



UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

EVALUACIÓN DEL MODELO ÓPTICO
PROPUESTO PARA LA REPRESENTACIÓN DE UN
TRANSFORMADOR DE CORRIENTE ÓPTICO

Br. Valentina María Díaz Palacios

Mérida, Junio, 2022



UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Evaluación del Modelo Óptico propuesto para la Representación de un Transformador de Corriente Óptico

Trabajo de Grado presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero
Electricista

Br. Valentina María Díaz Palacios
Tutor: Prof. Marisol Dávila
Asesor: Prof. Camilo Cano

Mérida, Junio, 2022

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Evaluación del Modelo Óptico propuesto para la
Representación de un Transformador de Corriente

Óptico

www.bdigital.ula.ve

Br. Valentina María Díaz Palacios

Trabajo de Grado, presentado en cumplimiento parcial de los requisitos exigidos para optar al título de Ingeniero Electricista, aprobado en nombre de la Universidad de Los Andes por el siguiente Jurado.

Prof. Zulima Barboza.

Prof. José Rafael Uzcátegui

Prof. Marisol Dávila

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a Dios por darme la calma cuando tenía dudas y miedo. Por brindarme sabiduría y fuerza cuándo más lo necesitaba. Gracias Señor por acompañarme en cada momento y decisión de mi vida, y porque sé que te haces presente de muchas maneras, que me escuchas y guías en mi andar día a día. Gracias Dios por llenarme de tantos regalos y bendiciones, por enseñarme los dones del Espíritu Santo y permitirme cultivar conocimiento y experiencia para sentirme hoy en paz con mi caminar.

Agradezco a mis padres por su insuperable e incondicional amor, su apoyo y comprensión, por forjar bases sólidas en mi vida, y formarme como una mujer de bien, con determinación y metas claras. Gracias a ustedes por enseñarme que la responsabilidad, el optimismo y el esfuerzo son necesarios para lograr las metas que me proponga. Por ser mi ejemplo y demostrarme a diario que la educación es una de las puertas al éxito. Lo mejor de mi vida son ustedes, seguiremos cumpliendo nuestros sueños como familia y sé que con el pasar del tiempo nos sentiremos cada vez más unidos y fuertes. Mi centro y mi visión de futuro son ustedes.

Gracias al Profesor Camilo Cano, por ser mi apoyo, guía y asesor académico en el desarrollo de esta tesis, por creer en mí y en mis capacidades, por tenderme la mano en los momentos críticos que necesitaba aterrizar mis ideas. Cuando todo se veía nublado, sus explicaciones me aclaraban y podía continuar. Por compartir y transmitir su conocimiento con entrega, encontrando ejemplos e ideas brillantes para que el proceso fuese más sencillo. Casi todo lo que sé de óptica y muchos otros temas, se lo debo a usted. Gracias profesor por alentarme a que todo iba a estar bien, por su tiempo, su optimismo y ayudarme a entender que cada una de las etapas que tuvo el estudio de esta tesis eran necesarias para completarla con éxito. Además de mi profesor, se ha convertido en mi amigo y le agradezco por darme la oportunidad de aprender de usted. Lo admiro y le doy gracias por ser un ejemplo para mí como profesional y persona.

A mi familia, gracias por ser parte de cada uno de los momentos más felices de mi vida, por acompañarme, preocuparse por mí y apoyarme para que pueda cumplir mis metas y sueños. Su amor, consejos y sonrisas llenan mi corazón de alegría. Les agradezco por creer en mí y ser ese soporte a lo largo de mis vivencias y mi camino de formación profesional.

A mis amigos, algunos cerca y otros lejos, pero sin importar el tiempo que pase o la distancia que nos separe han estado presentes de diferentes maneras, demostrando su amor, empatía, y apoyo para que pronto este sueño se hiciera realidad y poder volver a celebrar juntos cuando la vida nos dé la oportunidad.

A mi tutora la Prof. Marisol Dávila, le agradezco por la asesoría que me brindó para poder realizar un trabajo de calidad, por siempre tener una sonrisa en nuestras reuniones de correcciones y estar dispuesta de corazón a colaborar con los estudiantes. Gracias por darme su ejemplo de excelencia profesional, por su conocimiento e impulsarme a culminar mi carrera universitaria de la mejor manera.

A la Ilustre Universidad de Los Andes y los profesores de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, gracias por darme la oportunidad de convertirme en una profesional a través de la formación académica y social que ofrecen. Un lugar donde pasé unos años, llenos de estudio, risas, a veces desesperación, pero gracias a todo este tiempo entre salones y pasillos, pude adquirir gran cantidad de conocimientos y experiencias que han sido sin duda uno de los cimientos más importantes en mi vida.

Br. Valentina María Díaz Palacios. EVALUACIÓN DEL MODELO ÓPTICO PROPUESTO PARA LA REPRESENTACIÓN DE UN TRANSFORMADOR DE CORRIENTE ÓPTICO. Universidad de Los Andes. Tutor: Prof. Marisol Dávila C. Asesor: Prof. Camilo Cano . Junio de 2022.

Resumen

En el presente documento se muestran los resultados de la investigación titulada “Evaluación del modelo óptico propuesto para la representación de un Transformador de corriente óptico” en el cual se propuso 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 transformador de corriente óptico, las ventajas que tiene sobre uno convencional, así como plantear un modelo que permitiera obtener la caracterización del sistema.

Posteriormente se procedió a simular el modelo propuesto utilizando el software computacional MATLAB® variando a nivel de código los parámetros de configuración del láser emisor y los interferómetros según corresponda.

A partir de las simulaciones se lograron obtener resultados que permitieron evaluar la respuesta de los interferómetros para los diferentes casos y parámetros configurados.

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

ÍNDICE GENERAL

<i>Resumen</i>	<i>vi</i>
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	3
EL MODELO ÓPTICO DEL TRANSFORMADOR DE CORRIENTE ÓPTICO	3
1.1 ANTECEDENTES.....	3
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
1.3 JUSTIFICACIÓN	5
1.4 OBJETIVOS	6
1.4.1 Objetivo General.....	6
1.4.2 Objetivos Específicos.....	6
1.5 METODOLOGÍA	7
1.6 ALCANCE Y LIMITACIONES.....	7
1.6.1 Alcance	7
1.6.2 Limitaciones.....	8
CAPÍTULO II	9
FUNDAMENTOS TEÓRICOS SOBRE EL TRANSFORMADOR DE CORRIENTE ÓPTICO	9
2.1 EFECTO FARADAY	9
2.2 LEY DE AMPERE	10
2.3 TRANSFORMADOR DE CORRIENTE ÓPTICO.....	11
2.4 ELEMENTOS QUE CONFORMAN EL TRANSFORMADOR DE CORRIENTE ÓPTICO. ..	12
2.4.1 Transmisor Óptico.....	12
2.4.1.1 Diodos LED.....	13
2.4.1.2 Láser Semiconductor	13
2.4.2 Fibra Óptica.....	15
2.4.2.1 Ventanas de Transmisión de la Fibra Óptica.....	17
2.4.2.2 Clasificación de la Fibra Óptica según el número de modos	17
a. Fibra Óptica Multimodo.....	17
a.1- Fibra multimodo de Salto de Índice.....	18
a.2.- Fibra multimodo de índice gradual	19
b. Fibra Óptica Monomodo.....	20
2.4.3 Detector Óptico	21
2.4.3.1 Detectores Térmicos	22
2.4.3.2 Fotodetectores	22
a. Tipos de Fotodetectores.....	22

a.1.- Fotodetector P-N.....	22
a.2.- Fotodetector P-I-N.....	23
2.5 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL TRANSFORMADOR DE CORRIENTE ÓPTICO	24
2.6 CONFIGURACIONES DE UN TRANSFORMADOR DE CORRIENTE ÓPTICO	26
2.6.1 Sensor magneto-óptico utilizando materiales volúmicos (<i>Bulk Optic</i>).....	26
2.6.2 Sensor de Fibra Óptica Pura.....	26
2.6.3 Interferómetro Mach-Zehnder.....	27
2.6.3.1 Métodos de interferencia.....	29
CAPÍTULO III.....	31
MODELO Y SIMULACIÓN DEL TRANSFORMADOR DE CORRIENTE ÓPTICO.....	31
3.1 MODELADO DE LA INTERFEROMETRÍA ÓPTICA EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA.....	31
3.1.1 Respuesta del interferómetro de referencia y dispositivo bajo prueba.....	33
3.1.2 Procesamiento y linealización de la respuesta del interferómetro.....	34
3.1.3 Algoritmo de la transformada rápida de Fourier (FFT).....	35
3.1.4 Respuesta Temporal.....	36
3.1.5 Recuperación espectral de la respuesta en frecuencia.....	37
3.2 SIMULACIONES DEL INTERFERÓMETRO DE REFERENCIA.....	37
3.2.1 Caso 1.....	38
a. Parámetros del láser:.....	38
b. Parámetros del interferómetro de referencia:.....	38
3.2.2 Caso 2.....	39
a. Parámetros del láser:.....	40
b. Parámetros interferómetro de referencia:.....	40
3.2.3 Caso 3.....	42
a. Parámetros del láser:.....	42
b. Parámetros interferómetro de referencia:.....	42
3.2.4 Caso 4.....	44
a. Parámetros del láser:.....	44
b. Parámetros interferómetro de referencia:.....	44
3.3 SIMULACIONES DEL INTERFERÓMETRO DEL DISPOSITIVO BAJO PRUEBA (DUT).....	46
3.3.1 Caso 1.....	46
a. Parámetros del láser:.....	46
b. Parámetros del interferómetro del dispositivo bajo prueba:.....	46
3.4 SIMULACIONES DEL INTERFERÓMETRO DE REFERENCIA Y DISPOSITIVO BAJO PRUEBA.....	49
3.4.1 Caso 1.....	49
a. Parámetros del láser:.....	49
b. Parámetros del interferómetro de referencia.....	49
c. Parámetros del interferómetro del dispositivo bajo prueba.....	50
3.4.1.1 Cálculo del FSR de los interferómetros.....	51
3.4.2 Caso 2.....	53
a. Parámetros del láser:.....	53

b.	Parámetros del interferómetro de referencia	54
c.	Parámetros del interferómetro del dispositivo bajo prueba	54
3.4.2.2	Cálculo del FSR de los interferómetros	56
3.5 SIMULACIONES DEL INTERFERÓMETRO DE REFERENCIA Y DISPOSITIVO BAJO PRUEBA UTILIZANDO UN CRISTAL DE NIOBATO DE LITIO		57
3.5.1	Respuesta de la transmitancia óptica.	61
3.5.2	Respuesta de <i>IDUT</i> considerando la transmitancia óptica.	62
3.5.2.1	Transmitancia igual a 1.....	62
3.5.2.2	Transmitancia igual a 0.5.....	63
3.5.2.3	Transmitancia igual a 0.05.....	64
3.5.3	Implementación de la transformada inversa de Fourier.	65
3.5.3.1	Respuesta de la transformada inversa de Fourier cuando la transmitancia es 1.	66
3.5.3.2	Respuesta de la transformada inversa de Fourier cuando la transmitancia es 0.5.	67
3.5.3.3	Respuesta de la transformada inversa de Fourier cuando la transmitancia es 0.05.....	68
<i>CAPÍTULO IV</i>.....		71
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		71
4.1	CONCLUSIONES	71
4.2	RECOMENDACIONES	73
REFERENCIAS.....		74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		pp
2.1	Estructura Fibra Óptica.....	15
2.2	Propagación en zigzag de los haces de luz a través de la fibra óptica.....	18
2.3	Perfil fibra multimodo configuración de salto de índice.....	18
2.4	Perfil fibra multimodo configuración índice gradual.....	19
2.5	Modelo del fotodetector de tipo P-N.....	23
2.6	Modelo del fotodetector de tipo P-I-N.....	24
2.7	Efecto Faraday en un cristal óptico.....	24
2.8	Diagrama de bloques del modelo óptico del TCO.....	26
2.9	Modelo del TCO en configuración Interferómetro Mach-Zehnder.....	28
3.1	Diagrama del modelo OFDI.....	33
3.2	Respuesta caso 1 intensidad de campo eléctrico I_{ref}	39
3.3	Respuesta caso 2 intensidad de campo eléctrico I_{ref}	41
3.4	Comparación Respuesta variando dl_{ref}	41
3.5	Respuesta caso 3 intensidad de campo eléctrico I_{ref}	43
3.6	Comparación respuesta variando n_g	43
3.7	Respuesta caso 4 intensidad de campo eléctrico I_{ref}	45
3.8	Respuesta intensidad de campo eléctrico I_{DUT}	47
3.9	Respuesta intensidad de campo eléctrico $I_{DUT_balanced}$	48
3.10	Respuesta I_{DUT} e I_{DUTB}	48
3.11	Respuesta caso 1 I_{DUT} e I_{ref}	51
3.12	Cruces por cero de I_{ref}	52
3.13	Respuesta MATLAB® cruces por cero de I_{ref}	53
3.14	Respuesta caso 2 I_{DUT} e I_{ref}	55
3.15	Respuesta MATLAB® cruces por cero de I_{ref}	57
3.16	Montaje modelo óptico propuesto con cristal $LiNbO_3$	58
3.17	Efecto del campo eléctrico sobre el cristal de $LiNbO_3$	59
3.18	Respuesta de transmitancia para $L= 6.08$ m.....	61
3.19	Respuesta de transmitancia para diferentes longitudes del cristal.....	62
3.20	Respuesta de I_{DUT} e I_{ref} para transmitancia igual a 1.....	63
3.21	Respuesta de I_{DUT} e I_{ref} para transmitancia igual a 0.5.....	63
3.22	Respuesta de I_{DUT} e I_{ref} para transmitancia igual a 0.05.....	64
3.23	Respuesta de I_{DUT} e I_{ref} para diferentes valores de transmitancia.....	65
3.24	Picos de transformada inversa de Fourier para transmitancia igual a 1.....	66
3.25	Picos de transformada inversa de Fourier para transmitancia igual a 1 en dB.....	67
3.26	Picos de transformada inversa de Fourier para transmitancia igual a 0.5.....	67

3.27	Picos de transformada inversa de Fourier para transmitancia igual a 0.5 en dB.....	68
3.28	Picos de transformada inversa de Fourier para transmitancia igual a 0.05...	69
3.29	Picos de transformada inversa de Fourier para transmitancia igual a 0.05 en dB.....	69
3.30	Variación de E_1 y su pico de Fourier máximo asociado.....	70
3.31	Variación de E_1 y su pico de Fourier máximo asociado en dB.....	70

www.bdigital.ula.ve

INTRODUCCIÓN

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.

En un sistema de potencia es de suma importancia asegurar que los equipos instalados operen en condiciones óptimas, especialmente aquellos destinados a proteger estos 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.

Los transformadores de corriente ópticos tienen la capacidad de medir las intensidades de corriente de la red del sistema de potencia con una mayor exactitud. Inclusive si estos se encuentran sometidos a una condición de falla o saturación por corrientes elevadas, son capaces de medir correctamente, ya que no son afectados por las interferencias electromagnéticas. Esto es posible debido a los principios que rigen su funcionamiento y a su composición interna, ya que para su construcción se utilizan materiales no magnéticos, como un sensor de fibra óptica en lugar de un núcleo ferromagnético.

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, baja pérdida 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.

Debido a la necesidad de conocer con más detalle el funcionamiento de estos equipos y del impacto que ejercen en la actualidad las comunicaciones ópticas en los sistemas de protecciones, se plantea en este trabajo estudiar e implementar a través de simulación de software un sistema óptico que permita medir el efecto de la corriente en el sensor de fibra óptica de un transformador de corriente óptico.

El trabajo de grado se estructura de la siguiente manera:

En el capítulo I se plantea el problema concerniente al modelado de los transformadores de corriente ópticos, lo que conlleva a justificar el trabajo que se presenta, así como plantear una serie de objetivos generales y específicos, junto con la metodología aplicada para el desarrollo de este trabajo.

En el capítulo II se presentan las bases teóricas que sustentan qué es un transformador de corriente óptico, la teoría de funcionamiento del mismo, su construcción, configuraciones, ventajas y aplicaciones. Así como la descripción y funcionamiento del software computacional utilizado.

El capítulo III corresponde al desarrollo e implementación del modelo óptico a través de simulaciones, las cuales permiten caracterizar el sistema para conocer su funcionamiento y respuesta para la fase óptica.

Finalmente, en el capítulo IV se presentan las conclusiones y recomendaciones desarrolladas a partir de los resultados obtenidos durante toda la investigación.

CAPÍTULO I

EL MODELO ÓPTICO DEL TRANSFORMADOR DE CORRIENTE ÓPTICO

1.1 ANTECEDENTES

En la actualidad existen diversos estudios acerca de los modelos y técnicas de medida planteadas para los transformadores de corriente ópticos. A continuación, se indican los aspectos más relevantes de los antecedentes a esta investigación.

En [1] se presentan las diferentes configuraciones utilizadas para representar los TCO, basados en el efecto Faraday, las cuales varían dependiendo de cómo se implemente el camino óptico del sensor, esto arroja ventajas entre una configuración y otra. Entre las más comunes está la configuración del tipo *Bulk Optic*, y la de sensor de fibra óptica pura alrededor del conductor. En esta investigación también se sugiere la implementación de principios interferométricos los cuales son útiles y necesarios para lograr la medición de corriente en el TCO.

En [2] se propone un artículo donde se construye un prototipo del sensor de corriente de un TCO empleando una fibra óptica monomodo basado en el interferómetro de Mach-Zehnder. Uno de los resultados que se destacan en este artículo es la interferencia óptica detectada en la salida del interferómetro, la cual indican es proporcional a la medida de corriente. Por otro lado mencionan que el modelo propuesto tiene la capacidad de ser utilizado para realizar medidas de corrientes altas incrementando la longitud del camino óptico, sin sufrir efectos de saturación.

En [3] estudian los modelos para representar los transformadores de medida ópticos de corriente y voltaje utilizando su respuesta en frecuencia. Proponen representar los elementos circuitales a través de modelos analógicos, mientras los modelos digitales se representan a través de elementos ópticos y de electrónica.

En [4] explican la necesidad e importancia de disponer de sistemas de medidas adecuados en las instalaciones de generación y redes de distribución. Resaltan las ventajas de los sensores de fibra óptica robustos y con alta sensibilidad como lo son facilitar la monitorización de sensores a grandes distancias e incorporar todas las ventajas y posibilidades de las comunicaciones ópticas en estos sistemas. Además en esa misma investigación proponen codificar la información de los sensores de fibra en términos de frecuencia y longitud de onda. Se estudian los métodos utilizados para la detección y demodulación de señales moduladas en frecuencia, amplitud o fase, a través de procedimientos de detección homodina y heterodina, implementando un sistema óptico que consiste en un interferómetro Mach-Zehnder de fibra óptica el cual se reconoce como una configuración homodina.

En [5] en el 2012 se realizó un proyecto de investigación titulado “Comparación de un Transformador de Corriente Convencional con un Transformador de Corriente Óptico” el cual tuvo como objetivo modelar el TCO a partir de una representación circuital a través de su función de transferencia derivada de una respuesta en frecuencia, sin embargo en esta investigación no se abordó lo referente al modelo óptico.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

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.

Reducir las fallas en un sistema de potencia es un factor clave, y esto es posible gracias a la implementación de equipos capaces de hacerlo. Los transformadores de corriente ópticos permiten realizar esta tarea y debido a sus características intrínsecas son capaces de evitar el efecto de perturbaciones externas como por ejemplo las interferencias electromagnéticas, así como evitar los posibles efectos de saturación que pudieran aparecer en los dispositivos magnéticos cuando se presentan fallas en el sistema con elevadas corrientes de cortocircuito

Los TCO se caracterizan por ser un sistema estable donde las mediciones de corriente son mucho más precisas obteniendo las medidas reales de corriente, por consiguiente, se logra que los sistemas de protección se activen inadecuadamente con menor frecuencia.

Es importante resaltar que es de gran interés conocer y comprender el funcionamiento de un TCO a través de su modelo óptico, por tal razón en este trabajo el objetivo es evaluar el comportamiento óptico de un transformador de corriente proponiendo el modelo de interferómetro de Mach-Zehnder en configuración “*Self Homodyne*” variando los parámetros a los que es sometido a nivel de simulación.

www.bdigital.ula.ve

1.3 JUSTIFICACIÓN

Los elementos que componen las protecciones de un sistema de potencia se encargan de que los efectos de las fallas sean minimizados y en lo posible sean eliminados. Dentro del sistema de protección, los transformadores de medida juegan un papel importantísimo pues son los que dan acceso a las altas corrientes y voltajes existentes en la red, y permiten obtener la información vital concerniente a la operación directa e indirecta de los parámetros. Esta información es esencial para la adecuada operación de los sistemas de protección.

