

**INSTITUTO ENSINAR BRASIL
FACULDADE DOCTUM DE JOÃO MONLEVADE**

**FELIPE GONÇALVES MONTEIRO
RAFAEL CÉSAR DA SILVA**

**PROTEÇÃO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA COM ÊNFASE EM
CONTROLE E MONITORAMENTO TÉRMICO**

**JOÃO MONLEVADE
2019**

**INSTITUTO ENSINAR BRASIL
FACULDADE DOCTUM DE JOÃO MONLEVADE**

**FELIPE GONÇALVES MONTEIRO
RAFAEL CESAR DA SILVA**

**PROTEÇÃO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA COM ÊNFASE EM
CONTROLE E MONITORAMENTO TÉRMICO**

**Projeto de Pesquisa apresentado ao
Curso de Engenharia Elétrica da
Faculdade Doctum de João Monlevade,
como requisito para aprovação na
disciplina TCC I, orientado pelo Prof.
M.sc. José Olímpio dos Santos Filho e
pela coorientadora M.sc. Francisca
Daniella Andreu Simões Moraes Lage.**

**Área de Concentração: Proteção de
Sistemas Elétricos.**

**JOÃO MONLEVADE
2019**

Dedicamos este trabalho a todos que nos apoiaram e confiaram no nosso potencial.

AGRADECIMENTOS

FELIPE GONÇALVES MONTEIRO

Primeiramente a Deus, por me guiar e dar forças para não desistir durante os longos anos da faculdade. Por me conceder o dom da vida e sabedoria que me proporcionaram mais essa conquista.

A minha dupla de TCC Rafael Cesar que com muito trabalho em equipe e amizade pudemos concluir esse trabalho e encerrar mais essa caminhada. A toda coordenação do curso que sempre nos apoiou, aos professores que com muito carinho e dedicação pode nos passar um pouco do seu conhecimento, em especial ao nosso professor e orientador José Olímpio por toda ajuda e orientação neste trabalho, à nossa coorientadora Francisca Daniella por todo seu carinho e dedicação, à sua disponibilidade em nos receber em sua residência em um momento de descanso. À nossa professora Thais Araújo que iniciou a fase conosco no TCC1, passando todo seu conhecimento e técnica na elaboração dessa primeira parte do trabalho, à professora Ana Bretz professora de TCC 2, que nos mostrou os caminhos a seguir, pelas ajudas e sua recepção calorosa, ao professor Rinaldo Nonato que iniciou as ideias conosco no TCC1.

Aos meus pais Lucia Gonçalves e Manoel Monteiro, que sempre me mostraram como seguir o caminho da educação e de nunca desistir dos sonhos, com muita inspiração e incentivo, aos meus irmãos e irmã pela compreensão nos momentos ausentes. Aos meus colegas e amigos de trabalho que me acompanharam nessa caminhada, com muita colaboração nos momentos ausentes. Aos meus amigos Gilcimar Meireles, por toda disposição, prestatividade e conhecimento na formação deste trabalho, ao Adilson Peixoto por colaborar com todo seu conhecimento neste trabalho.

Neste espaço deixo as minhas mais sinceras desculpas às pessoas que por motivo de esquecimento e de espaço não citei.

A todos vocês, meu sincero muito obrigado!

AGRADECIMENTOS

RAFAEL CESAR DA SILVA

Primeiramente agradeço a Deus por ter me proporcionado saúde e determinação para enfrentar esta jornada, foram inúmeros dias de viagens após um dia cansativo de serviço. Dias em que às vezes não chegávamos à faculdade por causa de acidentes, várias noites chegando em casa de madrugada por causa de engarrafamentos e ônibus quebrado, mas tudo está sendo vencido com muita determinação e disciplina.

À minha família que sempre me motivou a fazer o curso. Em especial a minha mãe Geralda que, desde quando eu era novo, sempre me incentivou a buscar conhecimento, e que em todas as noites de faculdade me esperava chegar antes de dormir.

Aos professores e coordenação da faculdade Doctum, que me transmitiram inúmeros conhecimentos e desafios durante esta jornada de 5 anos. Meus agradecimentos ao M.sc. José Olímpio dos Santos Filho, que nos orientou com dedicação, demonstrando muito conhecimento. À M.sc. Francisca Daniella Andreu Simões Moraes Lage que aceitou este desafio dedicando seu tempo pessoal para nos ajudar e à Esp. Ana Regina Lara Bretz, que além de nos ensinar os passos do TCC em sala, também nos recebeu em casa para nos passar mais conhecimentos.

Por fim, agradeço ao Felipe Gonçalves Monteiro que, além dos 5 anos de caminhada, concluímos juntos mais este trabalho.

A todos muito OBRIGADO!!!

“Eu tentei 99 vezes e falhei, mas na centésima tentativa eu consegui, nunca desista de seus objetivos mesmo que eles pareçam impossíveis, a próxima tentativa pode ser a valiosa.” **Albert Einstein**

RESUMO

Os transformadores de potência, além de serem essenciais para o sistema elétrico de potência e para as grandes subestações, também correspondem a uma parte dos investimentos das empresas. Desta forma, o controle e o monitoramento da sua operação, além do seu sistema de isolamento e demais componentes, são fundamentais para que possam garantir confiabilidade e durabilidade, reduzindo os custos de operações associados à sua vida útil. Desta forma, com o crescente avanço das tecnologias dos dispositivos de proteção, os transformadores de potência se beneficiaram com equipamentos cada vez mais evoluídos, viabilizando a utilização de dispositivos eletrônicos inteligentes (IED) com controle e monitoramento, obtendo mais funcionalidade e confiabilidade. Para manter a operação do transformador confiável, existe a dependência da temperatura no que tange ao enrolamento e ao óleo. Com isso, a alta temperatura causa envelhecimento indesejável, gerando degradação no isolamento e limitações no carregamento do transformador. O trabalho apresentado tem como objetivo melhorar a proteção térmica dos transformadores de potência. Para além da pesquisa bibliográfica foi realizado um acompanhamento de um estudo de caso da troca de dispositivo de proteção digital convencional por IED, modernizando a proteção térmica do transformador de potência da subestação de uma mineradora situada na região do Médio Piracicaba. Com essa modernização da proteção térmica, os custos com tempo de levantamento e acompanhamento de dados foram reduzidos, já que são feitos através de um supervisor, possibilitando controle e monitoramento remoto do nível de temperatura em tempo real.

Palavras chaves: Transformadores de Potência. Temperatura. Proteção Térmica. IED.

ABSTRACT

Power transformers, in addition to being essential for the electrical power system and for large substations, also account for some of the companies' investments. Thus, the control and monitoring of its operation, as well as its isolation system and other components, are essential to ensure reliability and durability, reducing the operating costs associated with its useful life. Thus, with the increasing advancement of protection device technologies, power transformers have benefited from increasingly evolved equipment, enabling the use of intelligent electronic devices (IED) with control and monitoring, achieving more functionality and reliability. To maintain reliable transformer operation, there is a temperature dependence on winding and oil. As a result, the high temperature causes undesirable aging, leading to insulation degradation and transformer loading limitations. The work presented aims to improve the thermal protection of power transformers. In addition to bibliographic research, a case study was carried out on the exchange of a conventional digital protection device for IED, modernizing the thermal protection of the substation power transformer of a mining company located in the Middle Piracicaba region. With this modernization of thermal protection, the costs of data collection and tracking time have been reduced as they are made through a supervisor, enabling remote control and monitoring of the temperature level in real time.

Keywords: Power Transformers. Temperature. Thermal Protection. IED.

ABREVIATURA E SIGLAS

AF – Ar Forçado

AT – Alta Tensão

ATF – Alto Transformador

BT – Baixa Tensão

F – Fase

GPS – *Global Positioning System* (Sistema de Posicionamento Global)

HZ – *Hertz*

IED – *Intelligent Electronic Device* (Dispositivos Eletrônicos Inteligentes)

KV – KiloVolts

MT – Média Tensão

MVA – Mega Volt Amperes

N – Número de Espiras

NA – Ar Natural

N1 – Número de Espiras no Primário

N2 – Número de Espiras no Secundário

OFAF – Óleo Forçado, Ar Forçado

OFWF – Óleo Forçado, Água Forçada

ONAF – Óleo Natural, Ar Forçado

ONAN – Óleo Natural, Ar Natural

P – Primário

QD – Quadro de Distribuição

RTD – *Resistance Temperature Detector* (Detector de Temperatura de Resistência)

S – Seção

S – Secundário

SEL – *Schweitzer Engineering Laboratories* (Laboratórios de Engenharia Schweitzer)

TAP – Mudanças de Derivações de Enrolamento

TC – Transformador de Corrente

TF – Transformador

TM1 – Monitor de Temperatura

TP – Transformador de Potencial

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Transformador de Corrente – TC	18
Figura 2 – Transformador de Potencial – TP	19
Figura 3 – Autotransformador Trifásico	20
Figura 4 – Transformador de Potência / Força	21
Figura 5 – Estrutura Básica de um Transformador Monofásico	22
Figura 6 – Núcleo e Enrolamentos de um Transformador Trifásico	23
Figura 7 – Fechamento Estrela/Triângulo	23
Figura 8 – Termovisor	25
Figura 9 – Aspectos Construtivos dos Transformadores de Potência	28
Figura 10 – Circulação do Óleo no Transformador	28
Figura 11 – Termômetros Analógicos para Transformadores	30
Figura 12 – Termômetro Analógico.	31
Figura 13 – Detalhes dos Termômetros Analógicos.	32
Figura 14 – Dispositivo de Imagem Térmica.....	33
Figura 15 – Controlador de Temperatura Convencional (Digital)	34
Figura 16 – IED	35
Figura 17 – Transformador	38
Figura 18 – Dados de Placa	39
Figura 19 – Diagrama Unifilar	40
Figura 20 – Imagem Infravermelha - Anterior	41
Figura 21 – Dados da Elevação de Temperatura	42
Figura 22 – Imagem Infravermelha - Posterior.....	42
Figura 23 – Painel de Controle Convencional.....	43
Figura 24 – Painel de Controle IED	44
Figura 25 – Tela do Supervisório do Monitoramento e Controle do Transformador.....	48
Figura 26 – Tela do Supervisório de Carregamento do Transformador	49

QUADRO

Quadro 1 – Vantagens e Desvantagens	45
--	-----------

ANEXOS

Anexo 1 – Questionário	54
------------------------------	----

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	14
2 – OBJETIVOS.....	16
2.1 – Objetivo Geral.....	16
2.2 – Objetivos Específicos	16
3 – MARCO TEÓRICO	17
3.1 – Transformador.....	17
3.1.1 – Tipos de Transformadores	17
3.1.2 – Transformadores para Instrumentos e Medições	17
3.1.2.1 – Transformadores de Corrente	17
3.1.2.2 – Transformadores de Potencial	18
3.1.3 – Autotransformador.....	19
3.1.4 – Transformador de Potência ou Transformador de Força.....	20
3.2 – Temperatura.....	24
3.3 – Proteção Térmica	24
3.3.1 – Termovisor	25
3.3.2 – Monitoramento de Perda de Vida Útil.....	26
3.3.3 – Sistema de Ventilação Forçada.....	26
3.3.4 – Sistema de Resfriamento	27
3.3.5 – Convencional.....	29
3.3.6 – IED (Dispositivo eletrônico inteligente).....	34
4 – METODOLOGIA	36
5 – PESQUISA E LEVANTAMENTOS DE DADOS EM CAMPO.....	38
5.1 – Termografia.....	41
5.2 – Troca.....	43
5.3 – Vantagens e Desvantagens	44
5.4 – Questionários	46
6 – ANÁLISES DE DADOS	47
7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	50
REFERÊNCIAS.....	51
Anexo 1 – Questionário	54

1 – INTRODUÇÃO

Os transformadores de potência ou transformadores de força são encontrados no sistema elétrico de potência. Tal ação pode ser evidenciada na geração, na transmissão e na distribuição de energia elétrica. O equipamento exerce a função de modificar o valor de tensão e conseqüentemente, a corrente elétrica. Esta modificação de tensão e corrente é necessária para transmitir a energia elétrica em longas distâncias sem grandes perdas e com economia em cabeados e infraestrutura. Tal fato faz com que se mantenha a potência elétrica praticamente constante, de um circuito a outro. Instalados nos meios rurais e urbanos, os transformadores estão sujeitos a ameaças como intempéries, surtos de tensão, vandalismo e incêndios.

