

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

TONI CARLOS MENDONÇA DA CUNHA

**LEITOR ÓPTICO DA POSIÇÃO DE TAP DE COMUTADORES DE TAP
SOB CARGA**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA
2021

TONI CARLOS MENDONÇA DA CUNHA

**LEITOR ÓPTICO DA POSIÇÃO DE TAP DE COMUTADORES DE TAP
SOB CARGA**

Monografia de Especialização, apresentada ao Curso de Especialização em Automação Industrial, do Departamento Acadêmico de Eletrônica – DAELN, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista.

Orientadora: Profa. Dra. Simone Massulini Acosta

CURITIBA
2021



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Curitiba

Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Departamento Acadêmico de Eletrônica
Curso de Especialização em Automação Industrial



TERMO DE APROVAÇÃO

LEITOR ÓPTICO DA POSIÇÃO DE TAP DE COMUTADORES DE TAP SOB
CARGA

por

TONI CARLOS MENDONÇA DA CUNHA

Esta monografia foi apresentada em 01 de Dezembro de 2021 como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Automação Industrial. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Profa. Dra. Simone Massulini Acosta
Orientadora

Prof. Dr. Kleber Kendy Horikawa Nabas
Membro titular

Prof. M. Sc. Omero Francisco Bertol
Membro titular

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

RESUMO

CUNHA, Toni Carlos Mendonça da. **Leitor óptico da posição de TAP de comutadores de TAP sob carga**. 2021. 31 p. Monografia de Especialização em Automação Industrial, Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2021.

A comutação de TAP sob carga é muito importante para o controle da tensão de barras alimentadas por enrolamentos secundários de transformadores em subestações de energia sem a necessidade de desligamento de cargas. O monitoramento da posição do TAP de comutadores de TAP sob carga se torna imprescindível para o controle automático da tensão e o funcionamento correto do sistema de paralelismo de transformadores. Este monitoramento é feito por dispositivos eletrônicos inteligentes que normalmente recebem a informação da posição do comutador através de coroas resistivas. Com o passar do tempo, os contatos das coroas resistivas apresentam desgaste e demandam manutenção constante para evitar indicação incorreta da posição e bloqueio de sistemas de paralelismo e controle automático de tensão. Para minimizar manutenções e maximizar a confiabilidade dos sistemas automatizados a Copel Geração e Transmissão desenvolveu um leitor óptico que não utiliza contatos mecânicos, reduzindo em muito a necessidade de manutenção. Este trabalho demonstrou um ótimo resultado, no entanto sua instalação não é simples e os protótipos foram executados de forma a contemplar instalações específicas. Com o intuito de facilitar a instalação, contemplar variados dispositivos e dar mais confiabilidade ao projeto, foi desenvolvido uma nova versão de leitor óptico. Este trabalho apresenta a nova versão e expõe as divergências entre os projetos, com foco nas melhorias proporcionadas, na facilidade de instalação, esquemas elétricos utilizados e integração com os diversos controladores de TAP utilizados na empresa.

Palavras-chave: Subestação de energia. Transformador. TAP. Comutador.

ABSTRACT

CUNHA, Toni Carlos Mendonça da. **Optical reader of the TAP position of on-load TAP changer**. 2021. 31 p. Monografia de Especialização em Automação Industrial, Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2021.

On-load TAP changer load is very important for controlling the voltage of buses supplied by secondary coil windings of transformers in power substations without the need to disconnect loads. Monitoring the TAP position of TAP tap-changers under load becomes essential for automatic voltage control and the correct functioning of the transformer parallelism system. This monitoring is done by intelligent electronic devices that receive information about the tap changer position through resistive crowns. Over time, the contacts of resistive sprockets wear out and require constant maintenance to avoid incorrect indication of position and blocking of parallelism and automatic tension control systems. To minimize maintenance and maximize the reliability of automated systems, Copel applies an optical reader that does not use mechanical contacts, which is very maintenance-free. This work defined a great result, however its installation is not simple and the prototypes were executed in order to contemplate specific installations. In order to facilitate installation, contemplate different devices and give more confidence to the project, a new version of the optical reader was developed. This work presents a new version and exposes how divergences between the projects, focusing on the improvements provided, the ease of installation, electrical diagrams used and integration with the various TAP drivers used in the company.

Keywords: Power substation. Transformer. TAP. Switch.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Ilustração da coroa resistiva.....	22
Figura 2 - Diagrama de saída resistiva do leitor de TAP.....	22
Figura 3 - Características do sensor óptico reflexivo C9L3.....	24
Figura 4 - Ilustração do cilindro.....	24
Figura 5 - Codificação para comutador de 33 TAPs.....	25
Figura 6 - Circuito de acionamento dos relés.....	27
Fotografia 1 - Transformador WEG.....	14
Fotografia 2 - Comutador de TAP sob carga.....	16
Fotografia 3 - Primeiro projeto do leitor óptico de posição de TAP.....	19
Fotografia 4 - Módulos de leitura da posição de TAP.....	20
Fotografia 5 - Leitor óptico de posição de TAP instalado em campo.....	21
Fotografia 6 - Módulo dos sensores.....	27
Fotografia 7 - Módulo dos relés.....	28
Fotografia 8 - Leitor óptico de posição de TAP saída em BCD.....	28
Quadro 1 - Resistências em função do estado dos relés.....	23

LISTA DE SIGLAS

BCD	Binário convertido em decimal (do inglês <i>Binary Coded Decimal</i>)
CAT	Controle Automático de Tensão
CDC	Comutador de Derivação em Carga
COGT	Centro de Operação da Geração e Transmissão
IED	Dispositivos eletrônicos inteligentes (do inglês <i>Intelligent Electronic Device</i>)
LED	Diodos emissor de luz (do inglês <i>Light Emitting Diode</i>)
OLTC	Comutador de TAP sob carga (do inglês <i>On Load TAP Changer</i>)
PWM	Modulação de largura de pulso (do inglês <i>Pulse Width Modulation</i>)
SE	Subestação

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	10
1.2 PROBLEMA	11
1.3 OBJETIVOS	11
1.3.1 Objetivo Geral	11
1.3.2 Objetivos Específicos	11
1.4 JUSTIFICATIVA	12
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO	12
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1 TRANSFORMADOR	13
2.2 COMUTADOR DE TAP SOB CARGA	16
2.3 AUTOMAÇÃO	17
2.4 PARALELISMO DE TRANSFORMADORES	17
3 DESENVOLVIMENTO	19
3.1 PRIMEIRO PROJETO DO LEITOR ÓPTICO DE POSIÇÃO DE TAP	19
3.2 PROJETO ATUAL DO LEITOR ÓPTICO DE POSIÇÃO DE TAP	20
4 CONCLUSÃO	29
REFERÊNCIAS	30

1 INTRODUÇÃO

A potência elétrica é função direta da corrente e tensão. Para transmissão de grandes quantidades de energia, é necessário elevar-se a tensão para reduzir a corrente e assim minimizar as perdas no sistema de transmissão. O equipamento que tem a função de adaptar esta tensão é o transformador.

