

Evaluación del modelo óptico propuesto para la representación de un transformador de corriente óptico.

Evaluation of the proposed optical model for the representation of an optical current transformer.

Díaz, Valentina^{1*}; Dávila, Marisol¹; Cano, Camilo².

¹ Escuela de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.

² Grupo de Investigación en Electrónica de Altas Frecuencias y Telecomunicaciones – CMUN, Ingeniería Electrónica, Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá.

*vdiazp@unal.edu.co

Resumen

Un transformador de corriente óptico (TCO) tiene la capacidad de medir las intensidades de corriente de la red del sistema de potencia con gran exactitud, este equipo es capaz de medir correctamente, inclusive si estos se encuentran sometidos a una condición de falla o saturación por corrientes elevadas, debido a los principios que rigen su funcionamiento y a su composición interna, pues no son afectados por las interferencias electromagnéticas. Para su construcción se utilizan materiales no magnéticos, como lo es un material electro-óptico atravesado por una fibra óptica en lugar de un núcleo ferromagnético. Con el fin de evaluar el comportamiento óptico de este equipo, en el presente trabajo se propone modelar y simular un sistema óptico en configuración interferómetro de Mach-Zehnder que permita medir el efecto de la corriente en el sensor de fibra óptica, para ello se realizó una revisión del estado del arte con el fin de determinar el funcionamiento de un TCO, las ventajas que éste tiene sobre uno transformador de corriente convencional, así como plantear un modelo que permita obtener la caracterización del sistema. Este modelo plantea variar a nivel de código los parámetros de configuración del láser emisor y los interferómetros según corresponda, utilizando el software computacional MATLAB®. A partir de las simulaciones se lograron resultados que permitieron evaluar la respuesta de los interferómetros para los diferentes parámetros y casos simulados, siendo éstos satisfactorios al compararlos con aquellos tomados como referencia.

Palabras clave: Transformador de corriente óptico, Interferómetro de Mach-Zehnder, Sensor, MATLAB®.

Abstract

An optical current transformer (OCT) has the ability to measure the current intensity of the power system network with great accuracy, this equipment is capable of measuring correctly, even if they are subject to a fault or saturation condition due to high currents, due to the principles that govern their operation and their internal composition, since they are not affected by electromagnetic interference. Non-magnetic materials are used for its construction, such as an electro-optical material crossed by an optical fiber instead of a ferromagnetic core. In order to evaluate the optical behavior of this equipment, in the present work it is proposed to model and simulate an optical system in a Mach-Zehnder interferometer configuration that allows to measure the effect of the current in the fiber optic sensor, for this purpose a review of the state of the art has been done in order to determine the operation of a TCO, the advantages that it has over a conventional current transformer, as well as propose a model that allows obtaining the characterization of the system. This model proposes to vary at code level the configuration parameters of the emitting laser and the interferometers as appropriate, using the MATLAB® computational software. From the simulations, results were obtained that allowed evaluating the response of the interferometers for the different parameters and simulated cases, these being satisfactory when compared with those taken as reference.

Keywords: Optical current transformer, Mach-Zehnder interferometer, Sensor, MATLAB®.

1. Introducción

En un sistema de potencia es de suma importancia asegurar que los equipos instalados operen en condiciones óptimas, especialmente aquellos destinados a proteger dichos sistemas, dado que ellos deben trabajar adecuadamente tanto en condiciones normales como al momento de presentarse una falla o alguna perturbación en la red, de modo que detecte cualquier anomalía en el menor tiempo y mitigue en lo posible los efectos que estas fallas pudieran causar.

La implementación de nuevas tecnologías en los sistemas de potencia de alta tensión ha generado un impacto positivo sobre los sistemas de medición, control y protección, una de ellas es la utilización de los transformadores de corriente ópticos (TCO) empleados en aplicaciones para los sistemas de protección, los cuales han sustituido a los transformadores de corriente convencionales, con el fin de aprovechar los grandes beneficios que aportan dichos equipos.

Los transformadores de corriente ópticos permiten monitorear adecuadamente todo lo que ocurre en el sistema y debido a sus características intrínsecas son capaces de evitar el efecto de perturbaciones externas, que puedan afectar las mediciones, como por ejemplo las interferencias electromagnéticas y los posibles efectos de saturación que pudieran aparecer en los dispositivos magnéticos cuando se presentan fallas en el sistema por elevadas corrientes de cortocircuito.

Además de evitar la interferencia electromagnética, los transformadores de corriente ópticos poseen una alta sensibilidad y precisión en las medidas, también cuentan con un amplio ancho de banda, lo cual aporta la posibilidad de realizar mediciones en distintos rangos de frecuencia, en señales AC y DC. Poseen un aislamiento elevado y bajas pérdidas de transmisión. Así mismo, sus dimensiones son más reducidas en comparación a uno convencional al igual que su peso, lo cual es una ventaja al momento de realizar la instalación.

Considerando las grandes ventajas que presentan estos equipos es importante evaluar su comportamiento a través del modelado y simulación de los mismos para de esa manera poder conocer con más detalle su funcionamiento, particularmente su comportamiento óptico, por tal razón, en este trabajo se propone modelar y simular el sistema óptico utilizando una configuración interferómetro de Mach-Zehnder lo cual permitirá medir el efecto de la corriente en el sensor de fibra óptica.

Esta configuración de interferómetro permite evaluar las variaciones que se pueden presentar en el patrón de interferencia Φ cuando alguno de los parámetros relacionados a la propagación de la señal óptica cambia, como por ejemplo el índice de refracción, la velocidad de

propagación de la señal, o la longitud del trayecto de propagación, los cuales son parámetros que varían cuando un campo electromagnético externo afecta un material con características electro-ópticas lo que permite validar el funcionamiento correcto del modelo propuesto para el sensor óptico.

