



Universidad  
Técnica de  
Cotopaxi

# UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

## UNIDAD ACADÉMICA DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

### CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

#### PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

#### MODELAMIENTO DE UN TRANSFORMADOR ÓPTICO DE CORRIENTE IDEAL PARA SISTEMAS DE PROTECCIONES

#### **Autores:**

Chasi Alarcón Klever Santiago

López Bonito Edison Stalyn

#### **Tutor:**

MSc. Edwin Marcelo Lema

Latacunga – Ecuador

Febrero 2019



Universidad  
Técnica de  
Cotopaxi



Electricidad

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, Chasi Alarcón Klever Santiago y López Bonito Edison Stalyn, declaramos ser autores del presente proyecto de investigación: **“MODELAMIENTO DE UN TRANSFORMADOR ÓPTICO DE CORRIENTE IDEAL PARA SISTEMAS DE PROTECCIONES”**, siendo MSc. Edwin Marcelo Lema Guamán tutor del presente trabajo; y eximimos expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

**Chasi Alarcón Klever Santiago**  
C.C. 180485192-9

**López Bonito Edison Stalyn**  
C.C. 180473179-0



Universidad  
Técnica de  
Cotopaxi



Electricidad

## **AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN**

En calidad de Tutor del Proyecto de Investigación sobre el título:

**“MODELAMIENTO DE UN TRANSFORMADOR ÓPTICO DE CORRIENTE IDEAL PARA SISTEMAS DE PROTECCIONES ”**, de Chasi Alarcón Klever Santiago y López Bonito Edison Stalyn, de la carrera de Ingeniería Eléctrica, considero que dicho Informe Investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyecto que el Consejo Directivo de la FACULTAD de CIENCIAS DE LA INGENIERIA Y APLICADAS, de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, Febrero del 2019

MSc. Edwin Marcelo Lema Guamán

CC: 030224135-1

**TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**



Universidad  
Técnica de  
Cotopaxi



Electricidad

## APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA Y APLICADAS ; por cuanto, los postulantes: Klever Santiago Chasi Alarcón y Edison Stalyn López Bonito, con el título de Proyecto de titulación: MODELAMIENTO DE UN TRANSFORMADOR ÓPTICO DE CORRIENTE IDEAL PARA SISTEMAS DE PROTECCIONES, han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Sustentación de Proyecto.

Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa institucional.

Latacunga, Febrero del 2019

Para constancia firman:

**Lector 1 (Presidente)**  
Nombre: Ing. Xavier Proaño  
CC: 050265642-4

**Lector 2**  
Nombre: Ing. Marco León  
CC:050230540-2

**Lector 3**  
Nombre: Ing. Franklin Vásquez  
CC: 171043449-7

## **AGRADECIMIENTO**

*En estas líneas que quedaran grabadas en las memorias de un proyecto de investigación quiero agradecer a las personas que hicieron posible este logro y que estuvieron conmigo en los momentos difíciles, alegres, y tristes. Estas humildes palabras son para ustedes.*

*A mis padres Klever Chasi y Gladis Alarcón por haberme dado la vida y en el transcurso de ella darme todo su amor, confianza y comprensión pero sobre todo un Dios le pague por su apoyo incondicional brindado.*

*A mis hermanos mayores Lorena y Patricio por ser esos ejemplos de cómo ser un buen hijo, un buen hermano y un buen ser humano, por otro lado a mi hermana menor Cecilia, a mis sobrinas Camila y María José por darme todo su amor y motivarme en ser una mejor persona para poder ser ejemplo para ustedes.*

*Todos ustedes junto a Dios son el pilar fundamental de mi inspiración para nunca rendirme y seguir adelante sabiendo que siempre contare con su amor y apoyo. No tengo palabras para agradecerles las incontables veces que me brindaron su apoyo en todas las decisiones que he tomado a lo largo de mi vida.*

*De igual forma, agradezco a mi Tutor de Tesis, que gracias a sus consejos y correcciones hoy puedo culminar con éxito este trabajo con éxitos. A los Profesores que me han visto crecer como persona, y gracias a sus conocimientos hoy puedo sentirme dichoso y contento.*

**Santiago**

## **AGRADECIMIENTO**

*Me van a faltar páginas en este escrito para agradecer a las personas que se han involucrado en la realización de este trabajo, sin embargo merecen reconocimiento especial mis padres: Luis López y Laura Bonito que con su esfuerzo y dedicación me ayudaron a culminar mi carrera universitaria y me dieron el apoyo suficiente para no decaer cuando todo parecía complicado e imposible, a mi Virgencita del Cisne que me ha guiado espiritualmente.*

*Así mismo, agradezco infinitamente a mis hermanos: Washington, Lorena y Darwin, que con sus palabras y aliento me hacían sentir orgulloso de lo que soy y de lo que les puedo llegar a enseñar.*

*De igual forma, agradezco a mi Tutor de Tesis, que gracias a sus consejos y correcciones hoy puedo culminar con éxito este trabajo con éxitos. A los Profesores que me han visto crecer como persona, y gracias a sus conocimientos hoy puedo sentirme dichoso y contento.*

**Stalyn**

## **DEDICATORIA**

*El presente trabajo de investigación lo dedico principalmente a Dios, por ser el inspirador y darnos fuerza para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados.*

*A mis padres, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí y convertirnos en lo que soy. Ha sido el orgullo y el privilegio de ser su hijo, son los mejores padres.*

*A mi querida Universidad Técnica de Cotopaxi, la cual me abrió las puertas, para prepararme en el campo profesional, y poder llegar al punto donde me encuentro ahora.*

*A mis amigos que me han apoyado y han hecho que el trabajo se realice con éxito en especial a aquellos que nos abrieron las puertas y compartieron experiencias de vida.*

***Santiago***

## **DEDICATORIA**

*Dedico este trabajo de Tesis con todo cariño y amor a mis padres: Luis López y Laura Bonito. Por su apoyo constante, reproches cuando han sido necesarios para llevarme por el camino del bien, guiando mi vida con sus valiosos consejos.*

*A mi querida Universidad Técnica de Cotopaxi, la cual me abrió las puertas, para prepararme en el campo profesional, y poder llegar al punto donde me encuentro ahora.*

*A todos los amigos quienes me han apoyado y han hecho que el trabajo se realice con éxito en especial a aquellos que me abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos.*

***Stalyn***

## INDICE

<b>1. INFORMACIÓN GENERAL</b> .....	1
<b>2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO</b> .....	2
<b>3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO</b> .....	2
<b>4. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO</b> .....	3
<b>5. EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN:</b> .....	3
<b>5.1. Planteamiento del problema</b> .....	3
<b>5.2. Formulación del problema:</b> .....	4
<b>6. OBJETIVOS:</b> .....	5
<b>6.2. Objetivo General:</b> .....	5
<b>6.3. Objetivos Específicos:</b> .....	5
<b>7. ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS PLANTEADOS</b> .....	6
<b>8. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA</b> .....	7
<b>8.1. MARCO REFERENCIAL:</b> .....	7
<b>Los Transformadores</b> .....	7
<b>Transformador de Potencia</b> .....	7
<b>Transformadores de instrumentos</b> .....	8
<b>Transformadores de protección.</b> .....	8
<b>Transformador de medición.</b> .....	8
<b>Transformadores de Corriente</b> .....	10
<b>Transformadores de corriente para medida</b> .....	10
<b>Transformadores de corriente para protección</b> .....	11
<b>Transformadores de Tensión</b> .....	12
<b>Transformadores de tensión para medida</b> .....	14
<b>Transformadores de tensión para protección.</b> .....	14
<b>El Transformador Opto Eléctrico de Tensión EOVT</b> .....	15

Transformador Óptico de corriente:.....	15
<b>8.2. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>15</b>
<b>PRINCIPIOS FÍSICOS DE LOS DISPOSITIVOS ÓPTICOS DIGITALES .</b>	<b>16</b>
<b>Efectos físicos que se presentan en los sistemas ópticos: .....</b>	<b>17</b>
<b>Efecto Faraday.....</b>	<b>17</b>
<b>Ley de Rotacion de Faraday .....</b>	<b>20</b>
<b>Ley de Ampere.....</b>	<b>20</b>
<b>Efecto Kerr.....</b>	<b>21</b>
<b>Efecto Pockels .....</b>	<b>21</b>
<b>Consideraciones básicas acerca de las fibras ópticas.....</b>	<b>22</b>
<b>Principio de Operación del Transformador Óptico De Corriente: .....</b>	<b>25</b>
<b>Componentes del Transformador Óptico de Corriente.....</b>	<b>27</b>
<b>Ventajas del Transformador Óptico de Corriente: .....</b>	<b>29</b>
<b>Aplicación de los tranformadores Ópticos de corriente en una Subestación ..</b>	<b>30</b>
<b>Comparativa entre un transformador óptico de corriente y un transformador convencional.....</b>	<b>31</b>
<b>Selección del Sensor Óptico de Corriente para medición.....</b>	<b>33</b>
<b>Sensor Óptico de Corriente para Medición .....</b>	<b>33</b>
<b>Técnicas e instrumentos.....</b>	<b>36</b>
<b>9. PREGUNTAS CIENTÍFICAS O HIPÓTESIS: .....</b>	<b>37</b>
<b>10. METODOLOGÍAS Y DISEÑO EXPERIMENTAL: .....</b>	<b>38</b>
<b>10.1. Metodología de la Investigación: .....</b>	<b>38</b>
<b>11. PRESUPUESTO PARA LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO: .....</b>	<b>38</b>
<b>Principios Matemáticos del Transformador óptico de Corriente .....</b>	<b>39</b>
<b>Transformadores que utilizan efecto Pockels.....</b>	<b>39</b>
<b>Intensidad de campo magnético H.....</b>	<b>42</b>
<b>Constante de Verdet.....</b>	<b>44</b>

