A3
TP2

Análise das Características dos Transformadores de Corrente Ópticos do Ponto de Vista da Operação e Manutenção

Carlos Dutra, Luan Tominaga, Jurandir Oliveira, Vitor Woyakewicz, Tiago Matsuo, Sergio Zimath, Luciano Freitas, Rubens Nascimento

POWEROPTICKS, AQTECH, ENGIE
Brasil

RESUMO

A evolução das tecnologias de medição de corrente nas subestações de energia elétrica traz a tendência de adoção de transformadores de corrente ópticos (TCs ópticos). Esses dispositivos oferecem vantagens significativas em termos de precisão, eficiência e manutenção, representando um avanço em relação aos transformadores de corrente convencionais. Este artigo discute os benefícios operacionais e de manutenção dos TCs ópticos, destacando sua importância na modernização das infraestruturas elétricas.

A precisão e confiabilidade nas medições são características fundamentais dos TCs ópticos, que eliminam o risco de saturação e garantem medições exatas, mesmo em condições adversas. É ainda mais importante a promoção do aumento da segurança operacional e da preservação dos ativos da subestação tendo em vista que não há o risco de explosões com este tipo de equipamento. Além disso, a facilidade de integração com redes digitais, conforme a norma IEC 61850, simplifica o *design* das subestações e promove a interoperabilidade. Embora o custo inicial possa ser maior, a redução de custos operacionais a longo prazo é evidente, devido à diminuição da necessidade de manutenção e ao menor tempo de inatividade.

A manutenção preditiva proporcionada pelos TCs ópticos permite um monitoramento contínuo e a identificação precoce de falhas, resultando em diagnósticos precisos e uma gestão baseada em condição, que otimiza a vida útil dos ativos. Em termos de sustentabilidade, a redução no uso de materiais e o menor impacto ambiental durante a fabricação e operação contribuem para uma maior eficiência energética.

Apesar das vantagens, desafios como o custo inicial e a necessidade de capacitação técnica ainda requerem atenção. Este artigo também apresenta o TECO, um TC óptico desenvolvido nacionalmente, que exemplifica a aplicação prática da tecnologia, incorporando recursos avançados para monitoramento e compensação de variações de temperatura.

Em conclusão, a adoção de TCs ópticos nas subestações representa uma oportunidade valiosa para melhorar a eficiência operacional, reduzir custos e promover práticas de manutenção mais eficazes, alinhando-se às necessidades de um setor elétrico em constante evolução.

PALAVRAS-CHAVE

Transformador de Corrente óptico, TECO, Merging Unit, Confiabilidade, Monitoramento, IEC 61850, Barramento de processo, Operação, Manutenção.

* Carlos Dutra, carlos@poweropticks.com.br

1. Introdução

No cenário atual de transformação digital do setor elétrico, a confiabilidade e a precisão das medições são cada vez mais essenciais para garantir a eficiência das subestações de energia. Tradicionalmente, transformadores de corrente (TCs) convencionais desempenharam um papel fundamental na medição de correntes elétricas, sendo largamente utilizados em sistemas de proteção e medição. No entanto, essas tecnologias tradicionais enfrentam desafios significativos, como saturação em condições extremas, riscos de explosões e dificuldades de manutenção preventiva e preditiva.
Com o avanço das subestações digitais, a introdução dos transformadores de corrente ópticos, alinhados com a norma IEC 61850 [1] e mais recentemente com a norma IEC 61869 [2], trouxe uma inovação significativa. Os TCs ópticos oferecem maior precisão, flexibilidade e, principalmente, um novo paradigma de manutenção, baseado em monitoramento contínuo e proativo.
Neste trabalho, na seção 2 é tratado sobre os TCs ópticos e seu funcionamento básico. Nas seções 3 e 4 são explorados em profundidade os benefícios dos TCs ópticos, com foco na operação e manutenção de subestações de energia elétrica, destacando o impacto positivo que essas tecnologias têm nas rotinas de trabalho e na confiabilidade dos sistemas. Nas seções 5 e 6 são abordados os impactos na gestão de ativos e na sustentabilidade e eficiência energética, enquanto na 7 são tratados os desafios na implementação dos TCs ópticos. Na seção 8 é mostrada uma aplicação prática de TC óptico desenvolvido com tecnologia nacional, denominado de TECO. Ele possui uma característica diferenciada que é a capacidade de combinar as medidas obtidas do sistema de medição óptico com medidas provenientes de uma bobina de Rogowski trazendo uma abordagem de medição complementar com verificação cruzada dos dados que permite aumentar a confiabilidade das medições e proporcionar uma visão mais abrangente do funcionamento dos equipamentos. Para finalizar, na seção 9 são mostradas as conclusões do trabalho.