2. El modelo óptico del transformador de corriente óptico

Durante los últimos años las comunicaciones ópticas han formado parte de los elementos principales que componen un sistema de potencia. Los transformadores de corriente ópticos son uno de estos elementos que en la actualidad han sido implementados en las subestaciones para alimentar los equipos de protección, medición y control, y su función es el constante registro de los niveles de corriente de la red eléctrica, lo que permite que las protecciones alimentadas por él detecten cuando se presente una falla y actúen de manera inmediata.

El principio de funcionamiento de este dispositivo se basa en el Efecto de Faraday, el cual describe la relación entre una señal luminosa y un campo magnético aplicado. A través de este método se puede calcular la corriente que circula por un conductor, la cual origina dicho campo magnético.

Para poder llevar a cabo la medición es necesario aplicar una señal luminosa en la entrada, la cual se verá afectada por el campo magnético, provocando un cambio en el plano de polarización de la misma. Consecuentemente, se obtiene un desfase en el ángulo Φ de la señal luminosa, como se muestra en la figura 1 (Dávila, M., 2011).

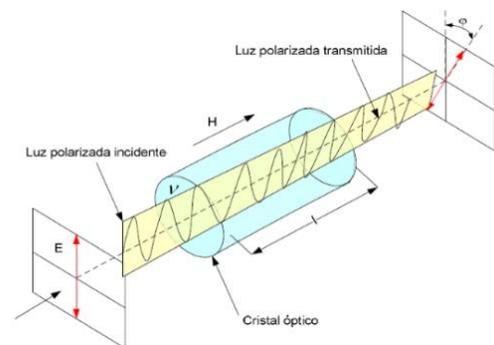


Figura 1. Efecto Faraday en un cristal óptico (Dávila, M., 2011).

Posteriormente, luego de obtener el cambio en la polarización de la luz o desfase Φ a través de la implementación de un diseño interferométrico, se aplica el principio de la Ley de Ampere, la cual muestra la relación directa entre el campo magnético y la corriente que circula a través de una trayectoria cerrada.

Un transformador de corriente óptico (TCO) está compuesto de varios elementos que se estructuran en tres etapas:

La primera etapa se caracteriza por una fuente sintonizable de señal óptica, por ejemplo, un láser de onda continua con potencia, ancho de banda y longitud de onda definida. Esta fuente es la encargada de enviar la señal luminosa a la entrada del TCO la cual viaja a través de la fibra óptica.

La segunda etapa corresponde al sensado óptico del TCO y en este trabajo se implementa a través de la configuración de un interferómetro de Mach-Zehnder. El uso de interferómetros permite calcular el patrón de interferencia que determina la variación relativa entre las fases de dos caminos de luz paralelos entre sí, con el fin de medir el efecto de la corriente en la fase óptica a la salida de los interferómetros.

En la última etapa, se tiene un dispositivo fotodetector, encargado de capturar los cambios en la señal del dominio óptico y llevarlos al dominio eléctrico.

En la figura 2 se muestra el diagrama de bloques básico que conforma el modelo óptico del TCO.

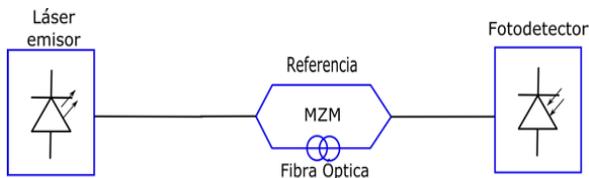


Figura 2. Diagrama de bloques del modelo óptico del TCO.

2.1 Interferómetro Mach-Zehnder

En esta configuración el camino óptico está definido por un sensor de fibra óptica y un dispositivo bajo a prueba alrededor del conductor como se muestra en la figura 3, donde se considera una configuración interferométrica.

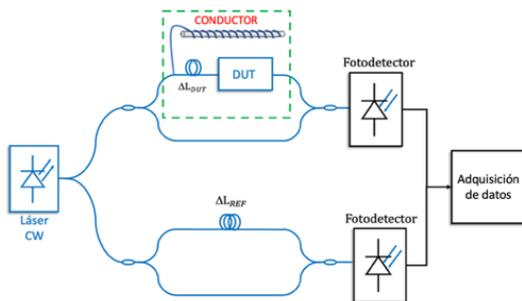


Figura 3. Modelo del TCO en configuración Interferómetro Mac-Zehnder.

Su funcionamiento consiste en implementar dos caminos de señal para determinar la variación relativa entre las fases de dos caminos de luz paralelos entre sí. Este tipo de

interferómetros se clasifican en balanceado y desbalanceado, su diferencia radica en que, para el primer caso, la longitud de los caminos es la misma, mientras en el desbalanceado la longitud entre un camino y otro es diferente presentándose un diferencial de longitud ΔL .

El interferómetro está conformado por dos caminos de señal, una de las ramas se mantiene libre y es por donde viaja la señal de referencia de fase Φ_1 , mientras por la otra rama la señal viaja a través de un camino óptico, la cual es sometida a la influencia de un campo electromagnético externo, es decir que esta rama funciona como un sensor que interactúa con el exterior, lo cual provoca una variación en la fase Φ_2 .

Seguidamente estas señales se suman obteniendo el patrón de interferencia, arrojando una señal en la salida la cual muestra el desfase entre Φ_1 y Φ_2 .

La diferencia de fase que se obtiene se puede interpretar a través de los cambios en el índice de refracción del camino óptico del interferómetro cuando este se somete a una perturbación externa, lo que conlleva a que la velocidad del medio óptico cambie (ecuación 1), por lo tanto, la señal tarda más o menos tiempo propagándose a través de la fibra óptica.

Al variar la longitud de uno de los caminos del interferómetro, se encuentra una variación directa con respecto al tiempo y la frecuencia de la señal, lo que finalmente significa variación en el patrón de interferencia.

La longitud del camino está dada por (Cano, C.,2018):

$$x = v \cdot t \quad (1)$$

La relación de la señal de salida del Interferómetro de Mach-Zehnder con respecto a los retardos entre las fases y la señal de entrada, responde a la siguiente ecuación (Cano, C.,2018):

$$E_o(t) = \frac{1}{2} (e^{j\Phi_1} + e^{j\Phi_2}) \cdot E_i(t) \quad (2)$$

Donde:

$E_i(t)$: Campo eléctrico de entrada

$E_o(t)$: Campo eléctrico de salida

En este trabajo se plantea evaluar el modelo óptico del sistema de medición de un transformador de corriente óptico, a través de simulaciones implementadas con un paquete computacional adecuado.