<b>Transformadores Opticos que utilizan el efecto Faraday</b> .....	45
<b>Polarización</b> .....	47
<b>Ley de Malus</b> .....	55
<b>La teoría ondulatoria de la luz</b> .....	60
<b>Modelamiento en Matlab</b> .....	62
<b>Primera parte - Modelamiento en Simulink</b> .....	62
<b>Calculo del campo magnético o inducción magnética</b> .....	64
<b>Calculo de la variación rad/Amperio</b> .....	65
<b>Cálculo de la ley de Malus y las salidas al GUIDE</b> .....	66
<b>Segunda Parte - Programación de las Gráficas</b> .....	68
<b>Tercera Parte - Modelamiento en Guide</b> .....	69
<b>Datos de ingreso para los cálculos</b> .....	70
<b>Datos de salida del resultado de los cálculos</b> .....	74
<b>Resultados y Conclusiones</b> .....	76
<b>Pruebas y Valoraciones</b> .....	77
<b>Prueba 1 con fibra óptica de Sulfuro de Zinc</b> .....	77
<b>Prueba 2 con fibra óptica de Cuarzo</b> .....	78
<b>Prueba 3 con variación de longitud de la fibra óptica</b> .....	87
<b>Prueba 4: Variación del radio del conductor</b> .....	89
<b>Prueba 5: Variaciones de corriente altas y bajas</b> .....	90
<b>12. BIBLIOGRAFÍA:</b> .....	93
<b>13. ANEXOS</b> .....	95
<b>Índice de Figuras:</b>	
Figura 1. Conexiones de diversos elementos a los transformadores de corriente y tensión.....	9
Figura 2. Transformadores de tensión para intemperie. ....	12

Figura 3. Representación de transformadores de tensión.....	13
Figura 4. Efecto de rotación de Faraday.....	18
Figura 5. Ley de Ampere.....	20
Figura 6. Ejemplo de Fibra óptica. ....	23
Figura 7. Fibra óptica brillando cuando transmite luz.....	24
Figura 8. Descripción del transformador óptico de corriente.....	26
Figura 9. Componentes del Transformador Óptico de Corriente.....	27
Figura 10. Proceso detallado del funcionamiento del transformador óptico de corriente.....	28
Figura 11. Transformador óptico de corriente.....	30
Figura 12. Valores medidos con un sensor de corriente con determinado número de vueltas.	34
Figura 13. Transformador convencional con salida óptica.....	35
Figura 14. Transformador de Corriente óptico.....	36
Figura 15. Incidencia de la Luz .....	39
Figura 16. Proceso de funcionamiento. ....	40
Figura 17. Rotación de plano de polarización. ....	41
Figura 18. Estructura de un captador Óptico.....	42
Figura 19. Rotación de Faraday.....	45
Figura 20. Representación de la luz propagándose. ....	47
Figura 21. Dirección de propagación de la onda. ....	47
Figura 22. Polarización por refracción. ....	49
Figura 23. Polarización lineal.....	50
Figura 24. Representación de la luz polarizada.....	51
Figura 25. Inclinación de la onda a 45°.....	52
Figura 26. Polarización Circular (a). ....	53
Figura 27. Polarización Circular (b). ....	53
Figura 28. Polarización elíptica. ....	55
Figura 29. Comparación entre la polarización circular y elíptica.....	55
Figura 30. Polarizadores Cruzados (a). ....	56
Figura 31. Polarizadores Cruzados (b). ....	57
Figura 32. Transmisión de la luz a través de un polarizador.....	58
Figura 33. Patrón de distribución de intensidad de la luz.....	58
Figura 34. Polarización de la luz. ....	60
Figura 35. Modelamiento de la entrada de señal de corriente. ....	64

Figura 36. Cálculo matemático del ángulo de alteración. ....	73
Figura 37. Programación de la ecuación Rad/Amp y corriente detectada.....	67
Figura 38. Aplicación de la ley de Malus. ....	68
Figura 39. Datos de ingreso en el GUIDE.....	72
Figura 40. Datos de salida en el GUIDE. ....	76
Figura 41. Herramienta para ver las gráficas.....	77
Figura 42. Resultados de la primera prueba al modelamiento. ....	78
Figura 43. Resultado del modelamiento del transformador óptico de corriente con el material Agua. ....	80
Figura 44. Resultado del modelamiento del transformador óptico de corriente con el material CS2 (Sulfuro de carbono). ....	81
Figura 45. Resultado del modelamiento del transformador óptico de corriente con el material Lámina de vidrio Flint. ....	81
Figura 46. Resultado del modelamiento del transformador óptico de corriente con el material Vidrio Crown. ....	82
Figura 47. Resultado del modelamiento del transformador óptico de corriente con el material Cuarzo.....	82
Figura 48. Resultado del modelamiento del transformador óptico de corriente con el material Fósforo.....	83
Figura 49. Resultado del modelamiento del transformador óptico de corriente con el material Sulfuro de Zinc. ....	83
Figura 50. Resultado del modelamiento del transformador óptico de corriente con el material Vidrio Grown.....	84
Figura 51. Resultado del modelamiento del transformador óptico de corriente con el material Vidrio Flint. ....	84
Figura 52. Resultado del modelamiento del transformador óptico de corriente con el material Cloruro de Sodio.....	85
Figura 53. Resultado del modelamiento del transformador óptico de corriente con el material Vidrio Flint ligero.....	85
Figura 54. Resultado del modelamiento del transformador óptico de corriente con el material Vidrio Flint extra denso. ....	86
Figura 55. Resultado del modelamiento del transformador óptico de corriente con el material Vidrio Flint pesado. ....	86

Figura 56. Resultado del modelamiento del transformador óptico de corriente con el material Vidrio Flint muy pesado. ....	87
Figura 57. Resultado del modelamiento del transformador óptico de corriente con el material Aire (760). ....	87
Figura 58. Resultados de la tercera prueba al modelamiento. ....	89
Figura 59. Resultados de la cuarta prueba al modelamiento. ....	91
Figura 60. Resultados de la quinta prueba A al modelamiento. ....	92
Figura 61. Resultados de la quinta prueba B al modelamiento. ....	93

## Índice de Fórmulas

Fórmula 1. Factor nominal de seguridad. ....	11
Fórmula 2. Corriente secundaria en relación a la corriente primaria. ....	11
Fórmula 3. Valor eficaz de un transformador de corriente para protección.....	11
Fórmula 4. Relación de transformación. ....	12
Fórmula 5. Fórmula para obtener el ángulo de rotación.....	18
Fórmula 6. Efecto Faraday para nubes interestelares. ....	19
Fórmula 7. Medida de la Rotación. ....	19
Fórmula 8. Diferencia entre los índices de refracción.....	21
Fórmula 9. Fórmula para el cálculo del ángulo de rotación. ....	39
Fórmula 10. Ángulo de rotación.....	40
Fórmula 11. Intensidad de Campo magnético. ....	42
Fórmula 12. Densidad de flujo magnético.....	43
Fórmula 13. Densidad de flujo con relación a la permeabilidad magnética del vacío. ....	43
Fórmula 14. Permeabilidad magnética del vacío.....	43
Fórmula 15. Unidad para la intensidad de campo magnético.....	44
Fórmula 16. Constante de Verdet. ....	45
Fórmula 17. Campo magnético. ....	46
Fórmula 18. Ecuación básica que rige el diseño de una cabeza óptica. ....	46
Fórmula 19. Irradiancia de Salida.....	46
Fórmula 20. Irradiancia en función de $\varphi$ . ....	46
Fórmula 21. Campo magnético transversal al campo eléctrico.....	48
Fórmula 22. Fórmula para la obtención de la onda XZ.....	50
Fórmula 23. Fórmula para la obtención de la onda YZ.....	50
Fórmula 24. Campo eléctrico. ....	51
Fórmula 25. Intensidad de onda. ....	57
Fórmula 26. Ley de Malus.....	57
Fórmula 27. Ecuación de Faraday. ....	64
Fórmula 28. Ángulo de Rotación en radianes. ....	64
Fórmula 29. Flujo de la densidad Magnética. ....	65
Fórmula 30. Cálculo de la variación de radianes por cada amperio.....	66
Fórmula 31. Cálculo intensidad de luz incidente. ....	68

Fórmula 32. Variación de la onda en el tiempo.....69

**Índice de Tablas**

Tabla 1. Datos técnicos de los conductores utilizados..... 75  
Tabla 2. Materiales con sus respectivas constantes de Verdet. .... 80  
Tabla 3. Resultados de la variación del ángulo respecto a cada Amperio..... 88

# UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

## FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

**TEMA:** “MODELAMIENTO DE UN TRANSFORMADOR ÓPTICO DE CORRIENTE IDEAL PARA SISTEMAS DE PROTECCIONES”

**Autores:** Chasi Alarcón Klever Santiago  
López Bonito Edison Stalyn

### RESUMEN

El presente proyecto parte desde el análisis teórico de los transformadores de medida y protección, señalando las ventajas que la tecnología óptica presenta en comparación a los equipos actualmente utilizados. El efecto Faraday en las fibras ópticas es la base de una nueva y mejor tecnología para la medición de corrientes en circuitos de los sistemas eléctricos de potencia. Pero sólo en los últimos veinte años la tecnología adecuada ha madurado lo suficiente para servir de base comercialmente atractiva para aplicaciones de sensores de corriente de fibra óptica.

Se aplican las ecuaciones establecidas por el físico Michael Faraday y la Ley de Malús en el software Matlab, en el modelamiento se demuestra los efectos físicos que implica todo el sistema de un transformador óptico de corriente, obteniendo como resultados los cálculos matemáticos del ángulo de alteración de la señal óptica y como va variando en relación a la corriente ingresada, de igual manera se visualiza una gráfica en la cual se observa las ondas de la señal de luz y las alteraciones a la que están expuesta en el dispositivo, de la misma forma se visualiza el comportamiento del dispositivo al poder variar sus componentes y las medidas de los mismos. La modelación establecida ayudara a la construcción de estos dispositivos y a las calibraciones que se realizan a los TC's Ópticos.