2. Arquitetura dos Transformadores de Corrente Ópticos

Com os avanços tecnológicos e a crescente digitalização das subestações, os TCs Ópticos surgem como uma solução inovadora. A grande maioria dos sensores ópticos de corrente elétrica operam com base no efeito Faraday, utilizando fibras ópticas como elemento sensor. O efeito Faraday é uma propriedade de algumas substâncias translúcidas que, ao serem submetidas a um campo magnético externo, causam uma rotação do plano de polarização da luz que nela se propaga [3], como mostra a Figura 1. Num sensor baseado no efeito Faraday, a corrente elétrica que passa por um condutor é calculada a partir da medição de fluxo magnético gerado em função da corrente. A forma mais simples de medir o fluxo magnético é enlaçar uma bobina de fibra óptica em torno do condutor. Nesta configuração, a sensibilidade da bobina de fibra óptica é diretamente proporcional ao número de voltas e às características físicas da fibra óptica. No modelo apresentado na Figura 1 uma luz linearmente polarizada sai do sensor Faraday com o seu ângulo de polarização modulado em função da intensidade do campo magnético rotacional ao condutor, que por sua vez é gerado pela corrente elétrica que flui nele.

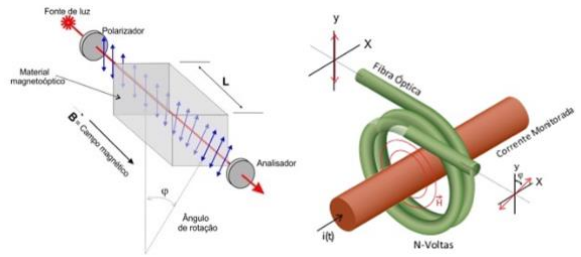


FIGURA 1 – Efeito Faraday aplicado à medição de corrente.

Por conta das características construtivas das fibras ópticas, o comportamento da luz pode sofrer alguma variação em função da variação da temperatura. Assim, mecanismos de compensação

necessitam ser adicionados para que a relação entre a corrente no condutor e o sinal luminoso permaneçam inalterados e mantenham o seu elevado grau de precisão na medição de corrente.
Um TC óptico é composto basicamente das seguintes partes:

- Fonte de luz (geralmente LASERs): Responsável pela geração do feixe de luz que percorre o sistema de medição.
- Cabos de fibras ópticas: Transportam o sinal óptico, garantindo isolamento elétrico e a integridade das medições mesmo em ambientes de alta tensão.
- Bobinas de fibra-óptica: elementos sensores que envolvem o condutor e pela qual o efeito Faraday se manifesta.
- Elementos de compensação: dispositivos utilizados para permitir ajustes em função da variação da temperatura ambiente e ou de perdas nos sistemas ópticos.
- Dispositivos ópticos de polarização, despolarização, *splitters* e comparadores: dispositivos que ajustam os sinais ópticos.
- *Merging Units* (MUs): Unidades de processamento responsáveis por converter o sinal óptico em dados digitais padronizados pela IEC 61850, permitindo seu uso por outros dispositivos de proteção e controle.

Esses elementos trabalham em conjunto para realizar medições de alta precisão, com maior flexibilidade e sem os riscos de saturação presentes nos TCs convencionais. O uso da luz como meio de transmissão oferece uma série de vantagens, que se estendem diretamente aos processos de operação e manutenção.

