

Estudio de los Transformadores de Corrientes Ópticos y propuesta de implementación en Línea de Transmisión del sistema paraguayo

Pedro Aníbal Sosa Cardozo, Luís Maria Delgado Ferreira, Félix Fernando Fernández Balbuena

Facultad Politécnica - Universidad Nacional de Asunción

Paraguay

Resumen

La corriente eléctrica es posible medir de forma no convencional, es decir, por una serie de equipamientos e instrumentos que utilizan otros principios físicos y no propiedades electromagnéticas. Uno de estos principios consiste en la utilización de las propiedades de polarización de la luz y el descubrimiento de la interacción de los campos magnéticos con la onda luminosa, que posibilitaron el desarrollo de métodos para realizar mediciones de forma menos riesgosa y sin la necesidad obtención directa de muestras o aperturas de circuitos eléctricos. Con los avances tecnológicos en la electrónica digital y las fibras ópticas se desarrollaron equipamientos confiables y sofisticados para las necesidades dentro de una subestación eléctrica, como ser el transformador de corriente óptico. Considerando los daños, tanto para el medio ambiente, así como para el patrimonio de la empresa concesionaria, que derivan de los eventos de explosiones de transformadores en subestaciones eléctricas y la dificultad de predecir los comportamientos instantáneos y a largo plazo de los transformadores de corriente con aceite dieléctrico, en alta tensión, sumado a los costos de mantenimientos y la cantidad de subestaciones antiguas en el Sistema Eléctrico de Potencia de Paraguay, se estudió y analizó al equipamiento capaz de realizar las mismas funciones de mediciones, reduciendo los riesgos y mantenimientos. Los transformadores de corriente ópticos, basados en Efecto Faraday, son una alternativa que disminuiría los problemas relacionados al uso de aceite dieléctrico que se tienen en los transformadores de corriente convencionales (electromagnéticos), y que son totalmente compatibles con las subestaciones eléctricas digitales gracias a que su utilización se basa en normas, como la IEC 61850 y acorde a los desafíos de ingeniería de diseño actuales. Estas exigencias están relacionadas a los costos, la seguridad operacional y el cuidado del medio ambiente (con el uso y manejo de aceite dieléctrico o SF₆) más las propias exigencias del sector eléctrico (continuidad del servicio, confiabilidad) y la necesidad de instalaciones o expansiones de subestaciones eléctricas en zonas urbanas. Para exponer mejor el caso de estudio se ha realizado un análisis de FODA y económico basado en un diseño de ingeniería, para una línea de transmisión en 220 kV del Sistema Eléctrico de Potencia en funcionamiento. Basada en la propuesta y estudio de caso se concluye que el transformador de corriente óptico es una opción válida y con factibilidad económica positiva y se recomienda proponer su utilización en forma de prototipo para exponer sus ventajas debido a que serán utilizados de forma masiva en la región en los próximos años.

Palabras clave

Aceite dieléctrico, Efecto Faraday, Transformador de Corriente, Subestaciones eléctricas, Normas

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo de investigación se enfoca en los transformadores de medida, en especial de los Transformadores de Corriente (TC) en alta tensión. El uso del aceite dieléctrico en los TC trae consigo ciertas dificultades cuando se tienen pérdidas y modificaciones de sus condiciones (humedad, desgaste por envejecimiento) y el riesgo de explosión debido a fallas internas es muy elevado. Dadas las condiciones y los eventos ocurridos en el país y la región, se buscó una alternativa para el uso de los TC a aceite. El desarrollo tecnológico permite tener en la actualidad equipos que utilizan el efecto magneto-óptico de Faraday y sumado a los avances en el campo de la electrónica, la óptica y la tecnología de los materiales, se dispone de un instrumento capaz de realizar la misma función que el TC convencional, denominado Transformador de Corriente Óptico. En el desarrollo del trabajo se busca examinar la tecnología que utiliza el TC Óptico, mediante diversas actividades técnicas, y así promover la discusión acerca de su uso en futuros proyectos dentro del Sistema Eléctrico de Potencia del Paraguay.