**Palabras Clave:** transformador, tecnología, óptico, fibra, ecuaciones.

**TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI**

**FACULTY OF APPLIED ENGINEERING SCIENCES**

**TOPIC:** “MODELING OF AN IDEAL OPTICAL CURRENT TRANSFORMER FOR PROTECTION SYSTEMS”

**Autors:** Chasi Alarcón Klever Santiago  
López Bonito Edison Stalyn

**ABSTRACT:**

The present project starts from the theoretical analysis of the measurement and protection transformers, pointing out the advantages that optical technology presents in comparison to the currently equipment used. The Faraday effect in optical fibers is the basis for a new and better technology for electricity measurement over circuits of electric power systems. But only in the last twenty years technology has matured enough to serve as a commercially attractive base for fiber optic sensor applications.

The established equations by the physicist Michael Faraday and Malus' Law at software Matlab are applied, in the modeling the physical whole system effects of an optical current transformer is showed, obtaining as results the mathematical calculations of the angle optical signal alteration and how it is changing in relation to the electricity input, in the same way a graph is displayed where the waves of the light signal and the alterations are exposed and observed in the device, at the same way the behavior of the device is visualized as it can vary its components and their measurements. The established modeling will help the construction of these devices and the calibrations that are made to the Optical CTs.

**Key words:** transformers, technology, optical, equations.



Universidad  
Técnica de  
Cotopaxi

CENTRO DE IDIOMAS

## *AVAL DE TRADUCCIÓN*

En calidad de Docente del Idioma Inglés del Centro de Idiomas de la Universidad Técnica de Cotopaxi; en forma legal **CERTIFICO** que: La traducción del resumen de tesis al Idioma Inglés presentado por los señores Egresados de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Unidad Académica de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas: **Chasi Alarcón Klever Santiago y López Bonito Edison Stalyn**, cuyo título versa “**Modelamiento de un transformador óptico de corriente ideal para sistemas de protecciones**”, lo realizaron bajo mi supervisión y cumple con una correcta estructura gramatical del Idioma.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad y autorizo a los peticionarios hacer uso del presente certificado de la manera ética que estimaren conveniente.

Latacunga, febrero 2019

Atentamente,

.....  
Lic. MSc. Edison Marcelo Pacheco Pruna  
DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS  
C.C. 050261735-0



[www.utc.edu.ec](http://www.utc.edu.ec)

Av. Simón Rodríguez s/n Barrio El Ejido /San Felipe. Tel: (03) 2252346 - 2252307 - 2252205

## **1. INFORMACIÓN GENERAL**

### **Título del Proyecto:**

MODELAMIENTO DE UN TRANSFORMADOR ÓPTICO DE CORRIENTE IDEAL PARA SISTEMAS DE PROTECCIONES.

**Fecha de inicio:** Abril del 2018

**Fecha de finalización:** Enero 2019

### **1 Lugar de ejecución:**

El Ejido-San Felipe- Latacunga-Cotopaxi- Ecuador- Universidad Técnica de Cotopaxi

### **2 Facultad que auspicia**

Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas

### **3 Carrera que auspicia:**

Ingeniería Eléctrica

### **4 Proyecto de investigación vinculado:**

Explotación y diseño de Sistemas eléctricos de potencia

### **5 Equipo de Trabajo:**

El Equipo de Trabajo se detalla en El Anexo Final.

### **6 Área de Conocimiento:**

Ingeniería eléctrica en sistemas de potencia

### **7 Línea de investigación:**

Energías alternativas y renovables, eficiencia energética y protección ambiental

### **8 Sub líneas de investigación de la Carrera:**

Protecciones eléctricas

## **1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO**

El presente proyecto tiene como propósito el estudio de los transformadores ópticos de corriente, analizando su tecnología y simulando su comportamiento mediante el software Matlab, partiendo desde un breve análisis de los antecedentes sobre los transformadores en general, detallando que tipos de transformadores existen y explicar su funcionamiento para así realizar una comparativa entre los convencionales y los que utilizan la tecnología óptica, resaltando así las ventajas del transformador óptico de corriente.

## **2. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO**

El sistema convencional de los transformadores de corriente ha sido funcional y efectivo durante mucho tiempo. Ahora, con los avances tecnológicos se hace necesario, en algunos casos, implementar nuevas tecnologías para que el sistema esté integrado en una misma plataforma de información, más precisa y exacta.

Los transformadores ópticos de corriente presentan grandes ventajas en relación a los transformadores convencionales. En la parte de la seguridad de los operarios de transformadores no correrían riesgos de descarga de ya que los que los transformadores ópticos de corriente no presentan tensiones altas.

Por otro lado, al no contener el líquido aislante de aceite o SF6 evita el riesgo de asfixias por evaporación del aislante, así contamos con grandes ventajas en lo que respecta a seguridad y salud.

En la operación de los transformadores ópticos de corriente no existe saturación, lo que conlleva a la reducción de costos para el cálculo del transformador adecuado debido a la saturación, estos TOC pueden medir corrientes desde cero y al no tener saturación no se ve afectado por las corrientes de cortocircuito y es capaz de medir la corriente de falla con exactitud y sin distorsión de la señal.

El dispositivo tiene una salida digital lo cual va a un relé o medidor con entrada digital, esto ofrece una mejor toma de datos y alta precisión en las medidas, con esto se reducen los costos ya que en los dispositivos convencionales se adiciona costos debido a la señal análoga a digital.

### **3. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO**

Los beneficiarios del presente proyecto serán tanto los estudiantes como los docentes que impartan asignaturas donde comprendan temas de transformadores y se pueda impartir de forma didáctica el tema de transformadores ópticos de corriente, de manera que se pueda utilizar un software para una mejor explicación.

### **4. EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN:**

#### **5.1. Planteamiento del problema**

En la actualidad la protección y medición en el uso de la energía en alta tensión es una de las partes importante en el manejo de un sistema eléctrico de potencia, por ello es un aspecto relevante para el consumidor y los comercializadores de la energía. Para fines de medición y protección la función de los transformadores es reducir altas corrientes y tensiones de forma proporcional a valores bajos de corriente o de tensión apropiados. Es decir, que sirven para medir o registrar la potencia transmitida, o bien para abastecer a los relés de protección con señales evaluables que establezcan el estado del relé. Los principales inconvenientes de los transformadores convencionales es el transporte de los mismos, ya que su peso es elevado porque necesitan estar sumergidos en aceite dieléctrico o contiene gas SF<sub>6</sub>, el cual debe ser llenado varias veces en sus mantenimientos y al momento de ponerle en marcha luego de desconectarlo por un tiempo. Se realiza un mantenimiento del aislamiento, que está constituido por el aislamiento líquido (aceite) y el aislamiento sólido (celulosa), materiales orgánicos que están sometidos a alteraciones químicas bajo la influencia de humedad, oxígeno, calor y catalizados por el material de bobinado (cobre, aluminio) y el hierro. Y con ello aumenta la producción de elementos perjudiciales para el medio ambiente.

Otro aspecto muy importante es su medición ya que al existir corrientes muy altas llega a su saturación y al ser muy bajas no nos da una lectura de ella y con él no nos dará una medida exacta de la corriente lo que generan pérdidas al momento de la facturación por la energía. La medición de corriente y voltaje son dos dispositivos cada uno con su aislamiento por lo cual aumenta el espacio que ocupan los dispositivos al igual que para la medición y protección de corriente y voltaje se usan dispositivos diferentes y también ocupa más espacio.

Por otra parte los circuitos abiertos en los secundarios de los transformadores de corriente convencionales pueden ocasionar daños graves al equipo o al persona El devanado secundario siempre debe estar cortocircuitado antes de desconectar la carga. Si se abre el circuito

secundario con circulación de corriente por el primario, toda la energía en el primario es magnetizante y normalmente producirán una tensión secundaria excesivamente elevada en bornes del circuito abierto. Todos los circuitos secundarios de los transformadores de medida deben estar puestos a tierra; cuando los secundarios del transformador de medida están interconectados; solo debe ponerse a tierra un punto.

Por el contrario, los transformadores ópticos de corriente existen algunas aplicaciones en donde se puede justificar el uso de los mismos en lugar de los transformadores de medición convencionales. En algunas aplicaciones la tecnología óptica digital hace que el sistema de medición óptico y protección sea más económico a largo plazo. Beneficia la medición en una mejor precisión, menores pérdidas y mejor eficiencia. Con la utilización de los transformadores ópticos no existe ningún peligro debido a secundarios en circuito abierto o por ferro resonancia. Además la facilidad del transformador óptico es que puede medir tanto corriente alterna como continua, la posibilidad de utilizar una misma columna de aislador llena con nitrógeno a baja presión para medir voltaje y corriente, lo que reduciría el número de equipos a instalarse. Los transformadores ópticos de corriente tienen salidas limitadoras de corriente gracias a los circuitos electrónicos. No hay problemas de secundarios abiertos debido a corrientes de falla altas.

## **5.2. Formulación del problema:**

En la necesidad de aumentar la seguridad para los operadores y disminuir el impacto ambiental al igual que aumentar la precisión de los dispositivos de medición y protección en los sistemas eléctricos de potencia se puede utilizar como una alternativa los transformadores ópticos de corriente. Se opta por estudiar desde su principio de funcionamiento, comportamiento y sus modelos matemáticos para conocer, y dar a conocer para posteriormente puedan ser implementados y poder remplazar los transformadores convencionales de medición y protección.

