 – Transformador de corrente



Fonte: Mamede Filho (2020)

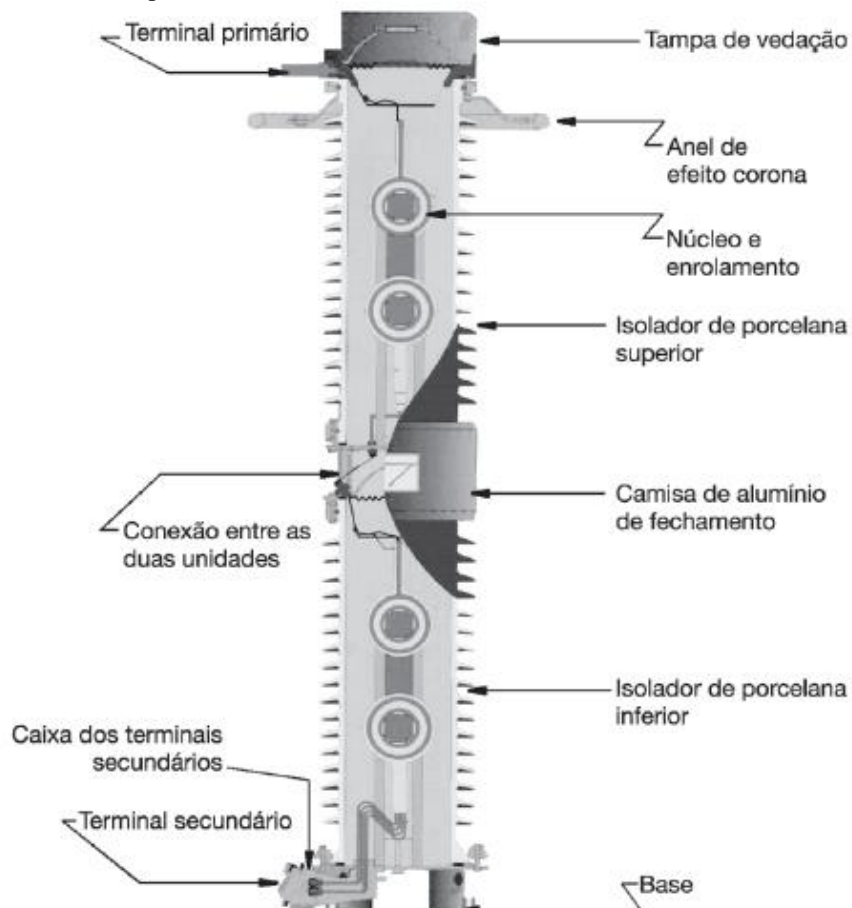
2.3.2 Transformadores de Potencial

São utilizados em aparelhos que apresentam impedâncias elevadas, empregados em sistemas de proteção e medição, geralmente são empregados junto com transformadores de corrente. Segundo Mamede Filho (2020), os transformadores de potencial são equipamentos que permitem aos instrumentos de medição e proteção funcionarem adequadamente sem que seja necessário possuir tensão de isolamento de acordo com a da rede à qual estão ligados.

Transformador de potencial é aplicado para instrumentos cujo enrolamento primário é ligado em paralelo com um circuito elétrico e reproduz no secundário uma tensão cujo valor é função da tensão do primário e da relação direta da quantidade de espiras dos enrolamentos (ROCHA DUARTE, 2018).

O TP é similar ao transformador de força, o que os diferencia é que o transformador de força alimenta uma carga secundária sem exceder o limite de temperatura, o TP alimenta uma carga secundária sem exceder o limite de erro de transformação. A figura 2 mostra um típico transformador de potencial utilizado em subestações com tensões altas.

Figura 2 – Transformador de potência indutivo



Fonte: Mamede Filho (2020)

2.4 Relés de Proteção

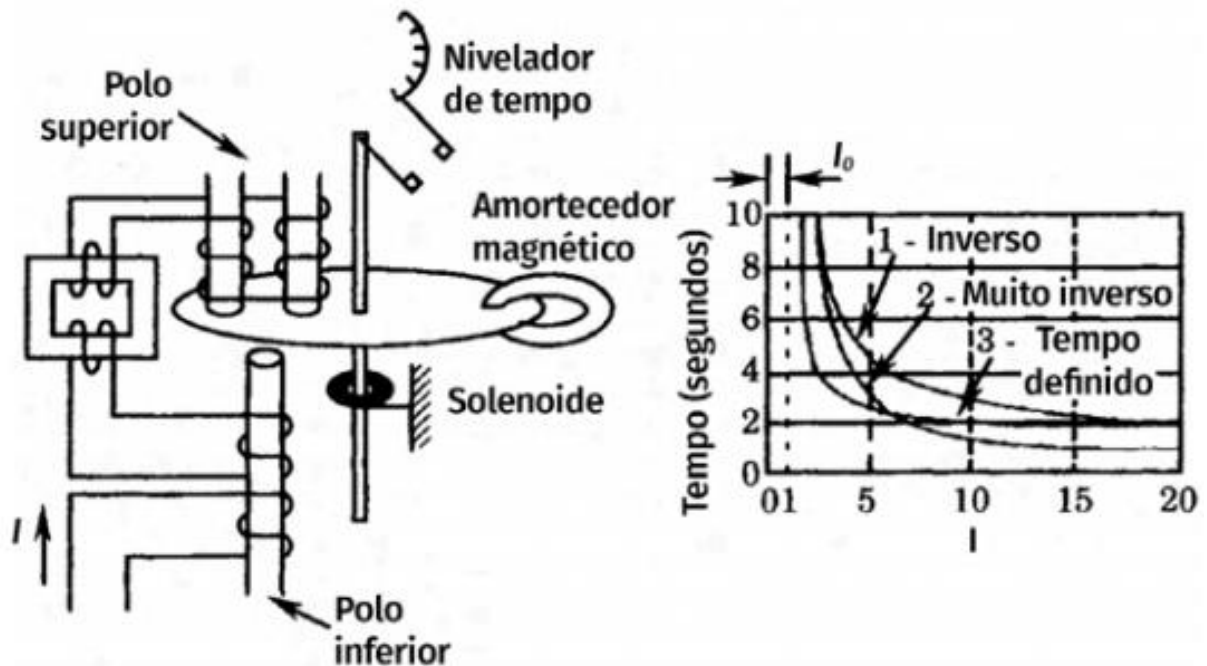
O relé é um dispositivo utilizado para operar um equipamento elétrico quando são produzidas variações nas condições desse equipamento ou do circuito ligado a ele ou a outro equipamento ou circuito associado (OLIVEIRA et al., 2021). Ou seja, relé de proteção tem a função de eliminar no menor tempo possível uma falta que pode ocasionar transtornos ao sistema, atuando especificamente na área afetada pelo distúrbio.

O relé de proteção é complementado pelo disjuntor na tarefa de retirar de operação o elemento defeituoso ou que esteja operando em condições anormais. O disjuntor é responsável pela desconexão do elemento, quando for solicitado pela atuação do relé de proteção (ROCHA DUARTE, 2018).

2.4.1 Relés Eletromecânicos

Os relés eletromecânicos, segundo Oliveira et al. (2021), contém elementos elétricos e magnéticos, condutores e núcleo ferromagnético, partes mecânicas, êmbolos móveis ou alavancas. Na figura 3 está demonstrado o funcionamento do relé elementar eletromecânico.

Figura 3 – Funcionamento do relé elementar

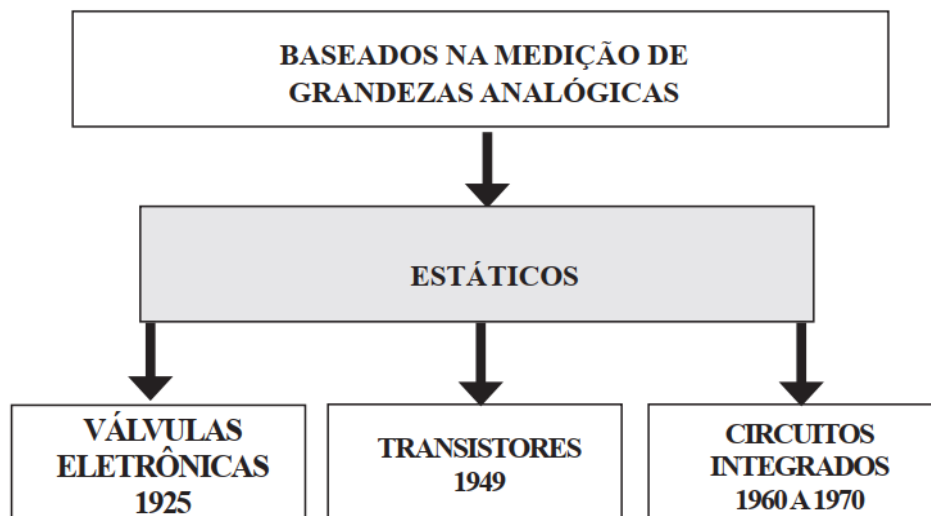


Fonte: Oliveira et al. (2021)

2.4.2 Relés Eletrônicos ou Estáticos

Os relés eletrônicos ou estáticos, ao invés de utilizarem estruturas eletromecânicas usam estruturas retificadoras e componentes eletrônicos controlados. Essa tecnologia propiciou o surgimento dos primeiros relés multifunção (ROCHA DUARTE, 2018). A Figura 4 traz a evolução dos relés estáticos.