2. MATERIALES Y RECURSOS UTILIZADOS

- Se consultó a las empresas del sector eléctrico del Paraguay, y se visitaron las instalaciones de estas.
- Se consultó a profesionales químicos que trabajan en el análisis del aceite de los transformadores.
- Se concretó una visita técnica a la subestación 230 kV Uberaba, de la COPEL - *Companhia Elétrica de Paraná*, en la ciudad de Curitiba – Paraná, Brasil. En la visita se observó el proyecto prototipo basado en el TC Óptico TECO-MR.
- Se realizó una práctica de laboratorio basado en un modelo diseñado para mostrar el efecto electro-óptico de Faraday y la polarización de haces de luz, en el Laboratorio de Electricidad de la Facultad Politécnica de la UNA.
- Se analizó un caso de estudio para una Línea de Transmisión (LT) y, además, se realizó un análisis FODA y un análisis económico. En la Fig. 1 se puede observar la práctica de laboratorio llevada a cabo. Disponible en el código QR y el link: <https://www.youtube.com/watch?v=loRZnE6GGAU>:

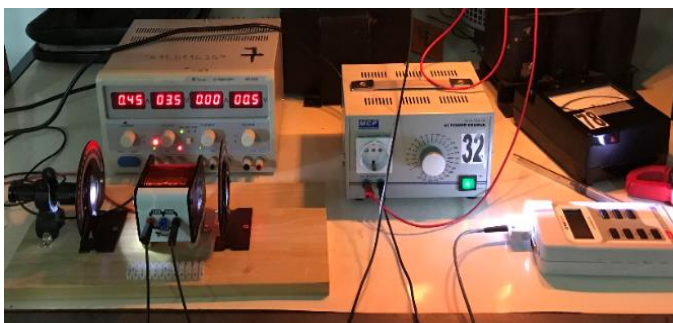


Figura 1: Práctica de Laboratorio “Efecto Faraday” - Laboratorio de Electricidad, Facultad Politécnica - UNA, Campus San Lorenzo [1]

3. TRANSFORMADOR DE CORRIENTE ÓPTICO

3.1. Efecto magneto óptico de Faraday

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

Michael Faraday en 1845 descubrió la manera en que la luz propagada a través de un medio material podría verse influenciada por la aplicación de un campo magnético externo. El ángulo β (medido en minutos de arco: arcmin) a través del cual el plano de vibración rota es expresado según la siguiente ecuación:

$$\beta = VBd \quad [2]$$

Donde β es la densidad de campo magnético (medido usualmente en gauss), d es la longitud del medio atravesado (en cm), y V es el factor de proporcionalidad conocido como la constante de Verdet.

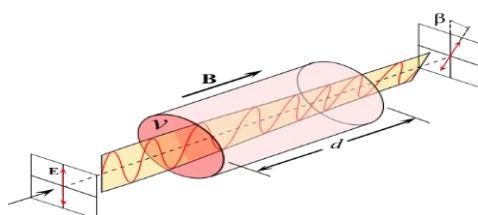


Figura 2: Efecto magneto-óptico de Faraday [3]

3.2. Transformador de Corriente Óptico

El TC Óptico utiliza el efecto Faraday para medir la corriente eléctrica. Posee 3 partes bien definidas que son: el módulo sensor, una función de aislador, y un sistema de procesamiento de información y fuente de luz basado generalmente en fibra óptica. En la Fig. 3 se muestran las partes.