3. Modelo y simulación del transformador de corriente óptico

En esta sección se presenta el modelo y la configuración propuesta para desarrollar la simulación de cada uno de los componentes de la etapa de sensado del transformador de corriente óptico a través del apoyo de un paquete computacional, herramientas y funciones que brinda el software MATLAB®, con el fin de comprender su respuesta y poder caracterizar el modelo propuesto.

Se definen los parámetros necesarios, donde parte de ellos y el código implementado para modelar el TCO han sido tomados de estudios previos y aportes de otros autores, sin embargo, se han realizado adaptaciones según la configuración y caracterización necesaria de algunos elementos específicos con el fin de demostrar el funcionamiento del código a nivel de simulación (Bru, L., 2022).

3.1 Interferometría Óptica en el Dominio de la Frecuencia

El modelo propuesto se basa en un sistema de medida a través de la técnica llamada Interferometría Óptica en el Dominio de la Frecuencia (*Optical Frequency Domain Interferometry*) el cual por sus siglas en inglés se define como OFDI. Esta es una técnica de barrido de longitud de onda donde se utiliza una fuente óptica sintonizable con un ancho de banda y longitud de onda central definido (Bru, L., 2022).

La configuración de este OFDI se caracteriza por la implementación de dos interferómetros Mach-Zehnder para adquirir la fase óptica de la señal, los cuales se denominan dispositivo bajo prueba o según sus siglas en inglés DUT “*Device Under Test*”, mientras al otro se le llama interferómetro de referencia como se ilustra en la figura 4.

A través del código que se implementa en MATLAB® se encuentra la respuesta para cada uno de los interferómetros, donde cada receptor responde a una corriente fotodetectada proporcional a la envolvente de la intensidad del campo eléctrico $I = |E|^2$ (Bru, L., 2022).

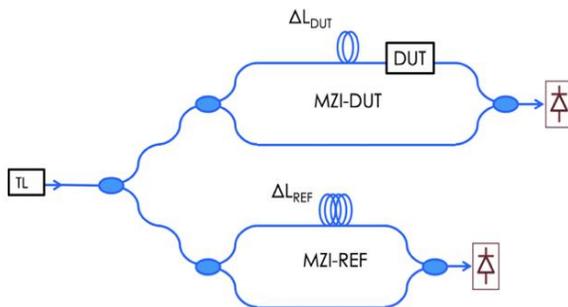


Figura 4. Diagrama del modelo OFDI (Bru, L., 2022).

Por lo tanto, para el interferómetro de referencia se tiene una

respuesta denominada I_{ref} y viene definida por la siguiente ecuación.

$$I_{ref} = (1 + e^{(j*\beta_{1wg}*\Delta L_{ref})})^2 \quad (3)$$

Para el interferómetro de referencia en la ecuación (3) se tiene una respuesta del tipo interferómetro de Mach-Zehnder, y por construcción para este tipo de configuración se considera que una de las ramas del interferómetro se mantiene libre, mientras la otra está sometida a perturbaciones externas las cuales generan un cambio en el patrón de interferencia relacionado a la propagación de la señal (Bru, L., 2022):

$$\Phi = \beta_{1wg} \cdot \Delta L \quad (4)$$

Es decir, que el patrón de interferencia del interferómetro se puede generar de diferentes maneras, una de ellas es variando la longitud del enlace del camino óptico ΔL_{ref} , o de forma alternativa variando el índice de refracción de grupo n_g a través de β_{1wg} .

Mientras, para el interferómetro del dispositivo bajo prueba se tiene una respuesta denominada I_{DUT} y viene definida por la siguiente ecuación (Bru, L., 2022):

$$I_{DUT} = (1 + H_{DUT} \cdot e^{(j*\beta_{1wg}*\Delta L_{DUT})})^2 \quad (5)$$

En el modelo propuesto de OFDI durante el barrido de longitud de onda, el patrón de interferencia es capturado por un fotodetector, que debe ser lo suficientemente rápido para captar la fotocorriente y como consecuencia generar las trazas del patrón de interferencia las cuales dependen de la velocidad del láser y de la separación en frecuencia Δf entre dos oscilaciones consecutivas (FSR) y se puede calcular tanto en unidades de longitud como en Hz (Kucuksari,S., 2010).

$$FSR_{[m]} = \frac{\lambda^2}{n_g * \Delta L} \quad (6)$$

$$FSR_{[Hz]} = \frac{c}{n_g * \Delta L} \quad (7)$$

Del código estudiado e implementado en MATLAB® se conoce que el interferómetro de referencia aporta los puntos necesarios para muestrear al interferómetro del dispositivo bajo prueba DUT, así como a su vez se utiliza para corregir las no linealidades de fase que ocurren durante el barrido de longitud de onda a causa del láser.

Por lo tanto, el interferómetro de referencia es esencial para construir, compensar y obtener la respuesta linealizada en frecuencia del DUT, la cual es una respuesta senoidal modulada por la función de transferencia de longitud de onda del interferómetro del dispositivo bajo prueba.

Para lograr una buena reconstrucción de la señal del DUT a partir del interferómetro de referencia, se debe cumplir el teorema de Nyquist donde $\Delta L_{ref} \geq 2\Delta L_{DUT}$.

La adquisición de datos de la respuesta linealizada del dispositivo bajo prueba se lleva a cabo con el fin de digitalizar la señal de fotocorriente. Es allí donde se procesan los datos y se obtiene una respuesta en el dominio de la frecuencia, sin embargo, con el fin de conocer la respuesta temporal del DUT y las contribuciones temporales representadas en picos de amplitud el algoritmo de la transformada de Fourier es implementado a nivel de código para así poder transformar los datos de un dominio a otro y realizar su interpretación.