## **6. OBJETIVOS:**

### **6.2.Objetivo General:**

Realizar la Modelación de un transformador óptico de corriente mediante el software Matlab, para la posterior utilización de esta tecnología como reemplazo confiable de los transformadores de corriente en los Sistemas Eléctricos de Potencia.

### **6.3.Objetivos Específicos:**

1. Investigar el principio de funcionamiento del transformador óptico de corriente al igual que sus principios físico-matemáticos.
2. Analizar los principios Físico-matemáticos y determinar las variables que influyen en la relación corriente-ángulo de desfase de la señal óptica.
3. Desarrollar una modelación de los transformadores ópticos de corriente.
4. Evaluar los resultados obtenidos en la modelación y presentar los mismos.

## 7. ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS PLANTEADOS

Objetivo	Actividad (tareas)	Resultado de la actividad	Descripción de la actividad (técnicas e instrumentos)
Investigar el principio de funcionamiento del transformador óptico de corriente al igual que su modelo matemático.	Se realizó una investigación en fuentes virtuales y también en fuentes bibliográficas en relación al tema planteado.	Se obtuvo datos importantes como mediante qué principios físicos funciona y en si como se obtiene su relación con la corriente.	Se investigó en proyectos de investigación locales e internacionales sobre los TOC (Transformadores ópticos de corrientes).
Analizar los principios Físico-matemáticos y determinar las variables que influyen en la relación corriente-ángulo de desfase de la señal óptica.	Se analiza los principios matemáticos investigados,	Hay que analizar los resultados obtenidos anteriormente y poder tener claro en si su principio matemático del transformador.	Se va analizando cada una de las formulas y ecuaciones las cuales van relacionando la inducción de la corriente en la fibra óptica y se van viendo sus variables.
Desarrollar una modelación de los transformadores ópticos de corriente	Ya definida las variables se plasmará el modelo en el simulador	Se obtendrá varias modelaciones las cuales se va a evaluar cada una mediante la curva de funcionamiento.	Mediante las variables se comienza a modelar en el software, en la aplicación Simulink mediante un diagrama de bloques y obteniendo como resultado una curva de funcionamiento.
Evaluar los resultados obtenidos en la modelación y presentar los mismos.	Mediante las modelaciones se procederá a evaluarlas.	Se obtendrá la modelación optima y con mayor exactitud	Se realizara una comparación entre la Modelación y cálculos matemáticos sobre el transformador.

## **8. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA**

### **8.1. MARCO REFERENCIAL:**

#### **Los Transformadores**

Los transformadores son máquinas estáticas con dos devanados de corriente alterna arrollados sobre un núcleo magnético. El devanado por donde entra energía al transformador se denomina primario y el devanado por donde sale energía hacia las cargas que son alimentadas por el transformador se denomina secundario. El devanado primario tiene  $N_1$  espiras y el secundario tiene  $N_2$  espiras. El circuito magnético de esta máquina lo constituye un núcleo magnético sin entrehierros, el cual no está realizado con hierro macizo sino con chapas de acero al silicio apiladas y aisladas entre sí. De esta manera se reducen las pérdidas magnéticas del transformador. [1]

Al conectar una tensión alterna  $V_1$  al primario, circula una corriente por él que genera un flujo alterno en el núcleo magnético. Este flujo magnético, en virtud de la Ley de Faraday, induce en el secundario una fuerza electromotriz (f.e.m.)  $E_2$  que da lugar a una tensión  $V_2$  en bornes de este devanado. De esta manera se consigue transformar una tensión alterna de valor eficaz  $V_1$  en otra de valor eficaz  $V_2$  y de la misma frecuencia. Nótese que esta máquina sólo sirve para transformar tensiones alternas, pero no sirve para tensiones continuas. [1]

#### **Transformador de potencia**

Se define el transformador de potencia como un transformador que transfiere energía eléctrica en cualquier parte del circuito entre la fuente de generación y los circuitos primarios de distribución, y el transformador de distribución lo define como un transformador que transfiere energía eléctrica de un circuito primario de distribución, a un circuito secundario de distribución o al circuito de servicio de un usuario. [2]

Los transformadores de pequeña potencia son utilizados principalmente en cargas de servicios industriales, centros comerciales, centros docentes e instituciones y subestaciones de compañías eléctricas. [2]

Los transformadores son constituidos normalmente por una parte activa conformada por el núcleo (circuito magnético), la bobina (circuito eléctrico) y la brida, la cual se define dependiendo del tipo de transformador, en un tanque que le da características particulares al equipo según el uso para el cual va a ser destinado. [2]

### **Transformadores de instrumentos**

Los aparatos de medida y los relés de protección no pueden soportar, por lo general, ni elevadas tensiones ni elevadas corrientes, ya que de lo contrario se encarecería sobremanera su construcción. Por otra parte es conveniente evitar la presencia de elevadas tensiones en aquellos dispositivos que van a estar al alcance de las personas. Son éstas las principales razones para la utilización de los transformadores de medida y protección, a través de los cuales se pueden llevar señales de tensión y corriente, de un valor proporcional muy inferior al valor nominal, a los dispositivos de medida y protección. Se consigue además una separación galvánica, (entre las magnitudes de alta y baja tensión), de los elementos pertenecientes a los cuadros de mando, medida y protección con las consiguientes ventajas en cuanto a seguridad de las personas y del equipamiento. Como las mediciones y el accionamiento de las protecciones se hallan referidas, en última instancia, a la apreciación de tensión y corriente, se dispone de dos tipos fundamentales de transformadores de medida y protección:

- Transformadores de tensión.
- Transformadores de corriente.

### **Transformadores de protección.**

Los transformadores cuya función es proteger un circuito, requieren conservar su fidelidad hasta un valor de veinte veces la magnitud de la corriente nominal, cuando se trata de grandes redes con altas corrientes puede ser necesario requerir treinta veces la corriente nominal. En el caso de los relés de sobrecorriente, sólo importa la relación de transformación, pero en otro tipo de relés, como pueden ser los de impedancia, se requiere además de la relación de transformación, mantener el error del ángulo de fase dentro de valores predeterminados.

### **Transformador de medición.**

Se denominan transformadores de medida a los que se emplean para alimentar circuitos que tienen instrumentos de medición o protección. El uso de estos transformadores se hace necesario en las instalaciones en donde se requiere reducir los valores de voltaje e intensidad admisibles para los instrumentos, ya sea por razones de seguridad o comodidad. [3]

Son transformadores cuya función es medir, requieren reproducir fielmente la magnitud y el ángulo de fase de la corriente. Su precisión debe garantizarse desde una pequeña fracción de corriente nominal del orden del 10%, hasta un exceso de corriente del orden del 20%, sobre el valor nominal. [2]

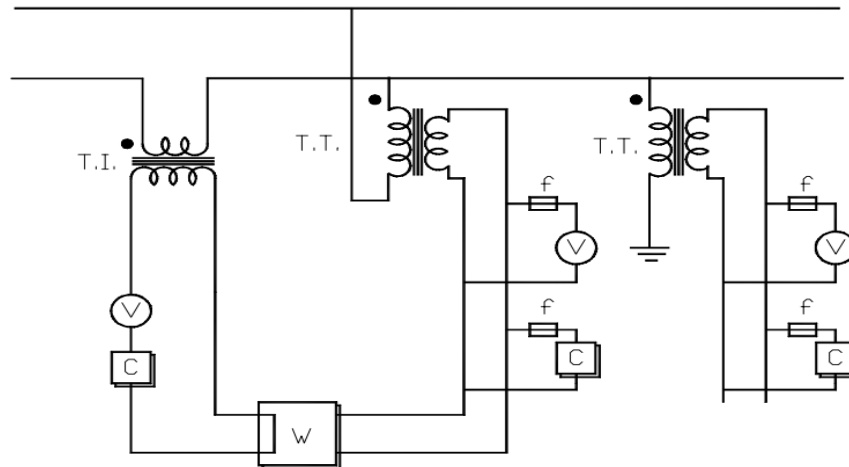


Figura 1. Conexiones de diversos elementos a los transformadores de corriente y tensión.

Los propósitos específicos para los que sirven los transformadores de medida son, entre otros, los siguientes:

- Aislar a los instrumentos de medición y protección del circuito primario o de alta tensión permitiendo así medir elevados voltajes e intensidades con instrumentos de bajo alcance.
- Proporciona mayor seguridad al personal al no tener contacto con partes en alta tensión.
- Permite la normalización de las características de operación de los instrumentos.

Existen básicamente dos tipos de transformadores de medida:

- Transformadores de tensión, que reducen la tensión y se conectan en paralelo.
- Transformadores de intensidad, que reducen la intensidad y se conectan en serie.

Los transformadores de medida difieren en su construcción práctica de los transformadores potencia, en que en los de medida no interesa la potencia o la energía a través de ellos, pero se deben construir de tal forma, que exista una relación de transformación bien definida y constante, entre la intensidad primaria y la secundaria (en el caso de los transformadores de intensidad) o bien, entre el voltaje primario y el secundario (en el caso de los transformadores de tensión). [3]

## **Transformadores de Corriente**

Un transformador de corriente es aquél en el cual el devanado primario se encuentra en serie con el circuito al cual se quiere medir la corriente, y el devanado secundario se conecta en serie con uno o varios instrumentos de medida, por ejemplo, un amperímetro, un vatímetro, un medidor de energía, etc. [3]

El arrollamiento primario puede tener una, dos o cuatro secciones, permitiendo una, dos o tres intensidades primarias nominales, mediante el adecuado acoplamiento de las mismas.

Puede haber también, uno o varios arrollamientos secundarios, bobinados cada uno sobre su circuito magnético. De esta manera, no existe influencia de un secundario sobre el otro.

Para que el transformador de corriente funcione correctamente, la carga debe tener un valor de impedancia muy bajo para mantener el transformador en condiciones cercanas al cortocircuito.