3. Benefícios Operacionais dos TCs Ópticos

A implementação de TCs ópticos nas subestações oferece benefícios substanciais para os processos de operação, desde o ponto de vista da simplicidade de instalação até o aumento da eficiência operacional. Alguns dos principais benefícios operacionais incluem:

3.1 Precisão e Confiabilidade nas Medições

Um dos principais problemas enfrentados pelos TCs convencionais é a saturação do núcleo magnético em condições de sobrecorrente, o que pode levar a medições incorretas. Os TCs ópticos, por sua vez, não possuem componentes magnéticos, eliminando completamente o risco de saturação. Isso garante que, mesmo sob condições extremas de operação, como curtos-circuitos ou falhas de alta magnitude, os TCs ópticos forneçam medições precisas.
Além disso, a capacidade dos TCs ópticos de medir com precisão uma ampla faixa dinâmica de correntes, desde baixas até correntes extremamente elevadas, é um fator crítico em ambientes de alta tensão. Aliado a isto está o fato de que com um único sensor os TCs ópticos atingem a classe de exatidão tanto para proteção quanto para medição de faturamento.

3.2 Facilidade de Integração e Digitalização

Os TCs ópticos são projetados para funcionar diretamente em redes digitais, integrando-se perfeitamente com sistemas de automação e controle baseados na IEC 61850. Isso elimina a necessidade de conversores de sinal adicionais, facilitando a integração em subestações digitais e promovendo uma maior interoperabilidade entre dispositivos de diferentes fabricantes.
Ao ser integrado com a sua própria *Merging Unit*, as medições são convertidas diretamente em dados digitais, eliminando a necessidade de transformações analógicas adicionais. Isso simplifica o projeto da subestação e reduz a complexidade dos sistemas de controle e proteção.

3.3 Redução de Custos Operacionais

Embora o custo inicial de implementação de TCs ópticos possa ser equivalente ou ligeiramente superior ao de TCs convencionais, os benefícios a longo prazo em termos de operação e manutenção compensam esse investimento. A ausência de componentes eletromagnéticos e a simplicidade estrutural dos TCs ópticos reduzem a necessidade de manutenção corretiva e minimizam o tempo de inatividade dos equipamentos. Além disso, por não necessitarem de óleo para isolação e terem dimensões expressivamente menores, sua construção resulta em dispositivos mais leves, o que facilita sua instalação, transporte e armazenamento.

4. Benefícios na Manutenção dos TCs Ópticos

A manutenção é um dos aspectos que mais se beneficiam com a introdução dos TCs ópticos, especialmente quando se considera a complexidade e os riscos associados aos TCs convencionais.

4.1 Manutenção Preditiva e Monitoramento Contínuo

Nos TCs convencionais, a manutenção preventiva costuma ser baseada em intervalos de tempo fixos ou após a detecção de falhas já ocorridas. Em contraste, os TCs ópticos, graças às suas *Merging Units* e capacidade de monitoramento contínuo, permitem que as equipes de manutenção adotem uma abordagem preditiva.
O monitoramento contínuo oferece informações detalhadas sobre o estado do TC óptico, como a degradação da fonte de luz ou anomalias no desempenho das fibras ópticas. Com isso, é possível programar manutenções preventivas de forma precisa, apenas quando necessário, evitando manutenções desnecessárias e otimizando o tempo de operação.

4.2 Redução de Tempo de Inatividade

Um dos maiores benefícios dos TCs ópticos é a capacidade de realizar diagnósticos avançados enquanto o equipamento ainda está em operação. Ao contrário dos TCs convencionais, que muitas vezes precisam ser desligados para inspeções, os ópticos podem ser monitorados em tempo real, sem a necessidade de interrupção no fornecimento de energia. Isso reduz drasticamente o tempo de inatividade, impactando positivamente a confiabilidade geral da subestação.