3.2 Simulación del interferómetro de referencia

Estas simulaciones se realizan para demostrar como varía la respuesta fotodetectada de I_{ref} en la salida del interferómetro de referencia del interferómetro al modificar alguno de sus parámetros de propagación por ejemplo la longitud del enlace del camino óptico ΔL_{ref} .

a. Respuesta de I_{ref} variando ΔL_{ref}

Parámetros del láser:

| | |
|----------------------------------|------------------------------------|
| $c = 3 \times 10^8 \frac{m}{s}$ | Velocidad de la luz |
| $\lambda = 1550 \text{ nm}$ | Longitud de onda central del laser |
| $\Delta\lambda = 100 \text{ nm}$ | Span |
| $\Delta\nu = 12.50 \text{ THz}$ | Ancho de banda de frecuencia |

Parámetros interferómetro de referencia (Señal roja):

| | |
|----------------------------------|--|
| $n_{g_{ofdr}} = 1.4682$ | Índice de refracción de grupo para una fibra óptica. |
| $\Delta L_{ref} = 16 \text{ mm}$ | Longitud del camino óptico del interferómetro |

Parámetros interferómetro de referencia (Señal azul):

| | |
|----------------------------------|---|
| $n_{g_{ofdr}} = 1.4682$ | Índice de refracción de grupo para una fibra óptica |
| $\Delta L_{ref} = 20 \text{ mm}$ | Longitud del camino óptico del interferómetro |

En la figura 5 se muestra la comparación entre la respuesta del interferómetro de referencia para $\Delta L_{ref} = 16 \text{ mm}$ (trazo rojo) y $\Delta L_{ref} = 20 \text{ mm}$ (trazo azul), de esta manera se valida como la respuesta del interferómetro I_{ref} cambia su periodicidad cuando se varía la longitud del camino óptico

del interferómetro.

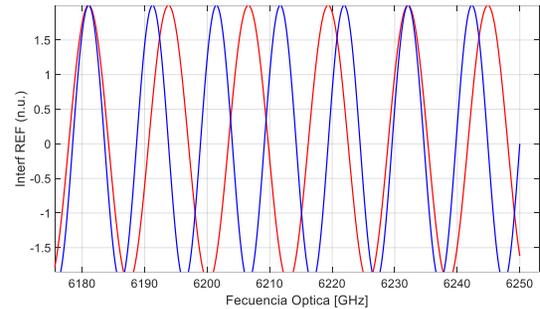


Figura 5. Comparación Respuesta variando ΔL_{ref} .

La respuesta de la señal en rojo tiene una amplitud normalizada con una frecuencia de modulación de la señal de 12.75 GHz para un periodo T de aproximadamente 78.62 ps. Mientras que la señal en azul tiene un periodo T de 98.04 ps lo cual corresponde a una frecuencia de 10.20 GHz. Por lo tanto, la periodicidad de la señal aumenta a medida que aumenta el ΔL_{ref} .

b. Respuesta de I_{ref} variando ΔL_{ref}

En esta simulación se aplica la segunda alternativa descrita que permite cambiar el patrón de interferencia del interferómetro a través de $n_{g_{ofdr}}$ y comparar su respuesta con la del caso a. Para esta simulación se van a mantener los mismos parámetros descritos para el láser, mientras que el índice de refracción de grupo $n_{g_{ofdr}}$ se incrementa de 1.4682 a 1.7 manteniendo $\Delta L_{ref} = 16 \text{ mm}$.

En la figura 6 se muestra la respuesta del interferómetro de referencia para $n_{g_{ofdr}} = 1.4682$ (trazo rojo) y para $n_{g_{ofdr}} = 1.70$ (trazo azul), de esta manera se valida como la respuesta del interferómetro I_{ref} cambia su patrón de interferencia cuando se varía el índice de refracción de grupo, así como la periodicidad de la señal aumenta a medida que se incrementa el mismo.

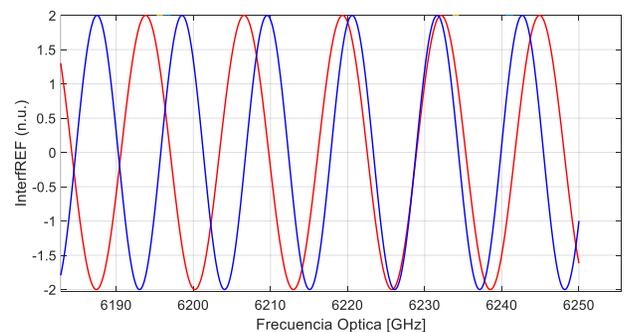


Figura 6 Comparación respuesta variando n_g .

3.3 Simulaciones del interferómetro de referencia y dispositivo bajo prueba.

En esta sección se realizan las simulaciones para representar la respuesta fotodetectada I_{ref} e I_{DUT} de los interferómetros, las cuales se modelan a través de una fibra óptica cuyos parámetros se configuran en el código de MATLAB®.

Para esta simulación se van a mantener los mismos parámetros descritos para el láser mientras para el interferómetro serán los siguientes:

Parámetros del interferómetro de referencia

$n_{g_{ofdr}} = 1.4682$ Índice de refracción de grupo para una fibra óptica
 $\Delta L_{ref} = 16$ mm Longitud del camino óptico del interferómetro

Parámetros del interferómetro del dispositivo bajo prueba

$n_{g_{DUT}} = 1.4682$ Índice de refracción de grupo para una fibra óptica
 $\Delta L_{DUT} = 4$ mm Longitud del camino óptico del interferómetro DUT

La traza azul de la figura 7 corresponde a la respuesta del interferómetro del dispositivo bajo prueba, que en este caso se simula como una fibra óptica, mientras la traza roja corresponde a la respuesta del interferómetro de referencia. Se ilustra lo descrito anteriormente, donde cada uno de los cruces por cero del interferómetro de referencia arroja los puntos donde se debe muestrear la respuesta del DUT.