Com base no crescimento do mercado de energia elétrica, as empresas buscam formas de diminuir os custos, operando de maneira a obter maior produtividade e menor número de parada dos equipamentos principais como os transformadores de potência (SOUZA, 2008).

Os transformadores de potência de grande porte são feitos sobre encomenda, de acordo com o projeto da planta ou subestação, tais equipamentos são únicos e devido ao seu alto valor de cerca de milhões faz com que se torne um dos maiores investimentos da indústria. A sua função de transformar os níveis de tensão de entrada e saída está diretamente relacionada ao fornecimento de energia elétrica. Para conciliar a proteção com as mais novas tecnologias no acompanhamento de sua vida útil, tem que conhecer o tipo de falha, as suas causas e defeitos (BECHARA, 2010).

Desta forma, controlar e monitorar a temperatura em um transformador de potência é importante para prevenir e evitar possíveis falhas no isolamento dos enrolamentos causados pelo aumento indesejado da temperatura. Os medidores de temperatura de enrolamentos e também o de temperatura do óleo auxiliam no controle operativo do transformador, os quais podem estar programados para conectar ou ligar um ou mais bancos de ventiladores no circuito de refrigeração do transformador, ou então, podem estar programados para iniciar um programa de rejeição de cargas a ele conectadas (SALLES, 2012).

Existem atualmente diferentes métodos que permitem que este controle de temperatura seja feito visando o custo e benefício. O IED (dispositivo eletrônico inteligente) é a mais nova tecnologia usada, que busca trazer mais segurança e confiabilidade para os transformadores através de monitoramento e controle de temperatura.

O presente trabalho tem como finalidade realizar um estudo sobre a proteção térmica para transformadores, usando de dispositivos de proteção, afim de controlar e monitorar com maior confiabilidade a temperatura. Para melhor entendimento será realizado o acompanhamento de um estudo de caso voltado a um processo de troca de sensor de temperatura. O dispositivo de proteção digital é do tipo convencional, *Treetech* modelo TM1, sendo substituído por um controlador e monitor IED SEL-2414 em um transformador de potência, com as potências nominais de 30/40/50MVA abaixador de 69kV / 13,8kV. O transformador está situado em uma planta industrial, sendo encontrado em uma mineradora situada na região do Médio Piracicaba.

O trabalho está dividido em 6 etapas, sendo a primeira a elaboração da proposta, expondo os objetivos. Na segunda etapa busca-se conceituar os temas abordados pela pesquisa, ressaltando o referencial teórico. Em seguida, aparece a metodologia, demonstrando como discorrerá o estudo. Na etapa subsequente, ocorre a amostragem do estudo de caso, por meio de pesquisas em campo e questionários com profissionais da área, trabalhadores da mineradora. Na outra etapa são apresentadas as análises e discussões. Por fim, é apresentada as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

2 – OBJETIVOS

Este trabalho de conclusão de curso visa realizar um estudo bibliográfico e descritivo sobre as técnicas de proteção térmicas, aplicadas em transformadores de potência.

2.1 – Objetivo Geral

Estudar a tecnologia de proteção IED no controle e monitoramento de temperatura dos transformadores de potência a partir da troca de um medidor digital convencional por um de modelo IED.

2.2 – Objetivos Específicos

Especificamente, ressalta-se:

- Entender o princípio de funcionamento dos transformadores de potência de alta tensão e dos dispositivos de proteção usando pesquisas bibliográficas.
- Compreender o desempenho do dispositivo convencional digital e do IED para proteção de transformadores de potência e dos seus componentes.
- Demonstrar as vantagens e desvantagens do dispositivo TM1/TM2 com o IED aplicadas ao controle e monitoramento de temperatura dos transformadores de potência.
- Coleta de dados sobre a segurança e os benefícios que o IED oferece aos transformadores de potência.

3 – MARCO TEÓRICO

3.1 – Transformador

Segundo BARBI et al. (2012), os transformadores ou Trafo em geral são equipamentos constituídos para adequar os níveis de tensão de energia elétrica. O Trafo é encontrado no processo de produção, transmissão e distribuição entre outras e ainda, tem a função de manter com segurança e confiabilidade o atendimento à uma dada demanda e suprimento dessa energia.

Conforme afirma SANTOS (2018), os transformadores são usados para transformar e distribuir a energia elétrica elevando ou reduzindo a tensão elétrica sem modificar a potência do circuito. Os TF's (transformadores) são construídos com material ferromagnético e possuem características operacionais que dependem do conjunto de condições referentes aos seus processos construtivos. Nesse processo pode-se citar: estruturas de fixação, formas e geometrias especiais de construção, materiais de isolamentos, ventilação, acessórios, entre outros.

3.1.1 – Tipos de Transformadores

De acordo com estudos feitos por MEIRELES (2010), existem inúmeros tipos de transformadores. Podendo ser: transformadores de força ou potência; transformadores de instrumentos como transformadores de corrente e potencial; autotransformadores.

3.1.2 – Transformadores para Instrumentos e Medições

3.1.2.1 – Transformadores de Corrente

Os transformadores de corrente (figura 1), simplificada representados por TC's, são equipamentos que se destinam à adequação de intensidades de correntes para fins de medição, proteção ou controle. Em geral, reduzem os valores de correntes de alta intensidade para valores compatíveis com os níveis utilizados nesse citado instrumento de medição (TAKANO, 2011).

Os transformadores de corrente são construídos com base no princípio da indução e da transformação eletromagnética. Com isso, um circuito constituído de um condutor (barra) ou de uma bobina de N espiras, denominado de enrolamento ou

circuito primário (P), recebe a corrente da rede elétrica, criando assim, um fluxo magnético que se concentra em seu circuito ferromagnético, denominado de núcleo do TC. Este o vincula ou o acopla a um segundo enrolamento, denominado de secundário (S), constituído de uma ou mais bobinas de N espiras cada, onde através de seus terminais se tem disponível a tensão de alimentação da carga secundária. Logo, a bobina é dimensionada para permitir a circulação da corrente segundo os valores desejados e compatíveis com os instrumentos a serem alimentados (TAKANO, 2011).

Figura 1 – Transformador de Corrente – TC



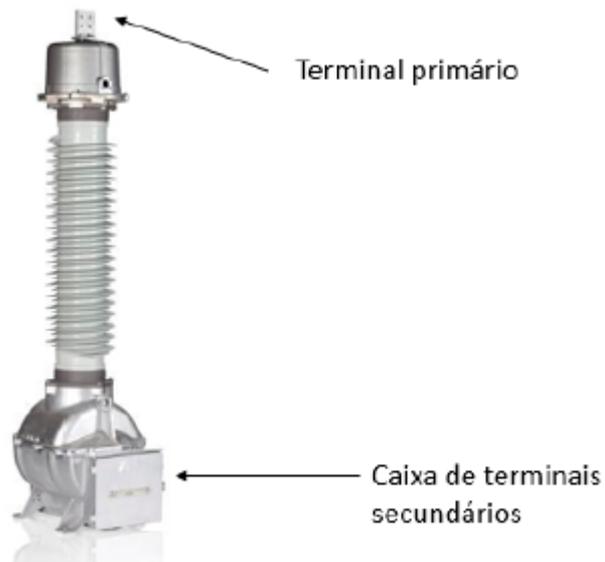
Fonte: ABB (2019)

3.2.2.2 – Transformadores de Potencial

De forma similar ao que foi apresentado para TC's, os transformadores de potencial (figura 2), TP's, reduzem os valores de tensão em redes de AT/MT/BT (Primário) aos níveis daqueles usados em instrumentos de medição e/ ou proteção (Secundário). Podem também realizar um isolamento entre circuitos de AT/MT e o de BT, ou até mesmo, executar ambas as funções (TAKANO, 2011).

O princípio de operação do TP's é o mesmo que o dos TC's, isto é, usam o princípio da indução eletromagnética ficando, portanto, submetidos às mesmas considerações apresentadas anteriormente para os TC's.

Figura 2 – Transformador de Potencial – TP



Fonte: ABB (2019)

3.1.3 – Autotransformador

De acordo com BARBOSA et al. (2017), o autotransformador (ATF) é diferente dos transformadores já citados, pois é constituído de apenas um enrolamento onde se tem o primário e o secundário. Entretanto, da mesma forma que os transformadores monofásicos podem ser combinados para a formação de bancos trifásicos a partir de três unidades monofásicas, também os autotransformadores permitem tal conexão, conforme mostra figura 3. Em sistemas de potência é muito usual encontrar tais aplicações de ATF's – trifásicos (ATF-3F).

Figura 3 – Autotransformador Trifásico



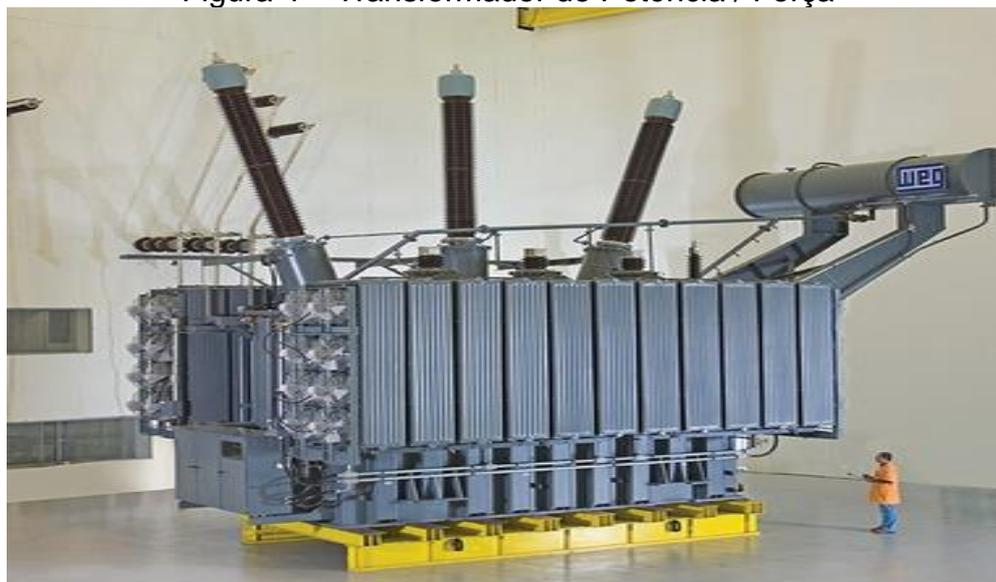
Fonte: *Wise Transformadores* (2019)

É possível reunir três unidades monofásicas de ATF's e conectá-las na forma de um banco trifásico. Daí, obtém-se um ganho no valor da potência total transformada. Nesse caso, é também usual se encontrar em sistemas de alta tensão ATF's trifásicos providos desse enrolamento terciário conectado no formato de ligação em *delta*, também chamado de triângulo, obtendo-se, portanto, um comportamento muito semelhante ao TF de três enrolamentos (JACOBOSKI, 2018).