Figura 4 – Evolução do relé eletrônico ou estático



Fonte: Duarte (2018)

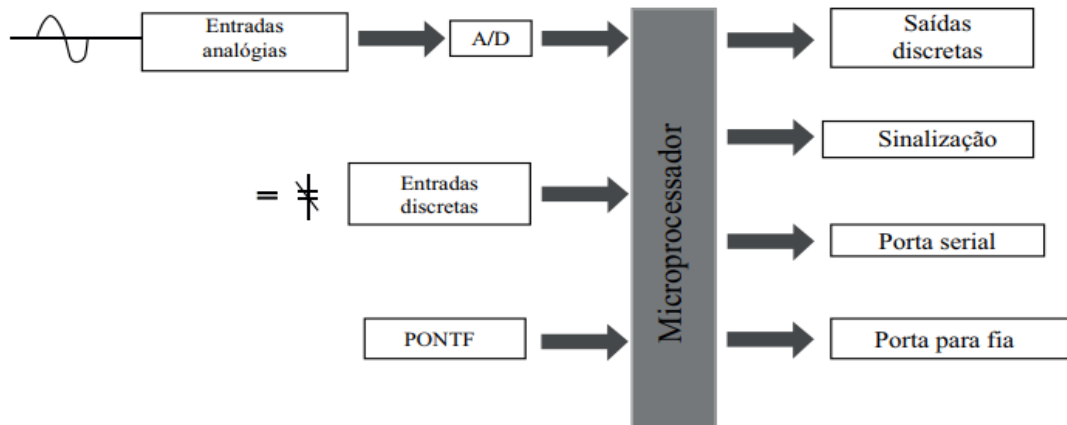
O funcionamento desses relés é semelhante ao dos eletromecânicos, porém suas peças são estáticas, com elementos semicondutores de eletrônica de potência, como diodos, tiristores e transistores (OLIVEIRA et al., 2021). Os relés eletrônicos possuem contatos elétricos que propiciam o acionamento de bobinas auxiliares e sinalização, e seu tempo de reação é inferior ao eletromecânico.

2.4.3 Relés Digitais

Segundo Rocha Duarte (2018), os relés digitais se baseiam em grandezas digitais e fazem também além de proteção, funções de medição e controle. São relés multifunção com características adaptativas. Na figura 5 está caracterizado o hardware básico de um relé digital.

Foram incorporados diversos recursos aos relés de proteção com esse avanço da tecnologia, dentre eles o hardware que pode ser aplicado em outros tipos de relé, funções adaptativas, registrador digital de perturbações, localizador de faltas, medição e controle.

Figura 5 – Hardware do relé digital



Fonte: Duarte (2018)

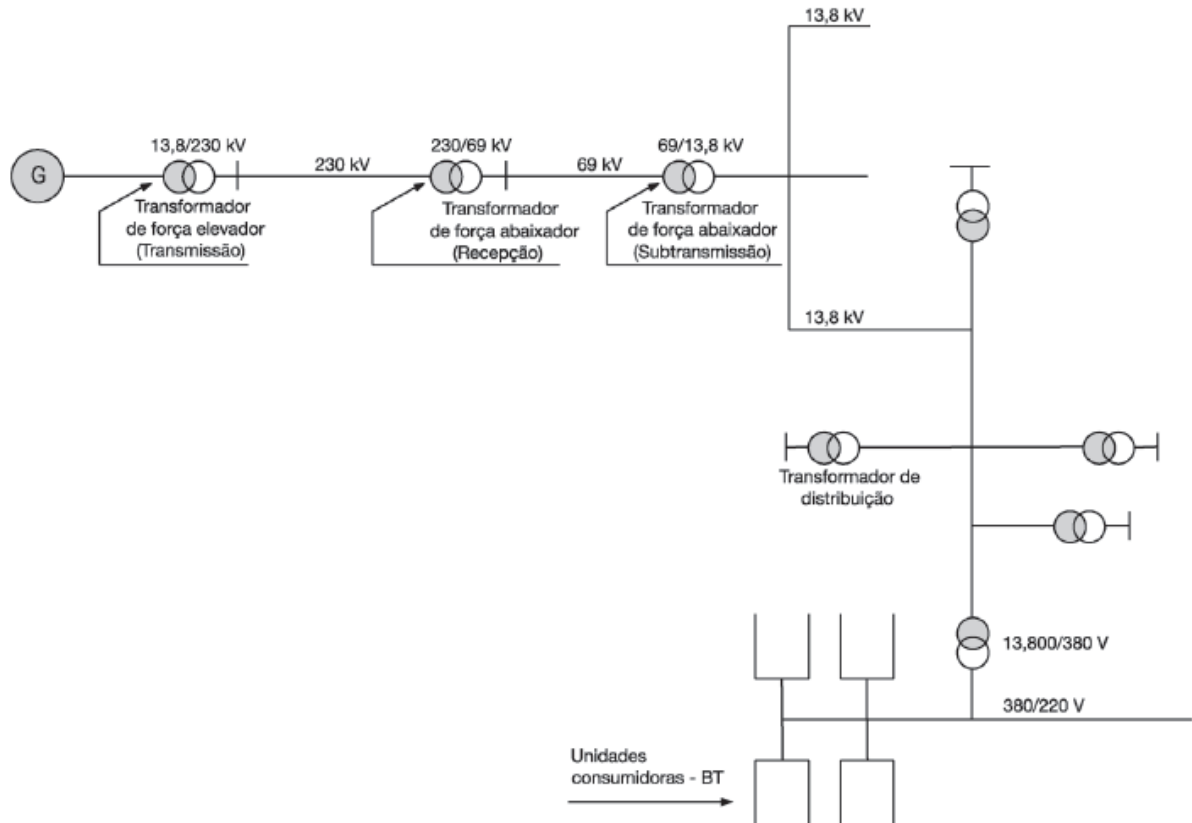
Os relés digitais conseguem tempos de respostas bem melhores em comparação aos relés eletromecânicos e os relés eletrônicos, além de elementos eletrônicos, esses relés têm microprocessadores, que podem ser administrados em situações mais complexas, promovendo maior lógica em seu monitoramento e tomada de decisão mais precisa (OLIVEIRA et al., 2021). Também suportam um alto nível de programação lógica para proteção e controle de circuitos e equipamentos.

2.5 Transformador de Potência

Transformador é um equipamento de operação estática que por meio de indução eletromagnética transfere energia de um circuito, chamado primário, para um ou mais circuitos denominados, respectivamente, secundário e terciário, sendo, no entanto, mantida a mesma frequência, porém com tensões e correntes diferentes (MAMEDE FILHO, 2020).

Os transformadores permitem que sejam reduzidas tensões a níveis seguros para utilização em residências, comércio e indústrias. São utilizados a partir das usinas, elevando os níveis de tensão para reduzir as perdas de transmissão de potência até as subestações localizadas mais próximas aos centros de consumo, onde rebaixam a tensão a níveis de distribuição. A Figura 6 mostra um sistema de geração, transmissão, subtransmissão e distribuição.

Figura 6 – Representação de um sistema geração, transmissão e distribuição



Fonte: Mamede Filho (2019)

Em sua concepção mais simples, o transformador é constituído, segundo Mamede Filho (2020), de dois enrolamentos, o primário que recebe a energia do sistema e o secundário transfere essa energia para a distribuição. Seu funcionamento pode ser estudado nas suas três mais importantes situações de operação.

- A Vazio – Quando transformador está energizado e não tem nenhuma carga ligada no secundário.
- Em Carga – Quando uma carga é ligada no secundário, fazendo circular corrente no secundário e conseqüentemente no primário.
- Em Curto-Circuito – Quando os bornes do secundário são ligados em curto fazendo com que a tensão medida seja praticamente nula.

2.6 Proteção de Transformadores

Como o transformador de potência é o elemento de maior responsabilidade dentre os demais empregados numa subestação, é de fundamental importância um estudo pormenorizado

sobre as proteções que devem ser utilizadas para manter a sua integridade e permanência em operação (MAMEDE FILHO, 2020).

As subestações podem ter diversas configurações, e os estudos de proteção devem atender de forma individual cada arranjo, segundo Mamede Filho (2020) devem contemplar, o nível de confiabilidade desejada, características da carga que irá atender, esquema de proteção desejado, número de transformadores desejados e potência de curto-circuito equivalente do sistema.

Mamede Filho (2020) avalia que as proteções que devem ser aplicadas num transformador, dependem da sua capacidade nominal e da importância da carga alimentada. Para transformadores de distribuição, são utilizadas chaves fusíveis, transformadores utilizados em plantas industriais com capacidade até 300 kVA são protegidos com chaves seccionadoras e com capacidade até 2000 kVA devem ser protegidos por relés digitais com função 50 / 51 e 50 / 51N.

Em transformadores com potências mais altas, além dos relés 50 / 51 e 50N / 51N devem ser utilizados relés diferenciais de sobrecorrente e imagem térmica, além do relé de gás, nível de óleo, relé de pressão, denominados relés de proteção intrínseca.

3 METODOLOGIA

O presente estudo tem o intuito de contribuir para a atualização das proteções do transformador, que será acrescida de alta tecnologia, poder de resposta rápida e confiabilidade, já que o equipamento que substituirá os existentes traz essas vantagens.

Este capítulo descreverá os processos metodológicos utilizados no desenvolvimento desse estudo. Partindo da apresentação da configuração atual das proteções do transformador, definição do relé, as proteções configuradas no novo relé.