O transformador é o maior, mais dispendioso e importante equipamento em uma subestação de transmissão. Como a carga do sistema é dinâmica, muitos transformadores da transmissão possuem um dispositivo que adiciona bobinas em um dos enrolamentos. A adição de bobinas altera a relação de transformação para adequar o fluxo de potência e as tensões envolvidas sem que seja necessário o desligamento do sistema. Este dispositivo é o comutador de TAP sob carga (do inglês *On Load TAP Changer*, OLTC). A espira adicionada pode estar em fase ou defasada de cento e oitenta graus permitindo que uma mesma espira possa aumentar ou diminuir a tensão.

Para manter os níveis de tensão dentro de parâmetros favoráveis à operação do sistema é necessário fazer a comutação dos TAPs, que pode ser feita de forma manual ou automática. Nas subestações da transmissão da Companhia Paranaense de Energia (Copel) existem controles automáticos de tensão (CAT) que podem rodar tanto no centro de comando (COGT), quanto na subestação (SE).

A maioria das SEs possui mais de um transformador trabalhando em paralelo, tanto para garantir a capacidade de suprir a carga como para dar confiabilidade em caso de desligamento de um transformador. Conforme Tretech (2016, p.17), normalmente os transformadores operados em paralelo possuem igual número de posições de derivação, com correspondência direta entre os diversos Comutadores de Derivação em Carga (CDCs), ou seja, os CDCs devem operar em posições numericamente iguais para que se obtenha o mínimo de corrente de circulação.

Para viabilizar a utilização de transformadores em paralelo são usados dispositivos eletrônicos inteligentes (do inglês *Intelligent Electronic Device*, IED), equipamentos com microcontroladores que rodam algoritmos baseados no método de troca de dados denominado de mestre-escravo. Estes IEDs podem receber a informação de posição de TAP através de entrada analógica (4 a 20 mA ou resistiva)

ou digital, geralmente no formato binário convertido em decimal (do inglês *Binary Coded Decimal*, BCD).

Os IEDs mais utilizados na Copel Transmissão recebem a informação de posição de TAP através de entrada resistiva, pois os dispositivos de acionamento de TAP são dotados de uma coroa resistiva. Em algumas instalações estes mecanismos possuem um transdutor que recebe como entrada a resistência da coroa e disponibiliza uma saída de 4 a 20 mA.

Embora essa coroa resistiva tenha sido uma solução que funcionou por muito tempo, o desgaste de seus contatos, aliados a poeira, fuligem e oxidação geram mau contato ocasionando erros de leitura de TAP e tornando indisponível o sistema de paralelismo. Este problema trouxe como consequência um elevado número de intervenções das equipes de manutenção para limpeza dos contatos, acarretando gastos adicionais à manutenção. Para corrigir este problema, uma equipe da engenharia de manutenção de SE da Copel Transmissão desenvolveu um leitor de TAP que não utiliza contatos mecânicos, mas pares de diodos e foto transistores.

O projeto foi denominado leitor óptico de posição de TAP e foi desenvolvido inicialmente para um transformador com controle de TAP feito por um IED modelo SPS-I da Treetech. Baseado em microcontroladores, o IED modelo SPS/SPS-I incorpora as funções dos diversos equipamentos que eram utilizados no passado para o controle de paralelismo de transformadores, tais como chaves seletoras do tipo mestre/comandado/individual, manual/automático e local/remoto, indicadores de posição de TAP, relés auxiliares para lógica eletromecânica, dentre outros (TREETECH, 2016, p. 16).

O modelo supervisor de paralelismo SPS-I funciona com uma entrada de 4 a 20 mA e o leitor de TAP foi concebido com uma saída compatível. O leitor possui um disco perfurado com seis bits e duas placas de circuito impresso, uma em cima e outra embaixo do mesmo, com diodos emissores de luz (do inglês *Light Emitting Diode*, LED) e fototransistores, que fazem a leitura do código e são ligados às seis entradas digitais de um microcontrolador ATmega328P, que junto com outros componentes eletrônicos ficam alojados em uma terceira placa.

O microcontrolador, por sua vez, gera um sinal com modulação de largura de pulso (do inglês *Pulse Width Modulation*, PWM) que varia em função da posição do TAP. Esse sinal é convertido em tensão variando de 1 a 4,9 V, que é aplicada a uma fonte de corrente de 4 a 20 mA.

Os protótipos desenvolvidos demonstraram funcionar perfeitamente, sendo inclusive instalados em campo. A proposta inicial deste trabalho foi dar continuidade ao seu desenvolvimento. Porém, o produto era confeccionado de forma artesanal e de difícil instalação, com um desenvolvimento bastante complexo, possuindo vários módulos e um microcontrolador que algumas vezes travava no campo devido a surtos eletromagnéticos, comuns em ambiente de subestação de energia. O leitor óptico de posição de TAP possui uma fenda para passagem do disco que permite entrada de sujeira e até pequenos animais, ocasionando falha na leitura. Importante apontar ainda que cada leitor era desenvolvido para um projeto específico que estivesse com problema.

Com o objetivo de simplificar o projeto, facilitar a instalação, evitar a exposição dos módulos e tentar que um único equipamento contemplasse a maioria dos projetos de transformadores das subestações da Copel Transmissão foi desenvolvido um novo leitor óptico da posição de TAP de comutadores de TAP sob carga, que é o objeto deste trabalho.

A concepção do leitor óptico foi modificada por completo, alterando a forma de aquisição de disco perfurado por sensor reflexivo, utilizando circuitos eletrônicos discretos e simples, evitando uso de alta frequência e disponibilizando três tipos de saída (4 a 20 mA, resistiva e BCD). Tudo isso utilizando apenas duas placas, um módulo com os sensores e outro com relés e uma etapa de fonte.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Diversos transformadores da Copel Transmissão possuem muitos anos de funcionamento e são dotados de um mecanismo de comutação de TAP com acionamento automático por controle de tensão, o que faz com que o sistema faça alterações de comutação várias vezes por dia. Essas comutações, aliadas as condições de funcionamento destes equipamentos (ambiente de subestação, poeira) desgastam os contatos das coroas resistivas indicadoras da posição do TAP. Este desgaste acarreta mau contato e conseqüente erro na leitura da posição, impedindo que os sistemas de paralelismo e controle automático funcionem, demandando atuação das equipes de eletromecânica e aumentando os gastos com a manutenção.

1.2 PROBLEMA

Como o problema está diretamente ligado ao desgaste dos equipamentos, a manutenção corretiva não resulta em um resultado duradouro. A substituição das coroas tem um custo bastante alto e demanda um tempo elevado de aquisição pois não são fabricadas no Brasil. Para contornar o problema, a engenharia de manutenção de subestações desenvolveu um leitor de posição independente da coroa resistiva.