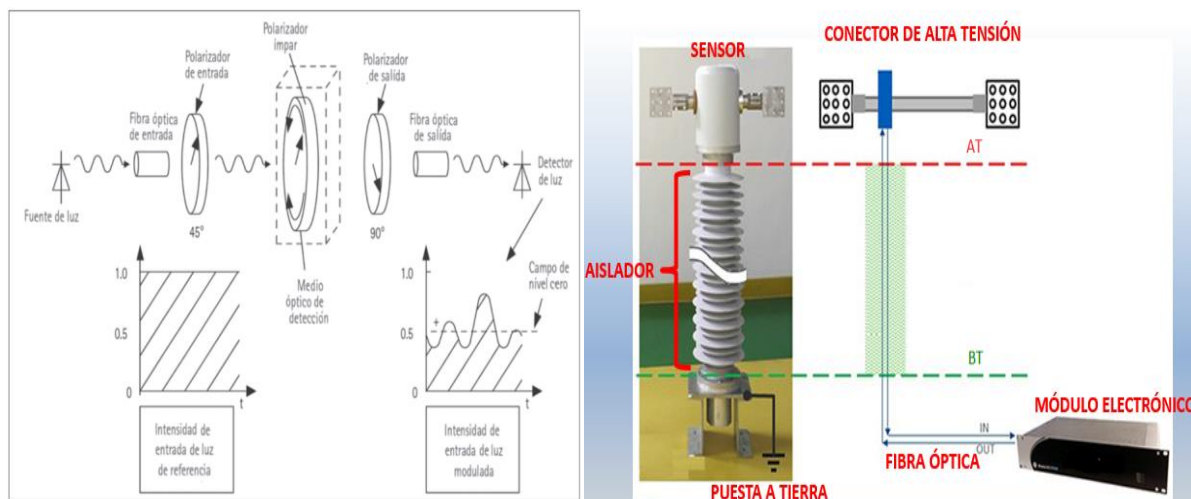


Figura 3: Funcionamiento de un transductor de instrumentación óptica (izquierda) y partes constitutivas (derecha) [4][5]

Con esta tecnología se tienen las siguientes ventajas [5]:

- Independencia de los circuitos eléctricos a medir (formas de conexionado, sin problema de secundario abierto o cortocircuitos), la detección de corriente se realiza sin contacto eléctrico;
- Linealidad durante toda la vida útil, menos impacto por envejecimiento de partes;
- Peso, materiales y ensayos de comisionamiento reducidos, debido a que existe una reducción de uso de materiales debido a la independencia del uso de aceites dieléctricos aislantes;

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

- Parámetros mínimos, reduciendo la cantidad de ensayos de fábrica y ensayos finales de comisionamiento;
- Modularidad (*plug and play*), vienen en forma modular, pudiendo ser fácilmente sustituido por partes (sensor, aislador, módulos electrónicos);
- Posibilidad de autodiagnóstico de módulos y sensor;
- Favorable a la preservación del medio ambiente, al no utilizar gases y/o aceites aislantes, se eliminan riesgos de explosiones y daños al ambiente.

Existen en cambio algunas limitaciones para el TC Óptico, se resumen a continuación [5]:

- Precisión en la medición para corrientes muy bajas, debido a que la detección es mínima por la variación angular;
- Sensibilidad de las uniones de fibra óptica al polvo, entonces se deben de tener periodos de mantenimientos más continuos si se utilizan en ambientes industriales agresivos;
- Diámetros de sensores fijos, caso haya necesidad de aumento de diámetro de conductores se deben de modificar los sensores, dependiendo de fabricante;
- Dependencia de los servicios auxiliares de la estación o planta para alimentación de los módulos ópticos, que funcionan con corriente continua.

3.3. Respuesta en régimen permanente del TC Óptico

Se ha consultado a los fabricantes acerca de las respuestas de los TC Ópticos en régimen permanente, los cuales han manifestado que las mismas son idénticas a las respuestas que se tienen con los TC convencionales. En la Fig. 4 se pueden observar las respuestas de dos fabricantes de TC Ópticos.

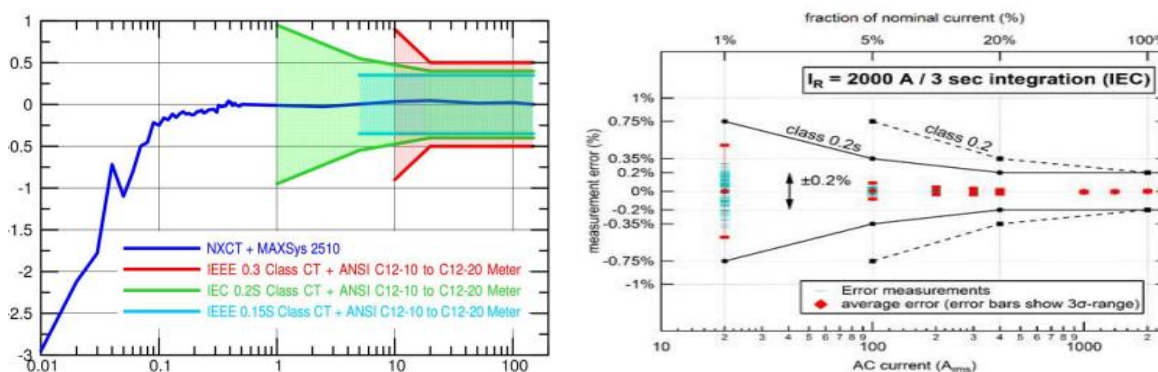


Figura 4: Respuesta y márgenes de errores para fabricante *NextPhase* para su TC Óptico en 240 kV (izquierda) y para el fabricante *ABB group* para su modelo en 230 kV (derecha), ambos para 2.000A [6]