3.1.4 – Transformador de Potência ou Transformador de Força

De acordo com FILHO e MAMEDE (2013), os transformadores de força ou transformadores de potência (figura 4) se constituem como um dos mais importantes equipamentos contidos em um sistema elétrico de potência. Isto, sendo na geração, transmissão e distribuição a grandes indústrias e centros urbanos. Tais TF's podem ser do tipo elevador ou abaixador de tensão, dependendo das finalidades a que se destinam.

Figura 4 – Transformador de Potência / Força



Fonte: WEG (2019)

De acordo com ALVES (2013), para todos os transformadores denomina-se de enrolamento primário (P) aquele que recebe a energia de uma determinada fonte de alimentação. O enrolamento secundário (S) é aquele que distribui essa energia transformada. Denomina-se, ainda, de enrolamento de alta tensão (AT) de um TF aquele que trabalha no nível mais alto de tensão. Conseqüentemente, o enrolamento de baixa tensão (BT) é o que opera na tensão mais baixa aplicada a esse TF. Essas classificações independem dos níveis de tensão e de isolamentos associados a tais enrolamentos.

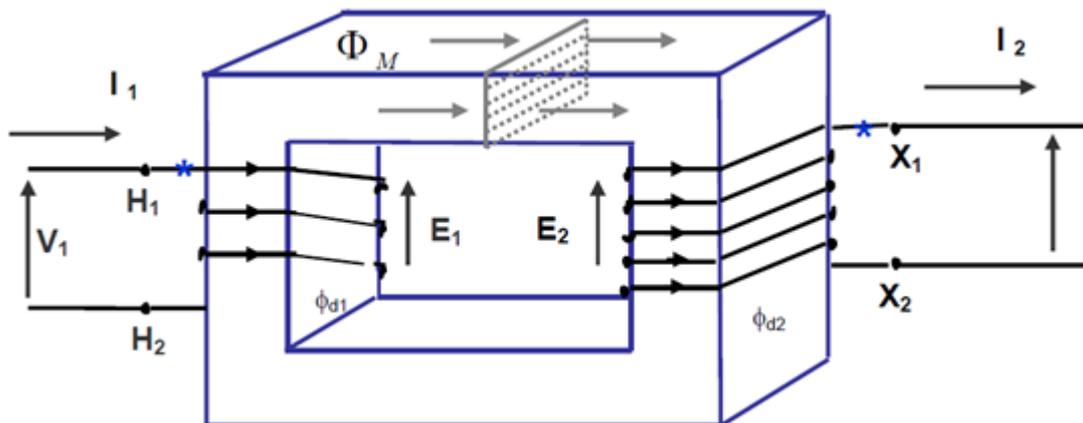
Ainda do ponto de vista operacional, conforme cita ALVES (2013), a potência recebida no enrolamento primário é transferida aos enrolamentos secundários. Daí, através desse fluxo magnético mútuo, o qual em função da natureza construtiva, geométrica e demais especificações técnicas do TF acaba por definir o valor máximo e de regime permanente dessa potência a ser transformada. Assim, é possível de ser transferida de um circuito para outro, sem causar elevada queda de tensão, aquecimento excessivo, danos ao isolamento ou a qualquer outra parte de sua estrutura construtiva, independentemente das várias e adversas condições de trabalho que esse equipamento poderá apresentar.

Conforme o autor acima, há de se dizer que os transformadores em questão podem ser monofásicos, operando isoladamente ou em bancos, constituindo assim, um sistema trifásico a partir de três unidades monofásicas. Logo, este sistema compõe

a sua forma mais usualmente encontrada em suas aplicações convencionais de MT e AT.

O circuito do transformador monofásico, pelo que relata MORAES (2012), (figura 5) recebe no primário (P) a alimentação de uma fonte alternada (AC), por exemplo, uma rede de transmissão, ou de distribuição, ou uma fonte de geração. Daí, através da absorção e circulação da corrente nesse enrolamento P, estabelece-se sobre o circuito magnético do núcleo um fluxo magnético, o qual por meio do núcleo acopla-se então, esses dois enrolamentos P e S sobre eles montados. A bobina do enrolamento primário possui N_1 espiras e a do enrolamento secundário possui N_2 espiras, sendo S a seção dada em m^2 , a área da seção reta transversal, constante e homogênea para esse circuito magnético.

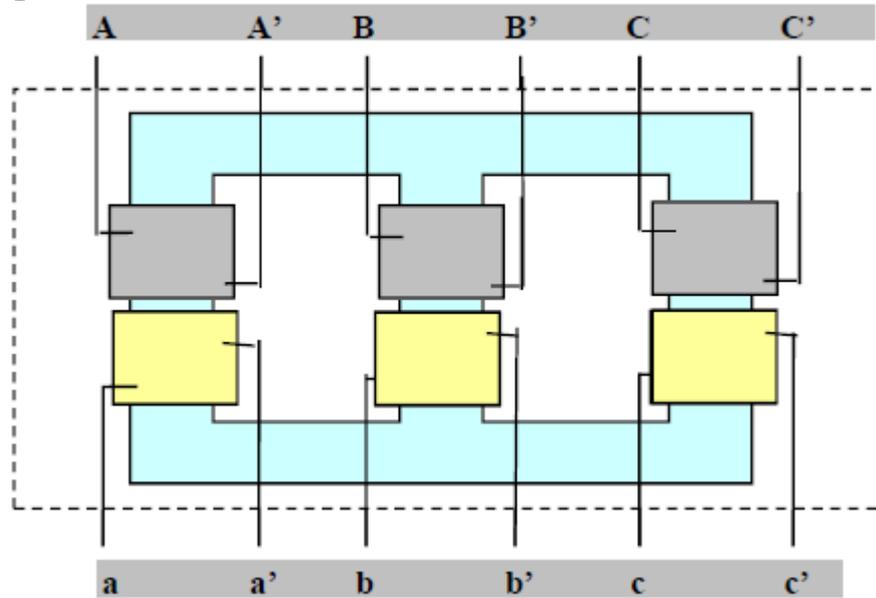
Figura 5 – Estrutura Básica de um Transformador Monofásico



Fonte: Moraes (2012)

Os transformadores trifásicos são estruturados através das interligações de seis (06) bobinas, constituindo assim, três enrolamentos para as fases do lado do primário e as outras três para as fases do lado do secundário do transformador como é demonstrado na figura 6 (ROSSI, 2019).

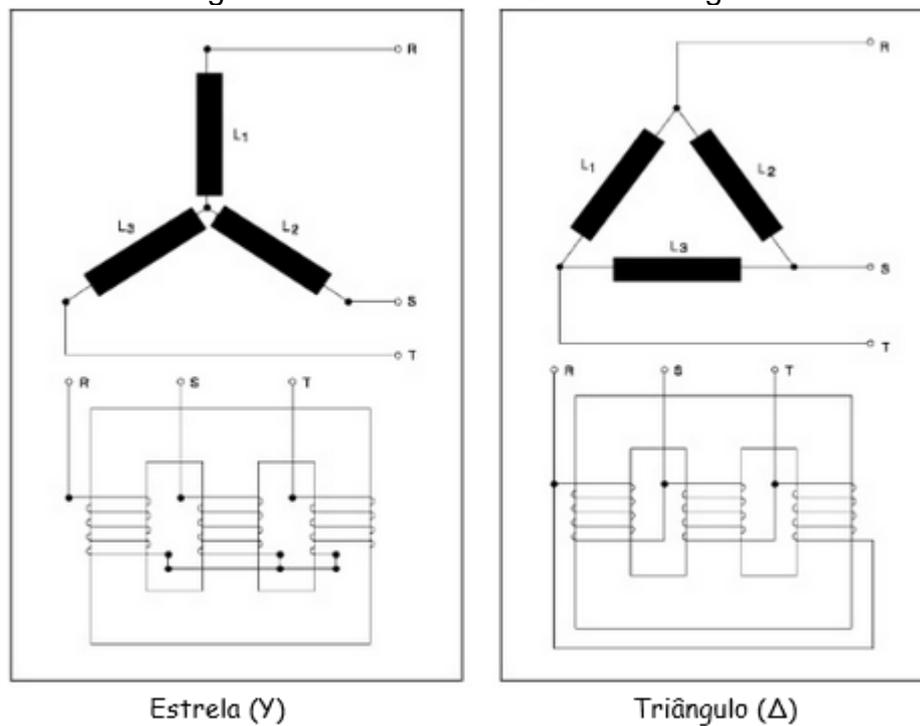
Figura 6 – Núcleo e Enrolamentos de um Transformador Trifásico



Fonte: Rossi (2019)

Os enrolamentos dos transformadores trifásicos podem ser fechados em estrela (Y) ou em triângulo (Δ), tanto no primário quanto no secundário (figura 7).

Figura 7 – Fechamento Estrela/Triângulo



Estrela (Y)

Triângulo (Δ)

Fonte: Tomazeli (2016)

3.2 – Temperatura

Transformadores são equipamentos vitais para o sistema elétrico. Mantê-los em boas condições de trabalho depende do seu sistema de controle e do monitoramento de temperatura. A elevação da temperatura causa medições contraditórias e a redução de sua vida útil. O relé de temperatura do enrolamento e o relé de temperatura do óleo são programados para ligar bancos de ventiladores. O intuito deste processo é refrigerar o transformador ou também realizar o desligamento do circuito, evitando maiores danos ao equipamento, em caso de aumento de temperatura (LOPES et al., 2017).

Com o aumento da temperatura, o isolamento dos enrolamentos dos transformadores pode sofrer degradação. Tal fato faz com que o transformador fique suscetível a falhas, podendo danificar seu meio isolante, existente no interior do transformador. Com a degradação do isolamento, são geradas pequenas descargas parciais. Essas descargas são pequenas centelhas geradas pela diferença de potencial entre as espiras, conseqüentemente são gerados alguns gases prejudiciais para o transformador.

3.3 – Proteção Térmica

De acordo com a publicação realizada pela empresa SEL (2018), fabricante de IED's, em sua revista técnica afirma que, atualmente, o carregamento dos transformadores de potência das subestações de energia é controlado por um método tradicional que se baseia na corrente ou potência do equipamento, ou seja, mede-se a carga que o mesmo alimenta. Este método visa proteger o equipamento contra sobrecargas excessivas, evitando danos e redução de sua vida útil. A empresa SEL afirma que não é raro admitir corte de carga em transformadores que estejam operando com cargas acima dos valores nominais do equipamento. Porém, a verificação de uma sobrecarga seria o primeiro passo da cadeia de degradação de um transformador. Logo, o aquecimento causado por essa elevação de corrente irá gerar a deterioração do papel isolante, acelerando o desgaste do transformador.