En los sistemas de potencia actuales en Venezuela la mayor parte de los transformadores de medida instalados hasta ahora son del tipo convencional, estos equipos, como es bien sabido, introducen ciertas distorsiones a las señales debido a los efectos electromagnéticos a los que están sometidos, especialmente al momento de ocurrir una falla cuyas elevadas corrientes

tienden a saturar el núcleo ferromagnético de estos transformadores trayendo como consecuencia medidas imprecisas de los valores de corriente y voltajes reales del sistema. Esas distorsiones pueden evitarse de dos maneras; ya sea ajustando y mejorando el sistema de protección para que sea menos sensible a las distorsiones, o mejorando los transformadores de medida que alimentan los equipos de protección, para asegurar que los valores medidos por estos últimos sean replicas exactas de los valores de corriente y voltaje del primario.

Recientemente se han desarrollado diseños de transformadores de medida que están basados en medidas ópticas de voltaje y corriente, los cuales han contribuido enormemente a disminuir las distorsiones presentes en los transformadores de medida convencionales, reduciendo considerablemente los problemas de interferencias electromagnéticas, así como aumentando las respuestas para amplios rangos de frecuencia.

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.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo General

- Evaluar el comportamiento de un transformador de corriente óptico utilizando herramientas computacionales adecuadas.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Estudiar y comprender el principio de funcionamiento de un transformador de corriente óptico (TCO).
- Seleccionar adecuadamente un paquete de computación que permita modelar el TCO.
- Diseñar un sistema óptico que permita medir el efecto de la corriente en el sensor de fibra óptica.

- Caracterizar por medio de simulaciones el TCO.

1.5 METODOLOGÍA

La metodología empleada en este trabajo es de tipo documental, la cual involucra el estudio teórico del tema y el uso de herramientas de software con el fin de simular la respuesta del modelo óptico de un transformador de corriente para así caracterizarlo a través de los resultados obtenidos. Para desarrollar la metodología planteada, primeramente, se realiza la revisión bibliográfica y el estado del arte referente a los fundamentos que rigen el funcionamiento del transformador de corriente óptico, sus diferentes tipos, los elementos que lo componen y las ventajas que aporta la implementación de estos. Posteriormente se sintetiza la información más relevante y necesaria para explicar el funcionamiento del TCO, logrando proponer y caracterizar una configuración interferométrica para modelarlo. Finalmente se ejecuta la simulación del sistema a nivel de software utilizando MATLAB®, con el objetivo de evaluar e interpretar la respuesta del modelo del TCO a través de los resultados de la simulación.

1.6 ALCANCE Y LIMITACIONES

1.6.1 Alcance

En este proyecto se determinará el comportamiento de un transformador de corriente óptico a través de simulaciones de software con el fin de caracterizar y proponer su modelo óptico, el cual permitirá determinar el efecto de la corriente en el sensor de fibra óptica.

1.6.2 Limitaciones

Durante el desarrollo de la investigación la principal limitación fue el hecho de encontrar un software adecuado que se adaptara a las necesidades que requería el proyecto, además era necesario contar con la opción de editar parámetros específicos los cuales eran necesarios para modelar la respuesta del transformador de corriente óptico. Luego de encontrar un software de simulación que tuviera las características mencionadas, se presentó otra limitante la cual fue comprender el funcionamiento del entorno de desarrollo, las funciones y ejecución el código del modelo propuesto.

www.bdigital.ula.ve

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS TEÓRICOS SOBRE EL TRANFORMADOR DE CORRIENTE ÓPTICO

En este capítulo se definen cada una de las bases teóricas fundamentales para el desarrollo de esta investigación, con el fin de comprender los conceptos del funcionamiento del transformador de corriente óptico, así como cada uno de los elementos que lo componen.

www.bdigital.ula.ve

2.1 EFECTO FARADAY

Michael Faraday descubre en 1845 la influencia que un campo magnético tiene sobre un haz de luz polarizado. Con este descubrimiento se explica cómo el plano de un haz de luz linealmente polarizado que incide en un medio óptico, cambia cuando este se ve sometido a la influencia de un campo magnético.

Este cambio se ve reflejado a través de un desfase en el ángulo Φ de polarización del haz de luz. Si no hay presencia de un campo magnético externo afectando el haz de luz, se conserva en la salida el mismo ángulo de referencia que tiene la señal de entrada, mientras que, si se aplica un campo magnético paralelo a la dirección de propagación de la luz, el ángulo Φ en la salida se verá desfasado con respecto al ángulo de la señal luminosa de entrada [6].

La ecuación que rige este principio es la siguiente:

$$\Phi = V.H.l \quad (2.1)$$

Donde:

Φ : Ángulo de rotación.

V : Constante de Verdet característica del material.

H : Magnitud del campo magnético paralelo a la dirección de propagación de la luz.

l : Longitud que recorre la señal luminosa dentro del medio.

En [7] se explica que la constante de Verdet es una medida de la fuerza del efecto Faraday para un material en particular. Además, se indica que una constante de Verdet de magnitud elevada representa que el material tiene una fuerte influencia del efecto Faraday, y que es un material ideal para actuar como un aislador óptico. La constante de Verdet varía normalmente con respecto a la longitud de onda y a la temperatura. Además, esta se determina a partir de las propiedades magnéticas del material, una constante de Verdet es positiva cuando el plano de polarización gira en el sentido de las manecillas del reloj, si se ubica al observador frente a la muestra y con la dirección del campo magnético. La constante es negativa cuando el plano de polarización gira en sentido contrario [8].

2.2 LEY DE AMPERE

Andre Marie Ampere, físico y matemático, establece en 1826 la Ley de Ampere la cual permite calcular el campo magnético a partir de la intensidad de corriente, o viceversa. Esta ley establece que la corriente total que recorre un contorno cerrado es proporcional a la circulación de la intensidad del campo magnético, y se expresa en la siguiente ecuación [9].

$$\oint H \cdot dl = I_T \quad (2.2)$$

Donde:

H : Magnitud del campo magnético paralelo a la dirección de propagación de la luz.

I_T : Intensidad de corriente total.

dl : Diferencial de longitud a lo largo del camino cerrado.

2.3 TRANSFORMADOR DE CORRIENTE ÓPTICO

Un transformador de corriente óptico es un instrumento de medición, donde se implementa un sensor óptico para determinar la intensidad de corriente que circula a través del conductor de una línea de transmisión, esto permite analizar el funcionamiento de los equipos que se encuentran conectados a la misma, actuando también como un elemento del sistema de protección y detección para prevenir fallas.

Además de ser un instrumento de medida, actúa como un transductor, ya que es un dispositivo que convierte la señal de la entrada del dominio óptico en una distinta para la salida en el dominio eléctrico.

En los últimos años, se ha llevado a cabo la implementación de transformadores de corriente ópticos, sustituyendo a los transformadores de corriente convencionales principalmente en la transmisión de los sistemas de potencia. Este avance en la implementación de nuevas tecnologías se debe a las mejoras que se han tenido con respecto a seguridad, precisión en las mediciones y amplio ancho de banda que ofrecen los transformadores de corriente ópticos [10].

Otras ventajas significativas se mencionan a continuación [6], [10], [11], [12]:

- Inmunidad a la interferencia electromagnética.
- No sufre saturación del núcleo al circular intensidades de corriente elevadas.
- Inmunidad al ruido y aislamiento elevado.
- Sensibilidad elevada.
- Bajas pérdidas de transmisión.
- Dispositivos más fáciles de instalar debido a su menor peso y tamaño reducido en comparación a los transformadores de corriente convencionales.
- Precisión de $\pm 0,2 \%$, valor permitido avalado por la norma IEC 60044-8.
- No necesitan cambios de aceite del aislamiento ni mantenimiento frecuente
- Reducción de costos en requerimientos de estructuras para su instalación.

2.4 ELEMENTOS QUE CONFORMAN EL TRANSFORMADOR DE CORRIENTE ÓPTICO

2.4.1 Transmisor Óptico

Es un dispositivo optoelectrónico cuya función es convertir una señal eléctrica en una señal luminosa modulada, que será posteriormente transmitida a través del medio de transmisión. Existen varios tipos de transmisores ópticos, con diferentes características como: tiempo de duración del láser (onda continua o pulsante), ancho de banda, longitud de onda y potencia de salida.

Los transmisores ópticos deben cumplir las siguientes características para garantizar su funcionamiento adecuado [13]:

- La longitud de onda generada debe coincidir con las ventanas de transmisión de la fibra óptica.
- Poseer un ancho de banda de modulación alto.

- Para implementaciones es conveniente que el diámetro tenga un tamaño compatible con el de las fibras ópticas para garantizar un mejor acople.
- Tener anchura espectral pequeña para minimizar los efectos de dispersión.

Existen diferentes tipos de transmisores ópticos, los cuales se describen a continuación:

2.4.1.1 Diodos LED

El diodo electroluminiscente (LED) es un dispositivo construido de material semiconductor, el cual está formado por una unión PN polarizada en corriente directa. Su funcionamiento se basa en el principio de emisión espontánea.

La emisión espontánea consiste en la creación de un fotón o señal luminosa a partir de la transición atómica de electrones portadores, los cuales descienden espontáneamente de un nivel alto de energía a un nivel inferior.

Los Diodos LED poseen ciertas características importantes, siendo estas las más relevantes [14]:

- Se utilizan con frecuencia en sistemas de comunicación de corta distancia en la primera ventana de transmisión.
- La señal de salida es ideal para acoples con fibras multimodo.
- Pueden ser modulados con velocidades de $(100 - 200) \frac{\text{Mb}}{\text{s}}$, inclusive en algunos casos pueden llegar a velocidades de $(1-2) \frac{\text{Gb}}{\text{s}}$.
- Presentan inmunidad frente a las variaciones de temperatura.
- Son una fuente emisora de luz incoherente.

2.4.1.2 Láser Semiconductor

El láser semiconductor es un dispositivo emisor de un haz de luz coherente, el cual funciona como un oscilador óptico bajo el principio de emisión estimulada [14]. La emisión estimulada se lleva a cabo cuando se tienen portadores en el nivel alto de energía mientras hay un flujo de fotones radiando el material.

Esta interacción hace que caiga un electrón a un nivel inferior de energía, generando un gemelo del fotón original (con la misma fase, dirección y polarización). El hecho de poseer dos fotones idénticos a partir de un fotón inicial es lo que permite que la luz se amplifique y que se origine un haz coherente [13].

La construcción interna de los láseres semiconductores está compuesta por espejos que dan lugar a una cavidad resonante. Esta estructura produce el efecto de realimentación óptica, la cual consiste en la reinyección de la luz en la cavidad del láser. Es decir, los espejos permiten que los fotones generados recorran varias veces la región activa del láser antes de salir, logrando un aumento en la emisión de fotones y fijando la dirección de emisión [15].

Características sobresalientes de los dispositivos de láser semiconductor:

- Permiten velocidades de modulación mucho más altas que los LED, de $30 \frac{\text{Gb}}{\text{s}}$ y superiores, esto es gracias a que el tiempo de recombinación de los portadores es muy corto por el proceso de emisión estimulada.
- Es posible realizar un acople de potencia eficiente con las fibras ópticas monomodo, ya que sus patrones de radiación son mucho más directivos.
- Es ideal para ser implementado en enlaces de distancias muy largas.
- La luz que emite este tipo de láser es coherente y de espectro delgado.
- Posee altas potencias ópticas.

Existen diferentes tipos de láseres semiconductores los cuales están clasificados según su cavidad.

Uno de los más utilizados en las comunicaciones ópticas es el VCSEL de emisión lateral, ya que se caracteriza por operar en un rango amplio de longitudes de onda como lo son 850 nm, 1310 nm y 1550 nm, además de emitir un haz de luz linealmente polarizado. Posee un bajo consumo de potencia y su construcción se basa en una unión de material P-N de materiales semiconductores dopados.

Esta unión se encuentra separada por un medio activo siendo este medio el que guía el haz de luz. En los láseres tipo VCSEL la emisión se propaga a lo largo de la zona activa, paralelo al plano de la unión P-N [16].

El láser tipo VCSEL se utiliza con frecuencia como emisor en las comunicaciones de alta velocidad y distancia media, así como también en sistemas con sensores.

2.4.2 Fibra Óptica

La fibra óptica es un medio de transmisión de datos (representados a través de señales luminosas) que actúa como una guía de onda. Es utilizada en los sistemas de comunicaciones ópticas comúnmente para la transmisión de datos en alta velocidad, a larga distancia con muy pocas pérdidas de potencia.

Su respuesta está caracterizada por sus parámetros de transmisión, y su función de transferencia responde a $E_{(z)} = E_0 e^{-\gamma z}$, donde γ es la constante de propagación la cual está definida por la amplitud y fase de la señal $\gamma = \alpha + j\beta$.

La estructura de una fibra óptica está construida por tres capas, el núcleo central, el revestimiento, y la chaqueta como se muestra en la figura 2.1.

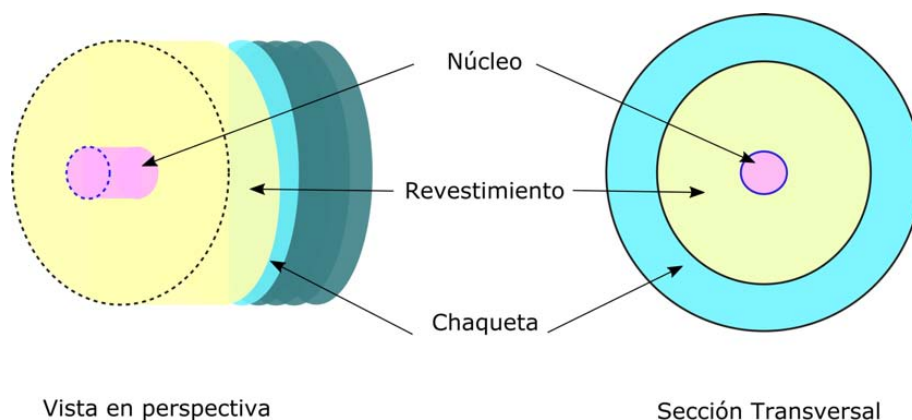


Figura 2.1. Estructura Fibra Óptica (Elaboración propia).

Las dimensiones típicas del diámetro del núcleo son de (9 a 62.5) μm , está compuesto por uno o varios hilos, los cuales están formados por un material de vidrio de silicio dopado con germanio, comúnmente con un índice de refracción $n \approx 1.5$.

El índice de refracción n se define como una medida de cuanto se reduce la velocidad de la luz al propagarse a través de un medio homogéneo. Es decir, este define que tan rápido es el paso de la señal luminosa a través del medio de transmisión.

El índice de refracción se expresa a través de la siguiente ecuación [14].

$$n = \frac{c}{v} \quad (2.3)$$

Donde:

n : Índice de Refracción.

c : Velocidad de la luz en el vacío ($3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$).

v : Velocidad de la luz en el medio.

Las dimensiones típicas del diámetro del revestimiento son de 125 μm , el revestimiento es la siguiente capa que rodea al núcleo de la fibra, está construido por un material de vidrio similar al del núcleo central. Está cubierto por una chaqueta plástica protectora, siendo el diámetro típico de este recubrimiento primario de 250 μm .

Es típico que el índice de refracción n_1 del material que compone el núcleo, sea mayor al índice de la refracción revestimiento n_2 , para que así la energía luminosa inyectada en la entrada se propague de forma guiada a través del núcleo sin escapar por el revestimiento. Es decir, la luz se refleja de tal forma que no atraviesa la superficie entre el núcleo y el revestimiento, originándose una reflexión interna total, sin existir refracción.

2.4.2.1 Ventanas de Transmisión de la Fibra Óptica

Las partes del espectro electromagnético, usadas para la transmisión de luz por fibra óptica, pertenecen a la categoría de luz infrarroja invisible.

En esta transmisión, se tienen diferentes longitudes de onda, las cuales se denominan ventanas y se encuentran distribuidas de la siguiente manera;

- Primera ventana $\lambda = 850 \text{ nm}$
- Segunda ventana $\lambda = 1310 \text{ nm}$
- Tercera ventana $\lambda = 1550 \text{ nm}$

2.4.2.2 Clasificación de la Fibra Óptica según el número de modos

La propagación de la luz a través del núcleo se describe a partir de varios rayos de luz. Estos rayos de luz sufren varias reflexiones a medida que viajan a lo largo de la fibra óptica y al incidir sobre la superficie que separa al núcleo del revestimiento. Cada uno de estos rayos guiados posee un ángulo de inclinación distinto y se denominan modos [14].

Las fibras ópticas se pueden clasificar a partir del número de modos guiados que viajan a través de esta.

a. Fibra Óptica Multimodo

Las fibras multimodo permiten el paso de más de un haz de luz de diferente longitud de onda cada uno, los cuales viajan por diferentes caminos. Cada modo se propaga a una velocidad distinta, dando origen a la dispersión intermodal. Esta dispersión se debe a que el índice de refracción n es diferente para cada camino. Como consecuencia cada modo toma un tiempo diferente en propagarse a través de la fibra, debido a la longitud que cada uno recorre.

La dispersión intermodal se produce debido a que cada modo se propaga en tiempos diferentes a través de la fibra óptica. La transmisión de información utilizando luz conlleva la modulación de la amplitud del campo electromagnético óptico [14].

Existen dos tipos de fibras multimodo, que se clasifican según la distribución del índice de refracción n en la fibra:

a.1- Fibra multimodo de Salto de Índice

En este tipo de fibra el índice de refracción n_1 es uniforme, el cual es mucho mayor al índice de refracción n_2 del revestimiento. La luz que viaja a través de este tipo de fibra se propaga en forma de zigzag (figura 2.2), mientras se lleva a cabo la reflexión interna total de los haces de luz dentro de la fibra, es decir, la luz se refleja completamente, sin existir refracción.

En este caso la dispersión intermodal tiende a ser bastante elevada, ya que la transición entre el índice de refracción n_1 y n_2 es brusca y cada modo viaja en tiempos diferentes a lo largo de la fibra óptica, como se muestra en la figura 2.3.

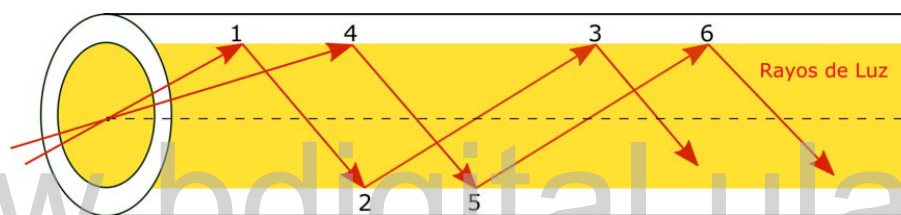


Figura 2.2. Propagación en zigzag de los haces de luz a través de la fibra óptica (Elaboración propia).

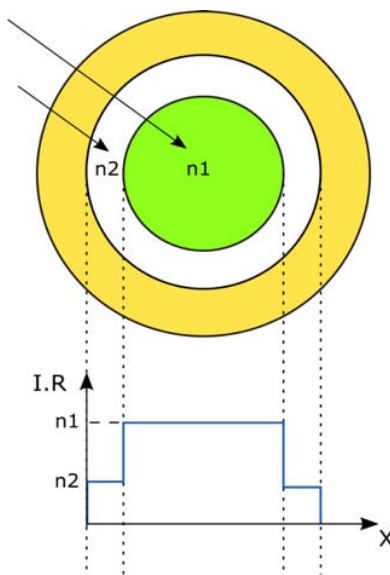


Figura 2.3. Perfil fibra multimodo configuración de salto de índice (Elaboración propia).

a.2.- Fibra multimodo de índice gradual

Las fibras multimodo de índice gradual se caracterizan por tener un índice de refracción no uniforme en el núcleo, ya que este se encuentra más dopado en el eje, lo que implica un mayor valor de n . Este valor decrece gradualmente a medida que se acerca a la frontera entre el núcleo y el revestimiento, llegando a igualarse.