4.3 Diagnóstico de Falhas Preciso

As *Merging Units* integradas nos TCs ópticos possuem capacidade de processamento avançado, permitindo a detecção de falhas incipientes antes que elas se tornem críticas. Por exemplo, a degradação das fontes de luz, que é uma das principais causas de falhas nos TCs ópticos, pode ser detectada com precisão, possibilitando sua substituição programada sem impactos na operação. Estes indicativos de falhas podem ser enviados utilizando os próprios protocolos indicados na IEC 61850, fazendo com que estas informações cheguem até sistemas SCADA e gerem avisos para os operadores sem que haja a necessidade de que estes operadores permaneçam verificando constantemente o estado dos equipamentos.
Além disso, as medições contínuas permitem a identificação de anomalias de curto prazo que, em TCs convencionais, poderiam passar despercebidas até que ocorresse uma falha catastrófica. Assim, os TCs ópticos promovem uma manutenção baseada em condição, onde as intervenções são feitas de acordo com o estado real do equipamento, aumentando a eficiência e reduzindo custos.
A integração de novas tecnologias, como Inteligência Artificial (IA) e Big Data, permitirá uma análise ainda mais aprofundada dos dados de medição, levando a uma manutenção proativa e extremamente precisa.

5. Impacto dos TCs Ópticos na Gestão de Ativos e Manutenção

Com a crescente complexidade e demanda por maior eficiência nas subestações, a gestão de ativos tornou-se um dos principais focos das empresas de energia. A capacidade de gerenciar os ativos de

forma inteligente, otimizando a vida útil dos equipamentos e minimizando custos de manutenção, é essencial para garantir a viabilidade operacional no longo prazo.

5.1 Gestão Baseada em Condição

Os TCs ópticos, por fornecerem dados em tempo real e diagnósticos contínuos, possibilitam uma transição para a gestão baseada em condição (*Condition-Based Maintenance, CBM*) [4]. Nesse modelo, as ações de manutenção são desencadeadas com base no estado real dos equipamentos, em vez de seguir cronogramas pré-definidos.
Essa abordagem reduz significativamente os custos de manutenção, uma vez que as intervenções são feitas apenas quando necessárias, e não de forma periódica, como acontece nos sistemas tradicionais. Isso não só reduz os custos operacionais, mas também aumenta a vida útil dos TCs ópticos e de outros componentes da subestação.

5.2 Minimização de Riscos Operacionais

Um dos principais desafios na operação de subestações é a mitigação de riscos associados a falhas inesperadas de equipamentos críticos, como os transformadores de corrente. Falhas nos TCs convencionais podem resultar em interrupções no fornecimento de energia, danos a outros equipamentos ou até acidentes graves.
Com os TCs ópticos, além de não estarem sujeitos a explosões como os convencionais, os operadores podem identificar possíveis falhas antes que estas se tornem críticas, graças ao monitoramento contínuo e à análise em tempo real. Isso minimiza o risco de falhas catastróficas e garante uma operação mais segura e confiável da subestação.

5.3 Otimização do Ciclo de Vida dos Equipamentos

A coleta de dados ao longo do tempo permite que as empresas de energia analisem tendências de desempenho e taxas de degradação dos TCs ópticos. Com essas informações, é possível otimizar o ciclo de vida dos equipamentos, programando substituições e atualizações no momento ideal. Essa otimização ajuda a evitar falhas prematuras e a garantir que os TCs ópticos operem no pico de sua eficiência por mais tempo, aumentando o retorno sobre o investimento.

6. Sustentabilidade e Eficiência Energética

A sustentabilidade é uma preocupação crescente em todas as indústrias, e o setor de energia não é exceção. A substituição de TCs convencionais por ópticos contribui diretamente para uma maior eficiência energética e redução de impactos ambientais.

6.1 Redução no Consumo de Materiais

Os TCs ópticos utilizam uma quantidade significativamente menor de materiais. Óleo, papel e cobre, largamente utilizados em TCs convencionais são substituídos por materiais leves e de tamanho drasticamente reduzido. Isso não só diminui os custos de produção, mas também minimiza o impacto ambiental relacionado à extração e processamento desses materiais. Além disso, os TCs ópticos são dispositivos mais leves, o que reduz os custos e as emissões associadas ao transporte e instalação.