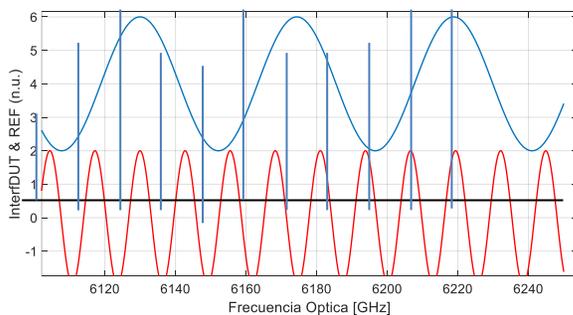


Figura 7. Cruces por cero de I_{ref} .

Además, se observa como dentro de un período, de I_{DUT} hay aproximadamente cuatro periodos de la señal I_{ref} , lo cual se configura a través del parámetro ΔL_{ref} el cual es cuatro veces mayor que ΔL_{DUT} , por lo tanto se cumplen el teorema del criterio de Nyquist.

El FSR se calcula con el fin de conocer la medida de cuantas veces o que tan rápido cruza por cero cada una de las señales.

$$FSR_{ref[m]} = \frac{\lambda^2}{n_{g_{ofdr}} \Delta L_{ref}} = 102.27 \text{ pm.}$$

$$FSR_{DUT[m]} = \frac{\lambda^2}{n_{g_{DUT}} \Delta L_{DUT}} = 409.09 \text{ pm.}$$

El $FSR_{ref[m]}$ es menor con respecto al del DUT lo que significa que se debe muestrear más fino, y sus cortes por cero darán los puntos donde muestrear el interferograma del dispositivo bajo prueba para recuperar una señal corregida de las no linealidades que pudieron aparecer en el barrido de frecuencia del láser.

3.4 Simulaciones del interferómetro de referencia y dispositivo bajo prueba utilizando un cristal de niobato de litio

En esta sección se desarrollan las simulaciones necesarias para representar el modelo OFDI propuesto ilustrado en la figura 8, donde el dispositivo bajo prueba "DUT" utilizado es un cristal de niobato de litio de longitud L , para el cual la respuesta de la función de transferencia de transmitancia óptica varía cuando un campo eléctrico externo afecta el cristal. Se propone la implementación de este cristal ya que el mismo permite evaluar el efecto que tiene un campo eléctrico externo sobre este cristal, el cual está hecho de un material dieléctrico con propiedades electro-ópticas.

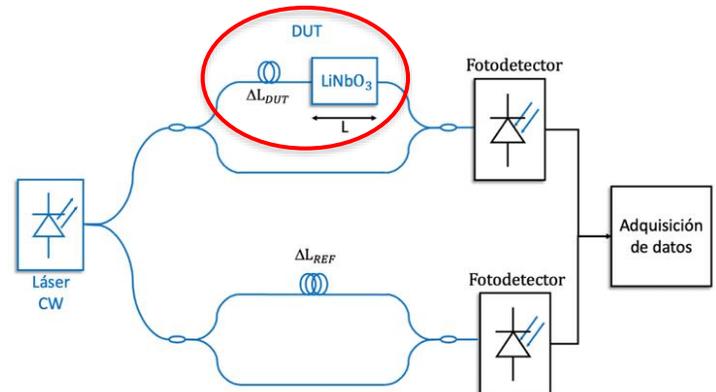


Figura 8. Montaje modelo óptico propuesto con cristal LiNbO_3 .

A partir de la teoría electromagnética, se conoce que la corriente que circula por las líneas de alta tensión de una subestación tiene una relación directa entre el campo magnético y eléctrico que se genera en las mismas.

Por lo tanto, para poder interpretar el modelo óptico de un transformador de corriente utilizando este dispositivo bajo prueba se consideran los campos eléctricos típicos en

promedio a los que se ven sometidas las líneas de alta tensión en las diferentes áreas de una subestación los cuales están dentro del rango de $(0 - 25) \frac{\text{kV}}{\text{m}}$ (Okrainskaya y col., 2002), (Nikolovski y col., 2010).

Poder caracterizar el efecto que tiene el campo eléctrico sobre el cristal de niobato de litio es fundamental y permite obtener la respuesta a la función de transferencia óptica de transmitancia $T(E_2)$, la cual responde a la medida de potencia que se transmite desde la fuente óptica al atravesar el material dependiendo del campo eléctrico que lo afecte y se representa en términos de amplitud, además esta función de transferencia determina los rangos en que el campo eléctrico puede ser linealmente sentido y medido (Gutiérrez y col., 2011).

En la figura 9 se ilustra el comportamiento de los campos eléctricos E_1 y E_2 en los medios correspondientes, el cual se modela a través de la teoría de campos en placas paralelas.

El campo eléctrico externo E_1 corresponde al campo eléctrico que se genera en las líneas de alta tensión en un medio con $\epsilon_{raire} = 1$, el cual es perpendicular a la superficie del cristal. Cuando E_1 atraviesa un medio diferente $\epsilon_{rLiNbO_3} = 35$ como el cristal de niobato de litio su valor cambia a un campo eléctrico menor E_2 . Considerando condiciones de contorno entre los medios y los campos eléctricos se tiene que:

$$\epsilon_{raire} \cdot E_1 = \epsilon_{rLiNbO_3} \cdot E_2 \quad (8)$$

Por lo tanto, de la ecuación 8 se encuentra que el campo que atraviesa el cristal E_2 viene dado por:

$$E_2 = \frac{E_1 \cdot \epsilon_{raire}}{\epsilon_{rLiNbO_3}} = \frac{E_1}{35}$$

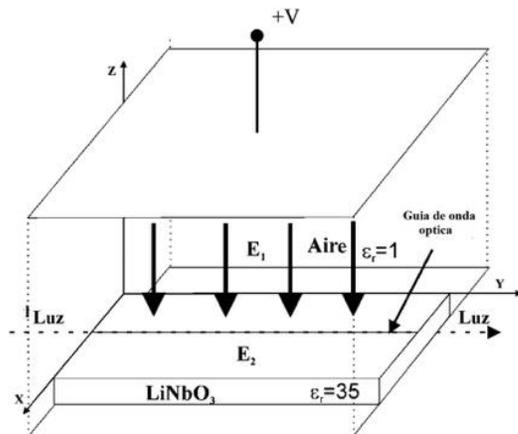


Figura 9. Efecto del campo eléctrico sobre el cristal de LiNbO_3 (Gutiérrez y col., 2011).