Serão descritos os procedimentos utilizados no ajuste das proteções, bem como as ferramentas e o formato de configuração usada na aplicação dos testes de proteção em bancada, explorando as diversas opções que o novo relé possui.

3.1 Configuração Atual

O transformador em que será feita a alteração dos equipamentos de proteção, é um equipamento da marca Coemsa, 20 MVA de potência, com ligação estrela aterrada no primário e secundário, está ligado no lado de alta tensão em 138 kV, e no lado de baixa tensão em 44 kV. A figura 7 mostra o transformador com seus TC's do primário (138 kV) a direita da figura, e os TC's do secundário (44 kV) a esquerda da figura. Essa área entre os TC's, compreende a área de atuação das proteções.

Distúrbios que se originam fora da área de proteção, compreendida entre os TC's, podem causar a atuação das proteções do transformador, pois se por exemplo ocorrer uma sobrecarga que não foi originada na zona de proteção, quando ela passar pelos TC's, será sentida essa sobrecarga e fazer atuar a proteção para não causar danos ao equipamento.

Figura 7 – Transformador e TC's



Fonte: Autor (2023)

As proteções do transformador de potência da Figura 7, são feitas por relés eletromecânicos da marca General Eletric, modelos IAC54B811A para proteção de fase, e IAC51B805A para proteção de neutro, que atendem as proteções de sobrecorrente instantâneo (50/) e temporizado (51/51N). A proteção diferencial de corrente (87) está sendo feita por relé eletrônico da marca ASEA, modelo RADS B, conforme Figura 8.

Figura 8 – Relés de proteção existentes

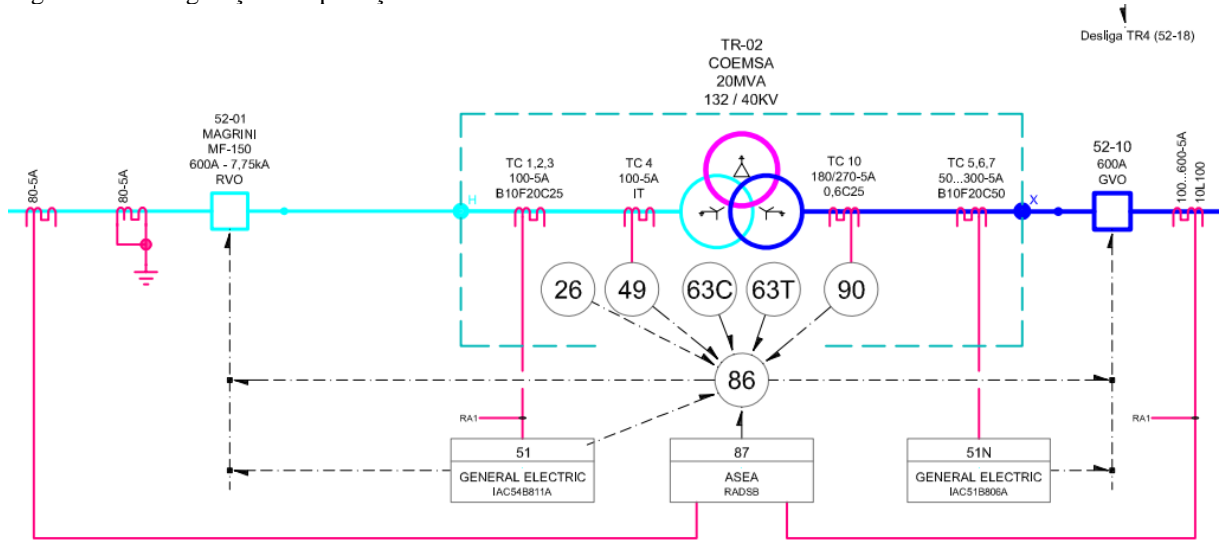


Fonte: Autor (2023)

O esquema de proteção atual está demonstrado na Figura 9, nela estão configuradas a proteção de sobrecorrente temporizada 51, que atua nos disjuntores de alta e baixa tensão, sem atuação do relé de bloqueio (86). A proteção de corrente instantânea da alta tensão (50), proteção diferencial (87), proteção de gás e fluxo (63T, 63C), fazem atuar o relé de bloqueio (86). O termômetro de óleo (26) e imagem térmica (49) não atuam mais sobre o relé de bloqueio, somente sinalizam as temperaturas.

Com a atualização do sistema de proteção do transformador, esses relés serão substituídos por um relé digital que vai concentrar todas as funções que por hora estão sendo atendidas pelos equipamentos da Figura 8, além das proteções intrínsecas. Essa atualização vai modernizar o sistema de proteção aplicado ao transformador. A Figura 9 traz a configuração esquemática das proteções do transformador.

Figura 9 – Configuração das proteções do transformador



Fonte: CPFL Energia (2023)

3.2 Relé digital

3.2.1 Definição do Novo Relé

Com o avanço da tecnologia dos equipamentos de proteção, podemos contar com uma grande variedade de relés que podem desempenhar diversas funções, ao contrário dos relés da atual configuração que são limitados a uma ou duas funções. Por isso se faz necessário um equipamento que consiga abranger todas as funções de proteção que serão configuradas para o novo projeto.

O relé SEL-487E é largamente utilizado na proteção principalmente de transformadores, reatores, barras e linhas curtas de transmissão. Na figura 10 está demonstrada a interface do relé SEL-487E que será utilizado para nova configuração das proteções.

Figura 10 – UPC Relé SEL-487E



Fonte: SEL (2021)

O relé pode ser usado para várias funções, proteção, medição e monitoramento. Fornece proteção diferencial e de tensão para equipamentos com até cinco enrolamentos. Aqui podemos destacar as principais funções de proteção incorporadas ao relé e que serão utilizadas no transformador alvo deste trabalho, conforme padrão da tabela ANSI:

- 87 – Proteção Diferencial;
- 50/51 – Sobrecorrente de fase instantânea e temporizada;
- 63C e T – Pressão de gás (Comutador e Transformador);
- 26/49 – Proteção térmica;
- 86 – Bloqueio.

3.2.2 Configuração do relé

O primeiro passo a ser executado no relé novo é gerar uma identidade, onde vai constar as informações da sua localização, ou seja, subestação que será instalado, equipamento que vai proteger, nome do proprietário, frequência nominal, sistema de rotação de fases. A figura 11 representa a identidade do relé.

Figura 11 – Identificação do projeto

General Global Settings

SID Station Identifier
SE ERE1

RID Relay Identifier
TR2 UPCA

CURSTU Current Channels: S = 5A, T = 5A, U = 5A
1 Select: 1-4

CURWXY Current Channels: W = 5A, X = 5A, Y = 5A, 5A, 5A
1 Select: 1-8

CONAM Company Name
CPFL

NFREQ Nominal System Frequency (Hz)
60 Select: 50, 60

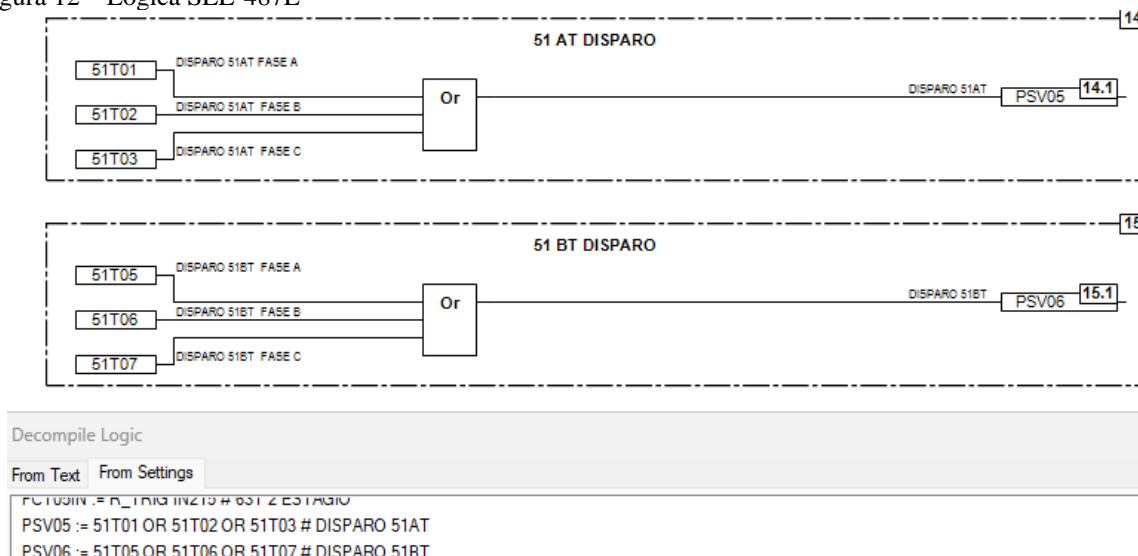
PHROT System Phase Rotation
ABC Select: ABC, ACB

Fonte: SEL (2021)

Para que o relé possa fazer com que as proteções atuem assertivamente, precisa ser escrita uma lógica, programando suas entradas e saídas binárias (BI = entradas binárias, BO = saídas binárias), entradas e saídas analógicas e contadores de tempo.

A Figura 12 traz a lógica para disparo das proteções 51 AT, saída PSV05 e 51 BT, saída PSV06, onde o disparo de qualquer uma das fases faz acionar a BO e desligar a alimentação do transformador. Também se observa na parte inferior da mesma figura outra forma de programar os disparos, sendo essa técnica mais direta, mas com o mesmo efeito.