Los transformadores de corriente se utilizan para suministrar información a los relés de protección y/o medida de la corriente, de la potencia, de la energía. Por eso han de entregar una intensidad secundaria proporcional a la primaria que pasa por ellos. Por tanto, se han de adaptar a las características de la red: tensión, frecuencia y corriente. [3]

Un TC de protección ha de tener su punto de saturación alto, de tal manera que permita medir, con suficiente precisión, una corriente de defecto para una protección cuyo umbral de disparo sea muy elevado. Generalmente, el Factor Límite de Precisión (FLP) de estos captadores de corriente tiene gran importancia. [3]

### **Transformadores de corriente para medida**

Son los transformadores de corriente destinados a alimentar los aparatos de medida, contadores y otros aparatos análogos. Para proteger los aparatos alimentados por el transformador, en caso de cortocircuito en la red en la cual está intercalado el primario, se tiene en cuenta el factor nominal de seguridad, que se define como:

$$F_s = \frac{I_{ps}}{I_{pn}}$$

Fórmula 1. Factor nominal de seguridad.

Donde:

- $I_{ps}$  = Corriente primaria nominal de seguridad.
- $I_{pn}$  = Corriente primaria nominal.

La corriente nominal de seguridad, es la intensidad primaria, para la que, el transformador ha comenzado a saturarse. En este momento, la corriente secundaria multiplicada por la relación de transformación nominal, debe ser menor o igual a 0,9 veces la corriente primaria.

$$K_n * I_{ss} < 0.9 * I_{ps}$$

Fórmula 2. Corriente secundaria en relación a la corriente primaria.

### **Transformadores de corriente para protección**

Son los transformadores destinados a alimentar relés de protección. Deben, por tanto, asegurar una precisión suficiente para corrientes de valor igual a varias veces la corriente nominal. Para estas corrientes, el error a considerar, es el error compuesto, que se define como el valor eficaz de la diferencia integrada sobre un periodo entre los valores, instantáneos de la corriente primaria y el producto de la relación de transformación nominal por los valores instantáneos de la corriente secundaria real. En tanto por ciento, viene dada por:

$$\Sigma_C(\%) = \frac{100}{I_P} * \sqrt{\frac{1}{T} * \int_0^t (K_n * i_s - i_p)^2 dt}$$

Fórmula 3. Valor eficaz de un transformador de corriente para protección.

## Transformadores de Tensión

Los transformadores de tensión, son aparatos destinados a aislar dos circuitos eléctricos y reducir la tensión a valores en los cuales se puedan conectar equipos de medida y protección. El primario del transformador, se conecta en paralelo con el circuito del cual se desea conocer el voltaje (lado de Alta Tensión). Al secundario (lado de Baja Tensión), se conectan en paralelo los equipos de medida y protección. [3]

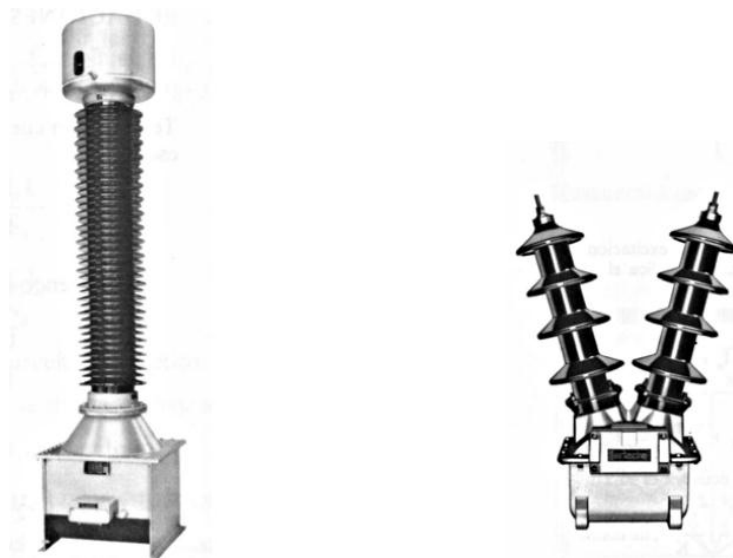


Figura 2. Transformadores de tensión para intemperie.

Debido a que estos transformadores deben indicar exactamente el valor de tensión existente en el primario, es necesario que la relación entre los voltajes primario y secundario se mantenga constante, esto significa que se debe limitar, tanto como sea posible la caída de tensión en el primario y en el secundario. La manera de conseguir la nula caída de tensión en los devanados primario y secundario, es conectando cargas con una impedancia de entrada elevada. [3]

La relación que existe entre la tensión de primario y secundario se la denomina relación de transformación, y viene dada por la expresión:

$$K_n = \frac{U_p}{U_s} = \frac{N_p}{n_s}$$

Fórmula 4. Relación de transformación.

- $K_n$  = Relación de transformación nominal.
- $U_p$  = Tensión primaria.
- $U_s$  = Tensión secundaria.
- $N_p$  = Número de espiras del devanado primario.
- $N_s$  = Número de espiras del devanado secundario.

Estos transformadores se fabrican para servicio interior o exterior, y al igual que los de corriente, se fabrican con aislamientos de resinas sintéticas (epoxy) para tensiones bajas o medias de hasta 33 kV, mientras que para altas tensiones se utilizan aislamientos de papel, aceite, porcelana o con gas SF6. [2]

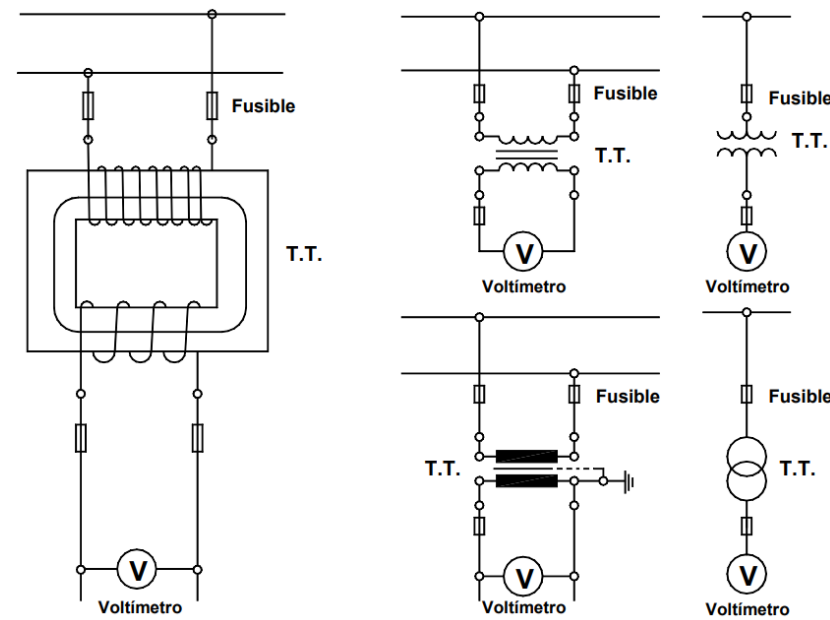


Figura 3. Representación de transformadores de tensión.

Los transformadores de medida de tensión no convencionales desarrollados en los últimos años están basados en dos filosofías de diseño:

- Transformadores que utilizan el efecto Pockels.
- Transformadores que utilizan un divisor capacitivo y salida óptica.

### **Transformadores de tensión para medida**

Son los destinados a alimentar los aparatos de medida, contadores y otros aparatos análogos. Clase de precisión La clase de precisión de un transformador de tensión para medida, está caracterizada por un número (índice de clase) que es el límite del error de relación, expresado en tanto por ciento, para la tensión nominal primaria estando alimentado el transformador con la carga de precisión. Esta precisión debe mantenerse para una tensión comprendida entre el 80% y el 120% de la tensión nominal con una carga comprendida entre el 25% y el 100% de la carga de precisión. Las clases de precisión para los transformadores de tensión son: 0,1, 0,2, 0,5, 1 y 3.

Siendo la guía de aplicación:

- Clase 0,1 Laboratorio.
- Clase 0,2 Laboratorio, patrones portátiles y contadores de precisión.
- Clase 0,5 Contadores normales, aparatos de medida.
- Clase 1 Aparatos para cuadros.
- Clase 3 Para usos en los que no se requiera una mayor precisión.

### **Transformadores de tensión para protección**

Son los transformadores destinados a alimentar relés de protección. Si un transformador de tensión va a ser utilizado para medida, normalmente no es necesario que existan dos arrollamientos separados, salvo que se desee una separación galvánica. [3]

#### **Clase de precisión**

La clase de precisión, como transformadores de tensión para protección, está caracterizada por un número que indica el error máximo, expresado en tanto por ciento al 5% de la tensión nominal y la tensión correspondiente al factor de tensión nominal. Este número va seguido de la letra P. [3]

Las clases de precisión más normales son: 3P y 6P. [2]

### **El Transformador Opto Eléctrico de Tensión EOVT**

Opera usando una variación del efecto electro óptico de Pockels denominado Celda de Cuadratura de Pockels. Un haz pasa por una placa de onda que produce un desfase de  $+45^\circ$  mientras que el otro haz pasa por una placa de onda que produce un desfase de  $-45^\circ$ . Como consecuencia cada haz de luz queda desfasado con respecto al otro en  $90^\circ$  y se dice que ambas señales de luz están en cuadratura. Si se aplica un voltaje entre los extremos del cristal, el campo eléctrico presente en el cristal produce una modulación en la frecuencia de la luz. Cuando la luz se ha propagado de un extremo a otro del cristal, dicha modulación representará la integral de la intensidad del campo eléctrico, es decir, la tensión aplicada al cristal. La tensión aplicada se reconstruye digitalmente a partir de estas dos señales en cuadratura. Esto se hace por medio de un procesador digital que considera el número de ciclos de la señal y reconstruye la forma de la tensión utilizando porciones de las señales que son una representación lineal de la tensión senoidal aplicada. [2]

### **Transformador Óptico de corriente:**

Un avance lógico para superar los problemas causados por la interferencia electromagnética en la señal del sensor es el uso de una transmisión de señal que es inmune a los campos electromagnéticos. Transmisión de la señal óptica utilizando fibras ópticas son la mejor solución para ese propósito. Normalmente, la señal óptica no se ve influenciada por los campos electromagnéticos. En un sensor diseñado adecuado sin embargo, varias propiedades de la luz que se utiliza como la portadora de la señal pueden ser influenciadas, por ejemplo, intensidad, estado de polarización, las propiedades espectrales y retardo de fase. Idealmente, la señal del sensor se genera directamente por la interacción del campo magnético con el medio sensor.