La respuesta de la función de transferencia de la

transmitancia viene dada por (Gutiérrez y col., 2011):

$$T(E_2) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos\left(\phi_0 - \pi \frac{E_2}{E_\pi}\right) \quad (9)$$

El ángulo ϕ_0 corresponde a la fase óptica que se introduce entre la entrada y salida del cristal al propagarse la señal óptica dentro del mismo considerando la longitud del cristal, cuando no hay un campo externo afectándolo, su ecuación se define como:

$$\phi_0 = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot (n_o - n_e) \cdot L \quad (10)$$

Por otro lado, la variable E_π se define como el campo eléctrico en V/m necesario para generar un cambio en la salida óptica de la función de transferencia $T(E_2)$ del sistema entre un máximo y un mínimo, y responde a la siguiente ecuación:

$$E_\pi = \frac{\lambda}{(r_{33} \cdot n_e^3 \cdot \Gamma_{TM} - r_{13} \cdot n_o^3 \cdot \Gamma_{TE}) \cdot L} \quad (11)$$

Parámetros de simulación

Se considera para las simulaciones el rango de campos eléctricos externos E_1 entre $(0 - 25) \frac{\text{kV}}{\text{m}}$, por lo tanto E_π se fija en $\frac{25}{\epsilon_{rLiNbO_3}} \frac{\text{kV}}{\text{m}}$.

Despejando la longitud del cristal de la ecuación 10 se encuentra que L corresponde aproximadamente a 6.08 m. A través de la ecuación 10 se calcula ϕ_0 y se encuentra un valor de aproximadamente 1.45×10^6 rad.

Conociendo todos los parámetros necesarios para calcular la transmitancia óptica, se procede a graficar la respuesta de la función de transferencia de transmitancia para las condiciones descritas.

En la figura 10 se ilustra la respuesta de la transmitancia óptica, la cual es una función senoidal-cosenoidal que varía entre un valor máximo y mínimo de amplitud según el campo eléctrico E_1 que afecta al cristal. Además, la distancia entre el máximo y mínimo de potencia transmitida corresponde a E_π .

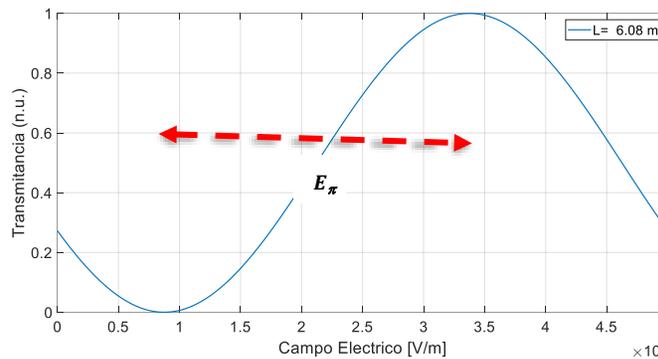


Figura 10. Respuesta de transmitancia para $L=6.08$ m.

Con el fin de mostrar la dependencia del período de la respuesta de transmitancia con respecto a la longitud del cristal, se graficó su respuesta utilizando dos longitudes diferentes a la propuesta inicialmente de 6.08 metros.

En la figura 11 se ilustra la respuesta para cada una de las longitudes simuladas, la traza en color azul corresponde a la respuesta para $L=6.08$ m, la traza en rojo corresponde a la respuesta para $L=10$ m, mientras la respuesta en verde corresponde cuando $L=4$ m.

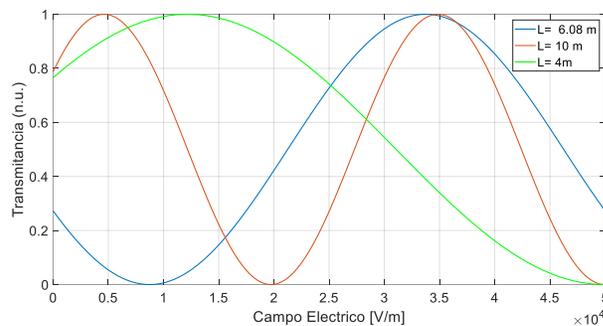


Figura 11. Respuesta de transmitancia para diferentes longitudes del cristal.

La figura 12 ilustra la respuesta del interferómetro DUT (traza azul), y el interferómetro de referencia (traza roja), cuando se considera el efecto de la transmitancia asociada a la respuesta I_{DUT} .

La cual para este caso corresponde al valor máximo de transmitancia es decir igual a 1, para un campo eléctrico E_1 de $33.70 \frac{kV}{m}$. Se encuentra entonces que la amplitud pico a pico de la respuesta de I_{DUT} es 4.

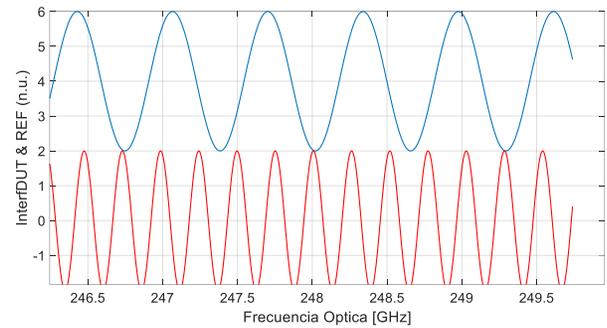


Figura 12. Respuesta de I_{DUT} e I_{ref} para transmitancia igual a 1.

Con el fin de mostrar la respuesta de como varía la amplitud de la señal dependiendo de la transmitancia se ilustra la figura 13, la traza azul corresponde a la transmitancia máxima igual a 1, la traza verde a la transmitancia de 0.50 y la fucsia a una transmitancia de 0.05.