Con este tipo de perfil se obtiene una menor dispersión intermodal ya que en contraste con el perfil de salto de índice, en este caso la transición entre n_1 y n_2 es gradual como lo indica su nombre (figura 2.4).

Esto permite que los haces de luz que se alejan del centro del núcleo aumenten la velocidad con que se propagan, haciendo que los diferentes haces de luz lleguen al final del recorrido a lo largo de la fibra en instantes casi iguales, logrando una dispersión intermodal mucho más reducida y controlada.

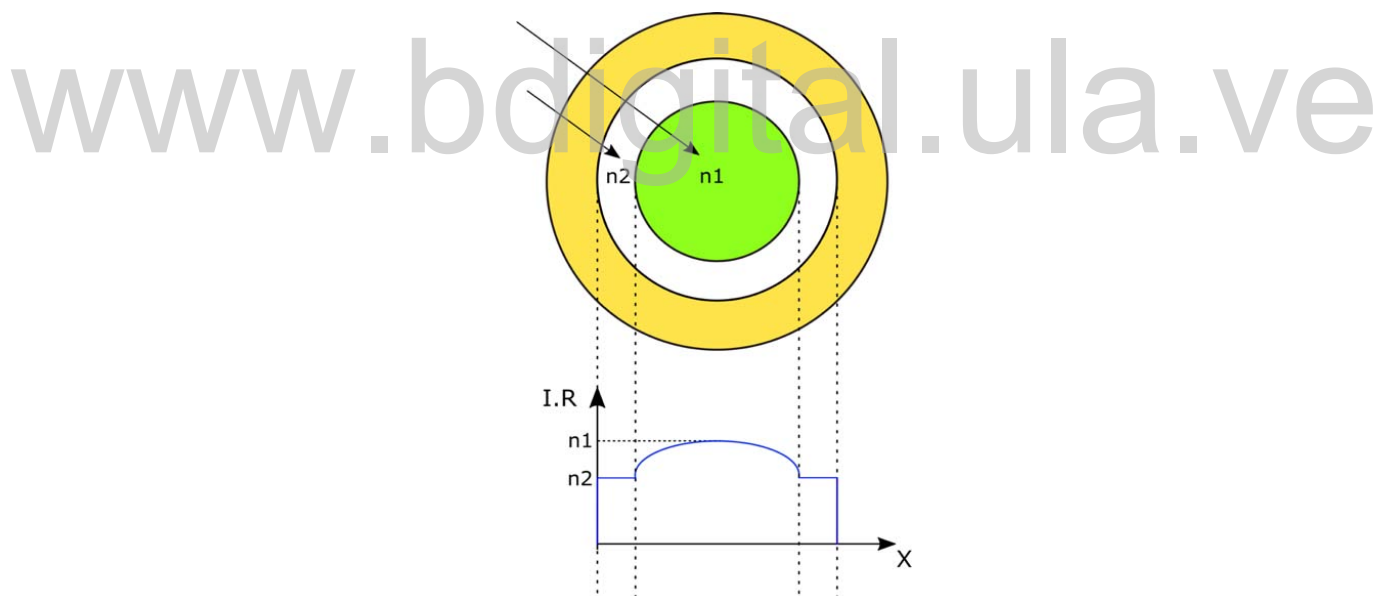


Figura 2.4. Perfil fibra multimodo configuración índice gradual (Elaboración propia).

En general las fibras multimodo poseen las siguientes características [14]:

- Son utilizadas comúnmente en enlaces de distancias más cortas, inferiores a 1 Km.
- Su velocidad de transmisión es moderada.

- Disponen de un núcleo de mayor diámetro.
- Debido al amplio diámetro del núcleo las fibras multimodo son ideales para ser acopladas a fuentes transmisoras del tipo LED y VCESEL.
- Funcionan en la primera y segunda ventana, 850 nm y 1310 nm respectivamente.
- La chaqueta plástica que cubre este tipo de fibra tiende a ser de color naranja según la convención de colores que se aplica a los cables de fibra óptica.
- Los diámetros que se encuentran comúnmente son de 62,5 μm y 50 μm para el núcleo, y de 125 μm para el revestimiento en ambos casos.
- La transmisión en la segunda ventana es la más adecuada para minimizar los efectos de dispersión.

b. Fibra Óptica Monomodo

Las fibras ópticas de tipo monomodo son aquellas que propagan un solo modo guiado. Esta fibra a diferencia de las multimodo, no presenta dispersión intermodal, ya que solo se propaga un modo. Por el contrario, sí está presente la dispersión intramodal o cromática, la cual se produce debido a que la transmisión de información utilizando un haz de luz está compuesta por diferentes longitudes de onda, donde cada una representa un color del espectro visible, por lo tanto no es monocromático, esto trae como consecuencia que cada longitud de onda que conforma el haz de luz sufra un retardo al propagarse a través de la fibra. Esta dispersión cromática da origen a el ensanchamiento temporal del pulso de salida con respecto al de la entrada [14].

Las fibras monomodo poseen las siguientes características:

- Alta velocidad de transmisión.
- Un gran ancho de banda.
- Su aplicación es comúnmente en enlaces de comunicaciones de larga distancia.
- El diámetro de su núcleo es mucho más pequeño en comparación al de las fibras multimodo.
- El diámetro del núcleo es de 9 μm y 125 μm para el revestimiento.

- Las longitudes de onda de propagación se encuentran en la ventana de 1330 nm y 1550 nm, ya que en estas se obtiene la mínima dispersión cromática y las mínimas pérdidas respectivamente.
- La chaqueta plástica que cubre este tipo de fibra tiende a ser de color amarillo según la convención de colores que se aplica a los cables de fibra óptica.

2.4.3 Detector Óptico

El detector óptico es un dispositivo que detecta y traduce información de una señal del dominio óptico al dominio eléctrico, produciendo una fotocorriente, la cual es proporcional a la potencia electromagnética promedio que incide en el dispositivo [14]. La relación de estos parámetros se muestra en la ecuación (2.4).

$$\bar{i}(t) = \mathfrak{R} \cdot P(t) \quad (2.4)$$

Donde:

$\bar{i}(t)$: Fotocorriente instantánea

\mathfrak{R} : Responsividad del dispositivo

$P(t)$: Potencia óptica incidente en el fotodetector

La responsividad \mathfrak{R} es un parámetro que caracteriza el fotodetector, está relacionado con su eficiencia cuántica, la cual representa la probabilidad de que un fotón sea absorbido y aporte un electrón a la fotocorriente [14].

En las comunicaciones ópticas los receptores o detectores empleados mayormente están contruidos de una unión P-N de materiales semiconductores.

Entre los detectores más comunes se encuentran:

2.4.3.1 Detectores Térmicos

Son aquellos que absorben la energía óptica, y la convierten en una variable de la temperatura. No son utilizados en comunicaciones ya que su tiempo de respuesta es muy lento, por lo tanto, no son capaces de seguir variaciones rápidas de la potencia incidente.

2.4.3.2 Fotodetectores

Este dispositivo absorbe la potencia óptica que incide sobre sí mismo, convirtiendo los fotones absorbidos en electrones a través del proceso de emisión estimulada, lo que da origen a la corriente fotodetectada. De este modo, se cambia la señal del dominio óptico al dominio eléctrico [14].

Los fotodetectores son los más utilizados en las comunicaciones ópticas, en parte, esto se debe a las siguientes características:

- La conversión de fotones a electrones es eficiente.
- Posee un bajo ruido.
- El área del fotodetector es suficiente para acoplarlo a una fibra óptica.
- Es un elemento de bajo costo.
- La respuesta varía según la longitud de onda.
- Su sensibilidad depende de la longitud de onda requerida.
- Alta confiabilidad.
- Velocidad de respuesta alta.

a. Tipos de Fotodetectores

A continuación, se explican los fotodetectores que se emplean con más frecuencia en las comunicaciones ópticas:

a.1.- Fotodetector P-N

Es un diodo semiconductor que está formado por una unión P-N. Su funcionamiento se basa en el principio de absorción. En este principio de absorción, se tiene un material que se

irradia con fotones, en el que se encuentra un portador que se envía del nivel bajo al nivel alto de energía, originándose la absorción de fotones del material.

Por cada fotón absorbido se genera un par electrón-hueco, esto trae como consecuencia que la señal óptica se transforme en una eléctrica. La polarización del fotodetector P-N se lleva a cabo en inversa, pues de esta forma se puede tener una zona de agotamiento mayor, además la polarización en inversa aumenta la velocidad, sensibilidad y respuesta en frecuencia del fotodetector.

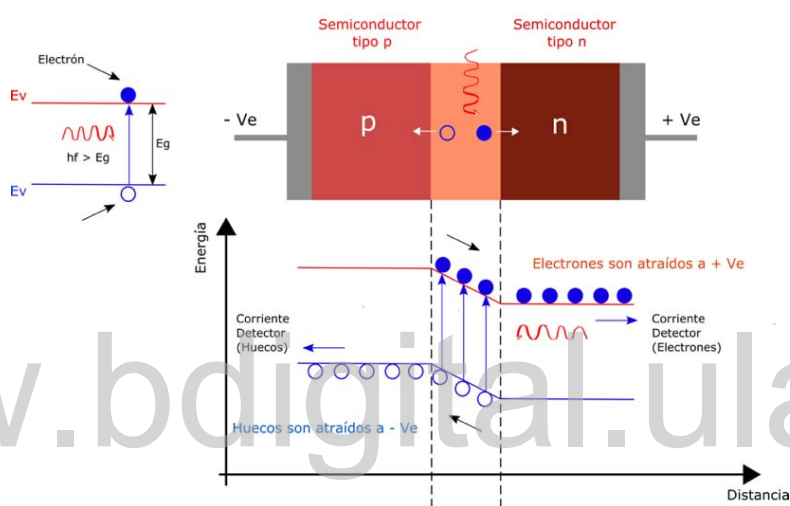


Figura 2.5. Modelo del fotodetector de tipo P-N (Elaboración propia).

a.2.- Fotodetector P-I-N

Su principio de funcionamiento es el mismo que para el fotodetector P-N, la diferencia es que este fotodetector fue creado con el fin de lograr que la absorción de fotones sea mucho más eficiente.

Esto se logra modificando la estructura del fotodetector, ya que en el medio del material P-N se agrega una capa de semiconductor intrínseca ligeramente dopada donde se lleva a cabo el proceso de absorción de fotones y generación de electrones, por lo tanto, se incrementa la absorción de luz, y la eficiencia cuántica del fotodetector [14].

En la figura 2.6 se muestra el modelo del fotodetector P-I-N donde se observa que la adición de la zona intrínseca origina un ensanchamiento importante en la zona de agotamiento, esto permite que se obtenga una mayor absorción, originando un campo estático fuerte en toda su extensión.

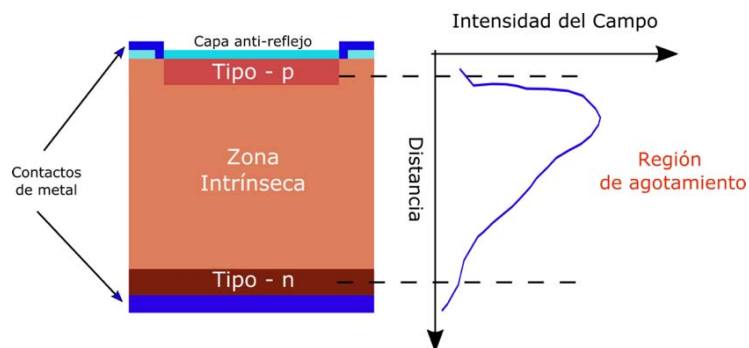


Figura 2.6. Modelo del fotodetector de tipo P-I-N (Elaboración propia).

2.5 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL TRANSFORMADOR DE CORRIENTE ÓPTICO

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 2.7 [17].

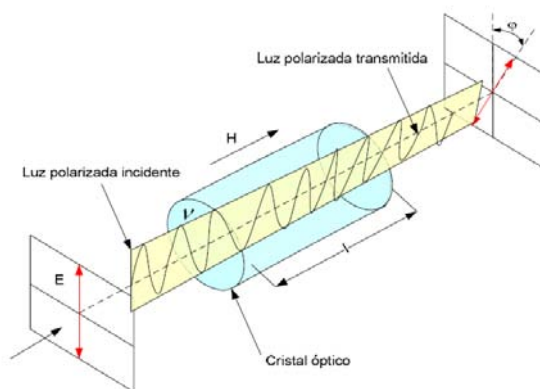


Figura 2.7 Efecto Faraday en un cristal óptico [17].

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. Sin embargo, si la señal luminosa no es sometida a un campo magnético, la fase de la señal de salida permanecerá igual que la fase de la señal de entrada. Como consecuencia si no hay presencia de campo magnético aplicado, tampoco habrá intensidad de corriente circulando a través del conductor.

Un transformador de corriente óptico (TCO) está compuesto de varios elementos que se describieron en el apartado 2.4. La construcción del modelo del transformador de corriente óptico en este trabajo se organiza en tres etapas conformadas por estos elementos principales:

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 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 2.8 se muestra el diagrama de bloques básico que conforma el modelo óptico del TCO.

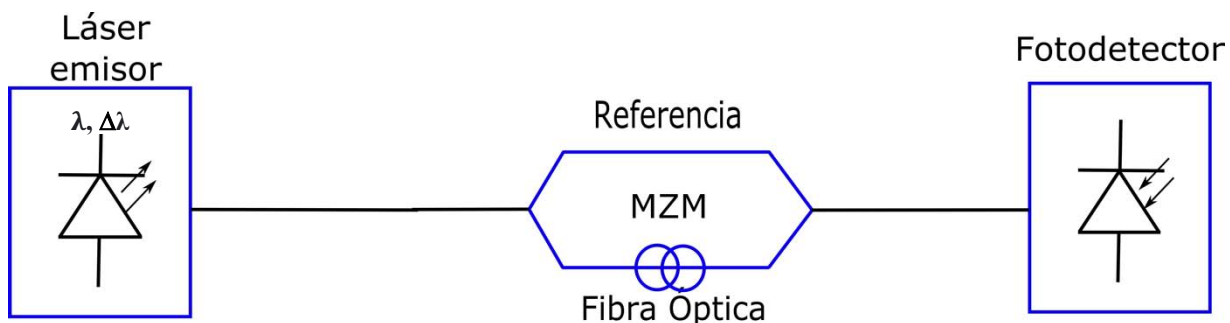


Figura 2.8 Diagrama de bloques del modelo óptico del TCO (Elaboración propia).

2.6 CONFIGURACIONES DE UN TRANSFORMADOR DE CORRIENTE ÓPTICO

2.6.1 Sensor magneto-óptico utilizando materiales volúmicos (*Bulk Optic*)

En esta configuración el camino óptico está determinado dentro de un bloque de material cristalino ópticamente activo, el cual encierra al conductor. El haz de luz de la señal de entrada recorre este camino óptico, donde a través del principio polarimétrico se obtiene la medida del desfase de la señal de salida y por ende la corriente del conductor la cual es proporcional al cambio en la polarización de la señal luminosa, causado por de un campo magnético externo [18].

La configuración de *Bulk Optic* puede presentar algunas limitaciones ya que para lograr que la señal luminosa recorra la mayor cantidad de camino óptico posible es necesario incorporar reflexiones dentro del material, por lo tanto va a existir un error inducido por estas reflexiones el cual afectara la medida de corriente.

2.6.2 Sensor de Fibra Óptica Pura

El camino óptico de este sensor es la fibra óptica, la cual se ubica alrededor del conductor [17]. El número de vueltas de fibra óptica alrededor del conductor es directamente

proporcional a la sensibilidad, es decir, un mayor número de vueltas de fibra óptica aporta un incremento en la sensibilidad del instrumento al realizar la medición.

Sin embargo, se pueden medir mayores magnitudes de corriente al tener menor número de vueltas de fibra óptica alrededor del conductor. Normalmente para aplicaciones en sistemas para protecciones se utilizan 3-4 vueltas de fibra óptica alrededor del conductor, donde el rango de medición se encuentra entre 100 mA a 100 kA [19].

Es importante tener en cuenta que la fibra óptica posee un radio de curvatura permitido, que garantiza que la señal a través de la fibra viaje con la menor cantidad de pérdidas, evitando la atenuación de la misma. El radio de curvatura es una medida que indica cuanto puede doblarse la fibra óptica antes de sufrir daños que la quiebren, y originen pérdidas de la señal luminosa a través de haces de luz refractados escapando del revestimiento. La cantidad permitida según las normas establecidas es de 10 a 12 veces el diámetro exterior del cable.

Este tipo de sensor utiliza dos técnicas distintas para realizar la medición, una de ellas es bajo el principio polarimétrico, el cual fue descrito anteriormente, la otra técnica se basa en el principio interferométrico.

2.6.3 Interferómetro Mach-Zehnder

En esta configuración el camino óptico está definido por un sensor de fibra óptica y dispositivo bajo a prueba alrededor del conductor como se muestra en la figura 2.9, donde se considera una configuración interferométrica. El interferómetro de Mach-Zehnder es utilizado para controlar la amplitud de la señal portadora, realizando una modulación en amplitud de la señal óptica [20].

Su funcionamiento consiste en implementar dos caminos de señal para determinar la variación relativa entre las fases de los 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 .

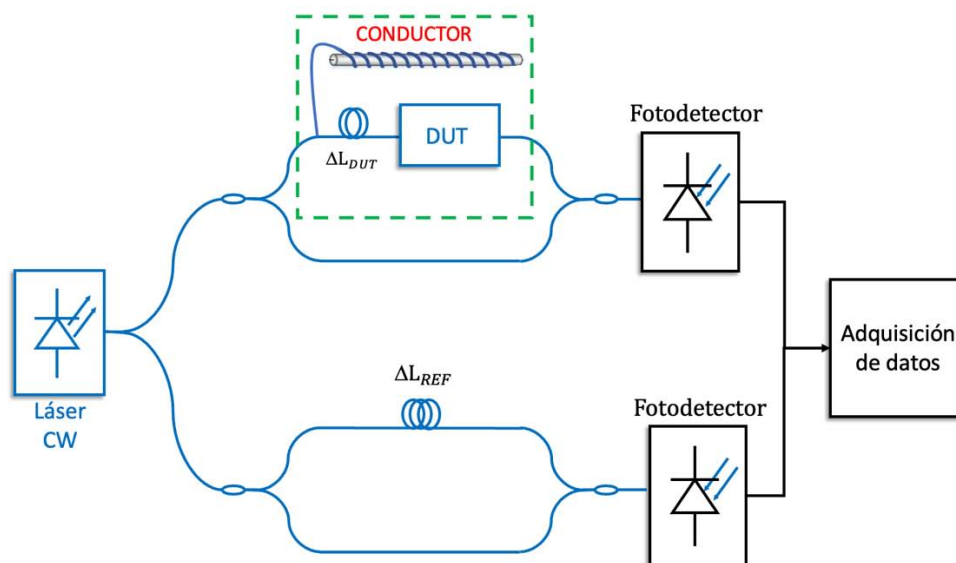


Figura 2.9 Modelo del TCO en configuración Interferómetro Mach-Zehnder (Elaboración propia).

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 2.3), 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

$$x = v \cdot t \quad (2.5)$$

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 [21]:

$$E_o(t) = \frac{1}{2} (e^{j\Phi_1} + e^{j\Phi_2}) \cdot E_i(t) \quad (2.6)$$

Donde:

$E_i(t)$: Campo eléctrico de entrada

$E_o(t)$: Campo eléctrico de salida

2.6.3.1 Métodos de interferencia

La interferencia entre dos señales causa intensas variaciones que se pueden detectar a través de un fotodetector, en esta sección se presentan dos métodos diferentes para medir la interferencia entre dos campos ópticos [22]:

- a. **Heterodino:** En esta configuración se tiene una señal de entrada que se combina junto con la señal de un oscilador local, el cual se utiliza como medida de referencia ya que tiene una potencia constante, frecuencia, amplitud y características de fase conocidas, con el fin de encontrar la interferencia entre el campo del oscilador y el campo de la señal de entrada.
- b. **Self Homodyne:** Esta configuración se implementa cuando se tiene un interferómetro de dos caminos como el de Mach-Zehnder, y se utiliza cuando uno de los campos ópticos de interferencia es la versión retrasada del otro. Esto se logra variando la longitud de uno de los caminos ópticos. Su funcionamiento consiste en que el campo que genera la señal de entrada se divide en dos y viaja a través de las ramas del interferómetro en diferentes tiempos, lo cual genera un t_o , el cual se define como el diferencial de tiempo entre los caminos del interferómetro.