O projeto se mostrou eficiente, porém relativamente complexo, fazendo uso de microcontrolador, fonte de corrente externa, duas alimentações (24 Vcc e 5 Vcc) contemplando apenas saída em corrente (4 a 20 mA), não atendendo a utilização de supervisores de paralelismo com sensores de resistência e código BCD.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver um leitor óptico de posição de TAP para instalação nas subestações de transmissão em substituição ao equipamento desenvolvido anteriormente por colaboradores da empresa.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver um circuito de saída único, que possa ser configurado por *jumpers* para atender aos diversos supervisores de paralelismo que encontram-se nas subestações da transmissão.
- Desenvolver um circuito óptico para determinar a posição do TAP, de forma que este possa ser instalado em um gabinete fechado, protegendo os sensores do meio ambiente, evitando que poeira e/ou pequenos animais possam ocasionar mal funcionamento, minimizando a necessidade de manutenção.
- Projetar os módulos e o gabinete do equipamento.

1.4 JUSTIFICATIVA

A complexidade de replicar o projeto inicial, a dificuldade de instalação, a necessidade de implantação em vários transformadores dotados de supervisores de paralelismo com entrada em resistência e código BCD, ocorrência de paralisação do processamento do microcontrolador por surtos eletromagnéticos, erros de leitura ocasionados por insetos obstruindo o disco e a necessidade de simplificar e reduzir os custos do produto levaram o autor a desenvolver um projeto diferenciado, alterando a forma de aquisição da posição do TAP, o conceito de saída da informação, o invólucro e a fixação do mesmo.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta monografia de especialização está dividida em quatro capítulos. No Capítulo 1 foi apresentado o tema do trabalho, foram abordados a motivação, os objetivos geral e específicos da pesquisa e a justificativa.

No Capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica sobre o transformador e o comutador de TAP sob carga (OLTC).

A seguir, no Capítulo 3 são analisadas as dissimetrias entre os projetos e é explanado todo o processo de concepção do projeto.

Por último, no Capítulo 4 são retomadas a pergunta de pesquisa e os objetivos e apontado como foram solucionados por meio do trabalho realizado. Além disto, são sugeridas propostas de atualização do trabalho que podem ser efetivadas a partir do estudo apresentado.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 TRANSFORMADOR

Todo sistema de potência é constituído de três diferentes segmentos: geração, transmissão e distribuição. Para que a energia gerada no primeiro segmento chegue ao seu destino final, que é o consumidor que está ligado no sistema de distribuição, é necessário também que exista em cada um desses segmentos uma subestação que possa elevar e reduzir a tensão em diferentes níveis. Assim, as usinas elétricas, sejam elas hidráulicas, térmicas, eólicas ou fotovoltaicas, geram energia em baixos níveis de tensão. As usinas hidráulicas e térmicas normalmente geram em tensões que variam entre 6 kV e 25 kV. Já as usinas eólicas geram em tensões que variam entre 600 V e 800 V, para turbinas de pequeno e médio portes, e 12 kV para turbinas de grande porte, enquanto nas usinas fotovoltaicas o nível de tensão de geração é da ordem de 320 V a 1000 V. É fácil compreender que um grande bloco de energia gerada em tensões tão baixas não pode ser transportado por dezenas a várias centenas de quilômetros aos pontos de consumo (MAMEDE FILHO, 2021).

Logo, a energia gerada nesses níveis de tensão alimenta inicialmente um transformador que tem a função de elevar a tensão de geração para níveis compatíveis com o valor do bloco de energia gerada e com a distância a ser percorrida através de um sistema de transmissão. Como os equipamentos de consumo são fabricados, por motivos econômicos e de segurança, com baixos níveis de tensão, agora é necessário que a tensão do bloco de carga transportada seja reduzida a níveis compatíveis com os equipamentos consumidores, normalmente, variando entre 220 V e 440 V, entre fases (MAMEDE FILHO, 2021).

Certamente, o atual desenvolvimento dos sistemas elétricos de potência não teria sido possível sem os transformadores. Por motivos técnicos e econômicos, entre a geração da energia elétrica e os centros de consumo, essa energia é transferida em vários níveis de tensão, níveis esses ditados por um conjunto de fatores que resumidamente, busca um mínimo custo aliado à segurança e à eficácia (JORDÃO, 2002).

Os transformadores com potência acima de 50.000 kVA são responsáveis pela adequação de tensão entre várias partes do circuito em sistemas de grande

capacidade de potência, possibilitando a transmissão de energia elétrica em médias e grandes distâncias da forma mais econômica possível. A Fotografia 1 mostra o maior transformador de potência fabricado pela WEG (WEG, 2021a).

Fotografia 1 - Transformador WEG



Fonte: Weg (2021a).

Sua aplicação mais característica está nas concessionárias de energia, onde são responsáveis pela interligação dos sistemas de geração e transmissão de energia com os sistemas locais de distribuição. Porém, podem ser utilizados também em subestações de indústrias de grande porte (WEG, 2021b).

Um transformador de potência é constituído de ao menos um enrolamento que recebe alimentação da rede alternada, denominado de enrolamento primário, e de um enrolamento isolado eletricamente do primeiro, mas acoplado magneticamente a ele, ao qual é ligado à carga (SANTOS, 2012).

Os transformadores a serem utilizados em sistemas de potência devem ser projetados e construídos de modo a aliar um custo aceitável com:

a) boa Regulação de Tensão, o que implica em obtê-los com reduzidas quedas de tensão. Isto se consegue, principalmente, pela intensificação do acoplamento magnético entre seus enrolamentos primários e secundários, com vistas à redução de fluxos dispersos e correspondentes quedas reativas. Essa

intensificação é obtida com o emprego de núcleos ferromagnéticos altamente permeáveis, em alguns casos com grãos orientados. A par dessas características dos núcleos, procura-se a maior proximidade possível entre os enrolamentos a serem acoplados;

b) altos Rendimentos, o que implica em baixas perdas de energia, tanto no cobre como no ferro. Reduções nessas perdas são obtidas limitando-se as solicitações desses materiais a níveis compatíveis com seus custos, e procurando melhorar suas propriedades. Quanto ao rendimento, é de se salientar que o transformador é um dos dispositivos que pode operar com os mais altos rendimentos, não raro acima de 99,5%;

c) baixas correntes e baixas perdas quando operando em vazio, propriedades estas que resultam de algumas das anteriores. Baixas correntes em vazio são obtidas com altas indutâncias de magnetização, características dos núcleos altamente permeáveis; menores perdas em vazio significam, principalmente, menores perdas no ferro visto que, sob essa condição de trabalho, geralmente as perdas no cobre são insignificantes (JORDÃO, 2002).

Transformadores tem como principal objetivo a transferência de energia através de um fluxo magnético comum a dois enrolamentos. O transformador é composto por um núcleo ferromagnético e duas bobinas condutoras enroladas a ele, o primário, que possui tensão aplicada em seus terminais, e o secundário, que terá tensão induzida nos seus terminais. A aplicação de tensão variante no tempo no primário, gera um fluxo magnético variante no tempo. O fluxo magnético, por sua vez, passa pelo secundário que terá tensão induzida. A tensão induzida no secundário vai variar de acordo com a relação de espiras entre o primário e secundário (MALAFAIA, 2017).

Nas subestações de transmissão da Copel Geração e Transmissão (G&T) estão instalados inúmeros modelos de transformadores dos mais diversos fabricantes. O ponto em comum destes transformadores é que a grande maioria possui um comutador de TAP sob carga.