## **8.2. MARCO TEÓRICO**

Mediciones convencionales en sistemas de alto voltaje y corriente confiaban años atrás en la medida de consumo de una pequeña cantidad de energía desde el sistema. Por ejemplo, un divisor resistivo representaba algunas pequeñas cantidades de corriente. [4]

En vez de la medición directa de la cantidad de interés se puede medir los cambios en las propiedades de algunos materiales como resultado de la energía eléctrica circundante o campo magnético. [4]

## PRINCIPIOS FÍSICOS DE LOS DISPOSITIVOS ÓPTICOS DIGITALES

Las nuevas tecnológicas referentes a los transformadores de instrumento han centrado su interés en promover avances en la de medición de energía utilizando tecnología óptica. Estos instrumentos tienen muchas ventajas tales como: la insensibilidad a las interferencias electromagnéticas, la facilidad de transportar, su ligereza y la su fácil instalación. En ciertas aplicaciones pueden sustituir a un sistema convencional de medición. [5]

Cuando se requiere una adquisición de datos precisa y segura se debe pensar en fibra óptica, y esta precisión se puede apreciar cuando en los transformadores de medición los errores en la lectura son mínimos, después de procesada, transmitida y almacenada la información. Esto último es en gran parte debido a que las señales luminosas son insensibles a perturbaciones electromagnéticas, en consecuencia, una excelente capacidad para transmisión de datos. En los casos de medición de energía en alta tensión, ya sea con el objetivo de protección o medición, se necesita que el instrumento sea preciso y exacto. [5]

En los sistemas actuales de medición de energía en alta tensión, cada instrumento de medición, no importando que sea TP (transformador de potencia) o TC (transformador de corriente), están conformados por núcleos ferromagnéticos. Estos instrumentos adquieren un pequeño porcentaje de energía de la línea de transmisión para la medición, por lo que se tiene que tomar en consideración la saturación de dicho núcleo, y esta se relaciona con la precisión y exactitud del transformador.

A diferencia de los sistemas convencionales, un sistema basado en medición indirecta cuenta con un sensor del campo magnético circundante y lo convierte a una señal óptica. Este sensor cuenta con una propia alimentación, dejando sin alteración la energía eléctrica circundante. El sensor basa su funcionamiento en principios físicos tales como los efectos Pockels, Kerr, Faraday y Ampere. [5]

El sensor simplemente se basa en el principio físico de que un material cambia o rota el plano de polarización de la onda luminosa que pasa a través del mismo, la cantidad de rotación depende del campo eléctrico o magnético. El sensor debe ser capaz de medir los pequeños cambios de polarización del haz de luz. [5]

## **Actividad Óptica**

Se denominan sustancias ópticamente activas a aquellas que producen un giro en el plano de polarización de la luz polarizada linealmente que pasa a su través. Serán dextrógiras si, mirando hacia la fuente luminosa, el giro se produce en el sentido de las agujas del reloj, y levógiras en caso contrario. El ángulo girado por el plano de vibración es proporcional al espesor de sustancia atravesado y depende de la longitud de onda de la luz. En general se considera como referencia la raya amarilla D del sodio. [6]

### **Efectos físicos que se presentan en los sistemas ópticos:**

#### **Efecto Faraday**

El efecto Faraday (denominado a veces como: Rotación Faraday) fue descubierto en 1845 por el físico Michael Faraday, e intenta demostrar la interacción entre la luz y un campo magnético. Para ser más precisos, el efecto describe como el plano de polarización de la luz puede cambiar. [7]

También muestra como su alteración es proporcional a la intensidad del componente del campo magnético en la dirección de propagación de la onda luminosa. El efecto Faraday es un efecto magneto-óptico. El efecto es la primera evidencia experimental de que la luz y el magnetismo están relacionados. Hoy en día la base teórica para definir esta relación se denomina Teoría electromagnética, y fue desarrollado por James Clerk Maxwell entre los 60 y 70. Este efecto ocurre en la mayoría de los materiales dieléctricos transparentes afectados por fuertes campos magnéticos (por ejemplo: 5 Tesla (50000 gauss) para hacer rotar la polarización 90 grados). [7]

El efecto Faraday es resultado de una resonancia ferromagnética cuando la permeabilidad de un material se representa por un tensor. Esta resonancia provoca que las ondas se descompongan en dos rayos polarizados circularmente y que se propagan con velocidades diferentes, esta propiedad se conoce como birrefringencia circular. Los rayos se recombinan al llegar a la interfase del medio, de tal forma que la onda resultante final tiene una rotación de su plano de polarización. [7]

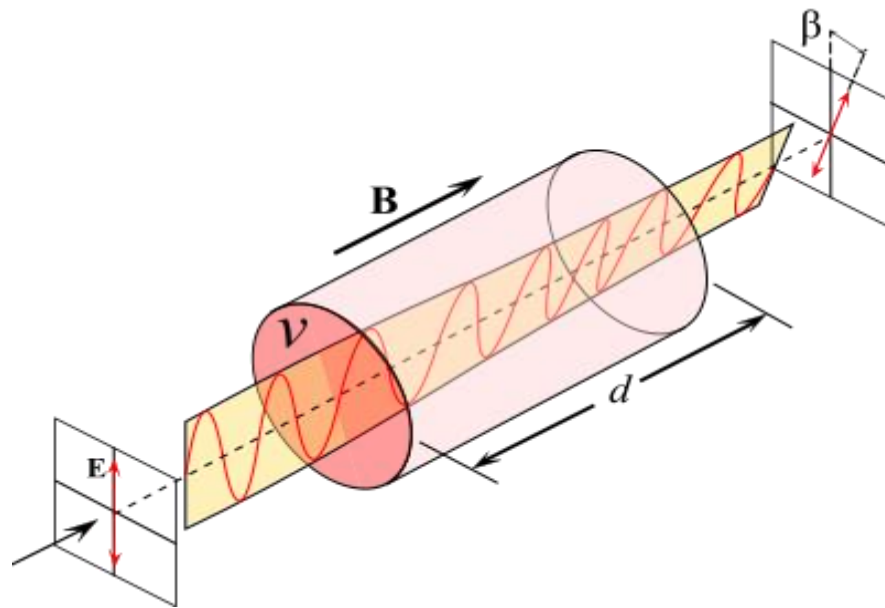


Figura 4. Efecto de rotación de Faraday.

Para poder determinar el grado de giro del plano de polarización en los diferentes materiales, se emplea la siguiente fórmula:

$$\beta = VBd$$

Fórmula 5. Fórmula para obtener el ángulo de rotación.

Donde:

$\beta$  es el ángulo de rotación (en radianes).

$B$  es flujo de densidad magnético en la dirección de propagación (en teslas).

$d$  es la longitud del camino óptico (en metros)

$V$  es la constante de Verdet del material. Este valor es una constante empírica que muestra la proporcionalidad (en unidades de radianes por tesla y por metro) entre el campo y la rotación del plano de polarización para varios materiales. Un valor positivo de esta constante indica que el giro del plano será levógiro (contrario a las agujas del reloj) y por el contrario un valor negativo indica un giro dextrógiro (sentido de las agujas del reloj). [7]

Algunos materiales tales como las aleaciones transparentes de terbio y galio (denominadas abreviadamente como TGG) tienen un valor de la constante de Verdet extremadamente elevada ( $\approx -40 \text{ rad T}^{-1} \text{ m}^{-1}$ ). De esta forma si se coloca una barra de este material en un intenso campo magnético, el ángulo de la rotación Faraday puede llegar a ser de 0.78 Rad.

(45°). Este efecto permite la construcción del Rotador de Faraday, que tienen como propiedad aislar algunos componentes de la luz transmitida en una dirección. Aislantes similares se construyen en los sistemas de microondas empleando barras de ferrita en una guía de onda envuelta en un campo magnético.

El efecto de Faraday se considera de mucha importancia en campos tales como la astronomía, que se emplea en la medición de campos magnéticos de pulsares de radio, que puede ser estimada mediante las medidas combinada de la rotación del plano de polarización y los retrasos existentes entre los pulsos de radio en diferentes longitudes de onda. [7]

Si se considera que un rayo de luz pasa a través de un medio interestelar en el que existe una cierta cantidad de electrones libres, se puede observar como existe un índice de refracción que consiste en hacer que la luz se propague en dos modos polarizados circularmente. El efecto Faraday en las nubes interestelares, al contrario de lo que pasa en los líquidos y sólidos, tiene una simple dependencia con la longitud de onda de la luz ( $\lambda$ ), de esta forma:

$$\beta = RM \lambda^2$$

Fórmula 6. Efecto Faraday para nubes interestelares.

Donde el efecto global de esta perturbación, caracterizado por MR, Medida de la Rotación, indica el giro del plano de polarización en función de B y de la densidad de electrones,  $n_e$ , ambos pueden variar a lo largo de la trayectoria lumínica, de esta forma se tiene que:

$$MR = \frac{e^3}{2\pi m^2 c^4} \int_0^d n_e B ds$$

Fórmula 7. Medida de la Rotación.