Además, se considera la configuración de **Self Homodyne** en el régimen coherente donde se debe cumplir que el diferencial de tiempo del interferómetro t_o sea menor al tiempo de coherencia de la fuente t_c ($t_o < t_c$) para garantizar una buena interferencia.

El tiempo de coherencia de un láser se define como una medida de la pureza del espectro de frecuencia del láser a través del tiempo. En las configuraciones de interferómetro de dos caminos, este representa el tiempo máximo para el cual la fase se mantiene constante en dos

instantes de tiempo diferentes. Su cambio es inversamente proporcional con respecto al ancho de línea Δ_ν del laser y su ecuación se define para una forma espectral Lorentziana como [21];

$$t_c = \frac{1}{\pi \cdot \Delta_\nu} \quad (2.7)$$

www.bdigital.ula.ve

CAPÍTULO III

MODELO Y SIMULACIÓN DEL TRANSFORMADOR DE CORRIENTE ÓPTICO

En este capítulo 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 que se van a estudiar a lo largo del desarrollo del capítulo con el fin de demostrar el funcionamiento del código a nivel de simulación.

3.1 MODELADO DE LA INTERFEROMETRÍA ÓPTICA EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA

Se presenta la implementación del modelo de 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.

OFDI 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 [23].

La configuración de este OFDI se caracteriza por la implementación de dos interferómetros Mach-Zehnder para adquirir la fase óptica de la señal. En este caso, un segundo interferómetro es recomendado y se emplea en el modelo con el propósito de corregir los errores de fase y no linealidades que ocurren en el barrido de frecuencia óptica del láser emisor, empleando para este modelo de OFDI el método de interferencia de “*self homodyne*” [23].

En este modelo uno de los interferómetros se denomina como dispositivo bajo prueba o según sus siglas en Inglés DUT “*Device Under Test*”, mientras al otro se le llama interferómetro de referencia.

En este tipo de configuración es importante considerar que el diferencial de longitud entre el interferómetro de referencia ΔL_{ref} sea mayor con respecto al diferencial de longitud del dispositivo bajo prueba ΔL_{DUT} , por lo tanto, se debe satisfacer la condición que enuncia el teorema de Nyquist, según [23]

$$\Delta L_{ref} \geq 2\Delta L_{DUT} \quad (3.1)$$

De esta manera se garantiza que el interferómetro de referencia pueda arrojar todos los puntos de muestreo necesarios para adquirir la señal del interferómetro del dispositivo bajo prueba correctamente. Este fundamento parte del teorema de Nyquist para la adquisición de señales, el cual establece que la reconstrucción exacta de una señal depende de la tasa de muestreo, por lo tanto, la frecuencia de muestreo f_s debe ser al menos dos veces mayor que la frecuencia más alta de la señal que se desea reconstruir f_m [24].

$$f_s \geq 2 \cdot f_m \quad (3.2)$$

El diagrama que se presenta en la figura 3.1 representa el modelo del sistema óptico que se utiliza para el desarrollo de la simulación en software del TCO, el cual consta con una etapa emisora de una fuente óptica sintonizable, dos interferómetros, y una etapa de foto-detección con el fin de obtener y comparar la señal de salida de referencia con la señal de salida del dispositivo bajo prueba que en esta investigación se representa a través de una fibra óptica primeramente, y luego con un cristal de niobato de litio, con el fin de encontrar si existe una variación en el patrón de interferencia.

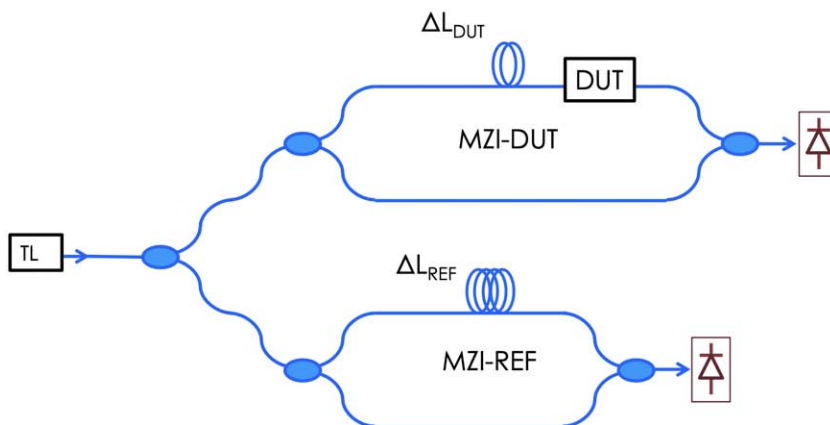


Figura 3.1 Diagrama del modelo OFDI [19].

3.1.1 Respuesta del interferómetro de referencia y dispositivo bajo prueba

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 $I = |E|^2$ [23].

Por lo tanto, para el interferómetro de referencia se tiene una respuesta denominada I_{ref} y viene definida por la siguiente ecuación.

$$I_{ref} = (1 + e^{(j*\beta_{1wg}*\Delta L_{ref})})^2 \quad (3.3)$$

Donde:

$$\beta_{1wg} = \frac{n_g}{c} \quad \text{Retardo de grupo.}$$

$$n_g \quad \text{Índice de refracción de grupo}$$

ΔL_{ref} Longitud del camino óptico interferómetro de referencia.

Para el interferómetro de referencia en la ecuación (3.3) se tiene una respuesta del tipo interferómetro de Mach-Zehnder, 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:

$$\Phi = \beta_{1wg} \cdot \Delta L \quad (3.4)$$

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} .

Por otro lado, para el interferómetro del dispositivo bajo prueba se tiene una respuesta denominada I_{DUT} y viene definida por la siguiente ecuación.

$$I_{DUT} = (1 + H_{DUT} \cdot e^{(j \cdot \beta_{1wg} \cdot \Delta L_{DUT})})^2 \quad (3.5)$$

Donde

H_{DUT} : Función de transferencia del interferómetro del dispositivo bajo prueba.

3.1.2 Procesamiento y linealización de la respuesta del interferómetro

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 de la separación en frecuencia Δf entre dos oscilaciones consecutivas (FSR) y se puede calcular tanto en unidades de longitud como en Hz [19]

$$FSR_{[m]} = \frac{\lambda^2}{n_g \cdot \Delta L} \quad (3.6)$$

$$FSR_{[Hz]} = \frac{c}{n_g * \Delta L} \quad (3.7)$$

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 $\Delta L_{ref} \geq 2\Delta L_{DUT}$.

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.

3.1.3 Algoritmo de la transformada rápida de Fourier (FFT)

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 serie de Fourier representa una señal como una combinación lineal de exponenciales complejas armónicas, la cual está compuesta por coeficientes a_k que miden la porción de la señal que está en cada armónico de la componente fundamental [25].

La transformada de Fourier se puede representar en términos de sus componentes real e imaginaria o en términos de magnitud y fase.

En la transformada rápida de Fourier se consideran principalmente los parámetros de frecuencia fundamental ω_o la cual está definida por la siguiente ecuación:

$$\omega_o = \frac{2\pi}{T} \quad (3.8)$$

A medida que ω_o disminuye o de manera equivalente cuando T se incrementa el espaciamiento de cada una de las muestras de la envolvente de la señal es más estrecho.

3.1.4 Respuesta Temporal

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. La Ventana de la respuesta temporal es simétrica con respecto a su eje y se encuentra en un rango desde $-\frac{T}{2}$ hasta $\frac{T}{2}$, por lo tanto su información es repetida a lo largo del eje, y se puede truncar la respuesta para analizar solo la mitad de la ventana definida.

Sin embargo a nivel de código existe un apartado donde previo a la implementación del algoritmo de la transformada rápida de Fourier se aplica la función de zero padding a el vector muestreado de la corriente del interferograma con el fin de agregar los puntos donde existan cruces por cero y de esta manera incrementar el número de elementos (muestras) pero sin cambiar la información de la respuesta del interferograma del dispositivo bajo prueba.

Adicionalmente el enventanado de tipo Gaussiano es utilizado, ya que permite corregir y reducir los lóbulos secundarios o también llamado fenómeno de Gibbs que pudiera presentar la respuesta del interferómetro.

Esta respuesta temporal proporciona información muy importante que se explica a continuación: como la resolución espacial, amplitud, forma y fase de la respuesta del DUT [23].

La resolución espacial permite conocer la zona en el DUT donde ocurren los eventos, considerando este “evento” como la aplicación de un campo electromagnético externo que altera sus parámetros no lineales y como consecuencia produce en la salida del interferómetro un patrón de interferencia.

La resolución espacial, según [23], se define por la siguiente ecuación:

$$\Delta_x = \frac{\lambda^2}{n_g \cdot \Delta\lambda} \quad (3.9)$$

La respuesta de las contribuciones temporales en términos de amplitud es considerada para analizar las pérdidas que pueda tener la señal y se evalúa a través de comparar la amplitud entre un pico y otro. Con respecto a la forma debido al enventanado Gaussiano que se emplea, la señal tiende a tomar este tipo de forma. Sin embargo pueden haber factores que la distorsionen. La fase proporciona información del DUT a través de la comparación de la misma entre sus contribuciones temporales.

3.1.5 Recuperación espectral de la respuesta en frecuencia

Luego de analizar la respuesta temporal del interferograma del DUT, su respuesta posee contribuciones temporales no deseadas que aparecen al aplicar el algoritmo de la transformada de Fourier. Estas contribuciones deben corregirse antes de obtener su reconstrucción espectral y para esto se implementan nuevamente técnicas funcionales para recuperar una traza más pura del espectro del DUT. Entre estas técnicas se encuentra el zero padding y el enventanado Gaussiano explicados anteriormente.

3.2 SIMULACIONES DEL INTERFERÓMETRO DE REFERENCIA

El objetivo de estas simulaciones es mostrar la respuesta fotodetectada de I_{ref} en la salida del interferómetro de referencia por individual, el cual se modela a través de una fibra óptica, configurando y variando los parámetros de simulación del láser y el interferómetro según corresponda.

3.2.1 Caso 1

A continuación se definen los parámetros de esta simulación

a. 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

b. Parámetros del interferómetro de referencia:

$n_{g_ofdr} = 1.4682$	Índice de refracción de grupo para una fibra óptica
$\Delta L_{ref} = 16 \text{ mm}$	Longitud del camino óptico del interferómetro
$\beta_{1ref} = \frac{n_{g_ofdr}}{c}$	Retardo de grupo.
$\beta_{2ref} = 0$	Dispersión retardo en propagación

Tomando en cuenta los parámetros descritos, se ejecuta la simulación en MATLAB® y se obtienen los resultados para el interferómetro de referencia, figura 3.2.

Donde se muestra la respuesta de la intensidad de campo eléctrico del interferómetro de referencia I_{ref} en el dominio temporal para los parámetros definidos tanto para el láser como el interferómetro.

La figura 3.2-a es la respuesta del interferómetro donde se comprueba que el parámetro de ancho de banda Δ_ν , definido para el láser de la simulación es de 12.5 THz. Esta ventana de ancho de banda se divide en 6.25 THz desde el origen del eje hacia cada uno de sus extremos izquierdo y derecho.

Mientras en la figura 3.2-b, se realiza un acercamiento de la respuesta, con el fin de observar su característica senoidal. Donde la señal 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.

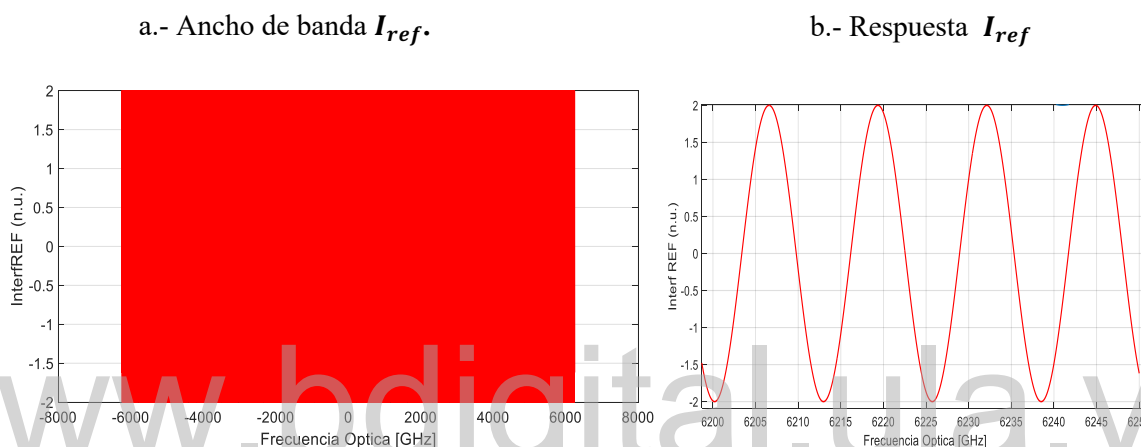


Figura 3.2 Respuesta caso 1 intensidad de campo eléctrico I_{ref} .

3.2.2 Caso 2

El objetivo de esta simulación es variar el valor de alguno de los parámetros de propagación que causan cambios en el patrón de interferencia del interferómetro de referencia para comparar su respuesta con respecto a la del caso 1.

Como se mencionó anteriormente en este capítulo, esto se puede generar variando la longitud del enlace del camino óptico ΔL_{ref} .

Para esta simulación se van a mantener los mismos parámetros descritos para el láser, sin embargo la longitud del enlace del camino óptico d_{ref} será mayor con respecto a la de la simulación 1 manteniendo fijo $n_{g_ofdr} = 1.4682$.

a. 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

b. Parámetros interferómetro de referencia:

$n_{g_ofdr} = 1.4682$	Índice de refracción de grupo para una fibra óptica
$\Delta L_{ref} = 20 \text{ mm}$	Longitud del camino óptico del interferómetro
$\beta_{1ref} = \frac{n_{g_ofdr}}{c}$	Retardo de grupo.
$\beta_{2ref} = 0$	Dispersión retardo en propagación

En la figura 3.3 se encuentra una respuesta de I_{ref} distinta a la que se obtuvo en el caso 1.

Ya que en esta simulación se comprueba como el patrón de interferencia cambia con respecto al aumento del parámetro $\Delta L_{ref} = 20 \text{ mm}$. Por lo tanto se encuentra como aumenta la periodicidad de la señal envolvente de intensidad de campo la cual tiene un periodo T de 98.04 ps lo cual corresponde a una frecuencia de 10.20 GHz.

Además, se muestra como el aumento de ΔL_{ref} solamente genera cambio en la frecuencia de la señal de I_{ref} mas no en la respuesta del espectro óptico, pues el ancho de banda del láser se mantiene en una ventana de 12.50 THz como fue definido.

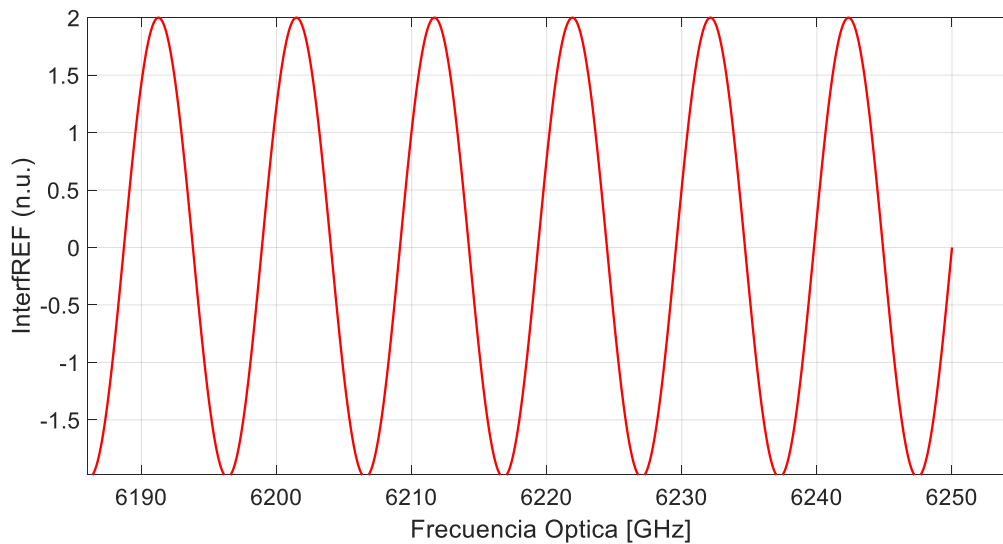


Figura 3.3 Respuesta caso 2 intensidad de campo eléctrico I_{ref} .

En la figura 3.4 se muestra la comparación entre la respuesta del interferómetro de referencia para $\Delta L_{ref} = 16$ mm (trazo rojo) y $\Delta L_{ref} = 20$ mm (trazo azul), de esta manera se valida como la respuesta del interferómetro I_{ref} cambia su periodicidad cuando se varia la longitud del camino óptico del interferómetro.

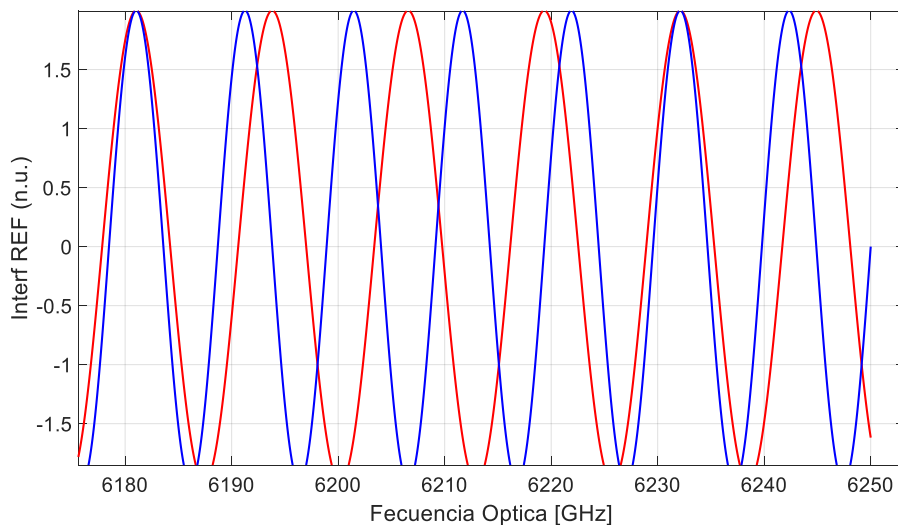


Figura 3.4 Comparación Respuesta variando dl_{ref} .

3.2.3 Caso 3

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 1.

Para esta simulación se van a mantener los mismos parámetros descritos para el láser, mientras que el índice de refracción de grupo se incrementa n_{g_ofdr} 1.7 manteniendo $\Delta L_{ref} = 16$ mm .

a. Parámetros del láser:

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

b. Parámetros interferómetro de referencia:

$n_{g_ofdr} = 1.70$	Índice de refracción de grupo para una fibra óptica
$\Delta L_{ref} = 16$ mm	Longitud del camino óptico del interferómetro
$\beta_{1ref} = \frac{n_{g_ofdr}}{c}$	Retardo de grupo.
$\beta_{2ref} = 0$	Dispersión retardo en propagación

En la figura 3.5 se ilustra una respuesta de I_{ref} distinta a la del caso 1, pues al incrementar el índice de refracción de grupo aumenta la periodicidad de la señal envolvente de intensidad de campo la cual tiene un periodo T de 90.42 ps lo cual corresponde a una frecuencia de 11.06 GHz.