Figura 12 – Lógica SEL-487E



Fonte: SEL (2021)

A programação do SEL-487E pode ser feita diretamente no relé com conexão serial ou ethernet, mas no nosso caso a conexão se deu como no exemplo da Figura 19, onde foi criada uma rede para realização das configurações e testes. A partir daí podemos acessar todas as informações do relé, realizar a programação e realizar os testes para validar a lógica.

3.3 Proteção

3.3.1 Proteções Intrínsecas

3.3.1.1 Proteção de Gás 63T (Relé Bucholz)

O relé Bucholz tem por finalidade proteger equipamentos imersos em líquido isolante, através da supervisão do fluxo anormal do óleo ou ausência, e a formação anormal de gases

pelo equipamento. São utilizados em transformadores que possuem tanque para expansão de líquido isolante.

Este tipo de relé detecta de forma precisa, por exemplo, os seguintes problemas: vazamento de líquido isolante, curto-circuito interno do equipamento ocasionando grande deslocamento de líquido isolante, formação de gases internos devido a falhas intermitentes ou contínuas que estejam ocorrendo no interior do equipamento. O relé de gás é normalmente instalado entre o tanque principal e o tanque de expansão do óleo dos transformadores.

O princípio de funcionamento do relé de gás baseia-se no acúmulo de gases ou fluxo anormal de óleo entre tanque e conservador. Os gases gerados por sobreaquecimentos localizados ou pequenas descargas elétricas são coletados pela câmara do relé, que força a boia superior para baixo e, ao atingir um volume pré-ajustado, fecha contatos de sinalização.

Porém, se ocorrer uma falha maior e o fluxo de óleo para o conservador atingir velocidades elevadas, uma boia é arrastada, fechando os contatos de desligamento. A velocidade ajustada no relé de gás permite uma boa sensibilidade e rapidez na indicação de possíveis falhas no transformador. Este ajuste evita desligamentos falsos causados por curtos-circuitos externos.

Figura 13 – Relé de gás



Fonte: Autor (2023)

É composto por um bujão de purga superior, um bujão de drenagem inferior, duas boias internas com dois contatos normalmente abertos um para alarme e outro para bloqueio que atuam pelo fluxo de gases movimentando as boias. A figura 13 mostra um relé bucholz (relé de gás) instalado, semelhante ao utilizado no transformador.

Modo de atuação:

- Por nível baixo de óleo no transformador, servindo também como retaguarda do nível de óleo do transformador;
- Por formação de gás devido a falha gradativa interna na parte ativa do transformador;
- Se houver descargas elétricas com grande liberação de energia, haverá formação súbita de gás, provocando a atuação da proteção.

Esses eventos vão provocar atuação da proteção, acionando a proteção de bloqueio 86T, comandando o desligamento dos disjuntores do primário e secundário do transformador.

3.3.1.2 Proteção de fluxo 63C

Proteção instalada na tubulação que interliga o CDC (comutador de derivação de carga) ao tanque de expansão dele. É composto por um contato normalmente aberto e uma bandeirola interna de sinalização. A Figura 14 mostra um relé de proteção por fluxo de óleo.

Esta proteção irá atuar somente quando houver um fluxo de óleo muito grande do CDC para seu tanque de expansão. Juntamente com sua atuação, assim como no 63T, fará atuar a proteção de bloqueio 86T, comandando o desligamento dos disjuntores do primário e secundário do transformador.

Figura 14 – Relé de fluxo



3.3.1.3 Termômetro do óleo

Sua função é medir a temperatura do topo do óleo do transformador. A temperatura do óleo do transformador é medida através de uma sonda (PT 100), conforme Figura 15, instalada em um poço próprio sobre a tampa do transformador.

O transformador é da classe de temperatura 55°C, sendo assim o alarme de primeiro estágio da proteção vai atuar quando a temperatura do óleo atingir 75°C e o segundo estágio quando atingir 85°C.

A proteção de temperatura de óleo é somente para monitoramento, não atua sobre disjuntores ou proteção de bloqueio (86T). Quando atuar essa proteção deverá ser analisado pela distribuidora qual circuito desligar para alívio de carga.

Figura 15 – Termômetro PT 100



Fonte: Adaptado de CPFL Energia (2023)

3.3.1.4 Termômetro de Imagem Térmica (49)

Sua função é medir de forma indireta a temperatura dos enrolamentos do transformador. A temperatura dos enrolamentos não é medida diretamente, ela baseia-se na temperatura do óleo com acréscimo de um gradiente que é obtido quando se faz o ensaio de aquecimento do transformador em fábrica.

Considerando que o transformador é da classe de temperatura 55°C, o alarme de primeiro estágio da proteção vai atuar quando a temperatura do óleo atingir 95°C e o segundo estágio quando atingir 105°C.

Assim como a proteção de temperatura de óleo, a proteção de temperatura dos enrolamentos, é somente para monitoramento, não atua sobre disjuntores ou proteção de bloqueio (86T). Quando atuar essa proteção deverá ser analisado pela distribuidora qual circuito desligar para alívio de carga.

3.3.2 Proteções Externas

3.3.2.1 Proteção Instantânea de Fase (50)

A proteção de sobrecorrente instantâneo deverá ser configurada para defeitos trifásicos na parte interna do transformador, e para sua configuração a referência é a corrente do secundário do TC do lado de alta tensão. Na prática os níveis de corrente podem atingir valores altos, e a atuação da proteção deve ser imediata. Também deve ser previsto a corrente de magnetização que atinge de 8 a 10 vezes a corrente nominal do transformador, devida as componentes de segunda harmônica (120Hz), que não deve provocar a atuação da proteção.

Para definir os valores de ajuste da proteção de sobrecorrente instantânea, o primeiro passo é determinar a relação de transformação do TC (RTC), conforme a equação 1. Na próxima etapa é calculada a corrente nominal do transformador, conforme equação 2 e a corrente nominal correspondente a do transformador que irá circular no secundário do TC, equação 3.

Cálculo da relação de transformação do TC (RTC):

$$RTC = \frac{I_p}{I_s} \quad (1)$$

$$RTC = \frac{200}{5}$$

$$RTC = 40$$

Onde:

I_p = corrente do primário do TC.

I_s = corrente do secundário do TC.

Cálculo da corrente nominal do transformador:

$$I_n = \frac{S}{\sqrt{3} \times V_n} \quad (2)$$

$$I_n = \frac{20 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 138 \times 10^3}$$

$$I_n = 83,7 \text{ A}$$

Onde:

S = potência aparente do transformador.

V_n = tensão nominal lado de alta do transformador.

Cálculo da corrente nominal do secundário do TC:

$$I_{nstc} = \frac{I_n}{RTC} \quad (3)$$

$$I_{nstc} = \frac{83,7}{40}$$

$$I_{nstc} = 2,09$$

Onde:

I_n = corrente nominal do transformador.

RTC = relação de transformação do TC.

Com as informações obtidas nos cálculos acima podemos configurar a proteção no relé, usando como base a corrente nominal do secundário do TC (I_{nstc}). Como é uma proteção de atuação instantânea, espera-se que atue imediatamente ao sentir um fluxo anormal de corrente na alta tensão do transformador.

O parâmetro máximo de corrente utilizado para que não haja saturação do TC, vai ficar em 20 vezes a corrente nominal, sendo que até este nível de corrente o equipamento deve fornecer medição com a menor faixa de erro possível. A equação 4 mostra o cálculo da corrente máxima no primário e secundário do TC, seguindo o limite estabelecido.

Corrente máxima no primário do TC:

$$I_{max1} = I_n \times 20 \quad (4)$$

$$I_{max1} = 83,7 \times 20$$

$$I_{max1} = 1674 A$$

Corrente máxima no secundário do TC:

$$I_{max1} = I_n \times 20$$

$$I_{max1} = 2,09 \times 20$$

$$I_{max1} = 41,8 A$$

3.3.2.2 Proteção Temporizada de Fase e Neutro (51/51N)

O acionamento da proteção 51 do transformador vai ocorrer quando a corrente atingir um valor superior ao da corrente de sobrecarga, pois os transformadores admitem elevadas

sobrecargas por curtos espaços de tempo. Segundo Mamede Filho (2020) esses valores podem chegar até 1,5 vezes o valor da corrente nominal do transformador e será o parâmetro usado para os testes dessa proteção.

O primeiro passo para os cálculos das correntes de acionamento da proteção temporizada, é o cálculo da relação de transformação do transformador de corrente (RTC). No lado de AT o transformador de corrente é de 200/5 A e no lado de BT é de 400/5 A. A equação 1 será utilizada para cálculo da RTC do lado de AT do transformador de corrente.

$$RTC = \frac{I_p}{I_s}$$

$$RTC = \frac{200}{5}$$

$$RTC = 40$$

A partir da equação 5 será calculado o valor da corrente de partida da proteção temporizada no secundário do TC:

$$I_{atf} = \frac{K_f \times I_{nt}}{RTC} \quad (5)$$

$$I_{atf} = \frac{1,5 \times 84}{40}$$

$$I_{atf} = 3,15 A$$

Onde:

I_{atf} = corrente de partida da unidade temporizada.

K_f = fator de sobrecarga, ajustado em 1,5.

I_{nt} = corrente nominal do AT do transformador.

Para o cálculo da corrente de acionamento da proteção temporizada no primário do TC vai ser utilizada a equação 6.

$$I_{actf} = I_{atf} \times RTC \quad (6)$$

$$I_{actf} = 3,15 \times 40$$

$$I_{actf} = 126 A$$

Onde:

I_{actf} = corrente de acionamento da unidade temporizada.