6.2 Eficiência Energética e Redução de Perdas

Os transformadores ópticos são dispositivos de baixo consumo de energia, uma vez que não dependem de campos magnéticos ou materiais condutores para realizar suas medições. Isso resulta em uma redução nas perdas energéticas ao longo do tempo, especialmente em subestações de grande porte, onde há um grande número de TCs em operação simultaneamente.
Além disso, a precisão dos TCs ópticos ajuda a evitar sobrecargas e falhas, que frequentemente resultam em desperdício de energia em sistemas elétricos convencionais.

6.3 Menor Impacto Ambiental ao Longo da Vida Útil

Os TCs ópticos não apenas consomem menos recursos durante sua fabricação e operação, mas também geram menos resíduos ao final de sua vida útil. Por não conterem óleos isolantes e outros materiais potencialmente perigosos, os TCs ópticos são mais fáceis de reciclar, e sua substituição tem um impacto ambiental muito menor do que os convencionais.

7. Desafios na Implementação dos TCs Ópticos

Embora os benefícios dos TCs ópticos sejam claros, ainda existem desafios a serem superados para uma adoção mais ampla dessa tecnologia.

7.1 Custo Inicial

Com a digitalização dos sistemas de proteção, automação e controle da subestação, o custo da solução completa, englobando os equipamentos, infraestrutura e mão de obra de toda a implementação deveria ser avaliado e comparado com o custo total da solução convencional. Quando se faz este tipo de análise, nota-se que o custo total da solução digitalizada é bastante atrativo. Entretanto, é comum que se compare os custos individuais de cada parte da solução e apesar de já ser bastante competitivo, o custo isolado dos TCs ópticos ainda pode ser superior ao de TCs convencionais. Isso se deve principalmente à complexidade dos componentes ópticos e à necessidade de infraestrutura digital para suportar a tecnologia. No entanto, os custos têm caído à medida que a tecnologia se torna mais comum e os benefícios a longo prazo, como a redução de manutenções e a maior confiabilidade, tendem a compensar esse investimento inicial.

7.2 Capacitação de Mão de Obra

A introdução dos TCs ópticos exige um nível mais elevado de capacitação técnica. Engenheiros e técnicos de manutenção precisam ser treinados para trabalhar com a tecnologia óptica, entender os princípios de funcionamento e saber como utilizar as ferramentas de monitoramento digital associadas. Embora isso represente um desafio inicial, também abre oportunidades para o desenvolvimento profissional e a melhoria das práticas de operação e manutenção.

7.3 Integração com Infraestruturas Legadas

Muitas subestações ainda operam com infraestruturas convencionais e sistemas legados que não suportam a digitalização completa. A transição para TCs ópticos, portanto, pode ser complicada em locais onde a infraestrutura precisa ser modernizada. A integração com sistemas de proteção convencionais e a adaptação da tecnologia óptica a ambientes mistos são questões que exigem planejamento cuidadoso.

8. Aplicação Prática de um TC óptico

Para ilustrar como os TCs ópticos utilizam a tecnologia para beneficiar os processos de operação e manutenção, como exemplo, é mostrado o TECO. Ele é desenvolvido com tecnologia nacional e traz características diferenciadas que permitem identificar anomalias no seu funcionamento e sinalizá-las.
O TECO considera como princípio de funcionamento o efeito Faraday, com a passagem de uma luz polarizada por várias espiras de fibra óptica montadas em uma estrutura que circunda o condutor em que se deseja medir a corrente. Esta bobina é montada em uma estrutura que é acoplada a um dispositivo que se interliga com a linha de alta tensão e é o sensor principal para a medição de corrente. Entretanto, a medição com as fibras ópticas pode ser sensível a variações de temperatura. Para compensar estas variações, o TECO adicionalmente utiliza uma bobina de Rogowski que simultaneamente realiza medições equivalentes da corrente monitorada.