3.4. Proyecto prototipo de TC Óptico en Subestación 230 kV Uberaba - COPEL [7]

Durante la investigación se ha visitado las instalaciones de la subestación perteneciente a la empresa COPEL. Dentro de sus instalaciones se encuentra el TC Óptico desenvuelto por las empresas *Power Optiks*, *Tractebel* y *Reason GE*. El mismo consiste en un proyecto prototipo en nivel de 230 kV, utilizando el modelo de TC Óptico TECO MR, en conexión paralela a un TC convencional sobre la línea de transmisión

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

LT Uberaba - Posto Fiscal, con el fin de comparar respuestas. En la Fig. 5 se puede observar al transformador.



Figura 5: Vista del TC Óptico (izquierda) y su tablero de conexionado en el patio de la Subestación Uberaba 230 kV (derecha) [7]

La experiencia relatada por los técnicos de COPEL con respecto al TC [7]:

- Las respuestas a perturbaciones en la línea fueron de igual precisión en el TC Óptico y el TC convencional.
- No se registraron fallas en el equipamiento.
- Se colocó un módulo sensor en el campo y no se verificaron variaciones en la medición por efecto de onda electromagnética al abrir y cerrar seccionadores o interruptores.

4. ANÁLISIS FODA

Se realizó un análisis de Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas (FODA), para determinar el punto donde se encuentra el TC Óptico estudiado para el sistema eléctrico paraguayo. Para ello se dispusieron de sentencias con pesos específicos con relación al equipo. A cada factor se les asignaron 10 sentencias y se calificaron según se ha evidenciado a lo largo del trabajo de investigación. Con este método se ha logrado procesar de forma numérica y obtener resultados para la matriz FODA. Los resultados se muestran en la Fig. 6.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELÉCTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

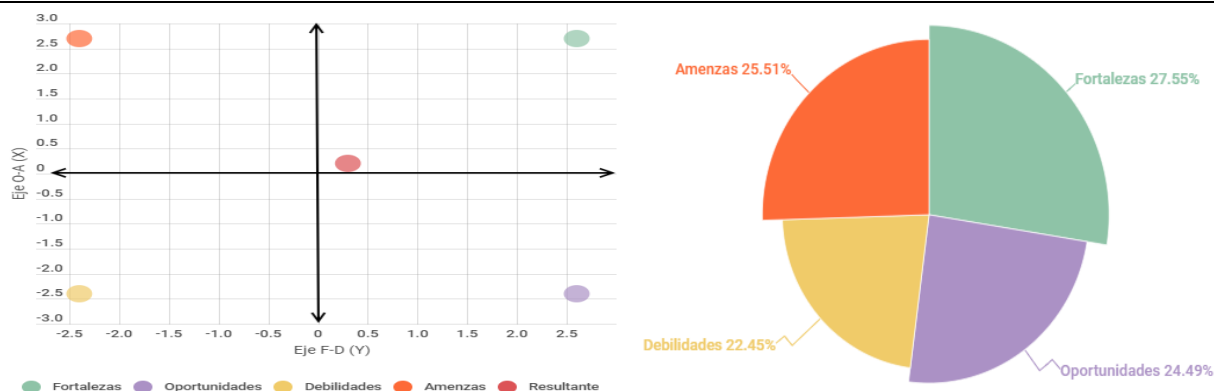


Figura 6: Resultados del análisis FODA

El resultado del FODA ha determinado de que las sentencias se encuentran en el cuadrante Fortaleza/Oportunidad (FO). Por lo tanto, con esto se demuestra de que existe una buena oportunidad para la utilización de los TC Ópticos en el sistema eléctrico paraguayo. Este análisis no es concluyente para su implementación final, es decir, se evidencia de que existe un equipo de medición, con numerosas ventajas y pocas desventajas, que puede ser aplicado al SEP del Paraguay, en particular en LTs de 220 kV.

5. CASO DE ESTUDIO: LÍNEA DE TRANSMISIÓN REGIÓN ESTE EN 220 KV

Como caso de estudio se tomó una Línea de Transmisión (LT), Región Este 220 kV, en operación dentro del Sistema Eléctrico de Potencia del Paraguay, y se realizó el análisis de las anomalías e intervenciones para el mantenimiento en los TC convencionales a aceite dieléctrico que se encuentran instalados en dicha LT. En la Tabla I se puede observar el resumen de horas de desconexión de la LT que causaron los mantenimientos en los TC a aceite.