RTC = relação de transformação do TC.

Para o cálculo da proteção temporizada de neutro (51N), utilizam-se as mesmas equações da proteção temporizada de fase apenas modificando as nomenclaturas de fase para neutro.

$$I_{atn} = \frac{K_f \times I_{nt}}{RTC}$$

$$I_{atn} = \frac{0,5 \times 84}{40}$$

$$I_{atn} = 1,05 A$$

Onde:

I_{atn} = corrente de ajuste da unidade temporizada.

K_f = fator de sobrecarga, ajustado em 0,5.

I_{nt} = corrente nominal do transformador.

Para o cálculo da corrente de acionamento da proteção temporizada de neutro no primário do TC vai ser utilizada da mesma forma que para fase, a equação 6.

$$I_{actn} = I_{atn} \times RTC$$

$$I_{actn} = 1,05 \times 40$$

$$I_{actn} = 42 A$$

Onde:

I_{actn} = corrente de acionamento da unidade temporizada de neutro.

RTC = relação de transformação do TC.

3.3.2.3 Proteção de Bloqueio (86T)

A proteção de bloqueio ou simplesmente 86T trata-se de uma proteção auxiliar que atua nos equipamentos que fazem o desligamento da tensão e cargas ligadas a proteção principal, no nosso caso irá desligar os disjuntores que seccionam o primário e o secundário do transformador.

Essa proteção vai receber informação das seguintes proteções para que atue:

- Proteção instantânea de fase e neutro, 50 /;
- Proteção temporizada de fase e neutro, 51 / 51N;
- Proteção diferencial do transformador, 87T;

- Proteção por fluxo de gás, 63T e 63C.

3.3.2.4 Proteção Diferencial do Transformador (87T)

A proteção diferencial (87T) faz a comparação das correntes que circulam no transformador entre os terminais do TC de alta tensão e os terminais do TC de baixa tensão, que chamamos de área protegida, e qualquer defeito que ocorra entre os terminais dos TC's a proteção irá atuar (MAMEDE FILHO, 2020). A polaridade dos TC's também é importante para que o 87T atue corretamente, sendo que o lado do barramento consideramos positivo e o lado do objeto protegido negativo como demonstrado na Figura 16.

Para fins de cálculo da corrente diferencial, devemos transformá-la em pu. Cada tap de corrente equivale 1 pu, sempre que entrar 1 pu no TC de alta tensão tem que sair 1 pu no TC de baixa tensão. Quando isso não ocorrer significa que tem algum distúrbio dentro da área protegida e o relé vai atuar desligando os disjuntores de alta e baixa tensão. Utilizamos a equação 7 para o cálculo da corrente diferencial.

$$Diff = (IAT) - (IBT) \quad (7)$$

Onde:

IAT = Corrente do lado de alta tensão em pu.

IBT = Corrente do lado de baixa tensão em pu.

Considerando as correntes nominais de alta e baixa tensão, calculadas a partir da equação 2, a corrente nominal no lado de alta tensão é 83,7 A que equivale a 1pu e a corrente nominal no lado de baixa tensão é 262,4 que equivale a 1 pu.

Corrente nominal do lado de alta tensão:

$$I_n = \frac{S}{\sqrt{3} \times V_n}$$

$$I_n = \frac{20 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 138 \times 10^3}$$

$$I_n = \mathbf{83,7 A}$$

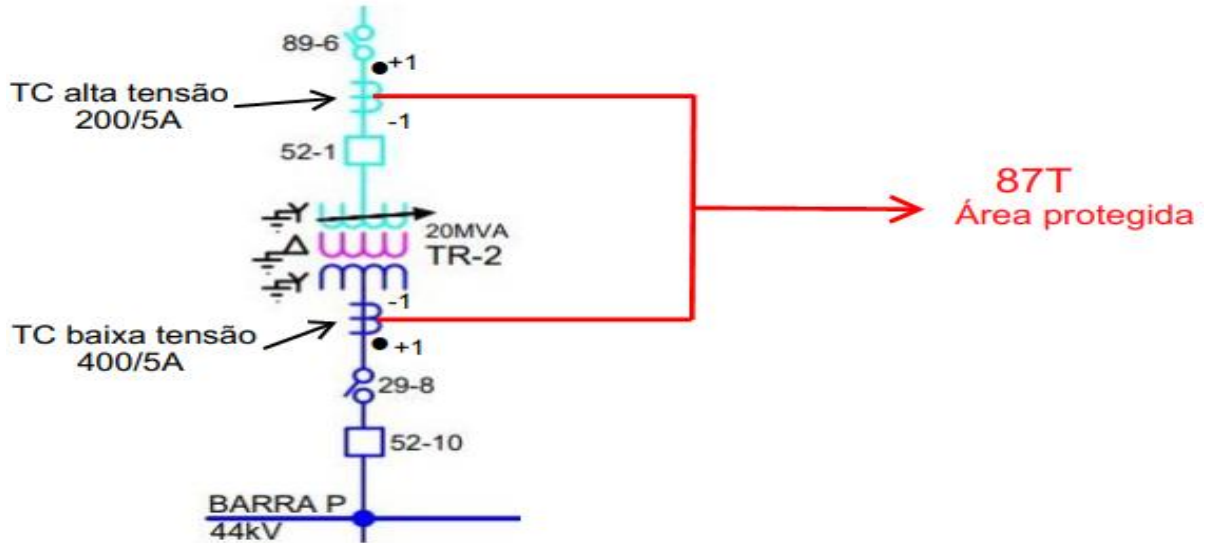
Corrente nominal do lado de alta tensão:

$$I_n = \frac{P}{\sqrt{3} \times V_n}$$

$$I_n = \frac{20 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 44 \times 10^3}$$

$$I_n = 262,4 \text{ A}$$

Figura 16 – Zona da proteção diferencial 87T



Fonte: Autor (2023)

A Figura 17 demonstra as duas zonas, uma em que a proteção não irá atuar e outra em que a proteção irá atuar. Quando houver diferença entre as correntes de entrada e saída, vai circular corrente na unidade de operação do relé (UO), ocasionando a atuação do relé diferencial (falta A), e no caso de falta fora da área protegida (falta B) o relé diferencial não sensibiliza pois não vai haver corrente circulando na unidade de operação.

Exemplo de cálculo da falta A:

$$Diff = (-1) - (-2)$$

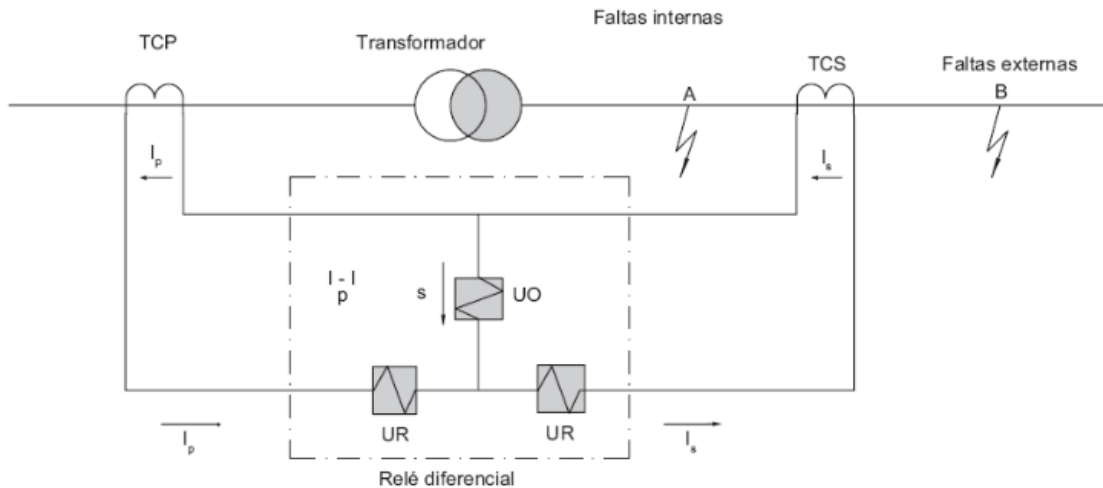
$$Diff = 1 \text{ A}$$

Exemplo de cálculo da falta B:

$$Diff = (-1) - (-1)$$

$$Diff = 0 \text{ A}$$

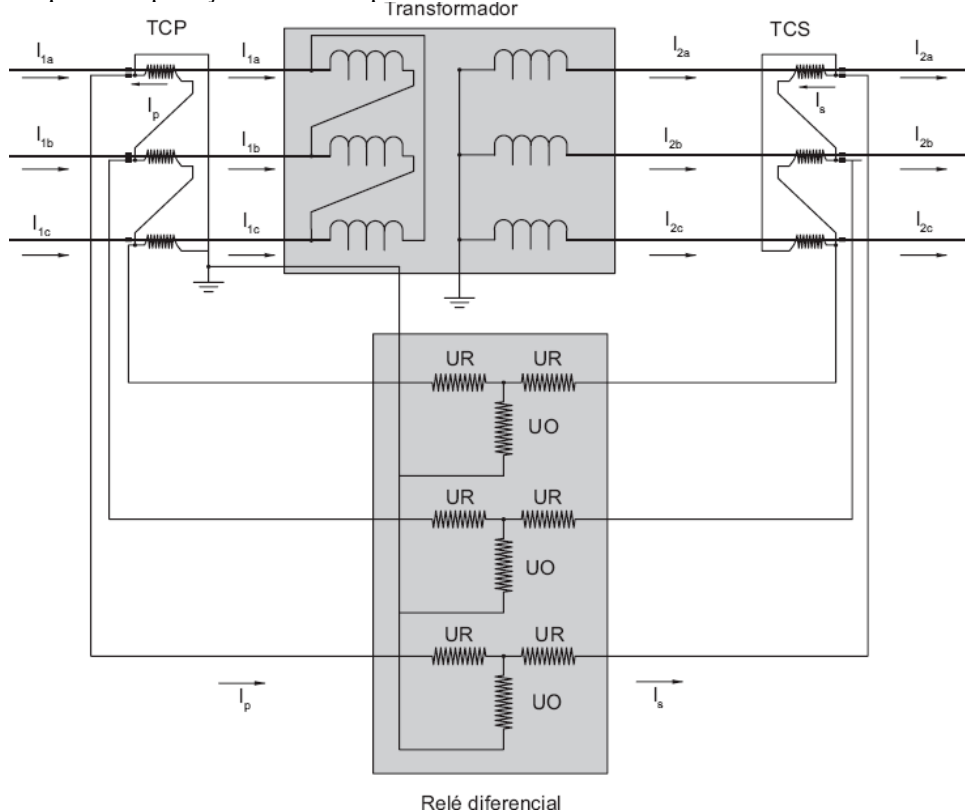
Figura 17 – Proteção diferencial em condição de não atuação