Assim, o aquecimento causa a redução da vida útil do transformador esta condição não depende somente da sobrecarga aplicada, mas também da norma de

fabricação do transformador, da sua curva de carga diária, da temperatura ambiente e da quantidade e eficiência do sistema de refrigeração aplicado.

Pelo que relata FILHO e MAMEDE (2013), com avanços e mudanças das tecnologias, existem atualmente diferentes métodos que permitem que este controle de carregamento seja feito com base no aquecimento. Com isso, permite a liberação de uma maior quantidade de carga, evitando cortes desnecessários e aumentando os limites de intercâmbio de energia, sem perda da vida útil adicional para o transformador.

3.3.1 – Termovisor

Segundo SOUZA (2008), as falhas em transformadores são geralmente derivadas de anomalias térmicas, o que se faz necessário o acompanhamento dessa temperatura. Desta forma, é importante o acompanhamento do nível de temperatura, afim de reduzir os custos e aumentar o seu ciclo de vida.

Ainda segundo SOUZA (2008), os termovisores (figura 8) são equipamentos que detecta a radiação infravermelha emitida pelo equipamento inspecionado, permitindo localizar possíveis falhas que não são possíveis detectar a olho nu. Usando de um método simples e sem contato direto, a inspeção é rápida, segura e confiável, capaz de examinar grandes superfícies com alto rendimento e em pouco tempo.

Figura 8 – Termovisor



Fonte: Souza (2008)

3.3.2 – Monitoramento de Perda de Vida Útil

Segundo OLIVEIRA et al. (2019), o papel isolante é submetido a um processo contínuo de degradação por ação da água, do oxigênio e de ácidos presentes no óleo isolante. Com isso, mantém-se o controle da ação desses contaminantes e o envelhecimento da celulose é predominantemente térmico e cumulativo. Com esta consideração, o envelhecimento está baseado na vida esperada do transformador sob efeito da temperatura de operação do isolamento ao longo do tempo. O elemento térmico usa a temperatura do óleo e o ponto mais quente do enrolamento para calcular o fator de aceleração do envelhecimento da isolação e estimativa de perda de vida útil.

Ainda conforme o autor citado acima, o fator de aceleração do envelhecimento representa quão rápido o isolamento está envelhecendo, devido ao *stress* térmico, em comparação ao envelhecimento que seria causado por uma temperatura de referência para o ponto mais quente.

No que tange à estimativa de vida, de acordo com um estudo publicado pela empresa SEL (2018) em sua revista técnica, é notório citar que a vida é perdida em 24h com relação às horas de vida total do transformador, valor que é fixado por norma. Assim, esse valor representa uma porcentagem de vida perdida por dia. Quando este valor é acumulado e subtraído do valor total de vida, pode-se obter uma estimativa de vida restante para o transformador, considerando apenas esforços térmicos.

3.3.3 – Sistema de Ventilação Forçada

Segundo FILHO e MAMEDE (2013), os transformadores de potência com potência superior a 2,5MVA são compostos de moto ventiladores aos seus radiadores com intuito de realizar a refrigeração forçada da máquina. Esses ventiladores normalmente são ligados em estágios, atuando à medida que o transformador adquire uma temperatura predeterminada nos seus enrolamentos. Desta feita, pode-se aumentar a capacidade da máquina em cerca de 25%.

Tais transformadores providos de ventilação forçada são apresentados por dois ou três valores de potência nominal. Esse trabalho cita um transformador de potência com as seguintes potências 30/40/50MVA. Assim, o primeiro valor se refere à potência

nominal do equipamento somente com a refrigeração natural do ambiente. O segundo valor, ao primeiro estágio da ventilação forçada, e o terceiro se refere ao segundo estágio da ventilação forçada.

3.3.4 – Sistema de Resfriamento

De acordo com FILHO e MAMEDE (2013), os transformadores em operação produzem internamente uma grande quantidade de calor. Este calor precisa ser transportado ao meio externo com o propósito de não prejudicar a qualidade do isolamento dos enrolamentos.

Ainda pelo autor, o calor gerado é resultado da perda *ôhmica* nos fios dos enrolamentos quando o transformador está com carga, e também das perdas por histerese e correntes de *Foucault* em qualquer condição de operação. O calor gerado nos condutores do enrolamento, pela passagem da corrente elétrica, é transferido ao óleo mineral isolante. Tal óleo envolve toda a bobina do transformador que por sua vez é transferido às paredes do tanque ou através dos radiadores, onde é feita a circulação do óleo e conduzido ao meio ambiente. Assim, é relevante citar os métodos de transmissão de calor, através da física, de forma tanto interna como externamente, ocorrendo das seguintes formas:

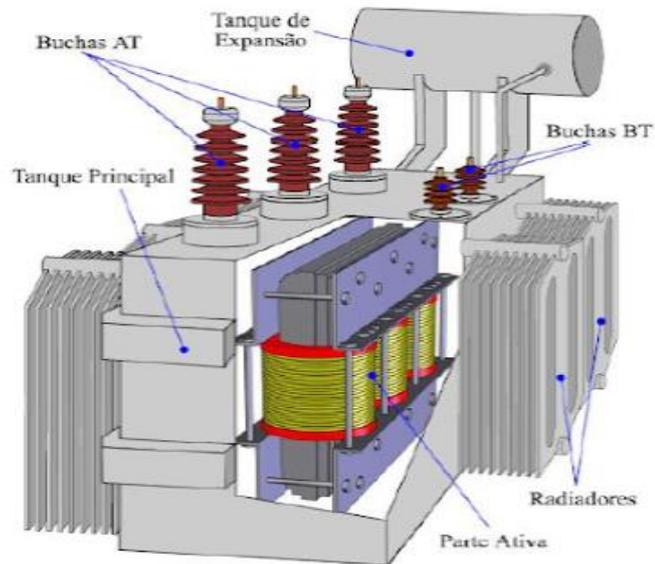
- Condução.
- Radiação.
- Convecção.

Pelo exposto, a contribuição da transmissão do calor por condução e radiação tem pouca importância, tornando desprezável para fins práticos. Logo, o processo de convecção é o principal responsável da transmissão de calor do núcleo para o óleo e, assim, para os radiadores e para o meio ambiente. Porém, a transmissão de calor do óleo aos radiadores do transformador é feita por condução. Em contrapartida, o método de transmissão de calor por convecção pode ser realizado por duas formas diferentes:

- Convecção natural.
- Convecção forçada.

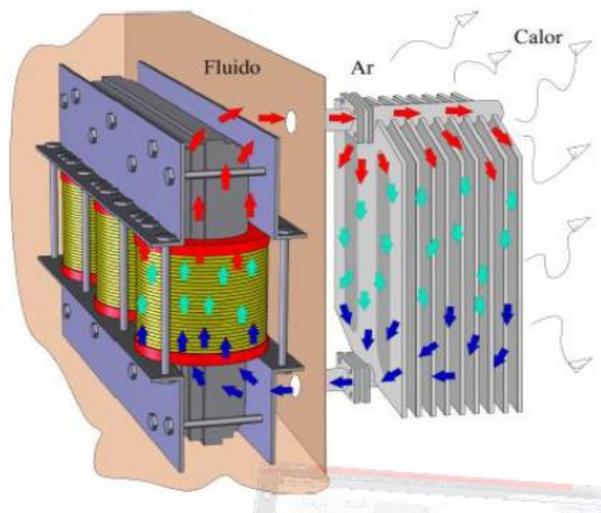
Continuando a citar FILHO e MAMEDE (2013), na convecção natural o volume de ar aquecido em contato com o transformador move-se para cima, sendo substituído por um volume de massa de ar mais frio que, ao ser aquecida, move-se como anteriormente, em um processo lento e contínuo. No momento em que o volume de óleo quente chega à parte superior do transformador, começa o caminho de volta através dos radiadores, transferindo o calor para o meio externo, retornando a sua parte inferior já resfriado, como ilustra a (figura 10).

Figura 9 – Aspectos Construtivos dos Transformadores de Potência



Fonte: Univertec (2013)

Figura 10 – Circulação do Óleo no Transformador



Fonte: Univertec (2013)

Ainda segundo FILHO e MAMEDE (2013), na circunstância da convecção forçada, é crucial a utilização de motores elétricos acoplados a ventiladores que aceleram a movimentação das massas de ar quente entre as aletas dos radiadores do transformador, que rapidamente são substituídas por massas de ar frio, em um processo rápido e contínuo. Este método é comum aos transformadores de potência que apresentam um custo elevado significativo. Contudo, tal sistema torna-se viável aos transformadores, já que deste jeito obtém-se uma capacidade adicional de potência nominal ao transformador. Os equipamentos designados a esse tipo de resfriamento trazem em sua especificação técnica um grupo de letras que descrevem as iniciais de cada sistema ao qual foi projetado para realizar o resfriamento do transformador.

- Óleo natural com resfriamento natural - ONAN (óleo natural, ar natural).
- Óleo natural com ventilação forçada – ONAF (óleo natural, ar forçado).
- Óleo com circulação forçada do líquido isolante e com ventilação forçada – OFAF (óleo forçado, ar forçado).
- Óleo com circulação forçada do líquido isolante e com resfriamento a água – OFWF (óleo forçado, água forçada).
- Seco com resfriamento natural – NA (ar natural).
- Seco com ventilação forçada – AF (ar forçado).

3.3.5 – Convencional

De acordo com os estudos realizados por LIMA (2015), a proteção térmica analógica dos transformadores de potência é interpretada como grosseiras e possuem uma vida útil menor que os próprios transformadores. Esses instrumentos são construídos em caixas resistentes com impermeabilização contra agentes externos do meio ambiente, como chuva entre outros. Com visores em vidro são verificados seus ponteiros mecânicos ajustáveis. Esses são responsáveis em realizar o comando dos ventiladores e funções de alarme e proteção. A figura 11 ilustra tais instrumentos.

Figura 11 – Termômetros Analógicos para Transformadores



Fonte: Lima (2015)

Do ponto de vista construtivo, conforme citado por LIMA (2015), os indicadores de temperaturas analógicos têm seu bom funcionamento nos seus primeiros anos de instalação. Durante o seu período de atuação, podem acontecer algumas deficiências quanto ao seu funcionamento. Veja:

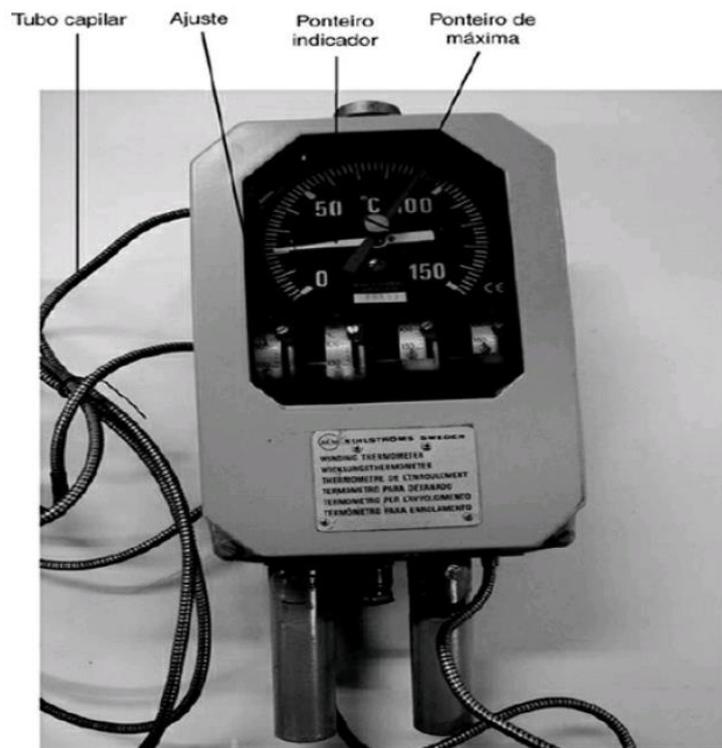
- Os indicadores, com o passar dos anos, acabam exigindo uma calibração periódica mais constante.
- Requerem uma maior habilidade do técnico para realizar seus ajustes.
- Em alguns instrumentos podem ocorrer penetração de água ou umidade, por estarem dispostos ao tempo.
- Estão sujeitos à corrosão de seus contatos e partes metálicas internas.
- São vulneráveis à alarmes e disparos errôneos ocasionados por trepidação ou vibração do instrumento.