2.2 COMUTADOR DE TAP SOB CARGA

O comutador de TAP sob carga é um dispositivo para mudança das ligações das derivações de um enrolamento, adequado para operação energizada. Consiste de uma chave comutadora, um inversor de transição e um seletor de derivações, este último provido ou não de um pré-seletor sendo o conjunto operado pelo mecanismo de acionamento (ROSA FILHO, 2005).

Fotografia 2 - Comutador de TAP sob carga



Fonte: Abb (2018).

De acordo com Rosa Filho (2005), os comutadores de derivação em carga são dispositivos muito importantes para a operação adequada de sistemas elétricos e processos industriais. Eles permitem a troca de relação de operação de um transformador, para controle da tensão, sem necessidade de desligamento do mesmo.

O OLTC tem a função de modificar a relação de transformação, adicionando ou subtraindo as espiras do enrolamento de regulação, mantendo inalteradas as condições da carga (STELMACH, 2019). A Fotografia 2 mostra um comutador de TAP sob carga da marca ABB (ABB, 2018).

O comutador de TAP sob carga é um equipamento de primeiro nível na automação e controle da subestação.

2.3 AUTOMAÇÃO

Quando programamos um micro-ondas para cinco minutos e pressionamos o botão de início, esperamos que, passado esse tempo, ele se desligue sozinho. Esse processo é automático, ou seja, acontece sem a intervenção humana. Quando entramos em um elevador e selecionamos o andar desejado no painel, presumimos que ele pare automaticamente naquele andar. A temperatura interna de uma geladeira é mantida relativamente constante por um sistema de controle automático, que liga ou desliga o compressor, conforme necessário (CAMARGO, 2014).

Automação é: executar as ações necessárias para que um equipamento, uma máquina, um processo ou um sistema funcione de maneira autônoma ou com o mínimo de intervenção humana (CAMARGO, 2014).

2.4 PARALELISMO DE TRANSFORMADORES

Diversas razões podem levar à opção de operação em paralelo de transformadores de potência, como por exemplo, a necessidade de aumento da potência de carga, o aumento da confiabilidade no fornecimento de energia elétrica, dentre outros.

Para que a operação paralela seja possível, uma das principais preocupações deve ser evitar a ocorrência de correntes de circulação entre os enrolamentos em paralelo, o que ocorre, por exemplo, se estes tiverem tensões diferentes. Em

transformadores com relação de transformação fixa, esta preocupação se limita à fase de projeto do empreendimento, que uma vez corretamente executado garante a perfeita operação dos equipamentos.

O mesmo não ocorre em transformadores equipados com Comutador de Derivações em Carga (CDC), uma vez que estes podem modificar sua relação de transformação livremente durante a operação. Assim, deve haver a preocupação durante a fase de projeto de que haja correspondência entre as derivações de um e outro transformador, porém deve haver também o cuidado de que, uma vez em operação, os CDCs dos transformadores em paralelo estejam em posições de TAP equivalentes, de tal forma que a corrente de circulação seja próxima de zero (TREETECH, 2016).

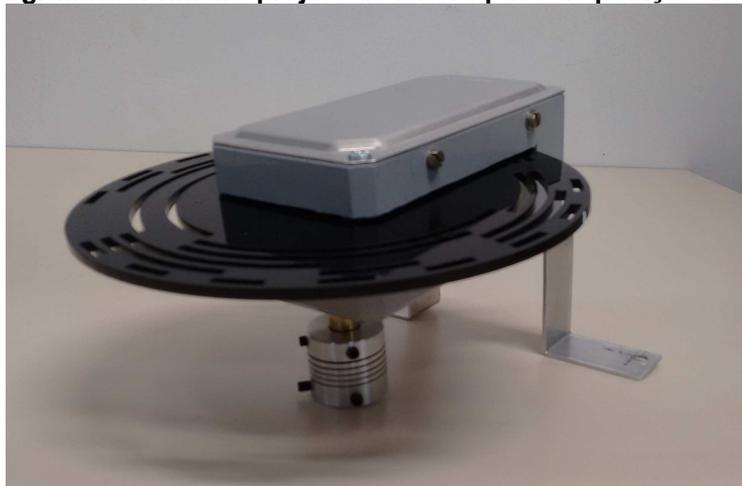
3 DESENVOLVIMENTO

3.1 PRIMEIRO PROJETO DO LEITOR ÓPTICO DE POSIÇÃO DE TAP

O projeto inicial foi desenvolvido e protótipos foram instalados nas subestações de Umbará, Maringá e Jaguariaíva. Todos apresentaram algum tipo de falha e os de Maringá e Umbará foram substituídos pela nova versão do dispositivo desenvolvido. Algumas falhas estão relacionadas a paralisação do processamento do microcontrolador devido ao campo eletromagnético resultante da abertura ou fechamento de chaves de alta tensão, dois discos quebraram devido ao seu peso e a proximidade de algumas ranhuras e, também, ocorreu erro de leitura devido a intrusão de inseto no leitor óptico.

Na Fotografia 3 é apresentado o primeiro modelo do leitor óptico de posição de TAP. O dispositivo foi projetado com dois pontos de apoio e um ponto de fixação no eixo da coroa resistiva. Internamente o dispositivo não possui apoio no eixo de rotação, dificultando a instalação em campo. O disco codificado é grande e possui pontos frágeis que quebram com facilidade e também fica exposto, permitindo a entrada de poeira e pequenos animais como aranhas.

Fotografia 3 - Primeiro projeto do leitor óptico de posição de TAP

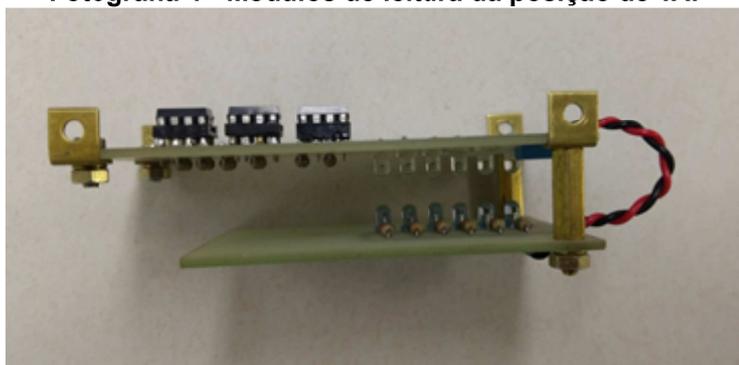


Fonte: Autoria própria.

A Fotografia 4 apresenta os módulos de leitura da posição, onde tem-se duas placas, uma com seis LEDs e outra com seis fototransistores. Os fototransistores são ligados a entradas de um microcontrolador ATmega328P. As entradas digitais produzem um sinal modulado em PWM na saída do microcontrolador, sendo que

este sinal é isolado por opto-acoplador e, depois de filtrado, produz uma tensão que varia de 1 a 4,9 Vcc conforme a posição do TAP. A utilização de um microcontrolador exigiu uma proteção contra interferência eletromagnética pois surtos são comuns em instalações de subestação de transmissão de energia. Mesmo com as proteções, ocorreram alguns eventos que travaram o processamento sendo necessário fazer um *reset* no microcontrolador.