UR: unidade de corrente de restrição; UO: unidade de corrente de operação; TCP: transformador de corrente primário; TCS: transformador de corrente secundário.
 Fonte: Adaptado de Mamede Filho (2020)

O transformador em questão é um equipamento de dois enrolamentos, primário e secundário, considerada a forma mais simples de aplicação da proteção diferencial, se comparado com transformadores de três enrolamentos, com primário, secundário e terciário. A Figura 18 demonstra o esquema básico da proteção diferencial para transformadores de dois enrolamentos, similar ao transformador estudado.

Figura 18 – Esquema de proteção diferencial para transformador de dois enrolamentos



Fonte: Adaptado de Mamede Filho (2020)

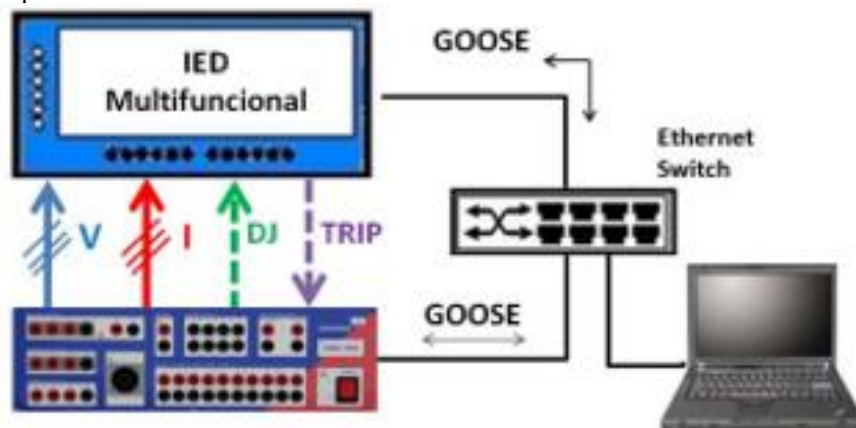
A corrente de magnetização do transformador poderá causar atuação da proteção diferencial, para isso será adotado algumas precauções para não ocorrer atuação indevida. Ajuste da corrente de atuação em valor superior a corrente de magnetização, ajuste do tempo de atuação com valor maior que o tempo de magnetização, tempo de operação em 100ms para três vezes a corrente de operação, e corrente de operação em 60% da nominal (MAMEDE FILHO, 2020).

3.4 Testes

A realização dos testes das proteções do transformador em bancada, foi feito com base IEC 61850. As mensagens GOOSE (Generic Object Oriented Substation Event) trafegam entre equipamentos, enviando status, comandos e sinais digitais, já os disparos são feitos por fiação convencional, conforme Figura 19.

A ferramenta utilizada para injeção de corrente é uma mala de testes Omicron, modelo CMC256-6, que é largamente utilizada para testes de proteções em sistemas elétricos, essa ferramenta utiliza o software Omicron Teste Universe 4.30 para realizar as injeções de corrente e simular a atuação das proteções.

Figura 19 – Rede para teste



Fonte: Omicron (2023)

Através do software de teste Omicron Test Universe, podemos controlar sinais de teste, processamento de dados de medição, criar relatórios, gerar entrada de dados para simulação de atuação de proteção.

Segundo a Omicron, o CMC 256 é um conjunto de teste controlado por computador que pode ser utilizado para testar:

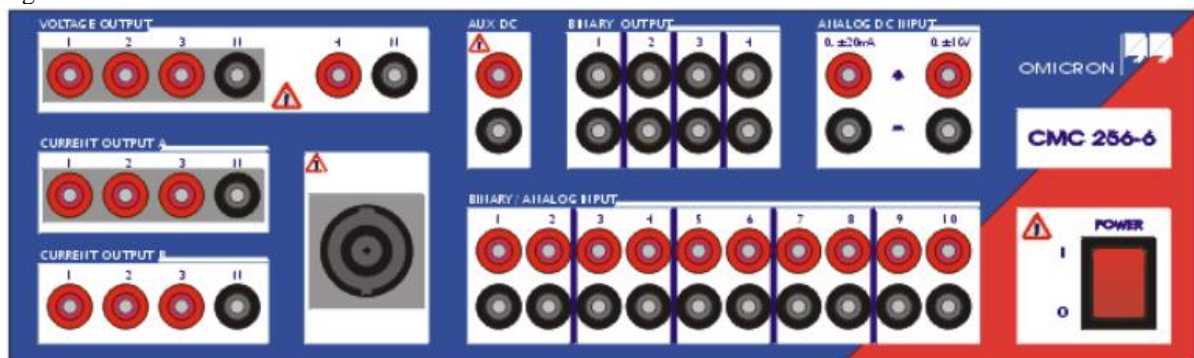
- Relés de proteção;

- Transdutores;
- Medidores de energia ;
- Analisadores de qualidade de energia;
- Testes e medições de alto desempenho.

A Figura 20 mostra a interface de hardware da caixa de testes CMC256-6, na qual podemos destacar suas principais características:

- Um canal de saída trifásica de tensão;
- Dois canais de saída trifásica de corrente;
- Saída auxiliar de tensão cc;
- Quatro saídas binárias;
- Dez saídas binárias analógicas;
- Duas entradas analógicas.

Figura 20 – Caixa de Teste CMC256-6



Fonte: Omicron (2023)

3.4.1 Teste proteção instantânea (50)

No teste da proteção instantânea os tempos de atuação são relativamente curtos, por se tratar de possíveis curtos-circuitos originados no transformador, o corte da falta com rapidez vai evitar danos maiores ao equipamento protegido.

Para o teste realizado em bancada, foram injetados níveis baixos de corrente, primeiro porque a caixa omicron, demonstrada na Figura 20, tem a capacidade limitada para injeção de corrente em 12,5 A. Outro fator levado em consideração foi que por se tratar de um equipamento de valor alto, tem que se ter muito cuidado para não causar danos, desse modo o teste realizado foi com correntes baixas, mas que demonstram que a proteção atua de forma satisfatória.

Na Figura 21 podem ser observados, o momento do aumento da corrente, o valor da corrente e o tempo entre a sensibilização do relé e a atuação da proteção, o restante é o tempo

de resposta dos disjuntores, demonstrando parâmetros muito bons, mesmo aplicando para o teste um nível de corrente mais baixo. Podemos observar no cálculo da equação 8 que a corrente no secundário do TC foi de 7,17 A aproximadamente, que equivale a 3,43 vezes a sua corrente nominal ($\frac{7,17}{2,09}$).

$$I_{stc} = \frac{I_i}{RTC} \quad (8)$$

$$I_{stc} = \frac{286}{40}$$

$$I_{stc} = 7,17 \text{ A}$$

Onde:

I_i = Corrente de injeção.

RTC = Relação de transformação do TC.