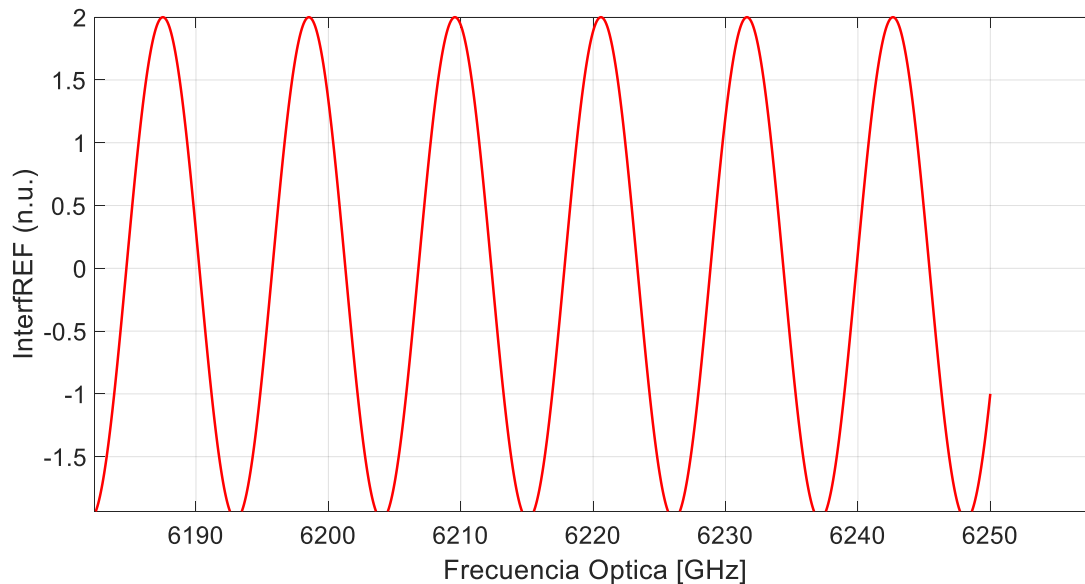


Figura 3.5 Respuesta caso 3 intensidad de campo eléctrico I_{ref} .

En la figura 3.6 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.

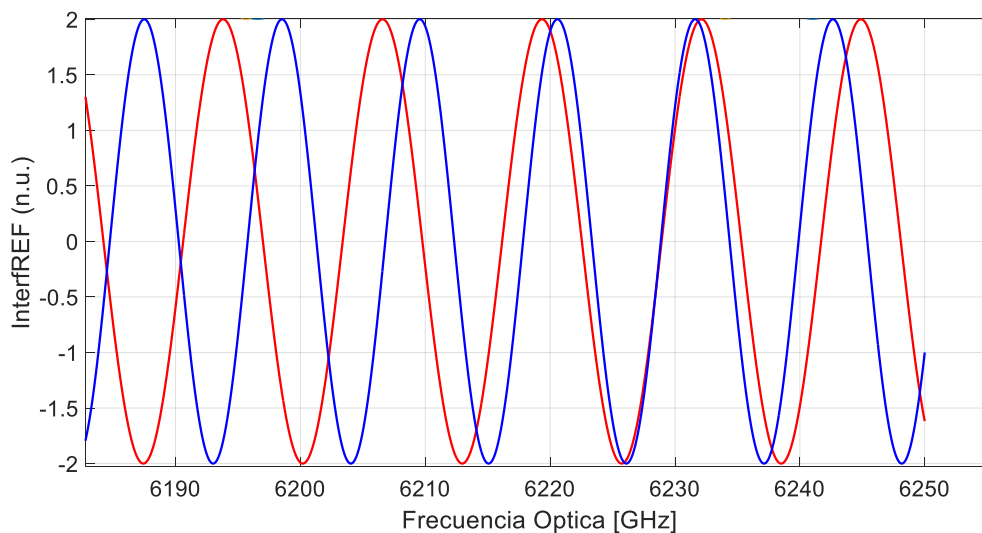


Figura 3.6 Comparación respuesta variando n_g .

3.2.4 Caso 4

Esta simulación se realiza con el fin de encontrar el cambio de la respuesta de la señal de I_{ref} cuando se varía alguno de los parámetros del láser como la longitud de onda central λ o el span $\Delta\lambda$.

La ecuación (3.5) describe el ancho de banda $\Delta\nu$ de una señal y la relación que guarda con respecto a la longitud de onda del láser y el span definido.

$$\Delta\nu = \frac{c}{\lambda_c^2} \Delta\lambda \quad (3.10)$$

a. Parámetros del láser:

$$c = 3 \times 10^8 \frac{m}{s}$$

Velocidad de la luz

$$\lambda = 1350 \text{ nm}$$

Longitud de onda central del laser

$$\Delta\lambda = 100 \text{ nm}$$

Span

$$\Delta\nu = 16.40 \text{ THz}$$

Ancho de banda de frecuencia

b. Parámetros interferómetro de referencia:

$$n_{g_ofdr} = 1.4682$$

Índice de refracción de grupo para una fibra óptica

$$\Delta L_{ref} = 16 \text{ mm}$$

Longitud del camino óptico del interferómetro

$$\beta_{1ref} = \frac{n_{g_ofdr}}{c}$$

Retardo de grupo.

$$\beta_{2ref} = 0$$

Dispersión retardo en propagación

El ancho de banda para este caso ha cambiado y corresponde a 16.4 THz su respuesta se ilustra en la figura 3.7-a lo que permite comprobar como al disminuir λ el ancho de banda $\Delta\nu$ es mayor comparándolo con el caso 1, esto permite validar la ecuación (3.5).

Al realizar un acercamiento, en la figura 3.7-b se observa la respuesta del interferómetro para I_{ref} . A pesar de que el ancho de banda cambió, la señal mantiene la misma frecuencia de modulación que arroja la simulación 1. Donde se tiene una frecuencia de 12.75 GHz para un periodo T de aproximadamente 78.62 ps.

Es decir que el efecto que tiene variar alguno de los parámetros del láser como el span o la longitud de onda central representa únicamente cambios en el ancho de banda del espectro óptico, más no en la frecuencia de modulación, pues la periodicidad de la señal se mantiene igual.

a.- Ancho de banda I_{ref} .

b.- Respuesta I_{ref}

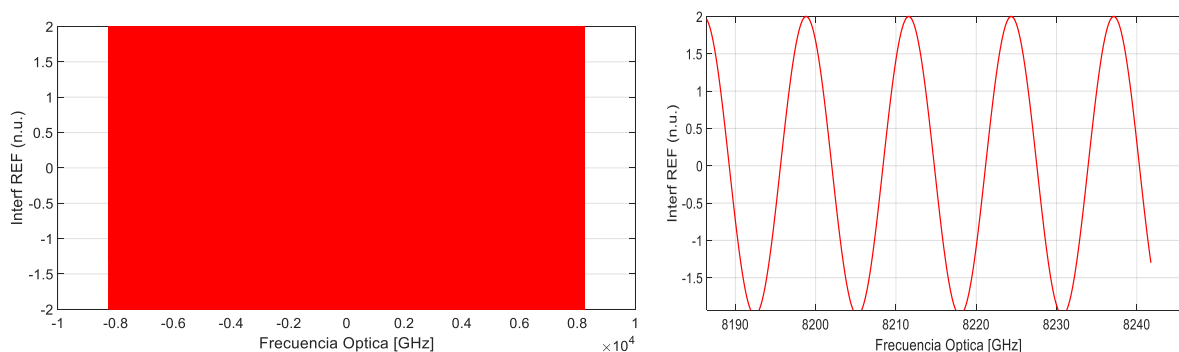


Figura 3.7. Respuesta caso 4 intensidad de campo eléctrico I_{ref} .

3.3 SIMULACIONES DEL INTERFERÓMETRO DEL DISPOSITIVO BAJO PRUEBA (DUT)

En esta sección se realizan las simulaciones para representar la respuesta fotodetectada I_{DUT} del interferómetro del dispositivo bajo prueba, en este caso el DUT se modela a través de una fibra óptica cuyos parámetros se configuran en el código de MATLAB® que se ejecuta para desarrollar esta investigación.

3.3.1 Caso 1

A continuación se definen los parámetros de esta simulación

a. 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

b. Parámetros del interferómetro del dispositivo bajo prueba:

$$n_{g_DUT} = 1.4682$$

Índice de refracción de grupo para una fibra óptica

$$\Delta L_{DUT} = 4 \text{ mm}$$

Longitud del camino óptico del interferómetro DUT

$$\beta_{1DUT} = \frac{n_{g_dut}}{c} \quad \text{Retardo de grupo.}$$

$$\beta_{2DUT} = 0 \quad \text{Dispersión retardo en propagación}$$

La figura 3.8 muestra la señal en la salida del interferómetro del dispositivo bajo prueba que responde a $I_{DUT} = (1 + H_{DUT} \cdot e^{(j \cdot \beta_{1wg} \cdot \Delta L_{DUT})})^2$, se calcula su frecuencia obteniendo 44.5 GHz de frecuencia con un período de 22.47 ps

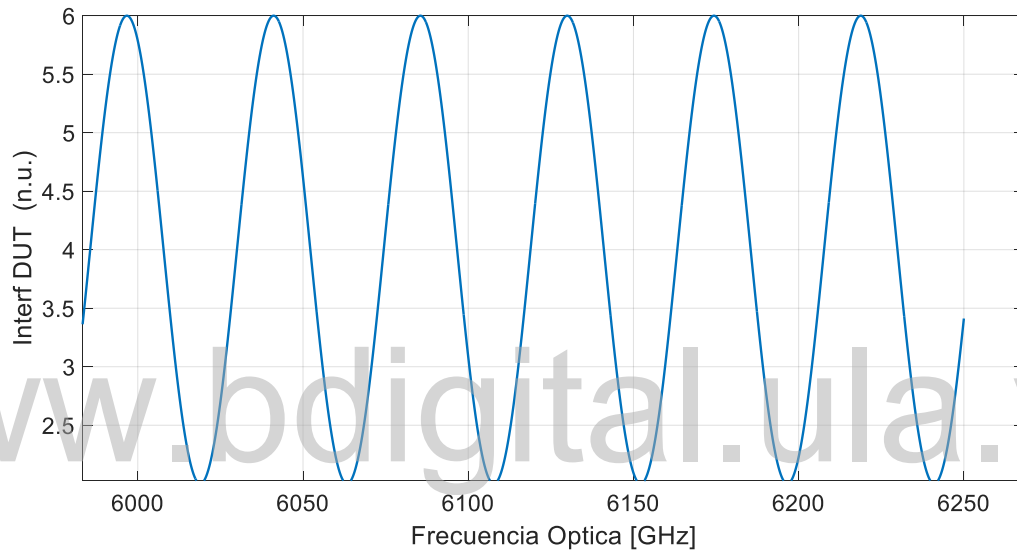


Figura 3.8 Respuesta intensidad de campo eléctrico I_{DUT} .

La señal fotodetectada de corriente para el interferómetro DUT tiene contribuciones en DC y AC. Las contribuciones en DC dependen de las pérdidas ópticas en el camino. Sin embargo el patrón de interferencia es detectado por la contribución oscilatoria o AC, por lo tanto $I_{DUT_balanced}$ evita la contribución DC del interferograma.

La señal que se muestra en la figura 3.9 corresponde a la respuesta de $I_{DUT_balanced}$ la cual corresponde a la diferencia entre I_{DUT} e I_{DUTB} . Esta respuesta $I_{DUT_balanced}$ tiene la misma frecuencia que I_{DUT} de 44.50 GHz.

$$I_{DUT_balanced} = I_{DUT} - I_{DUTB} \quad (3.11)$$

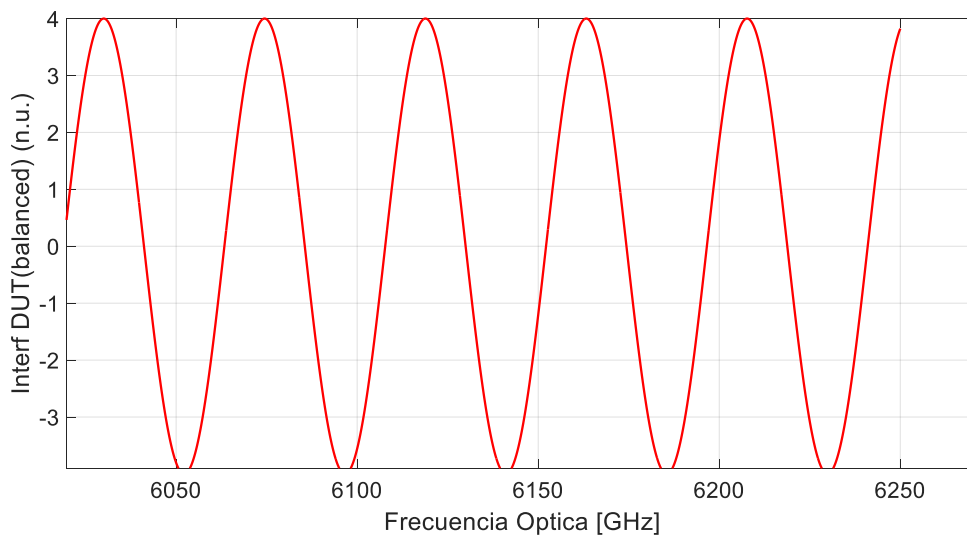


Figura 3.9 Respuesta intensidad de campo eléctrico $I_{DUT_balanced}$

En la figura 3.10 se muestran ambas señales, donde la traza en color morado corresponde a la respuesta de I_{DUT} , mientras que la traza en verde I_{DUTB} es la versión desfasada de I_{DUT} lo cual se representa no solo gráficamente si no también en las ecuaciones que definen a cada una de estas respuestas.

$$I_{DUTB} = (j + H_{DUT} \cdot e^{(j \cdot \beta_{1wg} \cdot \Delta L_{DUT})})^2 \quad (3.12)$$

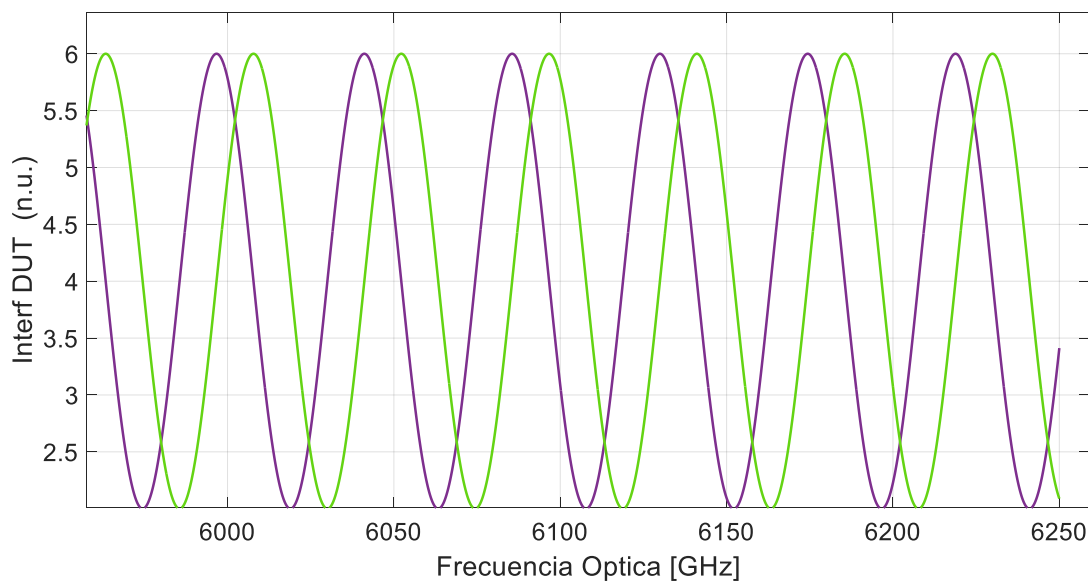


Figura 3.10 Respuesta I_{DUT} e I_{DUTB} .

3.4 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® que se ejecuta para desarrollar esta investigación.

3.4.1 Caso 1

A continuación se definen los parámetros de la simulación para ambos interferómetros.

a. 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

b. Parámetros del interferómetro de referencia

$$n_{g_of_dr} = 1.4682$$

Índice de refracción de grupo para una fibra óptica

$$\Delta L_{ref} = 16 \text{ mm}$$

Longitud del camino óptico del interferómetro

$$\beta_{1ref} = \frac{n_{g_ofdr}}{c} \quad \text{Retardo de grupo.}$$

$$\beta_{2ref} = 0 \quad \text{Dispersión retardo en propagación}$$

c. Parámetros del interferómetro del dispositivo bajo prueba

$$n_{g_DUT} = 1.4682 \quad \text{Índice de refracción de grupo para una fibra óptica}$$

$$\Delta L_{DUT} = 4 \text{ mm} \quad \text{Longitud del camino óptico del interferómetro DUT}$$

$$\beta_{1DUT} = \frac{n_{g_dut}}{c} \quad \text{Retardo de grupo.}$$

$$\beta_{2DUT} = 0 \quad \text{Dispersión retardo en propagación}$$

La traza azul de la figura 3.13 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.

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 parámetros ΔL_{ref} el cual es cuatro veces mayor que ΔL_{DUT} .

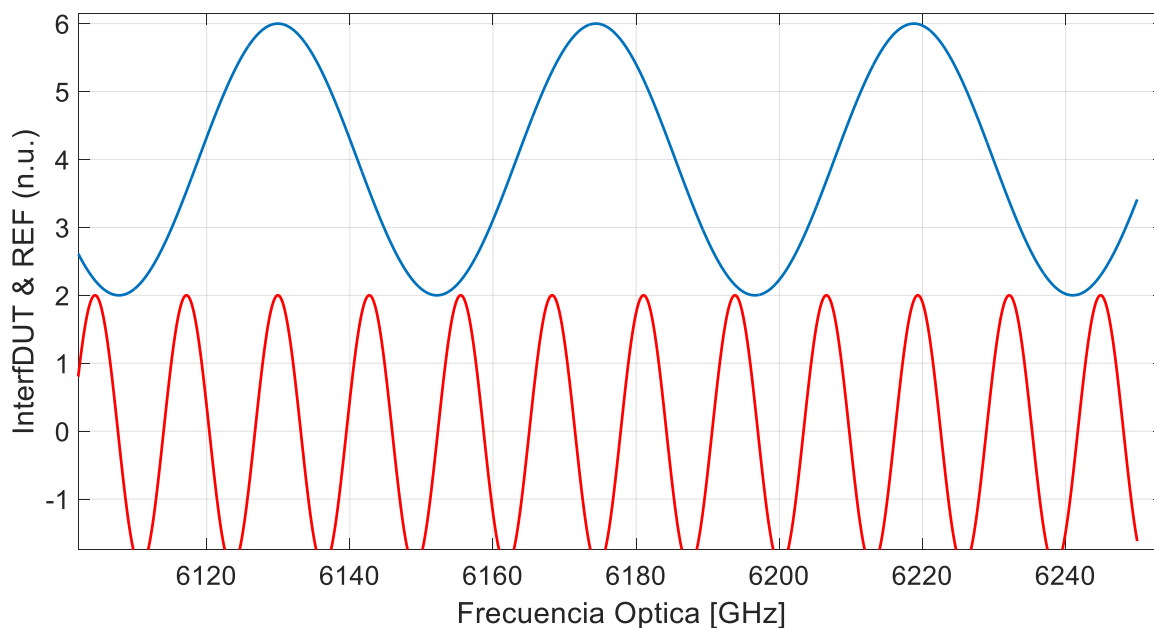


Figura 3.11 Respuesta caso 1 I_{DUT} e I_{ref} .

Por lo tanto se cumplen el teorema del criterio de Nyquist definido en la ecuación (3.1):

$$\Delta L_{ref} \geq 2\Delta L_{DUT} \quad (3.1)$$

3.4.1.1 Cálculo del FSR de los interferómetros

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

$$FSR_{ref}[m] = \frac{\lambda^2}{n_{g_ofdr} * \Delta L_{ref}} = 102.27 \text{ pm.} \quad FSR_{DUT}[m] = \frac{\lambda^2}{n_{g_DUT} * \Delta L_{DUT}} = 409.09$$

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 su señal corregida de las no linealidades que pudieron aparecer en el barrido de frecuencia del láser.

El FSR_{ref} se calcula en Hz ya que es el que se utiliza para muestrear al DUT, como se muestra a continuación:

$$FSR_{ref[Hz]} = \frac{c}{n_{g_ofdr} * \Delta L_{ref}} = 12.77 \text{ GHz.}$$

Mientras el período entre muestras viene dado por:

$$T_s = \frac{1}{FSR_{ref[Hz]}} = 78.30 \text{ ps}$$

Por lo tanto cada 12.77 GHz la señal de referencia tiene un cruce por cero los cuales indican donde se va a muestrear la señal del dispositivo bajo prueba.

En la figura 3.12 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.