Se encuentra que a mayor transmitancia mayor es la amplitud de I_{DUT} . Por lo tanto, la amplitud o potencia en la salida del interferómetro DUT, cambia con respecto al campo eléctrico que afecta el dispositivo bajo prueba.

La transmitancia entonces es el resultado del cambio en el patrón de interferencia propio por la propagación de la señal dentro del cristal, el cual está definido por la propagación y el índice de refracción.

Por lo tanto, la salida de la función de transferencia del interferómetro DUT, va a estar cambiando su amplitud (sufriendo atenuación) por el efecto del campo eléctrico. Presentándose una mayor amplitud cuando la transmitancia sea mayor.

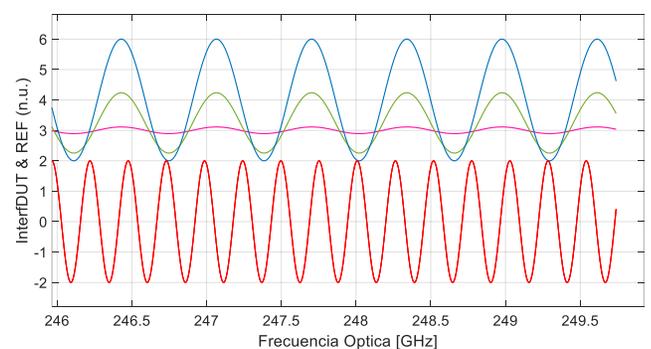


Figura 13. Respuesta de I_{DUT} e I_{ref} para diferentes valores de transmitancia.

De acuerdo con los resultados obtenidos el valor de transmitancia máximo se encuentra cuando el campo eléctrico E_1 es superior a $25 \frac{kV}{m}$. Considerando que el rango de medición lineal del campo eléctrico E_1 se fijó entre $(0-25) \frac{kV}{m}$, ya que estos son los valores promedio de campos

eléctricos que se miden en las líneas de alta tensión de una subestación, se encuentra que realmente la transmitancia máxima que el modelo propuesto es capaz de medir corresponde aproximadamente a 0.7 para un campo externo E_1 máximo de $25 \frac{\text{kV}}{\text{m}}$.

Esto ocurre ya que el ángulo ϕ_0 el cual aporta la variación de fase cuando no hay campo externo aplicado resultó un valor muy elevado (1.45×10^6 rad), debido a la longitud del cristal de 6.08 m, haciendo que la respuesta de transmitancia máxima de 1 ocurra a un campo E_1 superior a $25 \frac{\text{kV}}{\text{m}}$.

3.5 Implementación de la transformada inversa de Fourier.

Durante la implementación del modelo OFDI en la simulación de software hay resultados que se presentan tanto en el dominio temporal, como en el dominio del espectro de frecuencia.

Con el fin de linealizar la respuesta y llevarla de un dominio a otro se utilizan las series de Fourier a través del algoritmo de la transformada rápida de Fourier.

La respuesta temporal del DUT obtenida a través del algoritmo de IFFT, permite conocer las implicaciones que existen en cada punto y como se reflejan entre un dominio y otro, de esta manera se obtienen las contribuciones temporales en términos de amplitud las cuales son consideradas para analizar las pérdidas que pueda tener la señal y se evalúan a través de comparar la amplitud entre un pico y otro.

Luego de encontrar la respuesta en el dominio del tiempo para algunos valores de transmitancia, en la figura 14 se ilustra el barrido de campo eléctrico E_1 total con su valor de pico máximo asociado a la magnitud de la respuesta en el dominio del tiempo, por ejemplo, para un valor de transmitancia 1, el pico de Fourier corresponde a 0.012 (-19.17 dB).

Por lo tanto, se muestra la proporcionalidad del campo eléctrico con respecto a la transmitancia, donde a medida que E_1 aumenta, la transmitancia (o amplitud) relacionada a la respuesta de I_{DUT} también aumenta, así mismo el pico correspondiente luego de aplicar la IFFT.

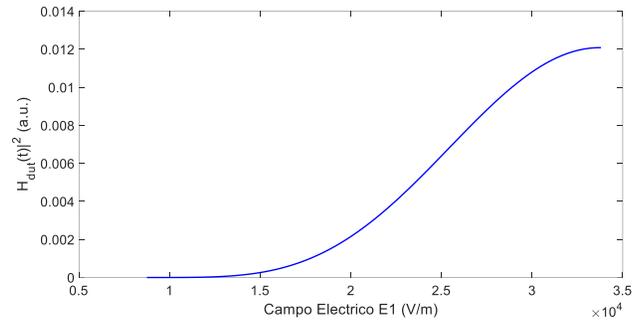


Figura 14. Variación de E_1 y su pico de Fourier máximo asociado.

La figura 15 ilustra la misma respuesta, pero representada en escala logarítmica expresada en dB, donde se comprueba que la salida de la amplitud del armónico del FSR varía con respecto al campo eléctrico.

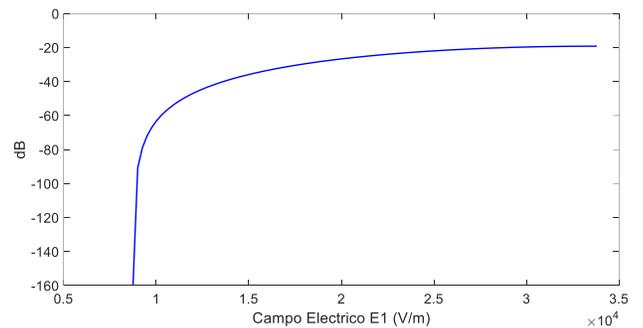


Figura 15. Variación de E_1 y su pico de Fourier máximo asociado en dB.

4. Conclusiones

A través de las simulaciones desarrolladas, a partir del modelo óptico planteado para un transformador de corriente utilizando herramientas de software como MATLAB®, se encuentran los resultados que validan el correcto funcionamiento del código en el simulador implementado.