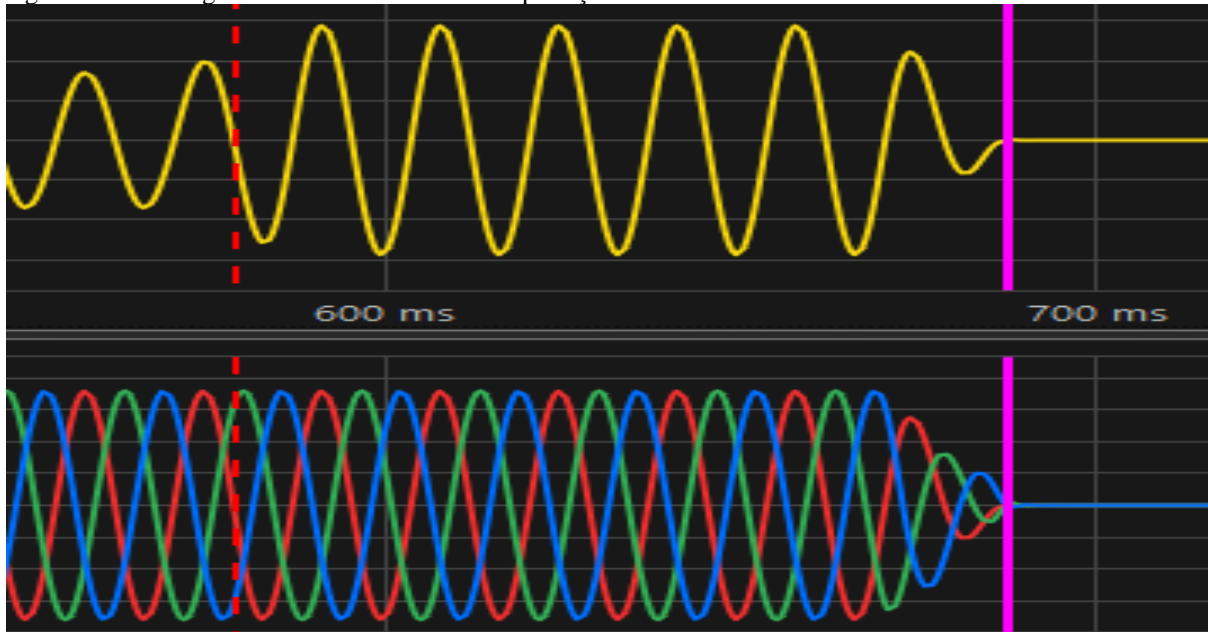
Figura 21 – Oscilografia de corrente da proteção instantânea



Fonte: Autor (2023)

Quando a proteção atuar, serão desligados os disjuntores de AT e BT, cessando o fornecimento de tensão ao transformador, que deve passar por uma avaliação preliminar para constatar se algum dano foi causado durante o evento. A Figura 22 mostra que corrente e tensão são cortadas no mesmo instante de tempo.

Figura 22 – Oscilografia de corrente e tensão da proteção instantânea



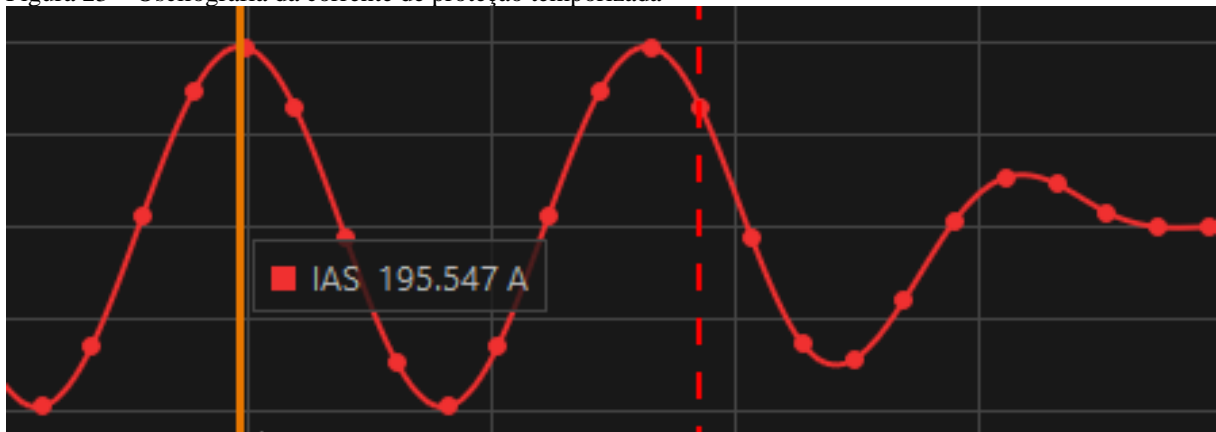
Fonte: Autor (2023)

3.4.2 Teste proteção temporizada (51 / 51N)

A proteção temporizada é programada para evitar que sobrecargas venham a prejudicar o desempenho do transformador, sempre que houver um aumento de carga significativo que ultrapasse os limites estabelecidos para o equipamento, ela deve atuar cortando a alimentação dessa sobrecarga.

As sobrecargas são permitidas por curtos períodos e dependem da temperatura inicial e da refrigeração. As sobrecargas que extrapolam essa condição, são causadas por eventos em emergências, e não estão previstas no sistema interligado.

Figura 23 – Oscilografia da corrente de proteção temporizada



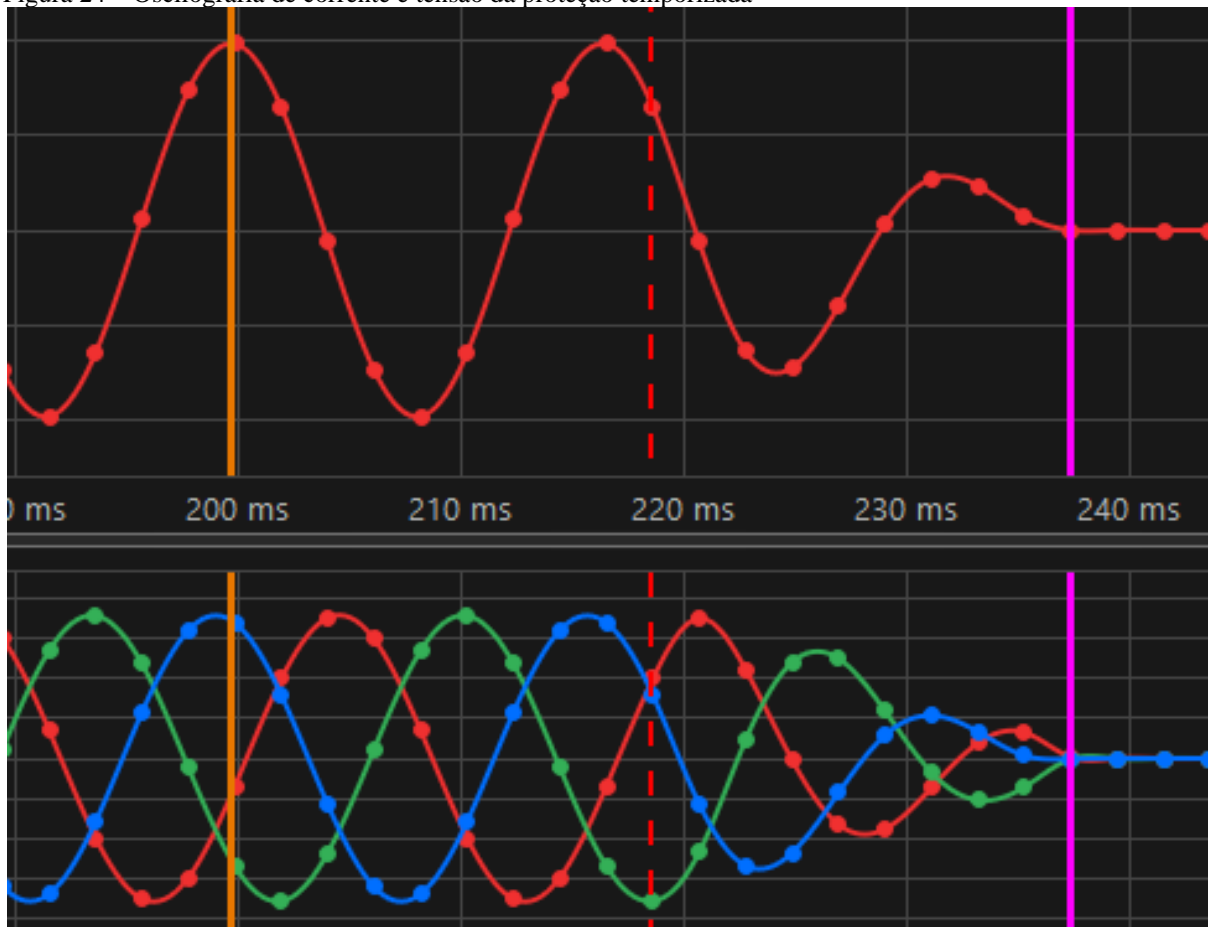
Fonte: Autor (2023)

A Figura 23 mostra a oscilografia de uma injeção de corrente 1,55 vezes a corrente de partida da proteção de sobrecarga de fase temporizada, calculada na equação 7. Na Figura 24 observa-se que o corte de corrente e tensão ocorre no mesmo instante.

$$I_{actf} = 126 \times 1,55$$

$$I_{actf} = 195,3 \text{ A}$$

Figura 24 – Oscilografia de corrente e tensão da proteção temporizada



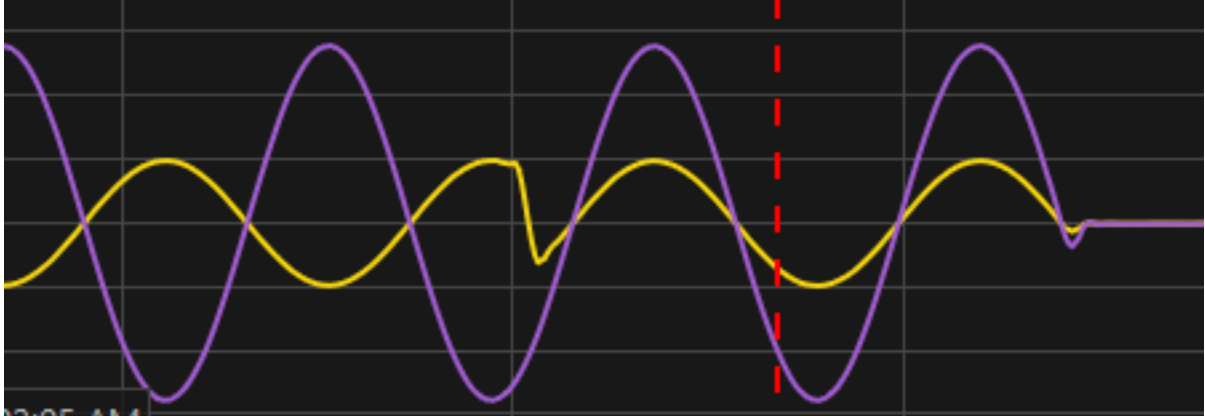
Fonte: Autor (2023)

3.4.3 Teste proteção diferencial

A proteção diferencial deve ter sensibilidade para os defeitos internos e ser indiferente para os defeitos externos. Quando ocorrer defeitos fora da área do diferencial, que fica entre o TC primário e o TC secundário, a corrente que circula pelo circuito de operação são nulas. Quando ocorrer faltas dentro da área do diferencial, há circulação de corrente no circuito de operação e a fonte deve ser desligada.