Com isso, o mesmo autor citado antes mostra outros problemas que acontecem de maneira indireta com esses tipos de indicadores analógicos:

- Procedimento de calibração difícil que requer muito tempo.
- Mercado de reposição de peças escasso.

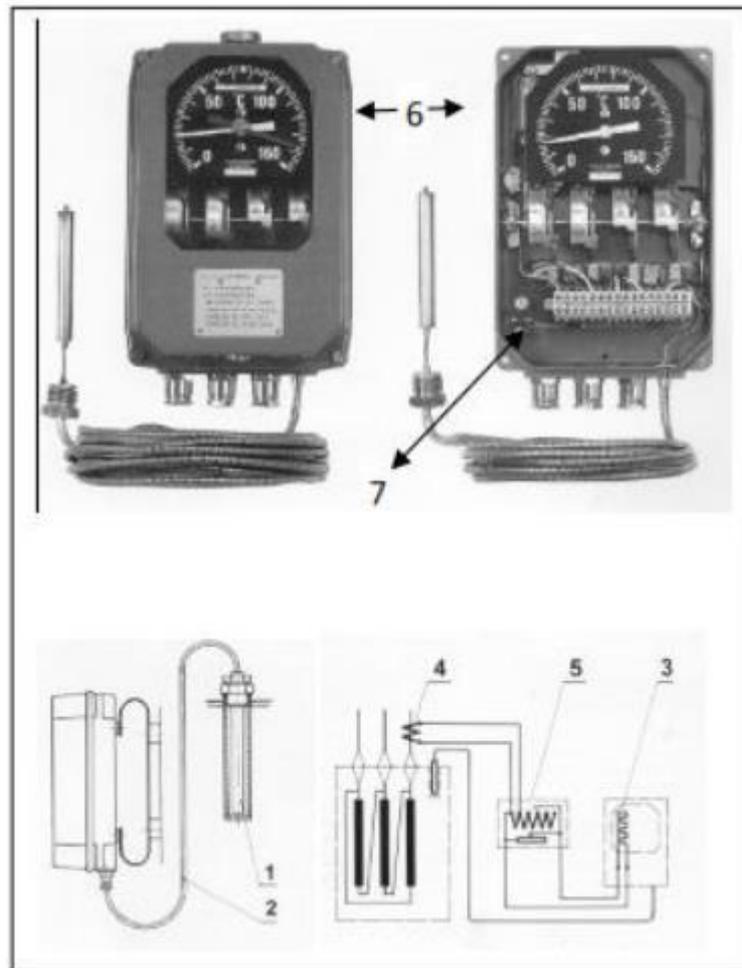
De acordo com FILHO e MAMEDE (2013), medidores de temperatura do óleo como o da figura 12, realizam a medição direta da temperatura do topo do óleo por meio do sistema de sonda, capilar e mostrador com ponteiros. A sonda entra em contato com óleo na parte superior do transformador. Isto faz com que o líquido expansivo no interior da sonda tenha uma ampliação que irá movimentar os ponteiros de medição e os contatos dos micro interruptores ajustáveis. Com a elevação da temperatura, os ponteiros alcançam os pontos ajustáveis para acionar os ventiladores, gerar alarmes ou também o desligamento do transformador. Na figura 13 podemos ver os detalhes do termômetro analógico.

Figura 12 – Termômetro Analógico.



Fonte: Filho e Mamede (2013)

Figura 13 – Detalhes dos Termômetros Analógicos.



Fonte: Lima (2015)

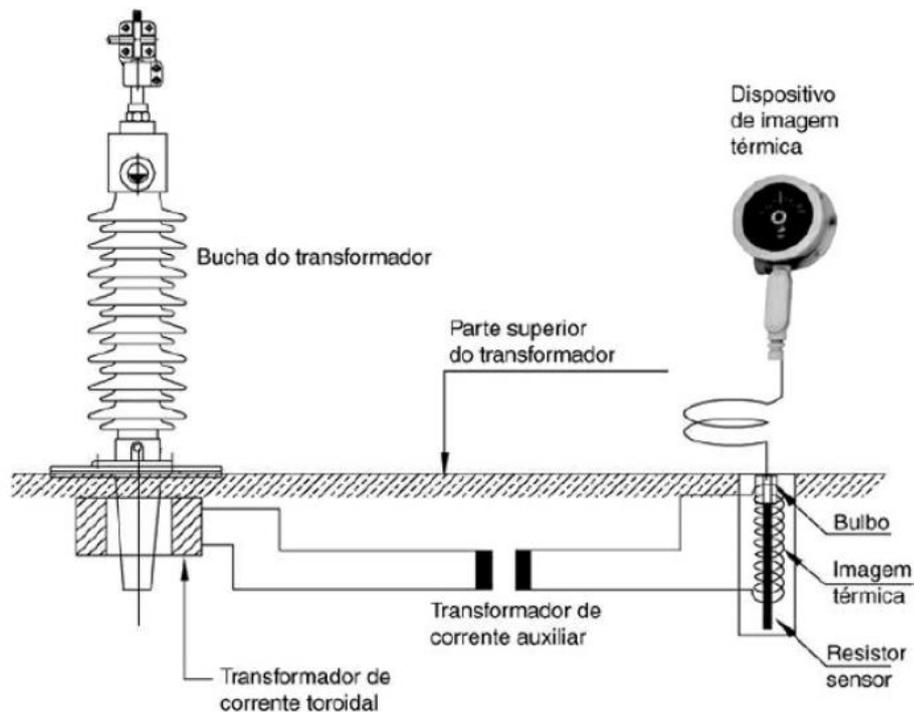
A figura acima exemplifica os componentes existentes em um termômetro analógico conforme os itens seguintes.

1. Termo poço ou bulbo;
2. Tubos capilares;
3. Elementos de aquecimento;
4. TC de Imagem térmica;
5. Caixas de calibração;
6. Mostradores de ponteiros;
7. Contatos secos de alarme, disparo e resfriamento.

Desta feita, os altos níveis de tensão, presentes nos enrolamentos dos transformadores, não permitem que seja instalada uma sonda de medição direta em seus enrolamentos. Com isso, a medição da temperatura dos enrolamentos é feita por

imagem térmica, processo que influencia indiretamente as temperaturas do óleo e da corrente de carga do transformador. O transformador dispõe de uma unidade utilizada para a indicação da temperatura do óleo e outra unidade de medição para temperatura do enrolamento. O princípio de funcionamento do indicador de temperatura do enrolamento parte de uma resistência de aquecimento conectada a um termopocço e a um transformador de corrente. A corrente que circula pelo TC cria um sobreaquecimento do bulbo e da sonda em relação à medida da temperatura do topo do óleo, referindo-se ao carregamento do transformador, que movimentará o líquido expansível pelo capilar, gerando uma indicação que correspondera a temperatura do enrolamento, como ilustra a figura 14.

Figura 14 – Dispositivo de Imagem Térmica.



Fonte: Filho e Mamede (2013)

De acordo com FILHO e MAMEDE (2013), os relés de proteção convencionais (figura 15), analógicos e eletrônicos, são considerados dispositivos limitados, por serem constituídos de circuitos integrados dedicados a cada função. Os medidores de temperatura eletrônico são constituídos por componentes como transistores, diodos, resistores e capacitores.

Ainda pelo autor, esses dispositivos tem seu princípio de funcionamento controlador baseado na medição de temperatura do topo do óleo, realizada por sensores de temperatura RTD do tipo Pt100 ohms a 0° C. Já, a temperatura dos enrolamentos é definida por meio de cálculos fundamentados em modelos matemáticos do comportamento térmico dos enrolamentos sem necessidade de métodos de imagem térmica baseada na resistência de aquecimento.

Para tal, esses controladores fazem com que seja necessário receber informações da corrente de carga do transformador por meio dos TC's de bucha, dedicados para esta finalidade.

Figura 15 – Controlador de Temperatura Convencional (Digital)



Fonte: Treetech (2017)

3.3.6 – IED (Dispositivo eletrônico inteligente)

De acordo com FILHO e MAMEDE (2013), os IED's são computadores com muitas funções, dentre elas, a capacidade de processamento e interação via software que possibilitam criar e executar lógicas internas. O IED também permite a interligação em rede, sincronização em tempo real através de GPS (sistema de posicionamento global) e executam suas funções de proteção de forma perfeita e clara. Tais funções são agregadas em um único relé, visto que sua alta capacidade de processamento permite incluir em um único equipamento várias necessidades de proteção. Vale ressaltar que isso, nas versões anteriores, não era indicado.

Devido ao fato de a tecnologia oferecer ferramentas que executam lógicas internas que permitem gerenciá-las através de blocos de funções e, ainda, ser possível a comunicação entre si, a tecnologia trouxe junto a automatização de subestações e sistemas, melhorando a confiabilidade, segurança e recursos operacionais. Cada fabricante possui seu software específico, onde se desenvolve a configuração, os parâmetros e a integração dos IED's (figura 16), com uma gama de recursos para o usuário. É possível também visualizar e manipular as condições das variáveis, essas advindas de entradas digitais ou analógicas e contatos de saídas, possibilitando gerenciar os valores de tais condições. Ainda proporcionam recursos para gerenciamento do sistema, salvando e visualizando oscilógrafas geradas a partir da detecção de falhas no sistema ao qual está fazendo o seu monitoramento, criar links de rede, gerenciar firmware, criar bancos de dados dos arquivos de cada dispositivo entre outras.

Figura 16 – IED



Fonte: SEL (2019)

Atualmente os IED's realizam a integração de dispositivos de campo como transformadores e disjuntores com o supervisório por meio de protocolos de comunicação definidos. Além disso, não possuem apenas função de supervisão, mas também de trafegar dados de proteção e automação, pois atualmente os protocolos de comunicação já são padronizados e possuem características de interoperabilidade.

4 – METODOLOGIA

Foram realizados estudos bibliográficos em diferentes trabalhos de graduação, artigos, sites e livros para entendimento do tema exposto. Com isso, a metodologia aqui empregada visa acompanhar e relatar o processo de troca de relé de temperatura convencional por IED, além de estudar seus benefícios. Desta feita, para enriquecer a proposta de estudo, realizou-se um questionário com profissionais do ramo da eletricidade no intuito de aumentar o esclarecimento de dúvidas para além da parte bibliográfica.