Fotografia 4 - Módulos de leitura da posição de TAP



Fonte: Autoria própria.

O projeto inicial foi desenvolvido por colaboradores que deixaram a empresa e o autor deste trabalho foi designado para dar continuidade ao projeto. A intenção inicial era reproduzir o dispositivo e instalar em outras instalações que já apresentavam problemas de desgaste da coroa resistiva. Porém, o próximo leitor a ser instalado deveria possuir saída em resistência e o projeto inicial não contemplava esta opção.

A primeira alteração de projeto seria introduzir uma saída resistiva mas outras oportunidades de melhoria foram percebidas e foi desenvolvido um novo projeto, completamente diferente do primeiro.

3.2 PROJETO ATUAL DO LEITOR ÓPTICO DE POSIÇÃO DE TAP

A primeira exigência para dar continuidade ao projeto do leitor óptico de posição de TAP foi disponibilizar uma saída em resistência que pudesse simular o comportamento da coroa resistiva.

A Fotografia 5 apresenta o projeto atual do leitor óptico de posição de TAP instalado na SE SMC em agosto de 2021.

Fotografia 5 - Leitor óptico de posição de TAP instalado em campo

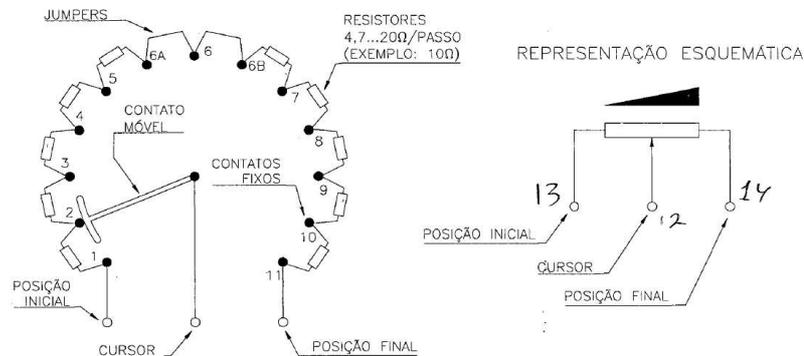


Fonte: Autoria própria.

A Figura 1 representa a coroa resistiva e foi obtida do manual técnico de um supervisor de paralelismo SPS da Treotech que possui entrada em resistência para ilustrar como o supervisor de paralelismo faz a aquisição da posição do comutador de TAP. Este equipamento possui resistores em série e um cursor com um contato móvel que faz variar a resistência entre o CURSOR e os pontos denominados POSIÇÃO INICIAL e POSIÇÃO FINAL de acordo com a posição do comutador (TREETECH, 2016).

A solução encontrada para a saída em resistência foi utilizar duas filas de resistores em série com valor total de 320Ω entre o CURSOR e os pontos de POSIÇÃO INICIAL e POSIÇÃO FINAL, onde os contatos dos relés RL1 a RL6 curto circuitam as resistências de forma que o somatório é equivalente a resistência da coroa para a posição de TAP selecionada.

Figura 1 - Ilustração da coroa resistiva

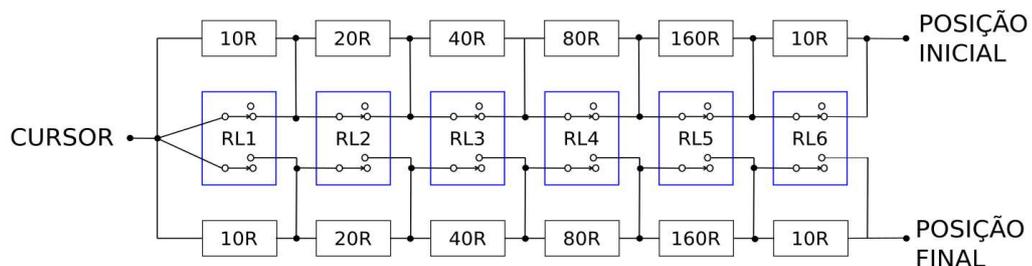


Fonte: Treetech (2016).

A Figura 2 apresenta o circuito de saída em resistência, onde todos os relés encontram-se desenergizados. Isto corresponde a posição de TAP 1 em que a resistência entre CURSOR e POSIÇÃO INICIAL é igual a 0Ω e entre CURSOR e POSIÇÃO FINAL é igual a 320Ω .

Com o relé RL1 energizado e os relés RL2, RL3, RL4, RL5 e RL6 desenergizados, a resistência entre CURSOR e POSIÇÃO INICIAL é igual a 10Ω e entre CURSOR e POSIÇÃO FINAL é igual a 310Ω , totalizando 320Ω .

Figura 2 - Diagrama de saída resistiva do leitor de TAP



Fonte: Autoria própria.

A resistência total entre os pontos de POSIÇÃO INICIAL e POSIÇÃO FINAL sempre deve totalizar 320Ω . Se a soma das resistências nas duas linhas for diferente deste valor, o supervisor de paralelismo reporta erro.

O Quadro 1 apresenta os valores das resistências entre o CURSOR e os pontos POSIÇÃO INICIAL e POSIÇÃO FINAL esperadas para cada uma das 33 posições de TAP da Figura 2. Nas colunas RL1 até RL6, o número zero (0) representa o relé em estado de repouso e o número um (1) representa o relé atuado.