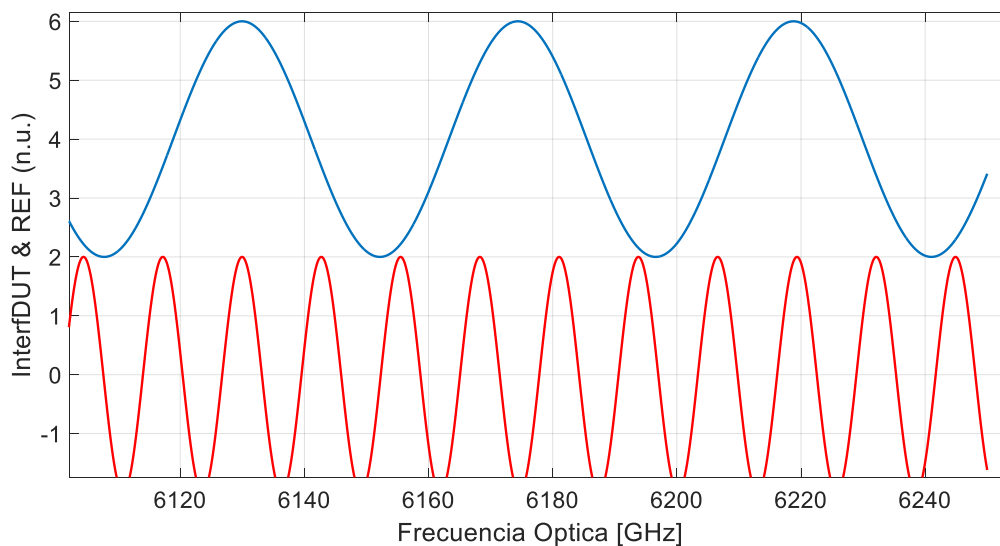


Figura 3.12 Cruces por cero de I_{ref} .

La misma respuesta también se obtiene pero a través del código de MATLAB® que se está ejecutando, y su resultado se muestra en la figura 3.13, donde el trazo en color azul punteado representa el interferómetro DUT que se desea recuperar, y los puntos en rojo sobre el son los cruces por cero del interferómetro de referencia. El vector obtenido corresponde a los puntos de muestreo para recuperar el interferómetro DUT, a los que posteriormente se les aplica el procesamiento de Fourier descrito en el apartado 3.1.3.

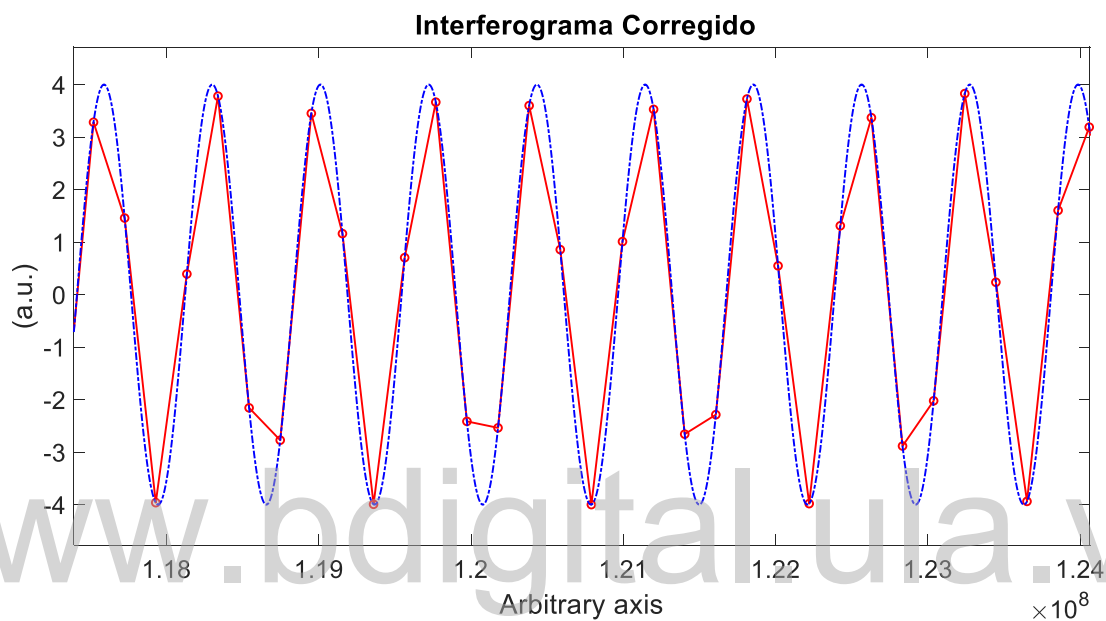


Figura 3.13 Respuesta MATLAB® cruces por cero de I_{ref} .

3.4.2 Caso 2

En este caso se propone editar algunos de los parámetros de los interferómetros con respecto a los planteados en el caso 1 de la sección 3.4, como el span y la longitud de cada uno de los caminos ópticos. Tomando en cuenta que esta nueva configuración se asemeja más a los valores que estos parámetros tomarían al utilizar los componentes para realizar un montaje físico experimental.

a. Parámetros del láser:

$$c = 3 \times 10^8 \frac{m}{s}$$

Velocidad de la luz

$\lambda = 1550$ nm Longitud de onda central del laser

$\Delta\lambda = 4$ nm Span

$\Delta\nu = 499$ GHz Ancho de banda de frecuencia

b. Parámetros del interferómetro de referencia

$n_{g_ofdr} = 1.4682$ Índice de refracción de grupo para una fibra óptica

$\Delta L_{ref} = 80$ cm Longitud del camino óptico del interferómetro

$\beta_{1ref} = \frac{n_{g_ofdr}}{c}$ Retardo de grupo.

$\beta_{2ref} = 0$ Dispersión retardo en propagación

c. Parámetros del interferómetro del dispositivo bajo prueba

$n_{g_DUT} = 1.4682$ Índice de refracción de grupo para una fibra óptica

$\Delta L_{DUT} = 20$ cm Longitud del camino óptico del interferómetro DUT

$\beta_{1DUT} = \frac{n_{g_dut}}{c}$ Retardo de grupo.

$\beta_{2DUT} = 0$ Dispersión retardo en propagación

La figura 3.14-a muestra el ancho de banda del espectro óptico para las respuestas de los interferómetros, el cual es mucho menor con respecto al del caso 1. Por lo tanto cuando el span se configura en 4 nm como lo es para este caso, el ancho de banda correspondiente es de 499 GHz y su ventana de respuesta se divide en 249.50 GHz desde el origen del eje hacia cada uno de sus extremos izquierdo y derecho.

Se realiza un acercamiento y se ilustra en la figura 3.14-b, para la cual se encuentra la respuesta de cada uno de los interferómetros, donde la traza verde corresponde al interferómetro del dispositivo bajo prueba, y la traza roja a la respuesta del interferómetro de referencia.

Se mantiene el mismo tipo de respuesta explicado en el caso 1 de esta sección, donde dentro de un período, de I_{DUT} hay aproximadamente cuatro periodos de la señal I_{ref} , ya que la relación entre ΔL_{ref} es cuatro veces mayor con respecto a ΔL_{DUT}

Al medir la frecuencia de cada una de las respuestas se encuentra que la respuesta del interferómetro DUT tiene una frecuencia de aproximadamente 1.02 GHz, mientras la frecuencia de la respuesta del interferómetro de referencia es de 255 MHz.

Es decir que el cambio en los parámetros relacionados a la longitud de los caminos ópticos ΔL_{DUT} y ΔL_{ref} tiene efecto directamente en las frecuencias de las señales de respuesta, por lo tanto, a mayor longitud de ΔL_{DUT} y ΔL_{ref} menor es la frecuencia.

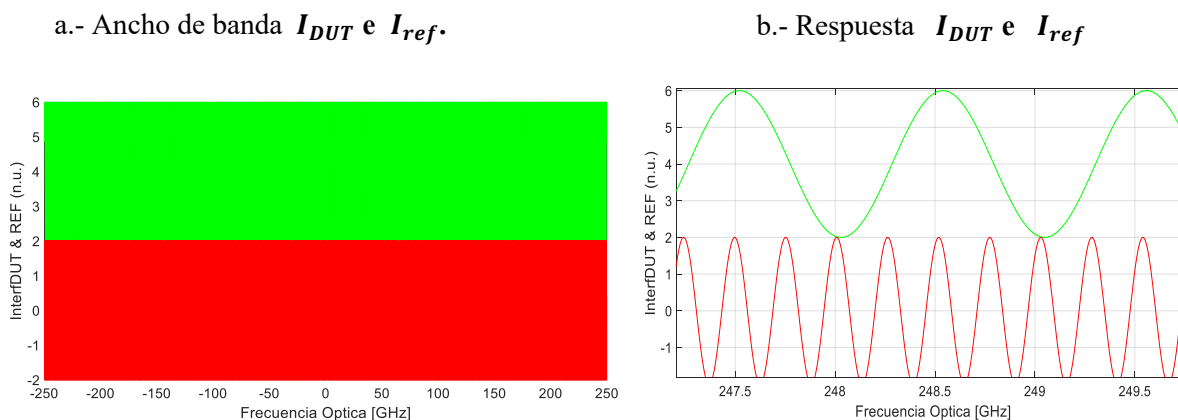


Figura 3.14 Respuesta caso 2 I_{DUT} e I_{ref} .

3.4.2.2 Cálculo del FSR de los interferómetros

$$FSR_{ref}[m] = \frac{\lambda^2}{n_{g_ofdr} * \Delta L_{ref}} = 2.05 \text{ pm.} \quad FSR_{DUT}[m] = \frac{\lambda^2}{n_{g_DUT} * \Delta L_{DUT}} = 8.18 \text{ pm.}$$

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 su señal corregida de las no linealidades que pudieron aparecer en el barrido de frecuencia del láser.

El FSR_{ref} se calcula en Hz ya que es el que se utiliza para muestrear al DUT, como se muestra a continuación:

$$FSR_{ref}[Hz] = \frac{c}{n_{g_ofdr} * \Delta L_{ref}} = 255.40 \text{ MHz}$$

Mientras el periodo entre muestras viene dado por:

$$T_s = \frac{1}{FSR_{ref}[Hz]} = 3.92 \text{ ns}$$

Por lo tanto cada 255.40 MHz la señal de referencia tiene un cruce por cero los cuales indican donde se va a muestrear la señal del dispositivo bajo prueba.

En la figura 3.15 el trazo en color verde punteado representa el interferómetro DUT que se desea recuperar, y los puntos en rojo sobre el son los cruces por cero del interferómetro de referencia. El vector obtenido corresponde a los puntos de muestreo para recuperar el interferómetro DUT, a los que posteriormente se les aplica el procesamiento de Fourier descrito en el apartado 3.1.3.

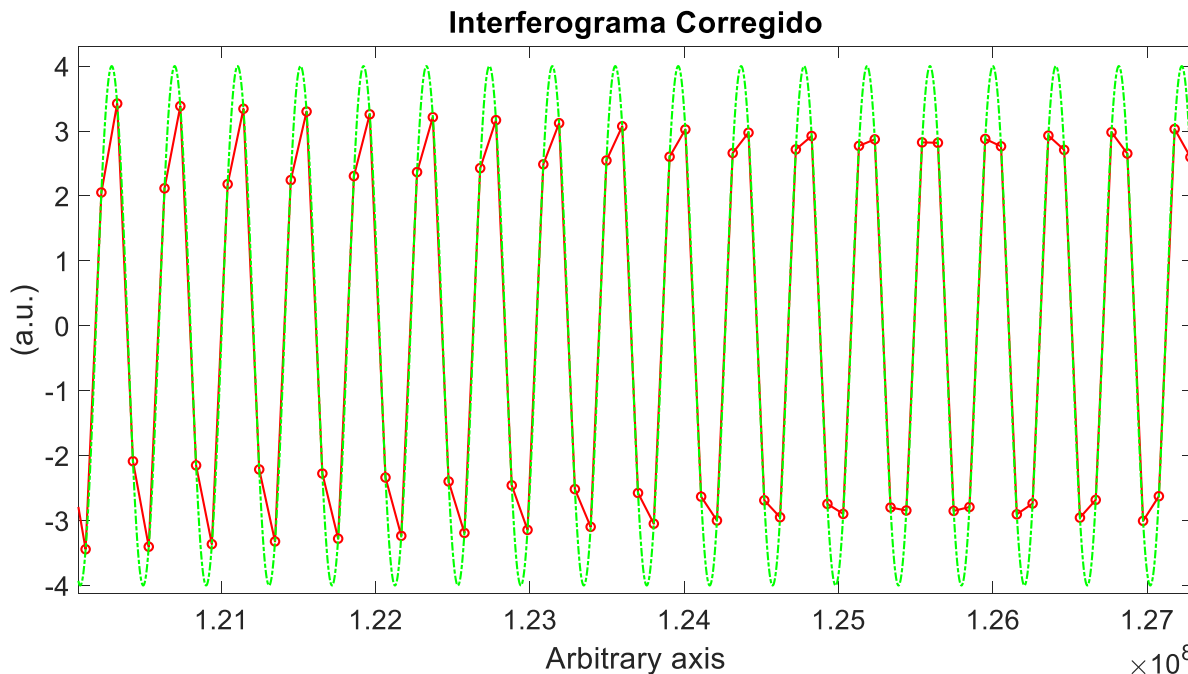


Figura 3.15 Respuesta MATLAB® cruces por cero de I_{ref} .

3.5 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, donde el dispositivo bajo prueba “DUT” utilizado es un cristal de niobato de litio. 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.

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.

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 [26].

La figura 3.16 muestra el esquema planteado para representar el modelo óptico propuesto, el cual consta de un láser emisor de onda continua con longitud de onda de 1550 nm, dos interferómetros Mach-Zehnder “DUT y de referencia”, con el fin de corregir las no linealidades, como se explicó previamente en este capítulo.

Además, en el interferómetro “DUT” se encuentra el 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.

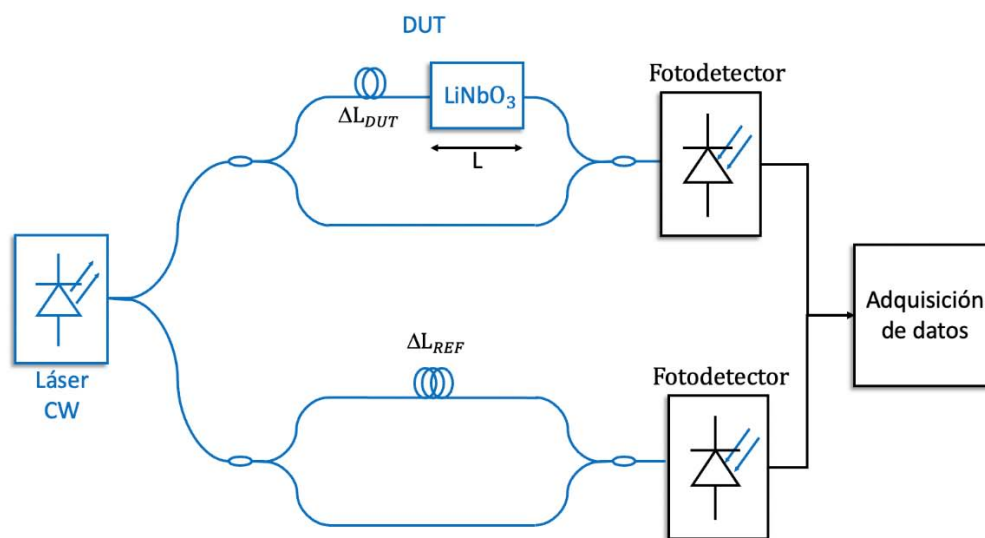


Figura 3.16 Montaje modelo óptico propuesto con cristal LiNbO_3 (Elaboración propia).

En la figura 3.17 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.

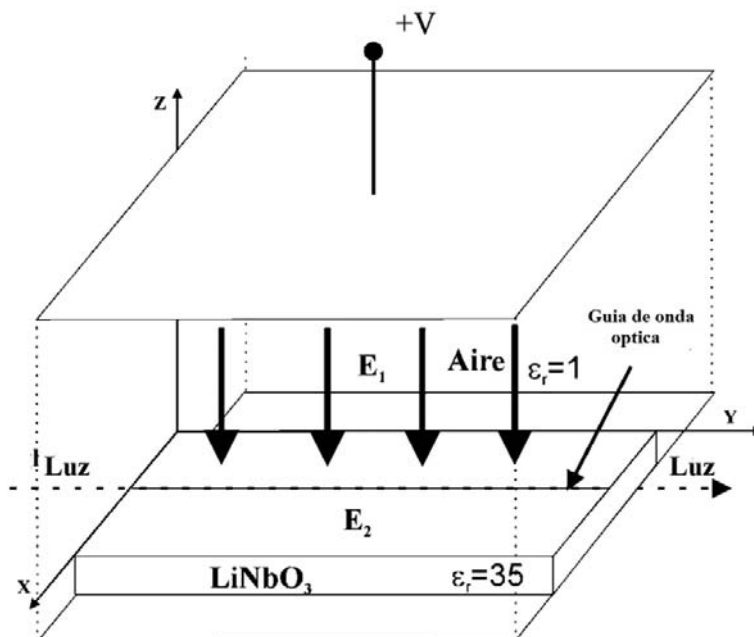


Figura 3.17 Efecto del campo eléctrico sobre el cristal de LiNbO_3 [26].

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:

$$\epsilon_{raire} \cdot E_1 = \epsilon_{rLiNbO_3} \cdot E_2 \quad (3.13)$$

Por lo tanto de la ecuación 3.13 se encuentra que el campo que atraviesa el cristal E_2 viene dado por:

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

La respuesta de la función de transferencia de la transmitancia viene dada por [26].

$$T(E_2) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos\left(\phi_0 - \pi \frac{E_2}{E_\pi}\right) \quad (3.14)$$

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:

$$\phi_0 = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot (n_o - n_e) \cdot L \quad (3.15)$$

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:

$$E_\pi = \frac{\lambda}{(r_{33} \cdot n_e^3 \cdot \Gamma_{TM} - r_{13} \cdot n_o^3 \cdot \Gamma_{TE}) \cdot L} \quad (3.16)$$

Donde:

$\lambda = 1550 \text{ nm.}$	Longitud de onda central del laser
$r_{33} = 30.80 \frac{\text{pm}}{\text{V}}$	Coefficiente electro-óptico propio del cristal
$r_{13} = 9 \frac{\text{pm}}{\text{V}}$	Coefficiente electro-óptico propio del cristal
$\Gamma_{TM} = 1.19$	Coefficiente de integrales electro-ópticas de superposición
$\Gamma_{TE} = 0$	Coefficiente de integrales electro-ópticas de superposición
$n_e = 2.14$	Índice de refracción extraordinario propio del cristal
$n_o = 2.20$	Índice de refracción ordinario propio del cristal
L	Longitud del cristal

Considerando que los valores de campo eléctrico típicos para líneas de alta tensión en subestaciones están dentro del rango de $(0 - 25) \frac{\text{kV}}{\text{m}}$ [27], [28].

Tomando esta referencia, 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 $\frac{25}{\epsilon_r \text{LiNbO}_3} \frac{\text{kV}}{\text{m}}$. Despejando la longitud del cristal de la ecuación 3.16 se encuentra que L corresponde aproximadamente a 6.08 m.

A través de la ecuación 3.15 se calcula ϕ_0 y se encuentra un valor de aproximadamente 1.45×10^6 rad.

3.5.1 Respuesta de la transmitancia óptica.

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

En la figura 3.18 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 afecte al cristal. Además, la distancia entre el máximo y mínimo de potencia transmitida corresponde a E_π .