Inicialmente os pesquisadores buscaram se instruir a respeito da funcionalidade e da importância dos transformadores de potência no sistema elétrico. Para que a tensão elétrica chegue às residências, hospitais e indústrias, ela precisa ser transformada desde a geração até a distribuição por meio dos transformadores elevadores e abaixadores, a fim de que sejam atendidos os níveis de tensão elétrica específica para cada cliente. Com o objetivo de manter o fornecimento da energia elétrica, o controle de temperatura é de suma importância por estar diretamente relacionado com a qualidade e confiabilidade dos transformadores inseridos no sistema elétrico.

Assim, na primeira etapa foi elaborada a proposta de estudo e os objetivos do trabalho sobre a proteção térmica em transformadores de potência. Em seguida, foi possível entender, pelos estudos feitos, e como mostra SOUZA (2008), a importância que a empresa tem em relação à diminuição de custo, operando de forma a obter menor quantidade de paradas e conseqüentemente conseguir maior produtividade, fato que se dá ao avanço da tecnologia para a proteção térmica dos transformadores.

Pela observação de relatos de profissionais, no que tange à prevenção das possíveis falhas ou danos causados pelo aumento indesejado da temperatura, foi possível entender que o medidor controla e monitora a temperatura, auxiliando no aumento da vida útil do transformador.

Dando continuidade ao trabalho, como já exposto, foram realizados estudos bibliográficos relacionados ao funcionamento dos transformadores e medidores de temperatura. Daí ficou mais fácil entender a importância do controle e monitoramento

de temperatura nos transformadores, para evitar a degradação do isolamento dos enrolamentos.

Na etapa seguinte foi realizado um estudo de caso, acompanhando a troca de medidores convencionais de temperatura por IED, no intuito de melhorar o controle e o monitoramento de temperatura em um transformador situado em uma mineradora no Médio Piracicaba. Tal transformador é responsável por reduzir o nível de tensão elétrica de 69KV para 13.8KV e, assim, distribuir para toda a planta industrial da mineradora. O transformador em questão, possui potência de 30/40/50MVA e a sua função é única no fornecimento de energia da planta, pois é localizado na subestação principal, onde é feita toda a distribuição da energia.

Antes de realizar a troca do medidor convencional pelo IED, foi feito levantamentos de dados. Isso se deu através de câmera termográfica a fim de analisar o nível de temperatura no transformador para comparação após a troca. Depois da troca foram levantadas vantagens e desvantagens do medidor convencional com o IED e realizado um questionário com profissionais da área. As pessoas entrevistadas são profissionais especializados da empresa. Um deles é o supervisor que atua na área de manutenção a mais de 30 anos, conhecendo o desenvolvimento que os dispositivos de proteção tiveram no monitoramento e controle do transformador a partir da evolução dos medidores aplicados. O segundo entrevistado é um engenheiro de proteção, responsável pela área de manutenção em Carajás.

Desta forma, foram levantadas as análises e discussões sobre as medições de temperatura após a troca dos medidores. Também verificou-se as vantagens e desvantagens que o dispositivo digital convencional e o IED possuem com auxílio de um quadro, feito por RODRIGUES (2013), e dos relatos nos questionários dos profissionais da área. Através das análises é possível entender os benefícios que as tecnologias dos IED's possuem.

Desta feita, nas considerações finais foram obtidos pontos positivos no monitoramento e controle dos transformadores e elaboradas propostas de trabalhos futuros com o intuito de manter a integridade dos transformadores de potência.

5 – PESQUISA E LEVANTAMENTOS DE DADOS EM CAMPO

No intuito de agregar conhecimento e melhorar a pesquisa, foi realizado um estudo de caso de um acompanhamento da troca dos dispositivos de proteção térmica. A figura 17 apresenta o transformador onde o processo de acompanhamento da troca foi realizado.

Figura 17 – Transformador

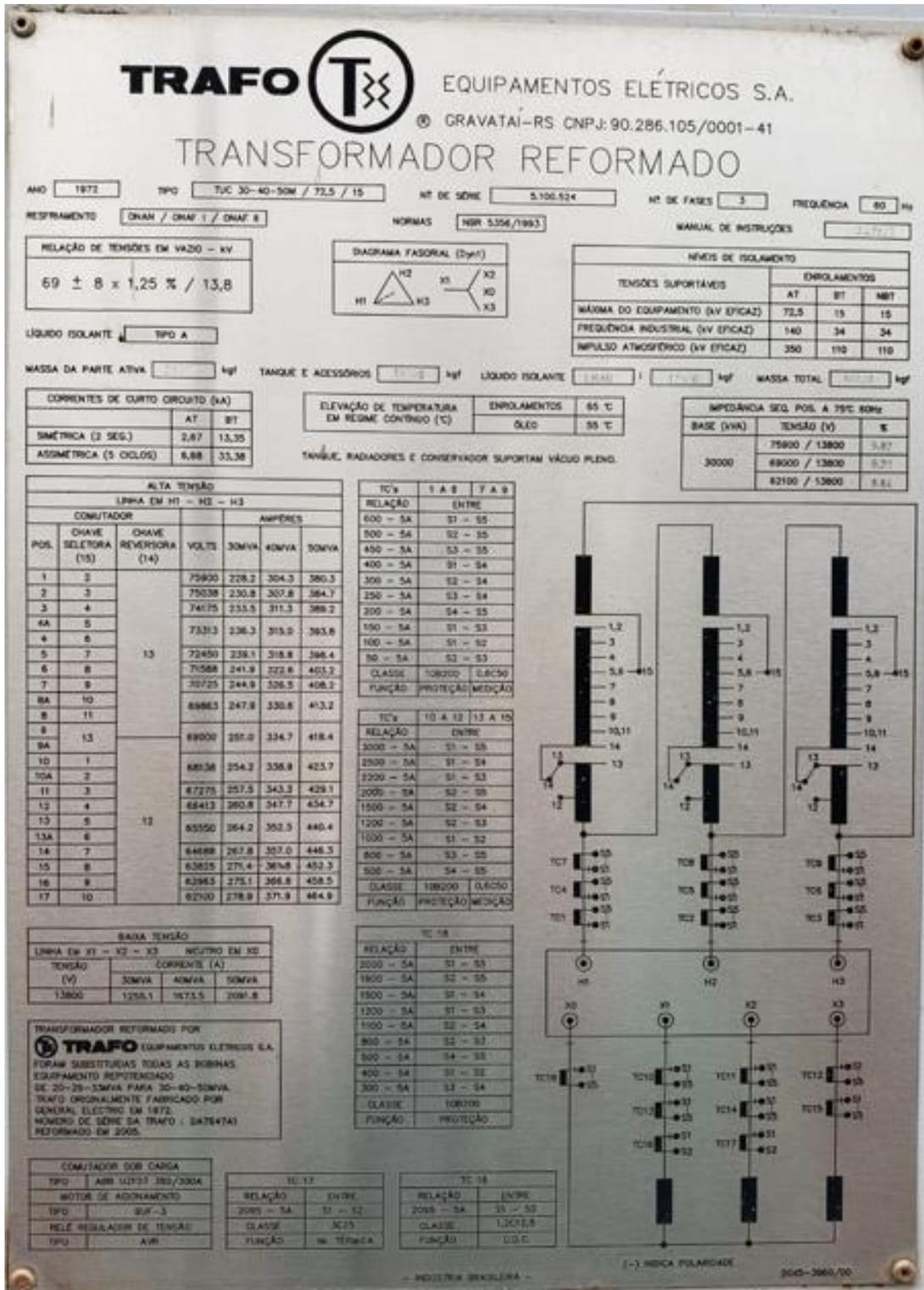


Fonte: Elaborada pelos próprios autores (2019)

O transformador é trifásico, com potência de 30/40/50MVA, tais potências refere se a condição de refrigeração do equipamento. Sendo 30MVA na sua condição de refrigeração natural, 40MVA com o primeiro grupo da ventilação forçada e os 50MVA com o primeiro e segundo grupo de ventilação forçada sendo necessário para sua refrigeração. Este transformador é responsável por diminuir a sua tensão primária

de 69KV para 13.8KV sua tensão secundária, e frequência nominal de 60HZ, conforme dados de placa do documental do transformador mostrado na figura 18.

Figura 18 – Dados de Placa



Fonte: Pesquisa Documental (2019)

5.1 – Termografia

Antes de ser realizada a troca dos dispositivos de proteção de temperatura, foi feita a análise termográfica para se ter uma avaliação da temperatura do transformador. A termografia foi realizada antes da troca, demonstrando através de imagem infravermelha a temperatura que o transformador já citado se encontrava, conforme mostra a figura 20.

Figura 20 – Imagem Infravermelha - Anterior



Fonte: Elaborada pelos próprios autores (2019)

Na medida realizada foi constatada uma temperatura de 64,3°C do óleo, temperatura alta para o transformador, conforme mostra a figura 21 da placa do transformador, que é de 55°C.

Figura 21 – Dados da Elevação de Temperatura

ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA EM REGIME CONTÍNUO (°C)	ENROLAMENTOS	65 °C
	ÓLEO	55 °C

Fonte: Elaborada pelos próprios autores (2019)

Depois da troca do dispositivo convencional de proteção térmica pelo IED, foi feita nova análise termográfica para comparação do nível de temperatura, conforme figura 22.

Figura 22 – Imagem Infravermelha - Posterior



Fonte: Elaborada pelos próprios autores (2019)

Na figura 22, o transformador já se encontra com o IED instalado. Logo, o nível de temperatura está mais baixo, chegando a 56,7°C, bem próximo do dado de placa.

5.2 – Troca

A figura 23 relaciona a quantidade de equipamentos digitais convencionais necessários para realizar as funções de proteção de um transformador com a tecnologia utilizada atualmente, onde um único IED realiza todas as funções de proteção como mostra a figura 24. Devido ao fato de a tecnologia oferecer ferramentas que executam lógicas internas através de blocos de funções e também ser possível a comunicação entre si, trouxeram junto a automatização de subestações e sistemas, garantindo confiabilidade, segurança e recursos operacionais.

Figura 23 – Painel de Controle Convencional



Fonte: Elaborada pelos próprios autores (2019)

Figura 24 – Painel de Controle IED



Fonte: Elaborada pelos próprios autores (2019)

O IED em questão é um SEL – 2414 que funciona entre a tensão de 110 a 240V na frequência de 50 ou 60HZ, além de controlar e monitorar a temperatura, ainda exercendo a função do controle de saída de tensão do transformador. Esta função muda os TAP's do transformador para equilibrar a tensão de saída.

5.3 – Vantagens e Desvantagens

O monitoramento remoto é de suma importância para a operação e manutenção dos transformadores de potência. O controle e monitoramento aumenta a confiabilidade da manutenção preditiva e preventiva, gerenciando e melhorando a vida útil do transformador. Estes benefícios concebem economia para a área de manutenção e diminuem o tempo de inspeção realizada pelos operadores, já que os mesmos não precisam ir em campo para levantar dados, sendo feitos agora através da sala de controle por meio de interface em tempo real.

As vantagens e desvantagens entre os dispositivos de proteção (convencional digital e o IED) estão relacionadas no quadro 1.