Quadro 1 - Resistências em função do estado dos relés

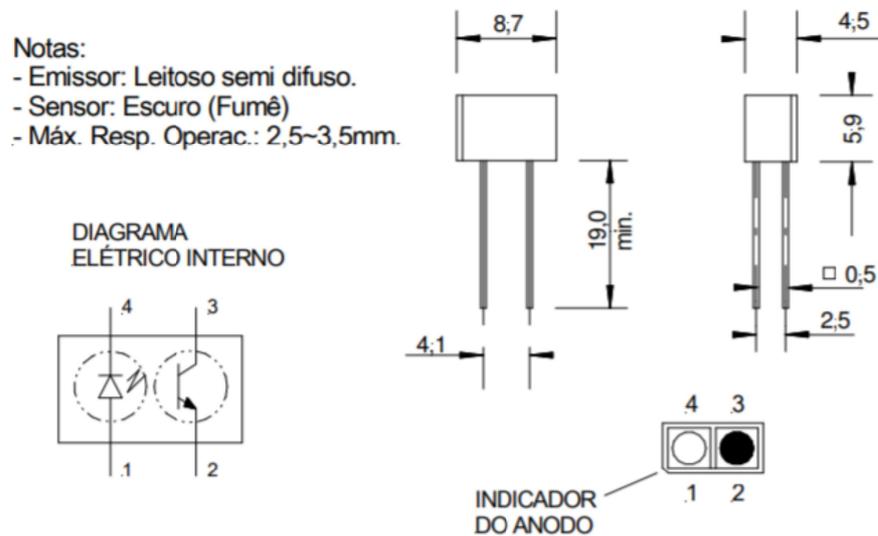
TAP	RL1	RL2	RL3	RL4	RL5	RL6	RESISTÊNCIA CURSOR	
							POSIÇÃO INICIAL	POSIÇÃO FINAL
1	0	0	0	0	0	0	0	320
2	1	0	0	0	0	0	10	310
3	0	1	0	0	0	0	20	300
4	1	1	0	0	0	0	30	290
5	0	0	1	0	0	0	40	280
6	1	0	1	0	0	0	50	270
7	0	1	1	0	0	0	60	260
8	1	1	1	0	0	0	70	250
9	0	0	0	1	0	0	80	240
10	1	0	0	1	0	0	90	230
11	0	1	0	1	0	0	100	220
12	1	1	0	1	0	0	110	210
13	0	0	1	1	0	0	120	200
14	1	0	1	1	0	0	130	190
15	0	1	1	1	0	0	140	180
16	1	1	1	1	0	0	150	170
17	0	0	0	0	1	0	160	160
18	1	0	0	0	1	0	170	150
19	0	1	0	0	1	0	180	140
20	1	1	0	0	1	0	190	130
21	0	0	1	0	1	0	200	120
22	1	0	1	0	1	0	210	110
23	0	1	1	0	1	0	220	100
24	1	1	1	0	1	0	230	90
25	0	0	0	1	1	0	240	80
26	1	0	0	1	1	0	250	70
27	0	1	0	1	1	0	260	60
28	1	1	0	1	1	0	270	50
29	0	0	1	1	1	0	280	40
30	1	0	1	1	1	0	290	30
31	0	1	1	1	1	0	300	20
32	1	1	1	1	1	0	310	10
33	1	1	1	1	1	1	320	0

Fonte: Autoria própria.

Para resolver o problema relativo a fragilidade e ao tamanho do disco utilizado com a codificação, foram substituídos o par LED e fototransistor por um sensor óptico reflexivo e o disco vazado foi substituído por um cilindro codificado. Alguns modelos de sensores reflexivos foram testados e foi selecionado o modelo C9L3 da empresa Cromatek (CROMATEK, 2021).

O sensor óptico reflexivo C9L3, Figura 3, é um dispositivo que consiste de um diodo emissor infravermelho angularmente posicionado contra um fototransistor (NPN) de silício, espectralmente compatíveis, encapsulados em um suporte de termoplástico resistente à temperatura (CROMATEK, 2021).

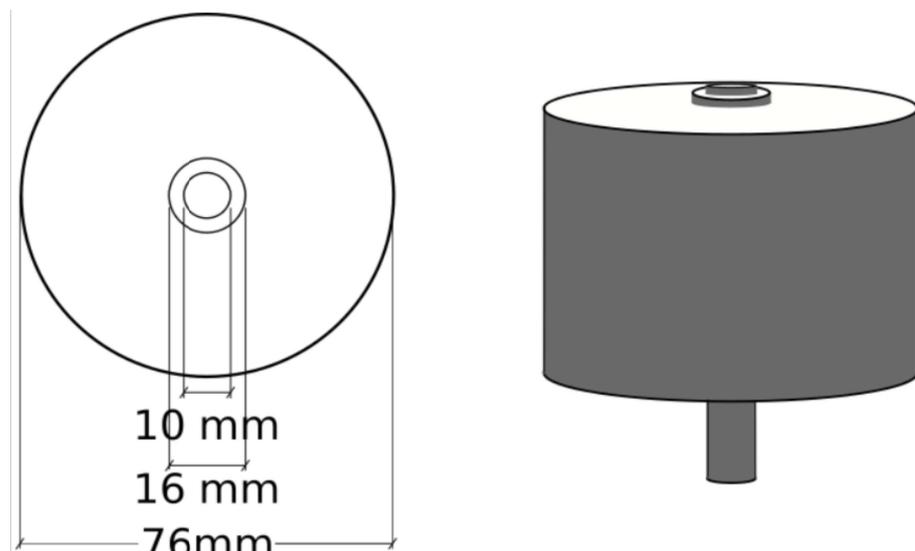
Figura 3 - Características do sensor óptico reflexivo C9L3



Fonte: Cromatek (2021).

A Figura 4 ilustra o cilindro, sendo que o material utilizado é o nylon. Neste cilindro é aplicada uma etiqueta com uma codificação composta de seis bits, onde cada bit representa o estado do relé correspondente.

Figura 4 - Ilustração do cilindro



Fonte: Autoria própria.

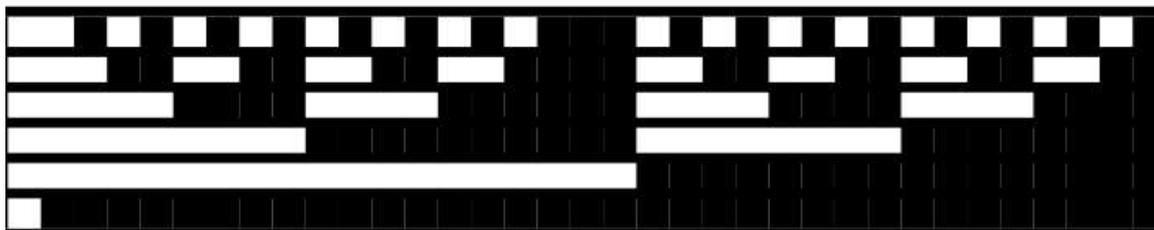
Quando a luz do LED do sensor encontra uma superfície clara da etiqueta, esta luz é refletida em direção de seu respectivo fototransistor, fazendo com que este conduza e acione o relé correspondente. De modo análogo, as partes escuras da etiqueta, absorvem a luz do LED fazendo com que seu fototransistor não

conduza e o respectivo relé permaneça em repouso. A etiqueta contendo a codificação pode ser impressa na própria empresa, podendo-se imprimir codificação específica para diferentes tipos de comutadores de TAP.

Alguns modelos de codificação foram desenvolvidos de acordo com a utilização, podendo ser para saída em resistência, saída em corrente ou em código BCD. Também pode ser necessário alterar a codificação de acordo com a rotação do mecanismo de acionamento, pois alguns mecanismos aumentam o TAP girando em sentido horário e outros em sentido anti-horário.

A Figura 5 apresenta o modelo de etiqueta desenhada para o modelo de comutador mais comum em transformadores mais antigos, os que apresentam desgastes na coroa resistiva. Este modelo possui 33 posições de TAP com inversão de fase no TAP central. Esta codificação pode ser utilizada tanto para saída em resistência como para saída em corrente, bastando espelhar o desenho. A posição de número 1 está à direita onde todos os bits são escuros, já no lado esquerdo todos os bits são brancos, acionando todas as saídas.

Figura 5 - Codificação para comutador de 33 TAPs



Fonte: Autoria própria.

Os relés escolhidos para o projeto possuem bobinas com alimentação em 12 Vcc, sendo esta a única fonte de tensão utilizada no projeto. Com fonte de alimentação em 12 Vcc é possível alimentar os LEDs em série, garantindo corrente igual e equilíbrio do brilho dos LEDs. Um regulador de tensão e um *trimpot* foram inseridos para ajustar a corrente, permitindo um ajuste para utilização com diferenças de opacidade do papel utilizado na etiqueta.