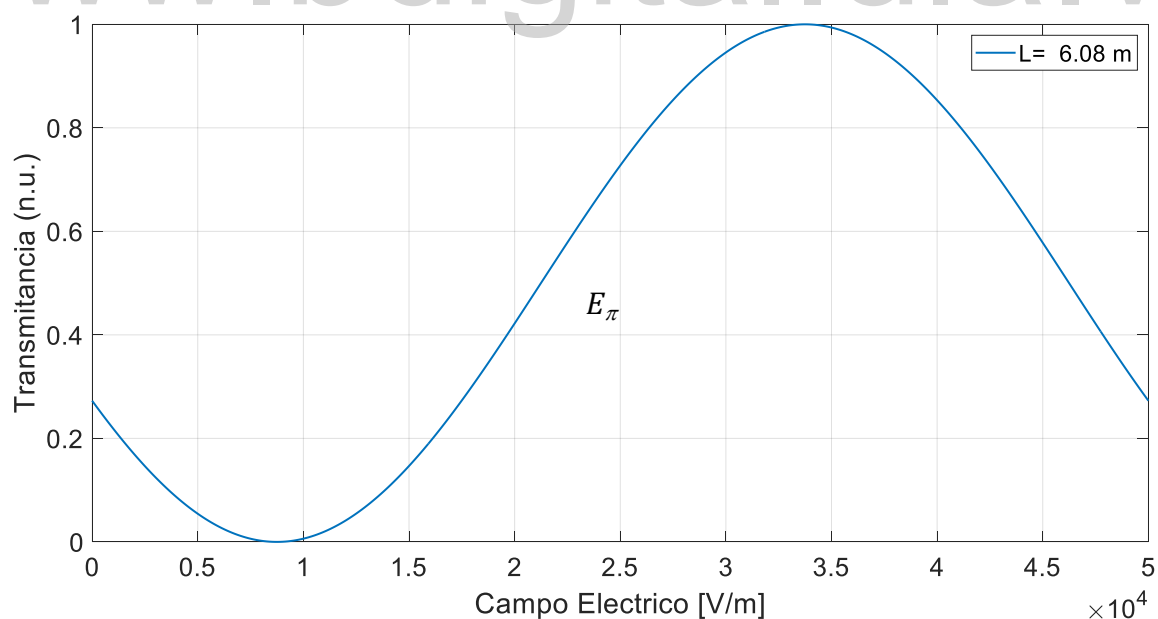


Figura 3.18 Respuesta de transmitancia para $L = 6.08$ m.

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 3.19 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.

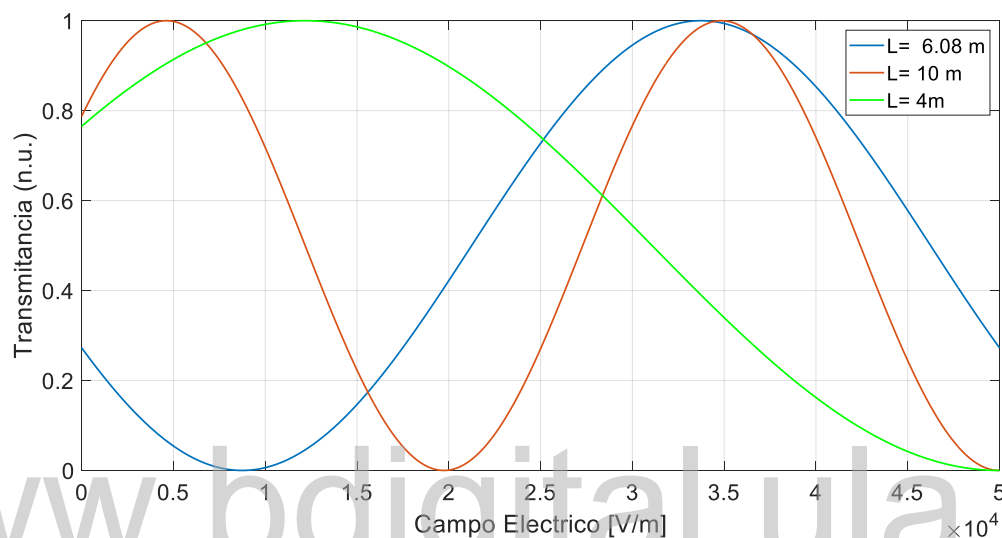


Figura 3.19 Respuesta de transmitancia para diferentes longitudes del cristal.

3.5.2 Respuesta de I_{DUT} considerando la transmitancia óptica.

3.5.2.1 Transmitancia igual a 1.

La figura 3.20 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 $33.70 \frac{\text{kV}}{\text{m}}$. Se encuentra que la amplitud pico a pico de la respuesta de I_{DUT} es 4.

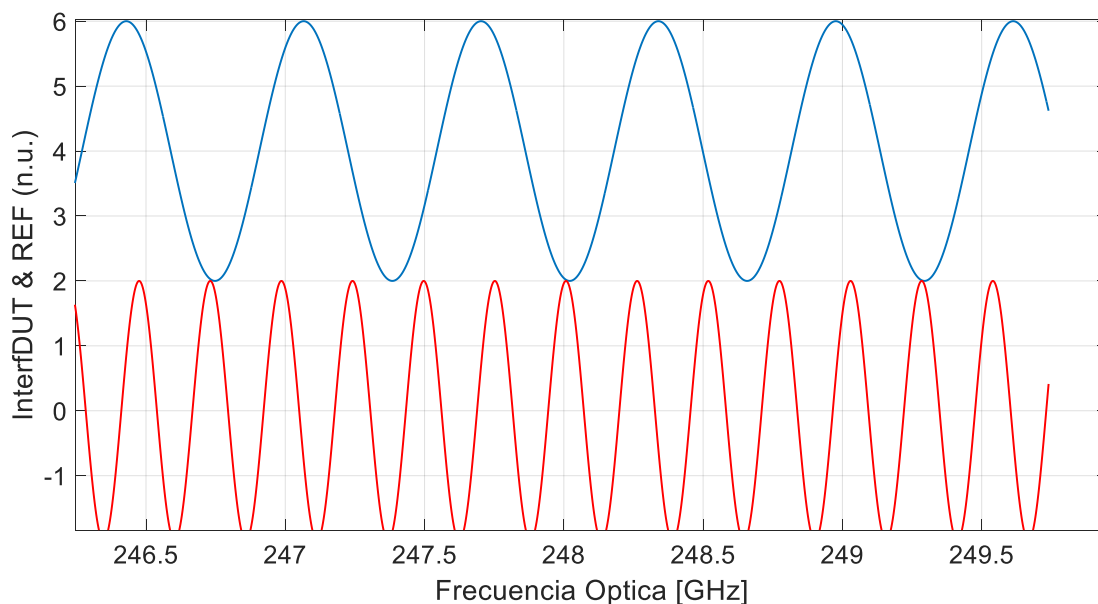


Figura 3.20 Respuesta de I_{DUT} e I_{ref} para transmitancia igual a 1.

3.5.2.2 Transmitancia igual a 0.5.

En la figura 3.21 se ilustra el efecto que tiene una transmitancia de aproximadamente 0.5 sobre la respuesta de I_{DUT} , cuando el campo E_1 es de aproximadamente $21.20 \frac{kV}{m}$. El trazo verde representa la respuesta de I_{DUT} la cual tiene una amplitud pico a pico de 2, como corresponde ya que la transmitancia en este caso es la mitad de la que se planteó en la figura 3.19.

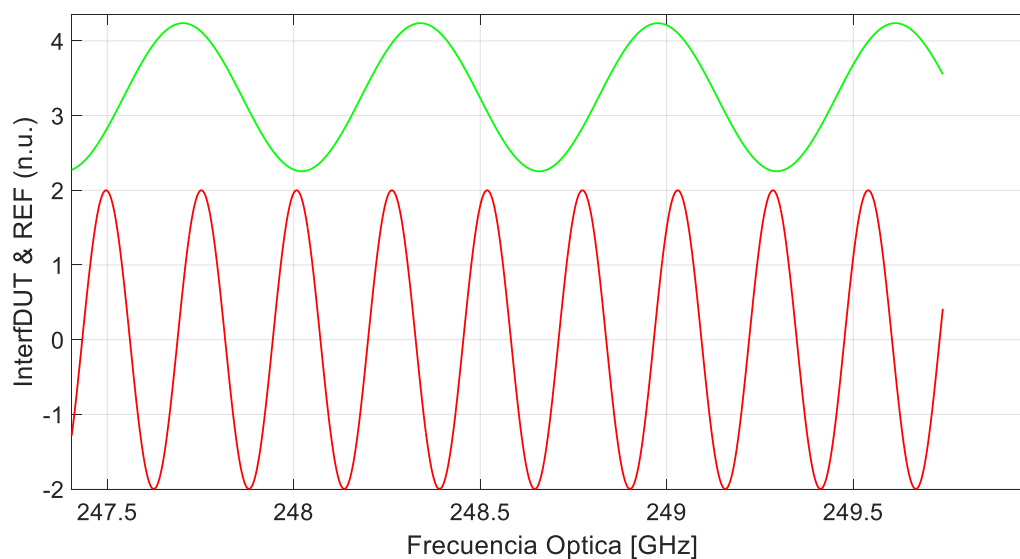


Figura 3.21 Respuesta de I_{DUT} e I_{ref} para transmitancia igual a 0.5.

3.5.2.3 Transmitancia igual a 0.05.

En la figura 3.22 se ilustra la respuesta cuando se considera una transmitancia muy cercana a 0.05 cuando el campo E_1 es de aproximadamente $5.13 \frac{\text{kV}}{\text{m}}$, con el fin de mostrar como varía la amplitud de I_{DUT} para ese caso. La traza fucsia corresponde a la respuesta de I_{DUT} y se encuentra una amplitud pico a pico muy pequeña de aproximadamente 0.2.

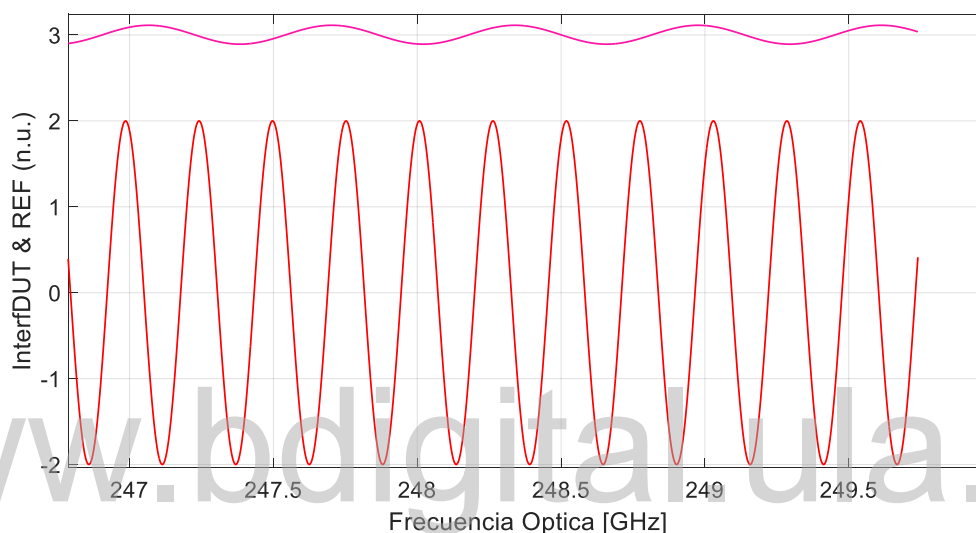


Figura 3.22 Respuesta de I_{DUT} e I_{ref} para transmitancia igual a 0.05.

Con el fin de mostrar la respuesta para los tres casos presentados y poder visualizar a mayor detalle como varía la amplitud de cada una de ellas dependiendo de la transmitancia se ilustra la figura 3.23, la traza azul corresponde a la transmitancia máxima de 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.

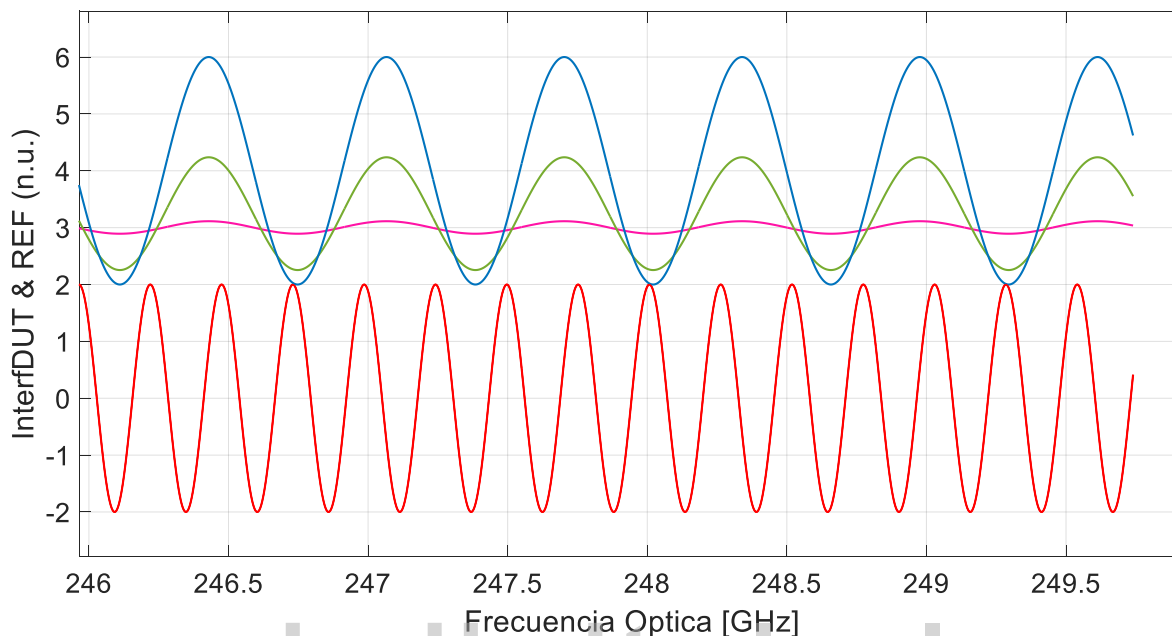


Figura 3.23 Respuesta de I_{DUT} e I_{ref} para diferentes valores de transmitancia.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la sección 3.5.2, el valor de transmitancia máximo se encuentra cuando el campo eléctrico E_1 es superior a $25 \frac{\text{kV}}{\text{m}}$. Considerando que el rango de medición lineal del campo eléctrico E_1 se fijó entre $(0-25) \frac{\text{kV}}{\text{m}}$, 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 $25 \frac{\text{kV}}{\text{m}}$.

3.5.3 Implementación de la transformada inversa de Fourier.

Se realiza el procesamiento de la transformada inversa de Fourier, a la señal senoidal re-muestreada del interferómetro DUT con el fin de encontrar su comportamiento en el dominio

del tiempo. Como se mencionó en la sección 3.1.4 la respuesta temporal proporciona información muy importante relacionada a la amplitud de la respuesta de I_{DUT} .

3.5.3.1 Respuesta de la transformada inversa de Fourier cuando la transmitancia es 1.

Luego de obtener la respuesta senoidal re-muestreada del interferómetro del dispositivo bajo prueba cuando la transmitancia es igual a 1, se aplica la IFFT, con el fin de conocer la potencia en el armónico del FSR, representada a través de los picos de amplitud asociados a el dominio del tiempo. La figura 3.24 ilustra la respuesta de dos impulsos centrados en el tiempo correspondientes a la periodicidad de la señal senoidal de I_{DUT} . Para este caso, la magnitud del máximo pico encontrado a través de la IFFT se encuentra a un valor de 0.012087 como se muestra en la figura.

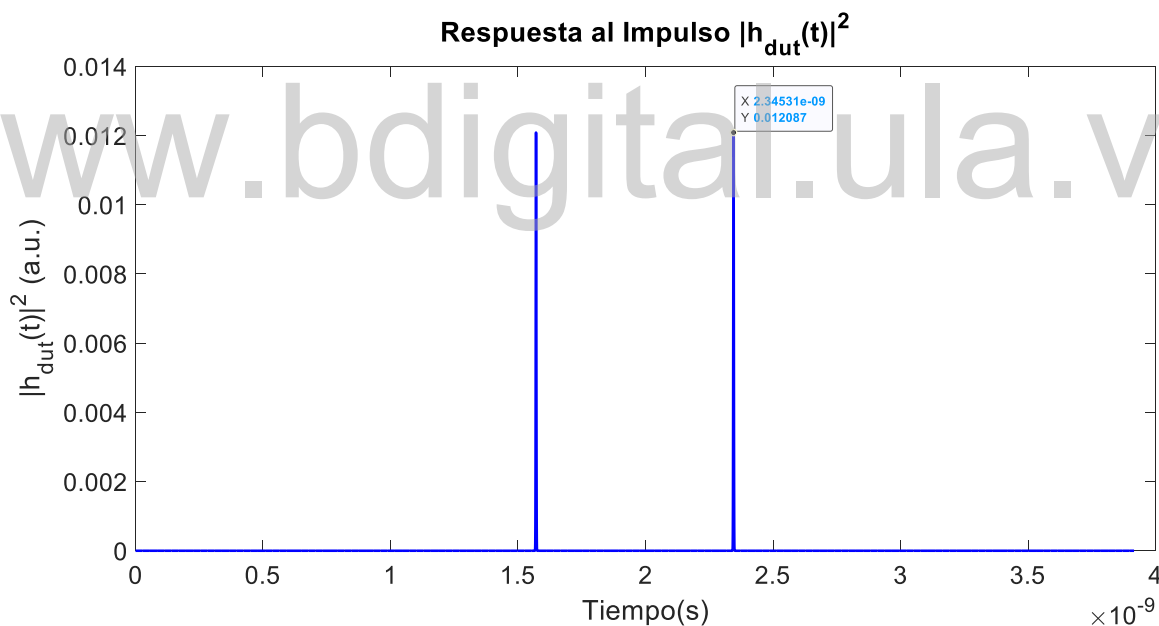


Figura 3.24 Picos de transformada inversa de Fourier para transmitancia igual a 1.

La figura 3.25 muestra la misma respuesta presentada anteriormente, expresada en la escala logarítmica en unidades de dB, para este caso el pico de Fourier corresponde a -19.18 dB.

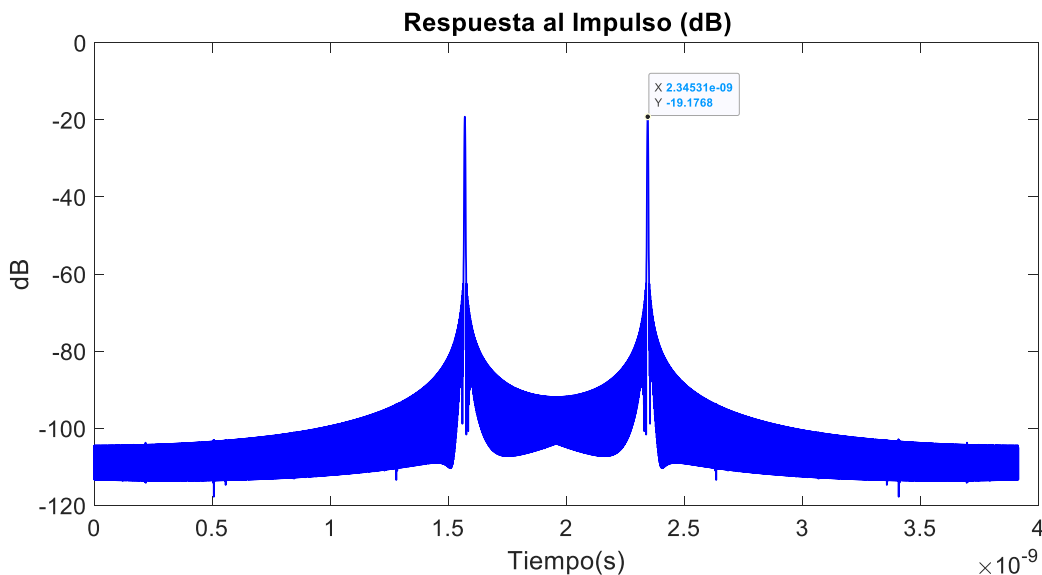


Figura 3.25 Picos de transformada inversa de Fourier para transmitancia igual a 1 en dB.

3.5.3.2 Respuesta de la transformada inversa de Fourier cuando la transmitancia es 0.5.

En este caso como la transmitancia es menor, la amplitud asociada a la respuesta de I_{DUT} disminuye, por lo tanto, al aplicar la IFFT, el pico de Fourier que se obtiene también es menor con respecto al caso anterior. Se encuentra en la figura 3.26 la respuesta de dos impulsos centrados en el tiempo correspondientes a la periodicidad de la señal senoidal de I_{DUT} , en su punto máximo se encuentra una magnitud de 0.002971.