Para el cual cada uno de los componentes que se proponen en el modelo como el láser, los caminos de los interferómetros, y dispositivo bajo prueba son definidos y caracterizados, con el fin de poder realizar cambios en sus parámetros que permitan simular diferentes escenarios.

Por medio de las simulaciones realizadas se demostró para cada uno de los casos, el funcionamiento del modelo propuesto OFDI, basado en interferómetros de Mach-Zehnder. Se evaluaron diferentes configuraciones, para conocer la respuesta individual del interferómetro de referencia y del interferómetro del dispositivo bajo prueba, encontrando que el patrón de interferencia Φ para cada una de sus salidas cambiaba, cuando alguno de los parámetros relacionados a la propagación de la señal óptica variaba por efecto de un campo eléctrico externo, como por ejemplo el índice de refracción, la velocidad de propagación de la señal,

o la longitud del trayecto de propagación.

Esos cambios en el patrón de interferencia se representaron a nivel de simulación como variaciones en la frecuencia o periodicidad en las respuestas de I_{DUT} e I_{ref} cuando el dispositivo bajo prueba utilizado era únicamente un enlace de fibra óptica.

Sin embargo, con el objetivo de poder sensar directamente el efecto de un campo eléctrico en el modelo propuesto se utilizó como dispositivo bajo prueba, un cristal de niobato de litio con propiedades electro-ópticas que responden a ese efecto de campo externo.

Se utilizó el mismo método o principio de medición mencionado anteriormente, para el cual la función de transferencia del dispositivo bajo prueba I_{DUT} cambió su amplitud como consecuencia del efecto del campo eléctrico externo.

Este cambio en la amplitud depende de la transmitancia óptica, la cual es el resultado de los cambios tanto en el índice de refracción como en la propagación de la señal a través del cristal. Por lo tanto, estos inducen un patrón de interferencia propio por la propagación dentro del material representado a través de una transmitancia que varía entre un valor mínimo y máximo, dependiendo del campo externo y teniendo en cuenta la longitud del cristal.

Los resultados obtenidos en cada una de las simulaciones permitieron validar el correcto funcionamiento del modelo óptico propuesto midiendo el efecto de la corriente (a través de su campo eléctrico asociado) en el sensor óptico.

El estudio de los resultados en el dominio del tiempo, los cuales se encuentran aplicando el procesamiento de la transformada inversa de Fourier (IFFT), permitieron encontrar datos importantes relacionada a la amplitud de la respuesta de I_{DUT} , los cuales demostraron la proporcionalidad entre el campo eléctrico y la amplitud asociada a la respuesta, representada en términos de transmitancia.

Finalmente, la implementación de la linealización del modelo a través del uso del interferómetro de referencia permitió realizar el muestreo de la respuesta de I_{DUT} , lo cual es necesario para el funcionamiento correcto del modelo. Además, se confirma que la periodicidad de la respuesta de I_{DUT} e I_{ref} depende del FSR correspondiente a los ΔL_{DUT} y ΔL_{ref} establecidos.

Referencias

- Bru, L. (2022). Optical Frequency Domain Interferometry for the characterization and development of complex and tunable photonic integrated circuits, Ph.D Tesis, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- Cano, C. (2018). Caracterización de un sistema de interrogación diferencial de sensores ópticos basados en redes de difracción de Bragg con peines de frecuencia, M.S Tesis, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Dávila, M. (2011). Actualización de los Capítulos II y III del Libro de Sistemas de Protecciones correspondientes a Transformadores de Potencial y Transformadores de corriente. Mérida, Venezuela.
- Gutierrez, C., Santos, J., Ochoa, R., Santiago, M y A. Morales. (2011). "Modeling and experimental electro-optic response of dielectric lithium niobate waveguides used as electric field sensor," *Measurement Science and Technology*, vol 2, no. 035207.
- Kucuksari, S. (2010). "Development of Models for Optical Instrument Transformers," Ph.D Tesis, Universidad de Arizona, Estados Unidos.
- Nikolovski, N., Klaic, Z., Kraus, Z y Stojkov, M. (2010). "Computation and measurement of electromagnetic fields in high voltage transformer substations," The 33rd International Convention MIPRO. Opatija, Croacia.
- Okrainskaya, I., Gladyshev, S., Sidorov, A. (2002). "Distribution of the Electric Field Intensity near the equipment of the 500 kV Power Substation," IEEE, pp. 216-220.

Recibido: 10 de septiembre de 2022

Aceptado: 15 de enero de 2023

Díaz, Valentina: Maestría en curso en Ingeniería Electronica en la Universidad Nacional de Colombia (Bogotá). Ingeniero Electricista (2022) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de los Andes en Mérida-Venezuela (ULA). Investigadora en el grupo de Investigación en Electrónica de Altas Frecuencias y Telecomunicaciones – CMUN de la Universidad Nacional de Colombia. Correo electrónico: vdiazp@unal.edu.co

 <https://orcid.org/0009-0006-8130-2562>

Dávila, Marisol: Profesora Titular de la Universidad de Los Andes (ULA) desde 1994. Doctora en Ciencias, en la especialidad de Ingeniería Eléctrica (2005). M.Sc en Ingeniería Eléctrica, Cinvestav, Guadalajara-México (2002). Ingeniero Electricista (1993) de la Facultad de Ingeniería

de la Universidad de los Andes en Merida-Venezuela (ULA).
Correo electrónico:marisol.davila@gmail.com.

 <https://orcid.org/0000-0002-5054-0916>

Cano, C. Camilo: Profesor Universidad el Bosque y Universidad Nacional de Colombia. Doctorado en Ingeniería Eléctrica y Electrónica en curso. M.Sc en Ingeniería Electrónica de la Universidad Nacional de Colombia (2019). Ingeniero Electrónico de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia (2016). Investigador en el grupo de Investigación en Electrónica de Altas Frecuencias y Telecomunicaciones – CMUN de la Universidad Nacional de Colombia Correo electrónico: cccanov@unal.edu.co.

 <https://orcid.org/0000-0003-1789-0073>