A Figura 25 mostra o momento em que há uma variação no ângulo da corrente no lado de alta tensão, o que evidencia que ocorreu um distúrbio no equipamento, ocasionando a atuação da proteção 87T.

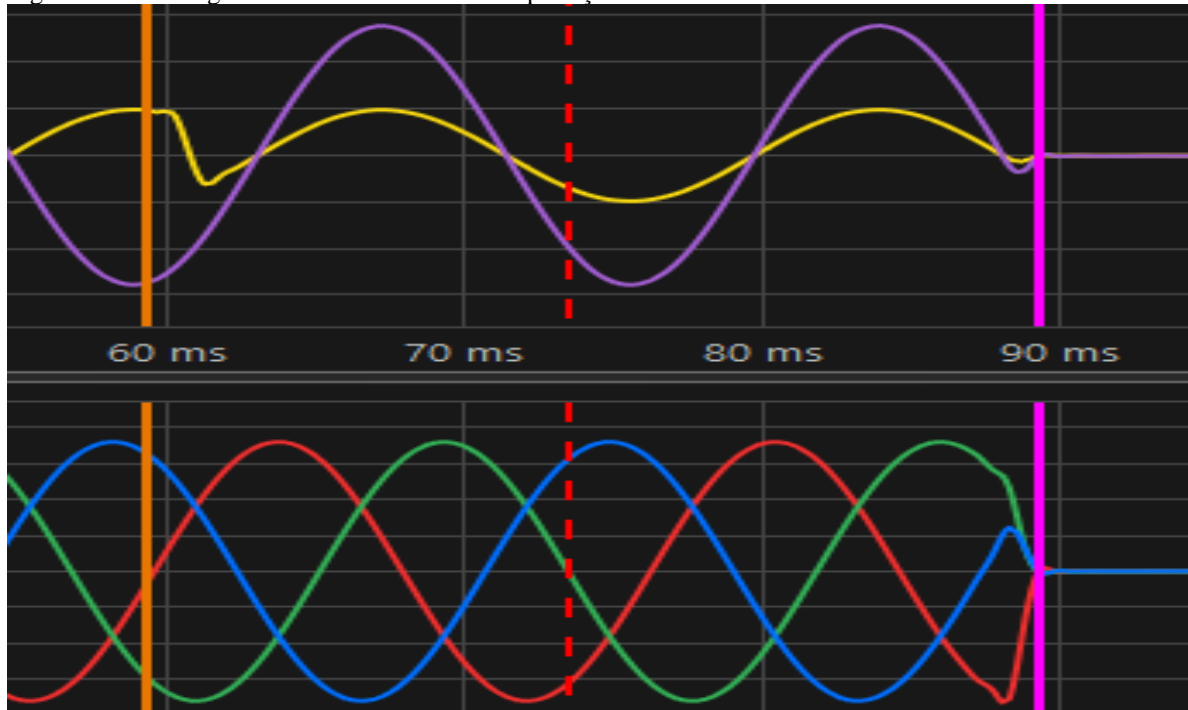
Figura 25 – Oscilografia da proteção 87T



Fonte: Autor (2023)

Na atuação da proteção diferencial, serão desligados os disjuntores de AT e BT, cessando o fornecimento de tensão ao transformador, que igual as atuações das outras proteções impeditivas, deve passar por uma avaliação preliminar para constatar se algum dano foi causado durante o evento. A Figura 26 mostra que corrente e tensão são cortadas no mesmo instante de tempo, eliminando a falta.

Figura 26 – Oscilografia de corrente e tensão da proteção 87T



Fonte: Autor (2023)

3.4.4 Avaliação dos testes

Os testes no geral se mostraram satisfatórios, pois seguiram o que se esperava em relação aos resultados e a partir deles podemos estimar os parâmetros para os testes em campo. Devemos considerar aqui que não foram simuladas as injeções de corrente como se dará na prática, por uma limitação do equipamento de injeção de corrente, mesmo assim foi satisfatório o resultado obtido, pois demonstrou o funcionamento correto da proteção.

A realização dos testes em bancada é uma ferramenta muito importante como prévia da atuação real das proteções e devem sempre ser complementadas posteriormente com os testes em campo, dando maior confiança para os sistemas de proteção.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As proteções de equipamentos do sistema elétrico de potência são de suma importância para o bom funcionamento do mesmo. Outro fator importante, visto que existem ainda bastante equipamentos que necessitam ser trocados, é que se atualizem os sistemas de proteção, instalando equipamentos modernos e providos de alta tecnologia que propiciam otimizar a forma da sua atuação reduzindo espaços de instalação.

Este trabalho propôs o estudo para atualização das proteções de um transformador de alta tensão, com a futura troca dos relés de proteção. Esta atualização nas proteções fará com que haja mais confiança e rapidez na atuação das proteções, melhorando os tempos de resposta na eliminação de faltas intrínsecas ou externas ao equipamento.

Conforme visto na revisão bibliográfica, são necessários vários equipamentos e métodos para configurar as proteções, além dos relés que atuam diretamente no corte das faltas, é preciso de referências de corrente e tensão chegando até eles, utilizando TC's e TP's. Com um projeto de proteção bem elaborado, a proteção do equipamento não vai permitir a ocorrência de grandes problemas.

O transformador é o equipamento mais importante em uma subestação, pois tem a função de elevar ou baixar tensões para atender os diversos níveis de tensão. Partindo dessa premissa conclui-se que o estudo tem grande importância para a melhoria do sistema estudado, pois vai deixar o sistema mais robusto e confiável.

A fase de testes é muito importante para o bom funcionamento de todas as proteções que serão atualizadas. Essa fase vai garantir que quando for exigido pelo sistema ela atue de forma assertiva na eliminação de faltas através do corte de tensão e corrente para o equipamento protegido.

Como o trabalho chegou até a fase de testes em bancada, simulando a atuação real das proteções, o que é uma etapa muito importante no todo do processo, fica como sequência deste, a instalação do novo relé e testes das novas proteções em campo, o que poderá confirmar os testes aplicados ou até acusar alguma falha na fase atual, possibilitando os acertos antes da entrada em operação.

Por fim podemos concluir que o estudo apresentado se mostrou importante para a aplicação que foi solicitado, mas sempre a espaço para melhorias.

REFERÊNCIAS

ARAGÃO FILHO, W. C. P. de. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. 1. ed. Vitória: Editora Blucher, 2014.

CAMINHA, A. C. **Introdução à proteção dos sistemas elétricos**. 1. ed. Rio de Janeiro: Editora Blucher, 1977.

COURY, D. V.; OLESKOICZ, M.; GIOVANNI, R. **Proteção digital de sistemas elétricos de potência**. 1. ed. São Carlos: Grupo GEN, 2007.

CPFL Energia. **CPFL Transmissão**. 2023. Disponível em: <https://www.grupocpfl.com.br/unidades-de-negocios/transmissao>. Acesso em: 28 mai. 2023.

DUARTE, A. C. da R. **Equipamentos de geração e transmissão: conceitos e critérios**. 1. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2018.

JORDÃO, R. G. **Transformadores**. 1. ed. Rio de Janeiro: Editora Blucher, 2002.

MAMEDE FILHO, J. **Manual de Equipamentos Elétricos**. 1. ed. São Paulo: Grupo GEN, 2019.

MAMEDE FILHO, J. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC Livros Técnicos e Científicos Ltda., 2020.

MAMEDE FILHO, J. **Subestação de alta tensão**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021.

MARDEGAN, C. S. **Proteção e seletividade: em sistemas elétricos industriais**. 2. ed. São Paulo: Atitude, 2012.

MOHAN, N. **Sistemas Elétricos de Potência - Curso Introductório**. 2. ed. São Paulo: Grupo GEN, 2016.

OLIVEIRA, I. C. et al. **Proteção de Sistemas Elétricos**. 1. ed. São Paulo: Grupo A, 2021.

OMICRON. **Home**. Disponível em: <https://www.omicronenergy.com>. Acesso em: 27 mai. 2023.

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. **O Sistema Interligado Nacional**. 2023. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>. Acesso em: 02 jun. 2023.

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Sobre o ONS Atuação**. 2023. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/atuacao>. Acesso em: 04 jun. 2023.

REINHAUSEN. **Home**. Disponível em: <https://www.reinhausen.com/>. Acesso em: 16 jun. 2023.

ROBBA, E. J. **Análise de sistemas de transmissão de energia elétrica**. 1. ed. Rio de Janeiro: Editora Blucher, 2020.

SEL - SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES. **Instruction Manual**: Protection and Automation System SEL-487, 2021.

SILVA, E. C. da. **Proteção de sistemas elétricos de potência**: guia prático de ajustes. 1. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark Editora, 2014.