Um cabeçote permite sustentar dois conjuntos de sensores redundantes. Nele são feitas as interconexões das fibras dos sensores e os cabos de fibra óptica oriundos dos demais dispositivos que formam o circuito óptico de medição. Além disto, no cabeçote é instalada uma placa que faz a aquisição dos sinais da bobina de Rogowski e os converte em dados amostrados para serem enviados para a *Merging Unit* utilizar nos algoritmos de compensação. A alimentação desta placa não pode ser realizada com cabos elétricos para não interferir na isolação do TC. Por conta disto, no cabeçote é instalada uma célula fotoelétrica que recebe uma luz proveniente de um dispositivo PoF (*Power over Fiber*). Os dados enviados pela placa de aquisição da bobina de Rogowski também utilizam uma fibra óptica como meio de comunicação.
Este cabeçote é sustentado por um isolador polimérico apropriado para os níveis de tensão requeridos e que também serve de duto para a passagem das fibras ópticas. Na base do isolador é realizada a junção das fibras ópticas.
As fontes de potência luminosa para os sensores Faraday do TECO são SLEDs que estão instalados internamente ao gabinete da *Merging Unit*. O feixe de luz fornecido por este módulo é linearmente polarizado e conduzido através de uma fibra óptica até o sensor Faraday, onde passa pelo sensor e tem o seu estado de polarização afetado em função do campo magnético. Posteriormente ele é conduzido a um sistema de aquisição, onde é decomposto em suas componentes ortogonais através de um *beam-splitter*, convertendo a modulação do ângulo do estado de polarização em modulação de intensidade. Esta conversão é realizada na *Merging Unit* do TECO. Nela as medições do sensor Faraday e da bobina de Rogowski são processadas e eventuais correções são aplicadas para que os *Sampled Values* enviados para a rede estejam sempre com a exatidão esperada.
A Figura 2 ilustra as estruturas do TECO.



FIGURA 2 – Estruturas do TECO

Conforme apresentado em [5], buscando obter uma solução de menor complexidade para minimizar os efeitos das variações térmicas sofridas pela exposição ao ambiente e pelo envelhecimento dos componentes ópticos, como as fontes de luz, foi criada e patenteada [6] uma técnica que utiliza a medição combinada de um sensor Faraday, utilizando polarimetria com a medição direta do deslocamento do ângulo do feixe de luz polarizado, juntamente com medidas provenientes de uma bobina de Rogowski. Os sensores Faraday têm a característica de serem bastante precisos com relação ao comportamento dinâmico. Já as bobinas de Rogowski, tem as medidas indiretas da corrente com ótima estabilidade em função das variações térmicas e não dependem de uma fonte de luz estável. O processamento de ambas as medidas e a adoção de algoritmos inteligentes para compensar os valores medidos pelo sensor Faraday, permite combinar as melhores características dos dois sensores e obter valores de corrente digitalizados com extrema precisão e estabilidade, em uma solução mais simples, eficiente e com custo ainda mais competitivo.
Adicionalmente, como efeito colateral de se manter a avaliação contínua dos coeficientes de compensação, se identificou que é possível inferir os níveis de degradação dos elementos ópticos ao longo do tempo, como por exemplo a intensidade das fontes de luz. Como o sistema de compensação