Donde:

**e** es el carga de un electrón

**m** es la masa de un electrón

**c** es la velocidad de la luz en el vacío

Las ondas de radio que pasan a través de la ionosfera están sujetas igualmente a rotación del plano de polarización según el efecto Faraday, y el efecto es proporcional al cuadrado de la longitud de onda. A 435 MHz (UHF), se puede esperar que las ondas hayan cambiado su

plano de polarización en 1.5 grados a causa del tránsito por la ionosfera, mientras que las ondas de 1.2 GHz lo hacen en cerca de un cuadrante.

### **Ley de Rotación de Faraday**

“Si un haz de luz polarizada en un plano atraviesa ciertas substancias transparentes en dirección paralela a las líneas de campo magnético intenso, el plano de polarización experimenta un giro o cambio.” [7]

### **Ley de Ampere**

André Marie Ampere fue un físico y matemático francés que en el año 1825 publico sus teorías en electrostática y electrodinámica, estudio la equivalencia entre imanes y corrientes y distinguió la diferencia entre tensión eléctrica y corriente eléctrica. Se le acredita a Ampere el descubrimiento del electromagnetismo. [5]

La ley de Ampere expresa que si la onda luminosa es uniformemente sensitiva al campo magnético a lo largo del camino de la onda luminosa y si este camino define un lazo o bucle cerrado, entonces la rotación acumulada del plano de polarización de la onda luminosa debido al campo es directamente proporcional a la corriente fluyendo por el conductor encerrado por el lazo. [5]

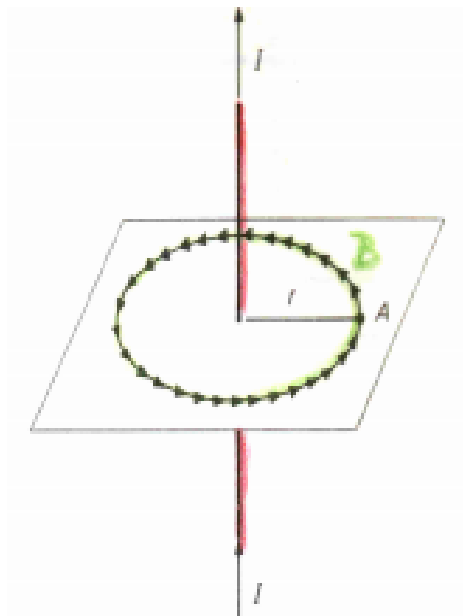


Figura 5. Ley de Ampere.

### **Efecto Kerr**

Descubierto en 1875 por el físico escocés John Kerr, el efecto Kerr es una birrefringencia o doble refracción, creada en un material por un campo eléctrico exterior. Se caracteriza por la existencia de dos índices de refracción diferentes: un haz luminoso se divide en dos haces cuando penetra en este material. [8]

La birrefringencia creada, a diferencia de la del efecto Pockels, varía según el cuadrado del campo eléctrico aplicado. Los materiales presentan en general un efecto Kerr muy débil, sin embargo, algunos líquidos presentan un efecto Kerr medible. [8]

Para [8], un campo eléctrico aplicado a un material genera una birrefringencia en ese material: la luz tiene un índice de refracción diferente según su polarización sea ortogonal o paralela al campo. La diferencia entre los dos índices  $n_2 - n_1$  es:

$$\Delta n = K E^2$$

Fórmula 8. Diferencia entre los índices de refracción.

**K** es la constante Kerr, cuando **K** es positiva,  $n_2 - n_1$  es positivo y la sustancia se comporta como un cristal uniaxial positivo.

**E** es la amplitud del campo eléctrico.

### **Efecto Pockels**

El efecto electro-óptico Pockels produce una birrefringencia en un medio óptico inducido por un constante o cambiante campo eléctrico. A diferencia del efecto Kerr, el efecto Pockels produce una birrefringencia proporcional al campo eléctrico, mientras que en el efecto Kerr es al cuadrado del campo. El efecto Pockels ocurre solo en cristales desprovistos de un centro de simetría, como el Litio Nobio Oxígeno y el Galio Arsénico. [9]

Friedrich Carl Alwin Pockels estudió el efecto que lleva su nombre en 1983, este efecto es utilizado para la fabricación de celdas Pockels, estas no son más que un monocristal orientado sin centro de simetría sumergido en un campo eléctrico controlable.

El campo eléctrico puede ser aplicado al cristal ya sea de forma longitudinal o transversal al rayo de luz. El eje del cristal puede ser longitudinal o transversal. Una celda longitudinal es un poco más grande, y los cristales son un poco menos eficientes en este modo. El

alineamiento del eje del cristal con el eje del rayo es crítico, ya que el des-alineamiento produce una birrefringencia y un cambio en la fase a lo largo del cristal, y estos una rotación polarizada, si el alineamiento no es exactamente paralelo o perpendicular a la polarización. [9]

Una celda transversal consiste en dos cristales en una orientación opuesta, esto produce un valor cero de la onda cuando el voltaje es llevado a cero. Esta celda no es ideal y tiene cambios debido a la temperatura. El alineamiento mecánico del eje del cristal no es tan crítico y es regularmente hecho con la mano sin necesidad de desarmadores; mientras el desalineamiento produce una energía en un sentido erróneo, en contraste al caso longitudinal, este no es amplificado proporcionalmente a la longitud del cristal.

Las celdas de Pockels son comúnmente usadas para rotar la polarización del rayo de luz que pasa a través de ellas.

Debido a la gran constante dieléctrica del cristal, las celdas Pockels se comportan como un capacitor. Cuando estas se maniobran a un estado de alto voltaje, se necesita una alta descarga, consecuentemente, estas rápidas maniobras requieren el manejo de grandes corrientes. Las celdas Pockels para fibra óptica utilizan un diseño de onda viajera para reducir los requerimientos de corriente.

Las celdas Pockels son utilizadas en una variedad de aplicaciones técnicas cuando se combinan con un polarizador:

1. Maniobras de apertura y cerrado en nanosegundos.
2. Imprimir información en el rayo por medio de modulación de la rotación entre cero y noventa grados.
3. Obtener una señal de amplitud modulada de la intensidad del rayo, cuando es visto por medio del polarizador.
4. Prevenir el feedback utilizando el prisma polarizador.

### **Consideraciones básicas acerca de las fibras ópticas**

Fibra óptica, guía o conducto de ondas en forma de filamento, generalmente de vidrio (polisilicio), aunque también puede ser de materiales plásticos, capaz de transportar una potencia óptica en forma de luz, normalmente emitida por un láser o LED. Las fibras utilizadas en telecomunicación a largas distancias son siempre de vidrio, utilizándose las de

plástico solo en algunas redes locales y otras aplicaciones de corta distancia, debido a que presentan mayor atenuación o posibilidad de sufrir interferencias.

En el interior de una fibra óptica, la luz se va reflejando contra las paredes en ángulos muy abiertos, de tal forma que prácticamente avanza por su centro. De este modo, se pueden guiar las señales luminosas sin pérdidas por largas distancias.

La fibra óptica ha representado una revolución en el mundo de las telecomunicaciones, por cuanto ha desplazado a los cables de cobre para la transmisión de grandes cantidades de información, sea en forma de canales telefónicos, televisión, datos, etc.

Las diferentes trayectorias que puede seguir un haz de luz en el interior de una fibra se denominan modos de propagación.

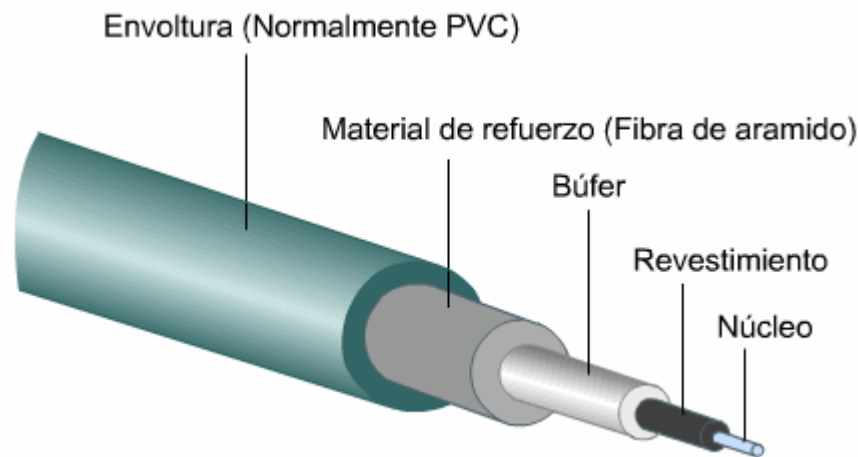


Figura 6. Ejemplo de Fibra óptica.

Una fibra multimodo es una fibra que puede propagar más de un modo de luz. Una fibra multimodo puede tener más de mil modos de propagación de luz. Las fibras multimodo se usan comúnmente en aplicaciones de corta distancia, menores a 1 km. Simple de diseñar y económico. El núcleo de una fibra multimodo es inferior, pero del mismo orden de magnitud, que el revestimiento. Debido al gran tamaño del núcleo de una fibra multimodo, es más fácil de conectar y tiene una mayor tolerancia a componentes de menor precisión.

Una fibra monomodo es una fibra óptica en la que sólo se propaga un modo de luz. Se logra reduciendo el diámetro del núcleo de la fibra hasta un tamaño que sólo permite un modo de propagación. Se utiliza en aplicaciones de larga distancia, más de 300 km. [1]

La fibra óptica se emplea en multitud de sistemas y el actual auge de los sistemas de banda ancha se debe en gran medida a la elevada capacidad de tráfico que pueden transmitir las redes de las operadoras basadas en fibra óptica. Las fibras ópticas pueden ahora usarse como los alambres de cobre convencionales, tanto en pequeños ambientes, dada la dificultad de hacer imperceptible una interceptación de los datos transmitidos.