O próximo passo foi adaptar um driver para fornecer corrente suficiente para a energização das bobinas dos relés a partir do sinal emitido pelo fototransistor. Este driver foi composto de um amplificador operacional e um transistor BC547 para cada relé. A luz do LED refletida pela etiqueta faz com que o respectivo fototransistor conduza e alimente a entrada positiva do amplificador operacional. Com a tensão na

entrada positiva maior que a tensão de referência, que pode ser ajustada, a saída do amplificador operacional excita um transistor que alimenta a bobina do respectivo relé.

O modelo de amplificador operacional utilizado foi o LM358 que contém dois amplificadores operacionais por invólucro. A Figura 6 apresenta o diagrama esquemático do driver com os respectivos sensores ópticos reflexivos.

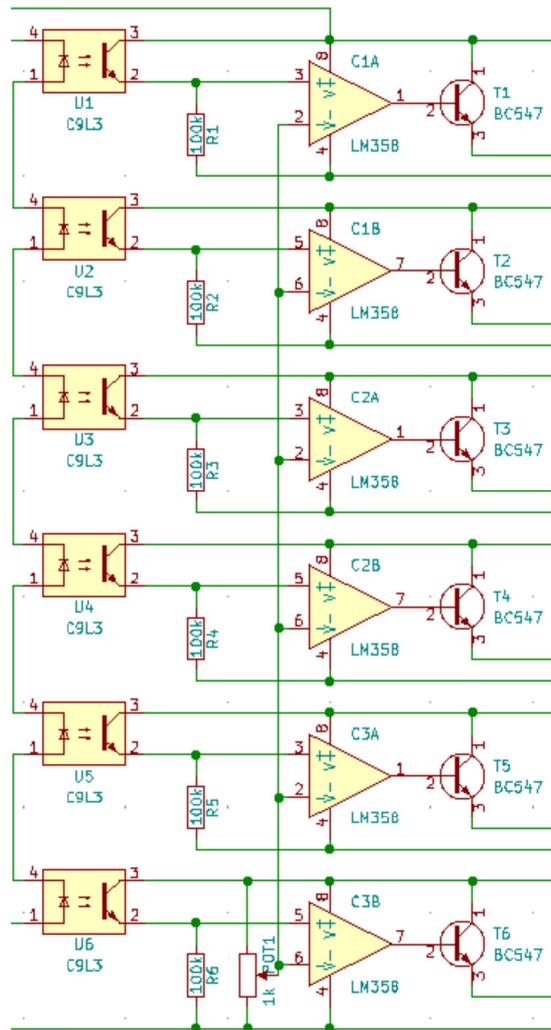
Com esta implementação tornou-se desnecessário o uso de microcontrolador. O uso de relés permite saída em resistência e em código BCD, embora não tenha sido implementado um conector apropriado para a saída em BCD. O projeto ficou mais simples e confiável, pois sem o uso de alta frequência é menos suscetível à interferência eletromagnética, presente em ambiente de subestação de energia.

O objetivo inicial de utilizar um projeto único com saída configurável também para corrente de 4 a 20 mA foi alcançado com a implementação de um circuito conversor de tensão (1 a 5 V) em corrente (4 a 20 mA). Este circuito é composto de um regulador de tensão, um amplificador operacional, dois *trimpots* de ajuste e um resistor.

O projeto completo do leitor óptico de posição de TAP é composto de duas placas, um módulo com os sensores e um módulo com os relés. A Fotografia 6 apresenta o módulo de sensores. Este módulo não possui conectores e é ligado ao módulo dos relés através de cabos soldados diretamente na placa.

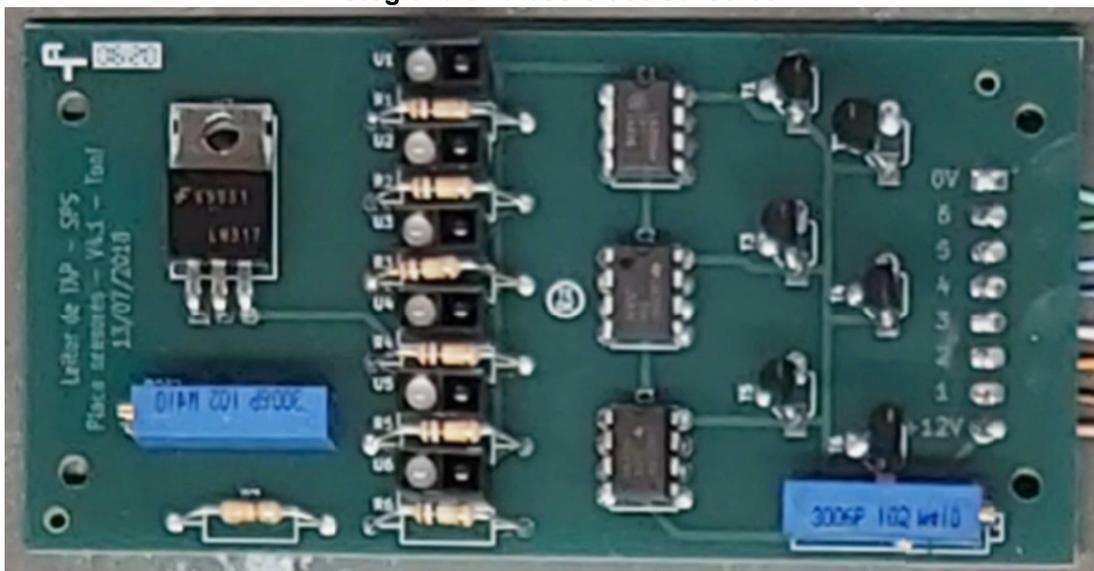
A Fotografia 7 ilustra o módulo dos relés. Este módulo possui interligação com o módulo dos sensores (lado esquerdo), possui um conector (lado direito) para entrada de alimentação 12 Vcc e três pontos de saída, que podem fornecer tensão ou corrente, sendo que a interface de corrente pode ser configurada através de *jumpers*.