Quadro 1 – Vantagens e Desvantagens

DISPOSITIVOS	VANTAGENS	DESVANTAGENS
DIGITAL	Maior precisão; maior flexibilidade de ajustes de proteção.	Baixa capacidade de processamento interferindo diretamente no desempenho e velocidade de atuação da proteção.
IED	Diversos grupos de ajustes; comunicação remota; múltiplas funções de proteção e auxiliares; configuração via <i>software</i> ; alta capacidade de processamento; etc.	Confiabilidade; disponibilidade.

Fonte: Rodrigues (2013)

Segundo RODRIGUES (2013), o IED possui muito mais vantagens se comparado com o dispositivo digital convencional. É muito confiável como dispositivo, pois traz uma segurança muito maior para o transformador, como mostra o quadro acima. Entretanto, uma das suas desvantagens também é a confiabilidade, isso é devido a ser um só dispositivo, responsável por toda a segurança do transformador. Se um IED vier a dar problema, a perda de informação é geral, interferindo diretamente no processo produtivo da planta. Por tanto é fundamental manter dois dispositivos de proteção realizando a mesma função, com o intuito de garantir o controle e monitoramento se caso um vier a dar falha.

A disponibilidade do IED também é questionada como desvantagem segundo RODRIGUES (2013), pois é um fator crítico quando se trata de evolução tecnológica.

5.4 – Questionários

Para melhor entender o benefício que a mudança dos relés oferece ao processo e a segurança do transformador, o questionário com os profissionais da empresa serviu de base. Os profissionais são pessoas diretamente ligadas ao bem-estar do transformador, sendo um, Adilson Peixoto, o supervisor que atua a mais de 38 anos na área do sistema elétrico. Este profissional é responsável pela manutenção das subestações e de todo sistema elétrico de potência da mineradora onde a troca foi realizada. O outro profissional é Gilcimar Meireles, engenheiro de proteção que trabalha no S11D, em Canaã dos Carajás.

Abaixo está a lista de perguntas feitas aos profissionais:

1. Quais as consequências das elevadas temperaturas geradas pelo alto carregamento de carga nos transformadores de potência?
2. Quais ganhos podemos adquirir com o monitoramento e controle da temperatura nos transformadores de potência?
3. Qual a importância de se fazer o controle e monitoramento da temperatura dos transformadores de potência?
4. A falta de um monitoramento e do controle da temperatura nos transformadores pode ser prejudicial à máquina?
5. Quais as vantagens e desvantagens podemos ter com o monitoramento e o controle da temperatura dessas máquinas?

A opinião técnica dos profissionais que estão diretamente envolvidos com a proteção dos transformadores é importante para esclarecimento e melhorias aplicada às novas técnicas de proteção. No anexo 1 estão expostas as respostas dos profissionais.

6 – ANÁLISES DE DADOS

De acordo com os dados levantados, nota-se um avanço muito grande no grau de proteção térmica para transformadores, fato que se dá pela troca de sensores com tecnologia mais avançada. O IED possui inúmeras vantagens, como: diversos grupos de ajustes; comunicação remota; múltiplas funções de proteção e auxiliares; configuração via software e alta capacidade de processamento. Já, o dispositivo digital convencional que estava realizando a proteção do transformador não possui tantas vantagens como o IED.

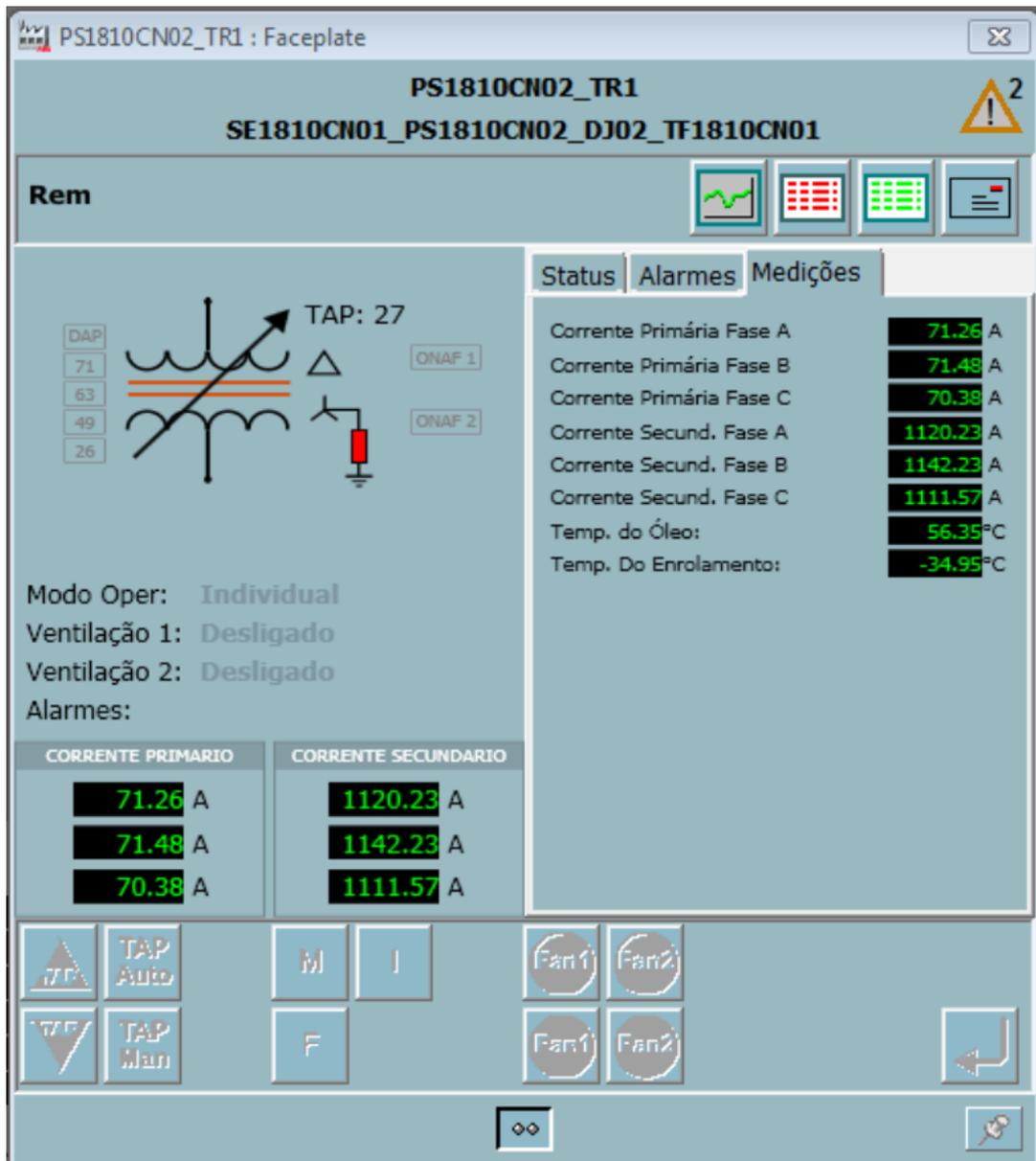
O IED SEL – 2414, proporciona um ganho de tempo através da comunicação remota via *software*, onde o operador não necessita ir em campo coletar os dados. Com o ganho do tempo melhora-se também a resposta de decisão do dispositivo para realização da proteção, acionando os ventiladores para refrigerar ou mesmo cortar cargas ligada ao transformador para evitar níveis alto de temperatura do óleo.

Os questionamentos feitos aos profissionais da área de manutenção, trazem uma visão prática da troca dos dispositivos de proteção térmica. Ambos os profissionais, Adilson Peixoto e Gilcimar Meireles, demonstram que as consequências das altas temperaturas geradas pelo alto carregamento de carga no transformador de potência causam a degradação do material isolante (papel) e a oxidação do óleo mineral. A degradação desses materiais pode gerar inumeradas falhas internas nos transformadores, tal como a perda do isolamento interno das bobinas, gerando pequenas descargas parciais entre as espiras. Esse fato gera a criação de gases no interior da máquina, alguns desses gases são inflamáveis, e ocorre o aumento da sua pressão interna da máquina.

A imagem termográfica demonstra que houve uma melhora considerável no nível de temperatura. Nota-se também que na análise pós troca da figura 22, o transformador está em uma temperatura abaixo dos 57°C. Isso é devido ao controle e monitoramento ser mais preciso, fazendo com que o acionamento dos ventiladores seja usado com mais frequência, permitindo o transformador trabalhar próximo ao nível de temperatura de 55°.

A instalação do IED concedeu diversos recursos para o monitoramento do transformador, possibilitando a criação de uma tela no supervisório de operação da subestação conforme a figura 25, onde são feitas todas as operações e monitoramentos remotos dos equipamentos, como disjuntores, seccionadora, e comandos para acionamento da ventilação forçada dos transformadores.

Figura 25 – Tela do Supervisório do Monitoramento e Controle do Transformador

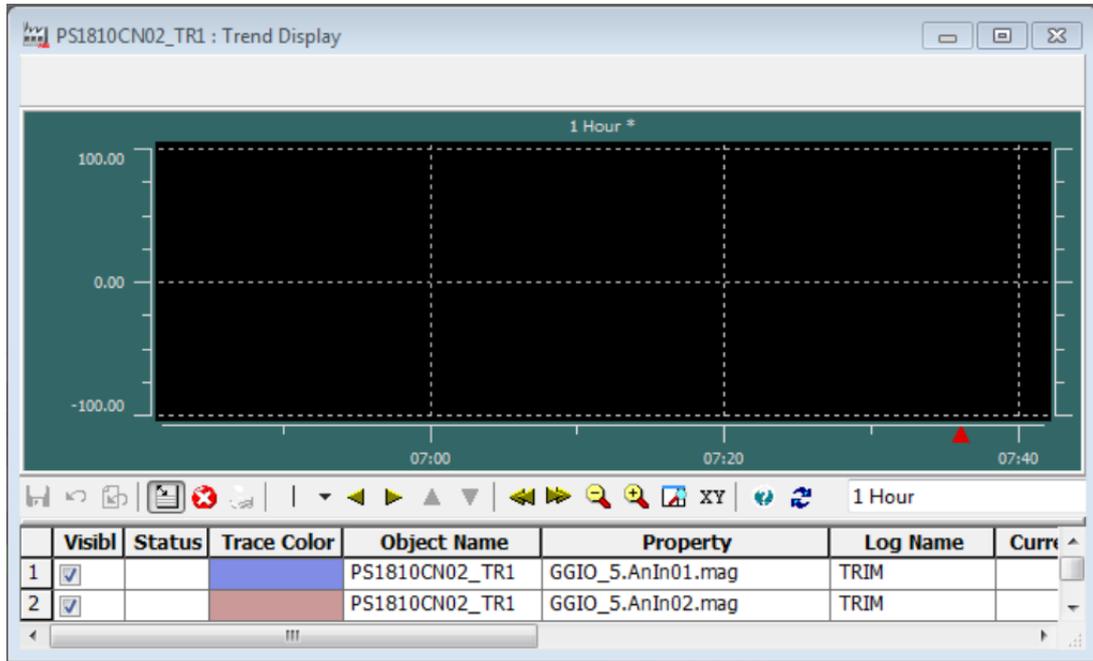


Fonte: Elaborada pelos próprios autores (2019)

O supervisório mostra todos os pontos que são monitorados e controlados pelo IED, como as correntes do transformador, lado primário e secundário, a sinalização das proteções em caso de atuações, o controle do TAP e registro de eventos gerados

no sistema. Já, a figura 26 mostra a tela de carregamento do transformador de acordo com a temperatura medida pelo IED, gerando um gráfico com os históricos de temperatura de acordo o período de funcionamento da máquina.