permanece constantemente calculando os índices a serem aplicados nas medidas, avaliando-se estes índices e classificando-os conforme faixas de valores ao longo do tempo, pode-se identificar tendências. Conforme estas tendências vão sendo obtidas pelos algoritmos internos, pode-se estimar a probabilidade de algum dos elementos estarem se degradando mais rapidamente e com isso alertar sobre a necessidade de se atuar de forma preventiva e programada no equipamento. Este alerta é dado por meio de mensagens MMS (*Manufacturing Message Specification*) que são previstas na IEC 61850 e por indicações nas interfaces de operação da *Merging Unit* do TC óptico. Diferentes análises dos dados internos podem ser realizadas e com isso também identificar falhas nos sinais recebidos dos sensores Faraday, bem como das medidas das bobinas de Rogowski. Da mesma forma é possível correlacionar as medidas dos diferentes sensores e associá-los com a variação da temperatura, estado dos elementos ópticos, como as fibras ópticas utilizadas para o envio e recebimento dos sinais de medição, de alguma anomalia nos sistemas eletrônicos envolvidos no processo de medição ou algum problema estrutural.
Um conjunto trifásico de TCs ópticos TECO com este sistema de monitoramento do estado do equipamento foi instalado como projeto piloto na Subestação Yta, da Eletrosul, na linha de 525 kV que se conecta com a usina Hidroelétrica de Itá.

9. Conclusão

Os transformadores de corrente ópticos representam uma inovação disruptiva no setor elétrico, oferecendo uma série de benefícios que vão desde a precisão das medições até a capacidade de manutenção preditiva e monitoramento contínuo. Eles trazem consigo uma nova era de eficiência e confiabilidade para a operação e manutenção de subestações de energia.
Com a transição para subestações digitais e a implementação cada vez mais ampla da norma IEC 61850, os TCs ópticos estão posicionados para se tornar a solução padrão em ambientes de alta tensão. O futuro aponta para uma maior aplicação de inteligência artificial e big data, o que permitirá que esses dispositivos avancem ainda mais, proporcionando melhorias contínuas na gestão de ativos e na otimização dos ciclos de vida dos equipamentos.
A evolução das subestações de energia está intimamente ligada à inovação tecnológica dos seus componentes primários, e nos sistemas de proteção, automação e controle, essa inovação traz a integração destes componentes dentro do barramento de processos da IEC 61850. Os TC ópticos são peças-chave para essa transformação. Apesar dos desafios iniciais de implementação, os benefícios a longo prazo superam as dificuldades, tornando essa tecnologia essencial para o futuro sustentável, eficiente e seguro da transmissão e distribuição de energia.
Como mostrado, o impacto nos processos de operação e manutenção são bastante importantes. Essas tendências futuras representam um avanço significativo em direção à automação e digitalização total das subestações de energia. Os TCs ópticos desempenharão um papel central nesse contexto, proporcionando não apenas medições precisas e confiáveis, mas também integrando-se a redes de manutenção autônomas. A possibilidade de autodiagnóstico e autocorreção trará um nível de eficiência e confiabilidade sem precedentes ao setor elétrico, especialmente em ambientes críticos.
O TECO, transformador de corrente óptico para aplicações em subestações de energia elétrica, utilizado para ilustrar os benefícios nos processos de operação e manutenção, é um equipamento desenvolvido como parte do projeto PD-00403-0060/2024 do programa P&D ANEEL, intitulado “Lote Pioneiro e Inserção no Mercado do Transformador Eletrônico de Corrente Óptico – TECO-MR”, no âmbito do programa de P&D da ENGIE Brasil regulado pela ANEEL, e em parceria com as empresas Power Opticks e AQTech.

BIBLIOGRAFIA

[1] IEC 61850-SER Series, “Communication networks and systems for power utility automation – All Parts”, 2021
[2] IEC 61869-1, “Instrument transformers – Part 1: General requirements”, 2023
[3] Coelho, Vinicius A., “O efeito Faraday: exposição teórica didática e experimento de baixo custo", dissertação de mestrado"; UFRJ; RJ; 2017.

[4] R. Ahmad, S. Kamaruddin, "*An overview of time-based and condition-based maintenance in industrial application*", Computers & Industrial Engineering, Volume 63, Edição 1, Páginas 135-147, Agosto 2012
[5] C. Dutra *et al*, "Técnica De Medição Combinada Para Garantia De Precisão Das Medidas Fornecidas Por Um Transformador De Corrente Óptico", Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - SNPTEE, 2023
[6] Patente no. BR1020160212677, "Transformador Óptico de Corrente com Medição Redundante e Circuito Híbrido de Compensação de Temperatura", INPI, 2016