Figura 6 - Circuito de acionamento dos relés

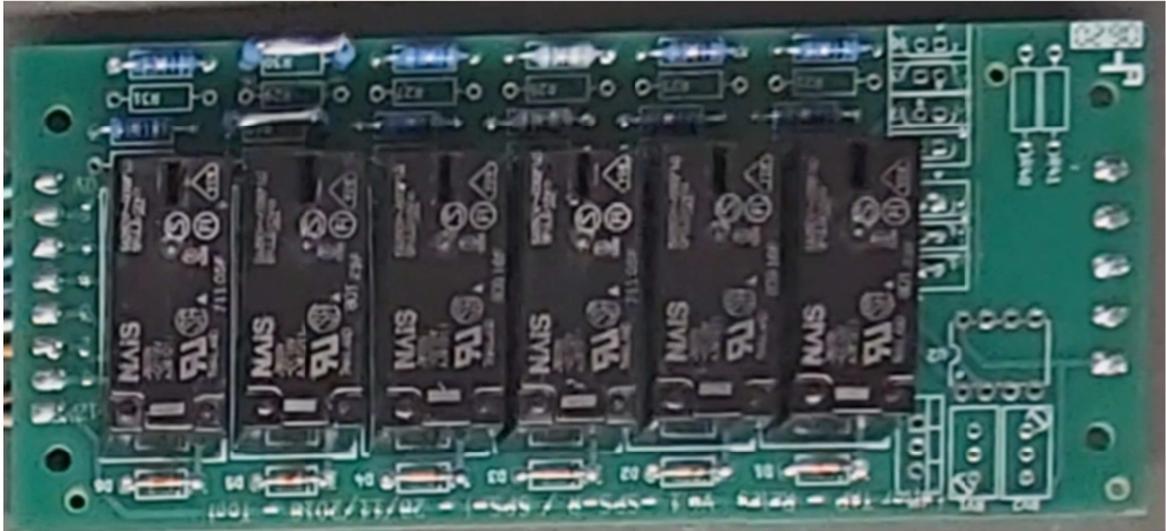


Fonte: Autoria própria.

Fotografia 6 - Módulo dos sensores



Fonte: Autoria própria.

Fotografia 7 - Módulo dos relés

Fonte: Autoria própria.

Não foi previsto um conector de saída em BCD. A implementação de um conector com saída em BCD fica como oportunidade de melhoria pra uma próxima versão do projeto. No entanto, é possível sua utilização adaptando-se um conector externo. A Fotografia 8 ilustra um projeto montado com o conector de saída em BCD adaptado ao invólucro.

Fotografia 8 - Leitor óptico de posição de TAP saída em BCD

Fonte: Autoria própria.

4 CONCLUSÃO

Em comparação com o primeiro projeto do leitor óptico de posição de TAP, o projeto desenvolvido neste trabalho é mais simples. Com apenas dois módulos o leitor atende todos os supervisores de paralelismo instalados nos transformadores da empresa. O custo do projeto também foi inferior ao do primeiro projeto e os componentes utilizados são de uso comercial e de fácil aquisição.

O módulo de sensores atende as necessidades, possui ajustes de brilho dos LEDs e tensão de referência para facilitar a leitura com diferentes tipos de papel que podem ser usados na confecção da etiqueta.

O módulo de relés pode ser configurado tanto para saída em corrente como para saída em resistência apenas alterando a configuração dos *jumpers* instalados na placa. Para saída em código BCD pode-se instalar a fiação diretamente no módulo, porém esta saída não contempla um conector.

Entre algumas dificuldades para a conclusão do projeto pode-se destacar o circuito de leitura do código. Para este circuito foram testados alguns sensores reflexivos com diversas configurações de polarização. Estes testes foram feitos em *protoboard* e nesta condição a iluminação ambiente influenciou na operação.

Para impedir que poeira, pequenos animais e também a luz ambiente influenciassem no funcionamento foi confeccionada uma caixa em alumínio. Esta caixa acomoda os módulos eletrônicos, o cilindro com a codificação e possui quatro pontos de fixação.

A instalação do leitor óptico de posição de TAP é mais fácil neste projeto do que na primeira versão do dispositivo. Porém, a instalação pode encontrar dificuldades em mecanismos de acionamento que estão em uso há muito tempo pois estes possuem folgas muito acentuadas no eixo devido ao desgaste.

O projeto atendeu as expectativas e está sendo instalado em diversas subestações da empresa. Algumas possibilidades para melhorias do dispositivo estão sendo estudadas e as principais modificações estão relacionadas ao desenvolvimento de um novo módulo de relés, que contemple um conector para saída em BCD, e o aumento do diâmetro do cilindro, buscando facilitar o ajuste em mecanismos de acionamento com desgaste acentuado.

REFERÊNCIAS

ABB. **User's guide on-load tap-changers type VUC**. 2018. Disponível em: <https://library.e.abb.com/public/2eb19677160742a2b22231950c822575/1ZSC000562-ABE%20en_Rev%202_low.pdf>. Acesso em: 24 nov. 2021.

CAMARGO, Valter Luís Arlindo de Elementos de automação / Valter Luís Arlindo de Camargo. -- 1. ed. -- São Paulo : Érica, 2014.

CROMATEK. **Chave óptica infravermelha compacta**. 2021. Disponível em: <<https://cromatek.com.br/datasheet/optoeletronicos/chave-otica-infravermelha-refletiva-compacta-C9L3.pdf>>. Acesso em: 11 nov. 2021.

JORDÃO, Rubens Guedes. **Transformadores**. São Paulo: Blucher, 2002.

MALAFAIA, Matheus Galluzzi. **Sistema de proteção de transformadores de extra-alta tensão utilizando relés digitais**. 2017. 111 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <<http://repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10019996.pdf>>. Acesso em: 10. out. 2021.

MAMEDE FILHO, João. **Subestações de alta tensão** / João Mamede Filho. - 1 ed. - Rio de Janeiro : LTC, 2021.

ROSA FILHO, Raimundo Nonato. **Metodologia para redução de custos na manutenção dos comutadores de TAP sob carga dos transformadores de potência de extra alta tensão da Eletronorte**. 2005. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2005.

SANTOS, Paulo dos. **Caracterização elétrica de um transformador monofásico didático**. 2012. 41 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnologia em Manutenção Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2012. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/15604/2/PB_COMIN_2012_1_04.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2021.

STELMACH, Fernando Renan. **Sistema de supervisão e controle na transmissão de energia**. 2019. 87 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Centro Universitário Facvest (UNIFACVEST), Lages, 2019. Disponível em: <<https://www.unifacvest.edu.br/assets/uploads/files/arquivos/40253-stelmach,-f.-r.-sistema-de-supervisao-e-controle-na-transmissao-de-energia.-tcc,-2019..pdf>>. Acesso em: 10. out. 2021.

TREETECH. **Manual técnico do supervisor de paralelismo síncrono**. 2016. Disponível em: <<http://treetech.com.br/wp-content/uploads/2017/11/Manual-SPS-5.00-pt.pdf>>. Acesso em: 11 nov. 2021.

WEG. **Transformador gigante**. 2021a. Disponível em: <<https://www.weg.net/institucional/BR/pt/news/produtos-e-solucoes/transformador-gigante>>. Acesso em: 22 nov. 2021.

WEG. **Transformadores de potência médio (até 150.000 kVA)**. 2021b. Disponível em: <https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Gera%C3%A7%C3%A3o%2C-Transmiss%C3%A3o-e-Distribui%C3%A7%C3%A3o/Transformadores-e-Reatores-a-%C3%93leo/Transformadores-de-Pot%C3%Aancia-a-%C3%93leo/50-001-a-400-000-kVA/Transformadores-de-Pot%C3%Aancia-M%C3%A9dio-%28at%C3%A9-150-000-kVA%29/p/MKT_WTD_MEDIUM_POWER_TRANSFORMER_UP_TO_150000KVA>. Acesso em: 22 nov. 2021.