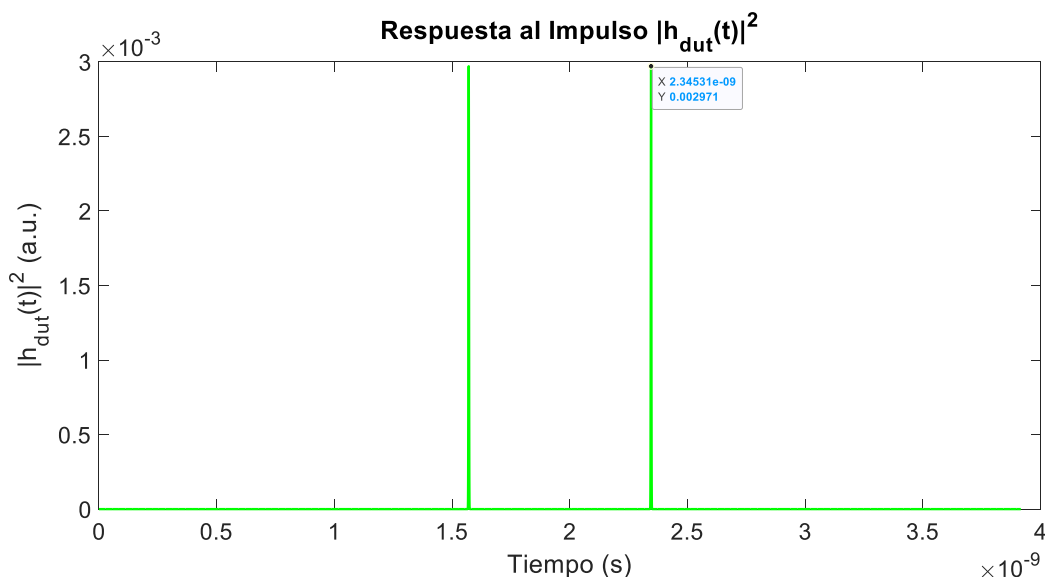


Figura 3.26 Picos de transformada inversa de Fourier para transmitancia igual a 0.5.

En la figura 3.27 se ilustra la misma respuesta presentada anteriormente, sin embargo, se encuentra expresada en unidades de dB, para este caso el pico de Fourier corresponde a -25.63 dB.

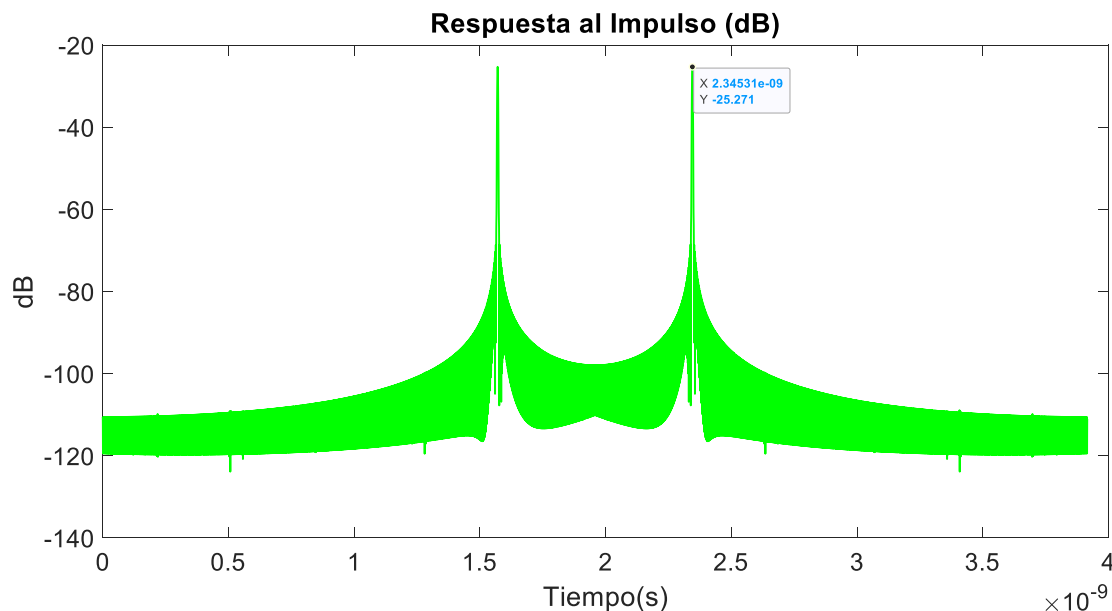


Figura 3.27 Picos de transformada inversa de Fourier para transmitancia igual a 0.5 en dB.

3.5.3.3 Respuesta de la transformada inversa de Fourier cuando la transmitancia es 0.05.

En esta simulación la transmitancia toma un valor muy pequeño de 0.05, la magnitud del pico encontrado a través del procesamiento de Fourier también lo es comparándolo, con las respuestas expuestas en los casos 3.5.3.1 y 3.5.3.2 .

En la figura 3.28 se ilustra la respuesta de dos impulsos centrados en el tiempo correspondientes a la periodicidad de la señal senoidal de I_{DUT} , su pico tiene una magnitud de 3.08×10^{-5} .

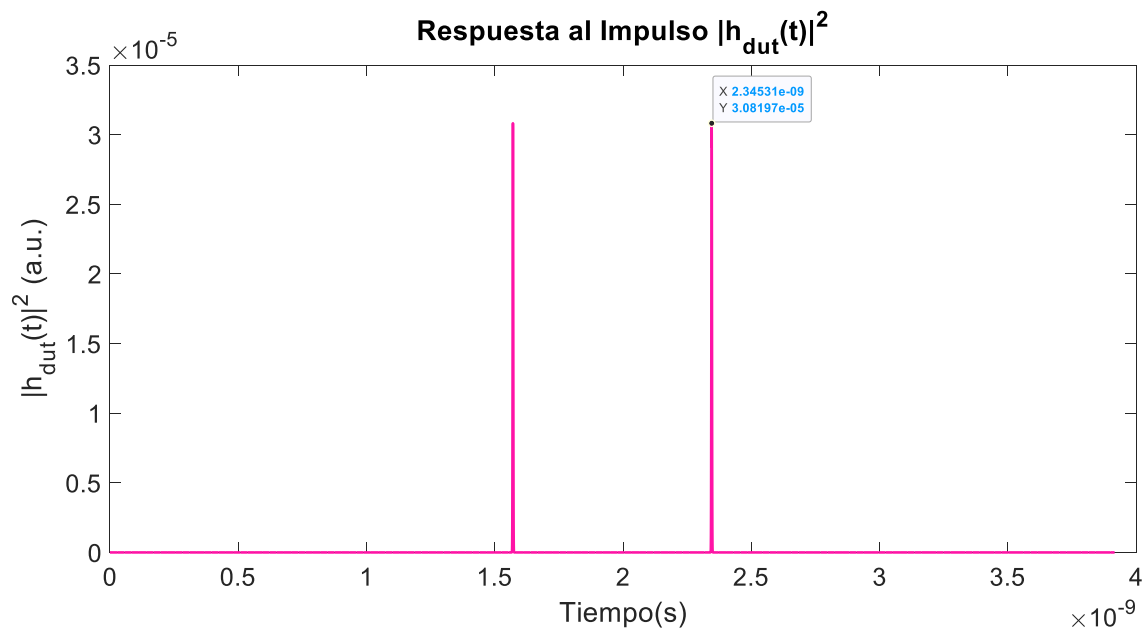


Figura 3.28 Picos de transformada inversa de Fourier para transmitancia igual a 0.05.

En la figura 3.29 se encuentra la misma respuesta presentada anteriormente, con la diferencia que se encuentra expresada en dB, para este caso el pico de Fourier corresponde a -45.11 dB.

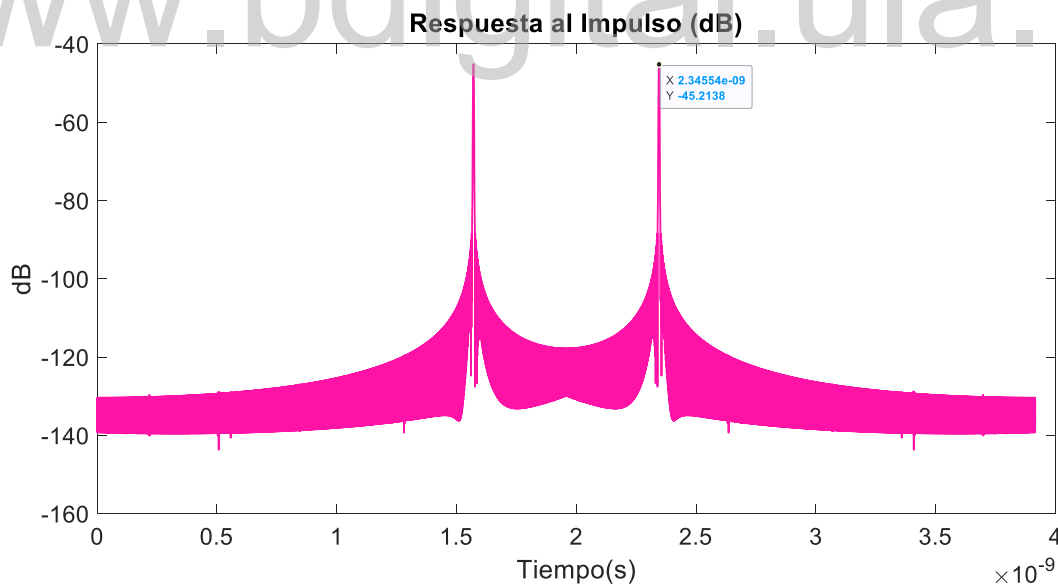


Figura 3.29 Picos de transformada inversa de Fourier para transmitancia igual a 0.05 en dB.

Finalmente, luego de encontrar la respuesta en el dominio del tiempo para algunos valores de transmitancia, en la figura 3.30 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.

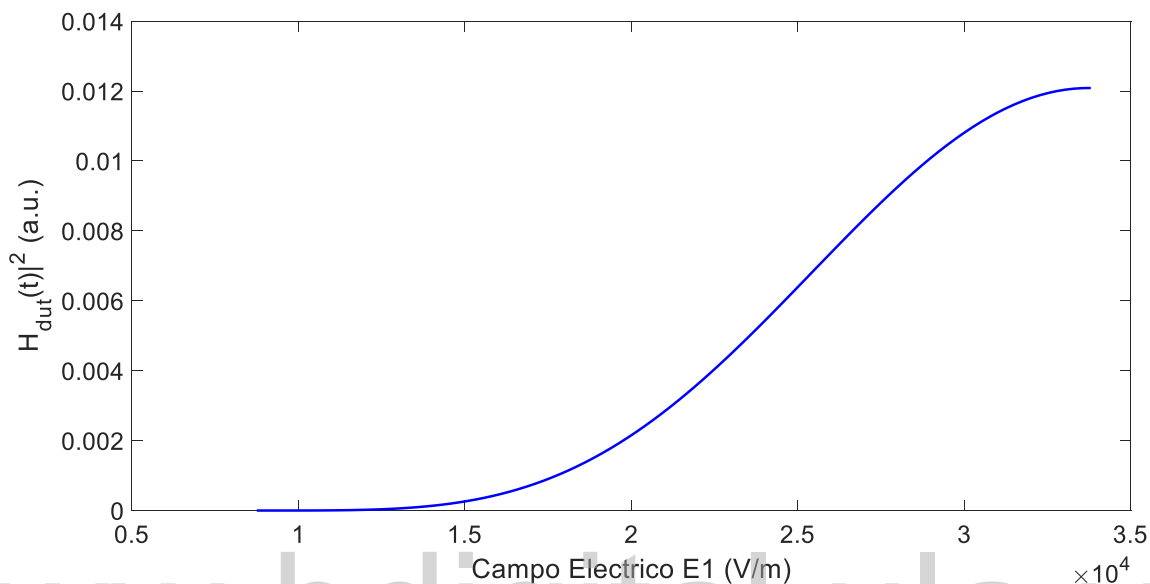


Figura 3.30 Variación de E_1 y su pico de Fourier máximo asociado.

La figura 3.31 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.

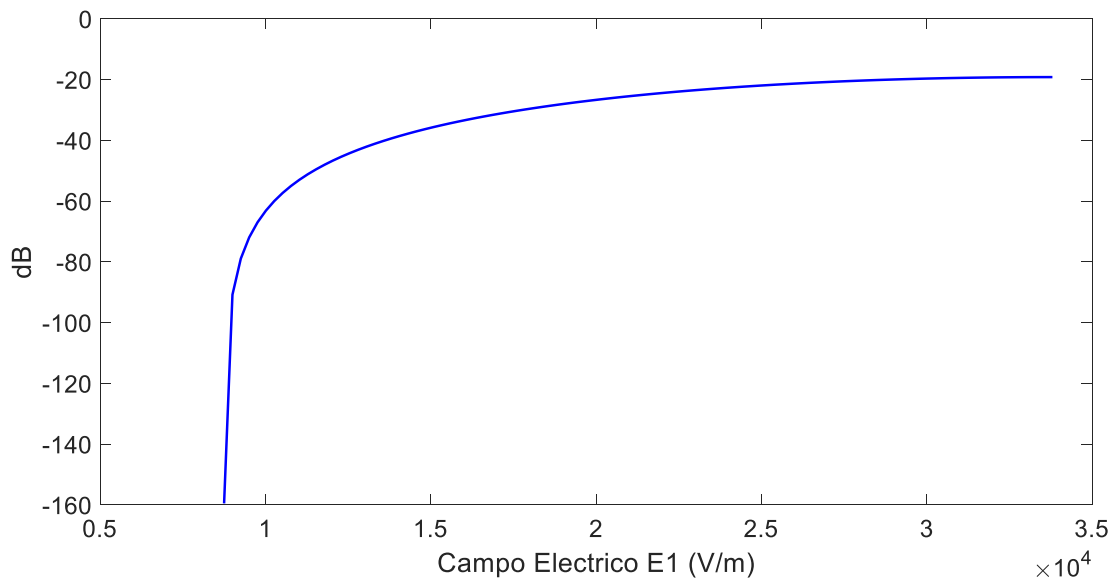


Figura 3.31 Variación de E_1 y su pico de Fourier máximo asociado en dB.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 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 el cual permitió medir el efecto de la corriente sobre el sensor óptico propuesto, 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 sensor 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 permiten validar el funcionamiento correcto del modelo óptico propuesto el cual permitió medir 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), permiten encontrar datos importantes relacionada a la amplitud de la respuesta de I_{DUT} , los cuales demuestran el cambio de la amplitud relacionada al armónico del FSR con respecto al campo eléctrico que afecte el sensor.

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 Δ_{LDUT} y Δ_{Lref} establecidos.

4.2 RECOMENDACIONES

A continuación se exponen algunas recomendaciones derivadas del desarrollo de este trabajo de investigación.

Es posible explorar otros materiales que puedan responder a los efectos de campo eléctrico y presenten características distintas al material utilizado en esta investigación el cual fue el niobato de litio. Ya que por ejemplo la permitividad eléctrica del cristal de niobato de litio es muy elevada $\epsilon_{rLiNbO_3} = 35$, haciendo que el campo eléctrico externo se atenúe en gran medida cuando atraviesa el cristal.

Se plantea el estudio de sistemas que realicen la medición a través de métodos distintos, donde no sea necesario utilizar un dispositivo bajo prueba adicional como el cristal. Por ejemplo sistemas de medición de fibra distribuida a través de cambios en la temperatura del conductor.

Ya que según la temperatura del mismo se puede relacionar a que valores de corriente está siendo sometido.

En trabajos futuros se podrían realizar las mediciones del campo eléctrico directamente usando las ecuaciones que lo permiten a través del cambio de índice de refracción en el medio de propagación, las cuales no se pudieron implementar en esta investigación debido a la gran longitud del cristal que se encontró para el funcionamiento del modelo OFDI planteado.

Finalmente se recomienda que se pueden utilizar métodos de medición no solo en el dominio de la frecuencia si no también en el dominio del tiempo.

REFERENCIAS

- [1] S. Liehr, "Optical measurement of currents in power converters," , M.S Tesis, Royal Institute of Technology, Estocolmo, Suecia, 2006.
- [2] A. Bastos, J. Mendonça, A. Kamshilin, A. Bezerra, "Hybrid opto-mechanical current sensor based on a Mach-Zehnder fiber interferometer," *IEEE Sensors Journal*, vol 14, no. 4 , pp. 1056-1060,2014.
- [3] S. Kucuksari, "Development of models for optical instrument transformers," Ph.D Tesis, Universidad de Arizona, Arizona, Estados Unidos, 2010.
- [4] L. Martínez "Sensores de fibra óptica codificados en frecuencia medida de voltaje y corriente," , Ph.D Tesis, Universitat de Valencia, Valencia, España, 2002.
- [5] Z. Araujo "Comparación de un transformador de corriente convencional con un Transformador de corriente óptico," ,Tesis, Universidad de Los Andes , Mérida, Venezuela , 2012 .
- [6] M. Hino, S. Hase, K.Ajiki, y M.Akagi, "Optical fiber current transformer applications on railway electric power supply systems", *QR of RTRI*, vol. 45, pp 59-63, 2004.
- [7] R. Meyers. *Encyclopedia of Physical Science and Technology*. Tercera Edición. San Diego, USA: Academic Press, pp, 381-394, 2001.
- [8] S.Galindo, y S. Cruz. "Aparato para medición del efecto Faraday" , *Revista Mexicana de Física- Enseñanza*, vol 48, pp 475-484, Octubre 2002.
- [9] G. Fowles. *Introduction to modern optics*. Segunda edición. New York: Dover Publications Inc, 1975.
- [10] J. Horak, J. Hrabliuk. "Current transformer errors and transformer inrush as measured by magnetic,optical and other unconventional CT's", Basler Electric Company,Illinois, Estados Unidos.

- [11] Emerging Technologies Working Group and Fiber Optic Sensors Working Group, “Optical current transducers for power systems: a review,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol 9, pp. 1778-1788, October 1994.
- [12] M. Lenner, A. Frank, L. Yang, T. Roininen, K. Bohnert, “Long-Term reliability of fiber optic current sensors,” *IEEE Sensors Journal*, 2019.
- [13] “Optoelectrónica y comunicaciones ópticas”, Notas de clase, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Nacional de Colombia, 2019.
- [14] J. Capmany, F. Fraile, J. Martí. *Fundamentos de comunicaciones ópticas*. Madrid, España: Editorial Síntesis, 1era ed., 1999.
- [15] A. Gómez. “Làser de semiconductor sometido a retroalimentación óptica: Aplicación a la medida de distancias,” Trabajo de Grado, Física, Universidad de Cantabria , 2016.
- [16] C. Rodríguez. “Vertical cavity surface emitting laser (Vcsel) Aplicaciones en comunicaciones ópticas y sensores,” Trabajo de Grado, Ingeniería de tecnologías y servicios de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Valencia, 2016.
- [17] M. Dávila, *Actualización de los capítulos II y III del libro de Sistemas de Protecciones correspondientes a transformadores de potencial y transformadores de corriente*. Mérida, Venezuela , 2011.
- [18] G. Robles, “Nuevas tendencias en las medidas de intensidades,” *Manuales de Mecánica y Electricidad*, pp. 36-42, 2002.
- [19] S. Kucuksari, “Development of models for optical instrument transformers,” Ph.D Tesis , Universidad de Arizona, Estados Unidos, 2010.
- [20] P. Pérez, L. Martínez, A. Díez, J. Cruz y M. Andrés, “A Fiber-optic current sensor with frequency- Codified Output for High-Voltage Systems,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol 14, no. 9 , pp. 1339-1341,2002.
- [21] C. Cano, “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, Bogota, Colombia, 2018.

- [22] D. Derickson, *Fiber optic test and measurement*. Upper Saddle River, NJ , USA: Prentice Hall, 1era ed.,1997.
- [23] L. Bru, “Optical frequency domain interferometry for the characterization and development of complex and tunable photonic integrated circuits,” Ph.D Thesis, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España, 2022.
- [24] J. Alvarado, C. Stern. “Un complemento al teorema de Nyquist”, *Revista Mexicana de Física*,” Edición 56-2, pp. 165-171, 2010.
- [25] A. Oppenheim, A. Willsky. *Signals and Systems*. Boston, USA: Prentice Hall, 2da ed., 1983.
- [26] C. Gutierrez, J. Santos, R. Ochoa, M. Santiago y A. Morales, “Modeling and experimental electro-optic response of dielectric lithium niobate waveguides used as electric field sensor,” *Measurement Science and Technology*, vol 2, no. 035207, 2011.
- [27] I. Okrainskaya, S. Gladyshev, A. Sidorov, “Distribution of the electric field intensity near the equipment of the 500 kV Power Substation,” *IEEE*, pp. 216-220 , 2002.
- [28] S. Nikolovski, Z. Klaic, Z. Kraus y M. Stojkov, “Computation and measurement of electromagnetic fields in high voltage transformer substations,” *Conference paper*, 2010.

www.bdigital.ula.ve