Tabla I: Resumen de horas para intervenciones de mantenimientos en la línea [8]

Resumen de horas de desconexión 2014 - 2020		
Anomalías	Duración (horas)	Observaciones
Sustitución de piezas	125 h	La pieza para sustituir con mayor frecuencia fueron las membranas del TC
Problemas derivados de aceite	55,5 h	Pérdidas por tornillos y estructura
Otros	11,5 h	Asociados a presencia de nidos de aves y puntos calientes

Considerando las desconexiones y los gastos en mano de obra y piezas de reposición, más el aceite repuesto en los casos de pérdida, se estima que para el periodo 2014 - 2020, el gasto en mantenimiento y energía cesante (energía que no fue vendida a través de la LT durante la desconexión) fue de: 2.881.622 USD.

5.1. Análisis económico para aplicación de TC Óptico en LT Región Este 220 kV

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

Conforme el diseño de ingeniería propuesto en la investigación y considerando las desconexiones y gastos en mantenimientos que han causado los TC a aceite en la línea de transmisión se ha estimado el costo y realizado el análisis de factibilidad del nuevo sistema de medición que tendrá la línea. Los resultados fueron:

- Análisis del Valor Actual Neto: 53.886 USD positivo.
- Análisis de la Tasa Interna de Retorno: 3%.

6. CONCLUSIONES

El uso de los TC Ópticos podría ayudar a reducir riesgos operacionales, tiempos y costos en mantenimientos en las Subestaciones Eléctricas.

Conforme al análisis FODA realizado, el TC Óptico está en el cuadrante de F/O, coordenadas (0,2;0,3) del plano cartesiano resultante. Por lo tanto, el equipo analizado presenta ventajas y beneficios positivos para futuros proyectos.

Para una propuesta de implementación conforme al caso de estudio, según el análisis económico, es factible, con un VAN positivo igual a 53.886 USD y una TIR positiva igual a 3%.

Finalmente, por más de que se haya demostrado las ventajas de los TC Ópticos para las empresas eléctricas, también en la operación del mismo y el cuidado con relación al medio ambiente, su posible utilización está vinculada a las políticas de cada empresa eléctrica y, además, a la cierta resistencia existente con relación a la migración hacia nuevas tecnologías. Este trabajo propone que la posible implementación de los TC Ópticos, primeramente, sea desarrollada como un prototipo dentro del SEP de Paraguay.

7. RECOMENDACIONES

- En la comunidad educativa se debe de investigar aún más sobre fenómenos físicos y sus aplicaciones a las ingenierías de diseño de equipamientos en especial para aplicación a los sistemas eléctricos.
- Para investigadores y empresas eléctricas involucradas, se pueden realizar nuevos estudios económicos y técnicos para la aplicación a proyectos eléctricos de expansión o Retrofits de sistemas nuevos (nuevas líneas de transmisión de energía o subestaciones) o como alternativa para sistemas que requieran actualización tecnológica, dentro del SEP de Paraguay.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

8. BIBLIOGRAFIA

- [1] Informe sobre práctica de laboratorio de Ley de Malus y Efecto Faraday. **Facultad Politécnica – Universidad Nacional de Asunción**, Paraguay, 2.019, páginas 1-4.
- [2] Eugene Hetch. **Óptica**. Editora Addison Wesley Iberoamericana, 2.000, páginas 324-336.
- [3] Peter Rush. **Protecao e automacao de redes**. Editora Edgard Blucher Ltda, 2.011, páginas 92-96.
- [4] General Electric Inc., “CMO/CTO/VTO Technology”. **Conferencia con autores**. Mayo, 2.020, páginas 2-9.
- [5] ABB Group. “ABB Retrofits & Subestaciones Digitales”. Setiembre, 2.018, páginas 2-6.
- [6]. Pedro Alberto da Silva Jorge. **Sensores Ópticos para Medição de Corrente Eléctrica em Alta-tensão**. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, 2.001, páginas 1-36.
- [7] Policarpo Uliana, Tractebel. “TECO-MR 550 kV – Transformador de corrente óptico de até 550 kV com medição”. **XXV SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**. 2.019, páginas 1-9.
- [8] Sistema de Mantenimiento Aperiódico (SMA), Itaipu Binacional.