Figura 26 – Tela do Supervisor de Carregamento do Transformador



Fonte: Elaborada pelos próprios autores (2019)

7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a modernização da proteção térmica dos transformadores, é possível economizar em custos de manutenção e melhorar o controle do carregamento do transformador. A experiência mostrou a viabilidade de aplicar o controlador e monitorador IED em transformadores já existentes e em novos. Ajudou também a estabelecer as características mínimas que tais sistemas de controle e monitoramento de temperatura devem cumprir para manter o nível de confiabilidade.

Com o acesso remoto as informações do transformador, aumenta-se a segurança para os funcionários, com isso os empregados não ficam mais expostos ao risco ao coletar os dados.

Com a criação do supervísório é possível traçar um gráfico de temperatura e carregamento do transformador, possibilitando uma avaliação ao qual o transformador está submetido levando em conta sua temperatura em tempo real da sua operação. Desta forma, a partir dos dados obtidos pelo gráfico, pode-se estabelecer uma avaliação do tempo para manutenção e de sua vida útil.

Desta feita, a conclusão do trabalho realizado demonstra que os avanços das tecnologias dos sensores mostram que a proteção em tempo real é mais confiável e tem uma melhor resposta de decisão e economia para o processo.

Para trabalhos futuros, propõe-se estudar sobre a proteção para todos os setores do transformador de potência, tais como: relés de sobrecorrente, sobretensão e sobrecarga, no intuito de melhorar a confiabilidade e a agilidade nas tomadas de decisões.

REFERÊNCIAS

ABB. **Transformadores de Instrumento de Alta Tensão**. ABB, 2019. Disponível em: <<https://new.abb.com/high-voltage/instrument-transformers>> Acesso em: 01 mai. 2019.

ALVES, Mário Ferreira. **ABC DAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS. ISEP - Instituto Superior de Engenharia do Porto**, Departamento de Engenharia Eletrotécnica, mar. 2013. Disponível em: <www.academia.edu/download/33534289/ABC_ME.pdf>. Acesso em: 23 out. 2019.

BARBI, Ivo *et al.* Projeto físico de indutores e transformadores. **Inep - Instituto de Eletrônica de Potência**, Universidade Federal de Santa Catarina, mar. 2012. Disponível em: <professorpetry.com.br/Bases_Dados/Apostilas_Tutoriais/Apostila_Projeto_Fisico_De_Magneticos.pdf>. Acesso em: 28 out. 2019.

BARBOSA, Mateus et al. **Princípio de funcionamento dos transformadores elétricos**. Salvador, 2014. Disponível em: <<https://www.academia.edu/download/36094172/relatriotransformadores-140302074151-phpapp01.pdf>>. Acesso em: 8 nov. 2019.

BECHARA, Ricardo. **Análise de falhas de transformadores de potência**. Diss. Universidade de São Paulo, 2010. Disponível em: <[Dissertacao_Ricardo_Bechara.pdf](#)>. Acesso em: 16 nov. 2019.

FILHO, Joao Mamede; MAMEDE, Daniel Ribeiro. *Proteção de sistemas elétricos de potência*. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

JACOBOSKI, Angelo. **Autotransformador regulador de tensão monofásico**. 2018. Trabalho final de graduação (Engenheiro Eletricista). Curso de Engenharia Elétrica. Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, RS, 2018. Disponível em: <repositorio.upf.br/bitstream/riupf/1423/1/PF2018Angelo%20Jacoboski.pdf>. Acesso em: 27 out. 2019.

LIMA, Gustavo Sales de. **Análise da importância de controladores digitais na medição da temperatura do enrolamento em transformadores a óleo**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Disponível em: <<http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/6408>>. Acesso em: 8 nov. 2019.

LOPES, C. E. B. et al. **Modernização no Sistema de Monitoramento Térmico de um Transformador de Potência**. INOVA TEC, v. 1, 2017. Disponível em: <<http://revistaadmmade.estacio.br/index.php/inovatec/article/view/3859>>. Acesso em: 5 de nov. 2019.

MEIRELES, Denise. **Aplicabilidade de subestações compactas isoladas a gás em grandes centros urbanos: proposta de procedimento aplicado à expansão do sistema elétrico**. 2010. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010. Disponível em: <<https://www.ppgee.ufmg.br/defesas/47M.PDF>>. Acesso em: 27 out. 2019.

MORAES, Everton. **Trafo: Transformador Monofásico**. [S. l.], 31 jul. 2012. Disponível em: <<https://www.saladaeletrica.com.br/trafo-monofasico/>>. Acesso em: 5 jun. 2019.

OLIVEIRA, Camila. et al. *Guia para Configuração do SEL-2414 como Monitor Térmico, Relé 90 e Controle de Paralelismo*. SEL- Schweitzer Engineering Laboratories, Campinas/SP, 2019.

RODRIGUES, Guilherme Freitas. **Benefícios Da Utilização Da Norma IEC 61850 Em Sistemas De Automação De Subestações E Proteção De Sistemas Elétricos**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro (2013). Disponível em: <www.monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10007403.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2019.

ROSSI, Ronaldo. *Transformadores*. Subestações elétricas de MT/AT – Operação e Manutenção. Itajubá MG, 2019.

SALLES, Ronaldo de Oliveira. **Estudo sobre os Esquemas de Rejeição de Cargas para Sistemas Elétricos de Potência**. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012. Disponível em: <www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180500/tce-18042013-134808/publico/Salles_Ronaldo_de_Oliveira.pdf>. Acesso em: 15 de nov. 2019.

SANTOS, Arlane Marcos Dos. **Automação De Subestações**. Colegiado do Curso de Engenharia de Controle e Automação - Ceca, UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO, 2018. Disponível em: <<https://monografias.ufop.br/handle/35400000/1354>>. Acesso em: 28 out. 2019.

SEL. **SEL – 2414. Módulo para monitoramento e controle de transformadores de potência**. Schweitzer Engineering Laboratories, 2019. Disponível em: <<https://selinc.com/pt/products/2414/>>. Acesso em: 29 out. 2019.

SEL, Schweitzer Engineering Laboratories LTDA. **Monitoramento térmico de transformadores e o impacto na vida útil dos equipamentos.** Interface, SEL, ano 13, n. 42, p. 6 - 7, 31 maio 2018.

SOUZA, Denise Cascão Poli. **Falhas e defeitos ocorridos em transformadores de potência do sistema elétrico da Celg, nos últimos 28 anos: um estudo de caso.** Goiana GO, 2008. Disponível em: <<http://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tde/961>>. Acesso em: 8 nov. 2019.

TAKANO, Michele Ogawa. **Anteprojeto de um sistema digital de proteção e controle aplicado em uma subestação elétrica industrial.** 2011. 1 CD-ROM. Trabalho de conclusão de curso - (bacharelado - Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/121517>>. Acesso em: 27 out. 2019.

TOMAZELI, Rodrigo Antônio. **Eletrônica industrial – Transformadores.** 2016. Disponível em: <<https://www.slideshare.net/RodrigoAntonioTomaze/elettronica-industrial-transformadores>>. Acesso em: 31 mai. 2019.

TREETECH. **Monitores de temperatura para óleo e enrolamentos TM1/TM2.** Catalogo TM1 - TM2, Revisão 5.30, 2017. Disponível em: <www.treetech.com.br>. Acesso em: 11 nov. 2019.

UNIVERTEC. **Transformadores: Aspectos Construtivos dos Transformadores de Potência.** 2013. Disponível em: <http://univertecefetmg.blogspot.com/2013/11/toshiba-transformadores-aspectos_19.html>. Acesso em: 10 nov. 2019.

WEG. **Transformadores de Força.** Weg, 2019. Disponível em: <<http://www.emsmotores.com.br/produto/weg-energia/transformadores-de-forca>>. Acesso em: 01 mai. 2019.

WISE TRANSFORMADORES. **O que é um autotransformador e como funciona?** Wise Transformadores, 2019. Disponível em: <<https://www.wisetransformadores.com.br/blog/o-que-e-um-autotransformador-e-como-funciona>>. Acesso em: 10 out. 2019.

Anexo 1 – Questionário

Questionário			
Nº	Perguntas	Adilson Peixoto	Gilcimar Meireles
1	<p>Quais as consequências das altas temperaturas, geradas pelo alto nível de carga nos transformadores de potência?</p>	<p>Degradação acelerada de materiais internos, papéis isolantes etc. Redução de vida útil de trabalho.</p>	<p>O aquecimento é um acelerador de reação química. Dentro do transformador temos óleo, papel, cobre, ferro e água que com o aumento da temperatura reagem provocando a degradação do papel e oxidação do óleo mineral isolante impactando a vida útil do transformador, deixando-o mais susceptível a falhas.</p>
2	<p>Quais ganhos podemos adquirir com o monitoramento e o controle da temperatura nos transformadores de potência?</p>	<p>Como a temperatura está relacionada a carga aplicada, consideramos trabalhar com menor carga, ou seja, menores temperaturas, assim o monitorador e controlador estar contribuindo para vida longa do equipamento e evitando falhas precoces.</p>	<p>Através de um sistema de monitoramento em tempo real que forneça dados suficientemente confiáveis, é possível estimar o seu envelhecimento e sua vida útil remanescente ou, pelo menos, torna possível saber sob quais limites operativos o equipamento está submetido.</p>

3	<p>Qual a importância de se fazer o controle e monitoramento da temperatura dos transformadores de potência?</p>	<p>Importante controlar e monitorar a temperatura para evitar falhas que possam causar danos, paradas indesejadas e até incêndios.</p>	<p>Redução dos efeitos causados pelo sobreaquecimento como, por exemplo; diminuição da vida útil do isolamento devido ao aumento da temperatura do papel em contato com o óleo e o enrolamento; Evolução dos gases em função da carga e das correntes parasitas; possível atuação do dispositivo de alívio quando o óleo passa de 105 °C. Assim, a importância do acompanhamento das temperaturas no interior do transformador se refere, principalmente, ao grau de deterioração do isolante sólido (neste caso o papel).</p>
4	<p>A falta de um controle e monitoramento de temperatura nos transformadores pode ser prejudicial à máquina?</p>	<p>Sim, pois sem o conhecimento da temperatura do transformador será mais difícil antecipar falhas prematuras.</p>	<p>Sim. Pois o aquecimento é um dos principais agentes causadores de defeitos em máquinas elétricas.</p>

5	<p>Quais as vantagens e desvantagens que podemos ter com o monitoramento e o controle da temperatura dessas máquinas?</p>	<p>Como já informado os transformadores com exceção dos transformadores de distribuição, todos tem monitores para controle de temperatura, as vantagens são ter segurança em suas instalações contra incêndio e poder retirar o transformador caso inicie a ter problemas térmicos. Desvantagem não vejo nenhuma, já que o controle da temperatura realizado pelo os monitores trazem segurança para o equipamento, instalações e principalmente as pessoas.</p>	<p>Não vejo nada de negativo em ter controle e monitoramento da temperatura, pelo contrário. A falta de ambos pode incorrer na perda precoce do transformador.</p>
---	--	--	--

Fonte: Elaborada pelos próprios autores (2019)