Algunas de las desventajas son el costo, la fragilidad de las fibras, la disponibilidad limitada de conectores y la dificultad de reparar un cable de fibras roto en el campo.

Charles Kao en su tesis doctoral de 1966 estimó que las máximas pérdidas que debería tener la fibra óptica para que resultara práctica en enlaces de comunicaciones eran de 20 dB/km. En 1970 los investigadores Maurer, Keck, Schultz y Zimar que trabajaban para Corning Glass Works fabricaron la primera fibra óptica dopando el sílice con titanio. Las pérdidas eran de 17 dB/km.

El primer enlace transoceánico con fibras ópticas fue el TAT-8, comenzó a operar en 1988. Desde entonces se ha empleado fibra óptica en multitud de enlaces transoceánicos, entre ciudades y poco a poco se va extendiendo su uso desde las redes troncales de las operadoras hacia los usuarios finales.



Figura 7. Fibra óptica brillando cuando transmite luz.

Algunos de los usos que se le ha dado a la fibra óptica son:

- Se puede usar como una guía de onda en aplicaciones médicas o industriales en las que es necesario guiar un haz de luz hasta un blanco que no se encuentra en la línea de visión.
- La fibra óptica se puede emplear como sensor para medir tensiones, voltajes, corrientes, temperatura, presión así como otros parámetros.
- Es posible usar latiguillos de fibra junto con lentes para fabricar instrumentos de visualización largos y delgados llamados endoscopios. Los endoscopios se usan en medicina para visualizar objetos a través de un agujero pequeño. Los endoscopios industriales se usan para propósitos similares, como por ejemplo, para inspeccionar el interior de turbinas.
- Las fibras ópticas se han empleado también para usos decorativos incluyendo iluminación, árboles de Navidad.

### **Principio de Operación del Transformador Óptico De Corriente:**

Los sensores ópticos de corriente brindan actualmente significativas ventajas en comparación a los sistemas convencionales, su utilización es de gran importancia dentro de la medición de parámetros eléctricos en base a sistemas modernos.

Según [10], los sensores ópticos de corriente trabajan bajo el principio del efecto de Rotación de Faraday. La corriente que fluye en un conductor induce un campo magnético el cual según el efecto de Faraday cambia el plano de polarización de la onda luminosa viajando a través de un camino determinado el cual rodea al conductor. La ley de Ampere establece que si la onda luminosa es uniformemente sensible a todo el campo magnético a lo largo de un camino determinado, y este define un lazo cerrado, entonces el cambio acumulado del plano de polarización de la onda luminosa es directamente proporcional a la corriente fluyendo en el conductor, como se lo expresó anteriormente.

Estos sensores de corriente con fibras ópticas trabajan en el principio que el campo magnético, más que rotar o cambiar una onda de luz linealmente polarizada, cambia la velocidad de una onda de luz circularmente polarizada dentro de un sensor de fibra envuelto (lazo) alrededor del conductor que lleva la corriente. El efecto es el mismo efecto Faraday pero formulado diferentemente. Se ha demostrado que es mucho más fácil medir con

precisión cambios en la velocidad de la onda luminosa que cambios en el estado de polarización. Los transformadores ópticos de corriente son tanto intrínsecos como extrínsecos, son intrínsecos porque la fibra óptica es usada para censar la corriente y a su vez son extrínsecos porque la fibra transmite la onda luminosa hacia y desde el grupo de elementos sensores de corriente. [10]

Se puede observar cómo es un circuito óptico en la figura 5 La onda luminosa, procedente de un LED, es enviada hacia una fibra óptica donde es polarizada y dividida en dos ondas de luz ortogonalmente polarizadas. Estas dos ondas viajan a través de la fibra de mantenimiento de polarización hasta el sensor principal. Una fibra óptica de placa de cuarto de onda convierte las dos ondas en: una onda de polarización elíptica, la cual es una onda electromagnética transversal en la que la rotación del vector del campo eléctrico es hacia la derecha respecto a un observador que mira en la dirección y sentido de la propagación de la onda, y en una onda electromagnética de polarización elíptica cuyo vector del campo eléctrico gira hacia la izquierda respecto a un observador que mira en la dirección y sentido de la propagación respectivamente. Estas dos ondas viajan a través de la fibra óptica la cual envuelve en un número específico de vueltas alrededor del conductor de corriente (lazo de Fibra óptica). Las dos ondas viajan a través de la fibra a diferentes velocidades, la diferencia es proporcional a la intensidad de campo magnético alineado con la fibra que censa. Al final de la región de censado las dos ondas se reflejan en un espejo. Debido a la reflexión el censado de las dos ondas con polarización elíptica es cambiado y las dos ondas ahora viajan en una dirección contraria con respecto al campo magnético. Las dos ondas mantienen su diferencia de velocidad para el viaje de retorno alrededor de la fibra censada. [10]

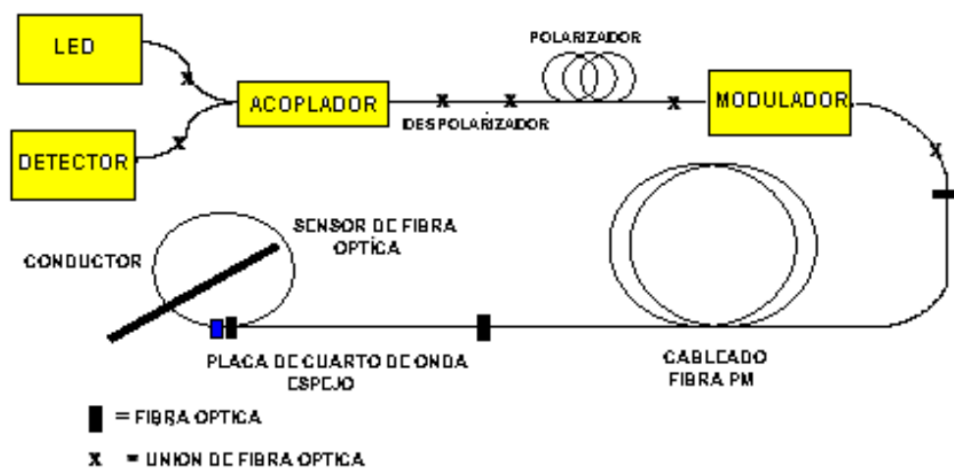


Figura 8. Descripción del transformador óptico de corriente.

Una vez que la onda luminosa ha regresado por la misma vía alrededor de la región censada, las dos ondas de nuevo se encuentran con la placa de cuarto de onda donde son convertidas de nuevo al estado de polarización lineal. Ahora la onda luminosa que viajó destinada en la fibra PM (Mantenimiento de Polarización) como polarización-X (polarización elíptica) regresa al estado de polarización-Y (polarización lineal) y viceversa. Las dos ondas son recombinadas en el polarizador y desviadas a una foto detectora (Detector que responde a la energía radiante). [10]

### Componentes del Transformador Óptico de Corriente

El transformador óptico digital de corriente se divide en tres elementos separables como se indica la Figura 6. El armazón metálico o llamado también chasis optoelectrónico, el cableado de fibra óptica, el sensor principal y el soporte. El armazón opto-electrónico contiene todos los elementos electrónicos como la fuente de luz (Láser) y demás componentes ópticos. El armazón optoelectrónico para un sistema trifásico incluye la fuente de poder y está en el cuarto de control de la subestación.

El cableado de fibra óptica, un cable de fibra PM para cada sensor, está conectado en ambos extremos tanto que el chasis opto-electrónico, el sensor principal y el soporte pueden ser transportados independientemente.

El sensor principal y la columna que funciona como aislador tienen una estructura dieléctrica y suficientemente liviana para ser soportado por la línea propiamente e integrada a una estructura de soporte existente.

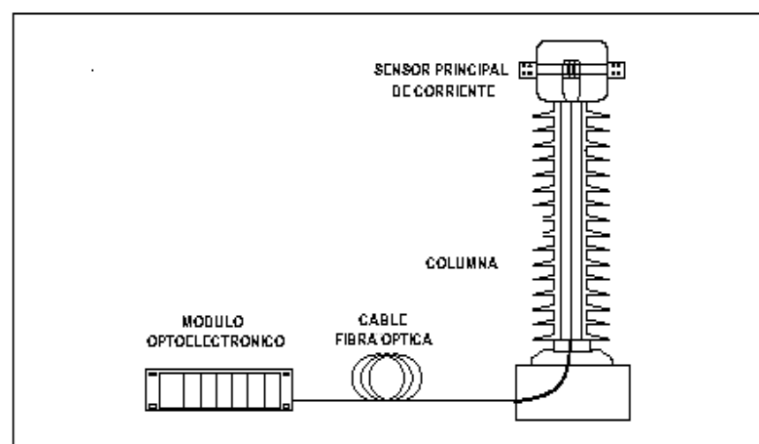


Figura 9. Componentes del Transformador Óptico de Corriente.

El sensor principal de este instrumento es el sensor de corriente de fibra óptica, el cual es el núcleo del transformador óptico de corriente. Consiste de una fuente de luz (Láser), foto detector (detector que responde a la energía radiante), elementos ópticos y electrónicos acoplados a un sensor envuelto alrededor del conductor. El modulador, es el “corazón” o parte principal de este instrumento junto a la demás tecnología (óptico-electrónico) permite una medición de corriente con muy alta precisión. Valores de corriente que van desde el rango de 1 A. (rms) hasta 63 KA. (rms). Su reducido tamaño y peso comparado con los equipos convencionales permiten ubicarlos en subestaciones compactas, también en aplicaciones donde el espacio puede ser muy limitado.

Explicando más detalladamente el proceso:

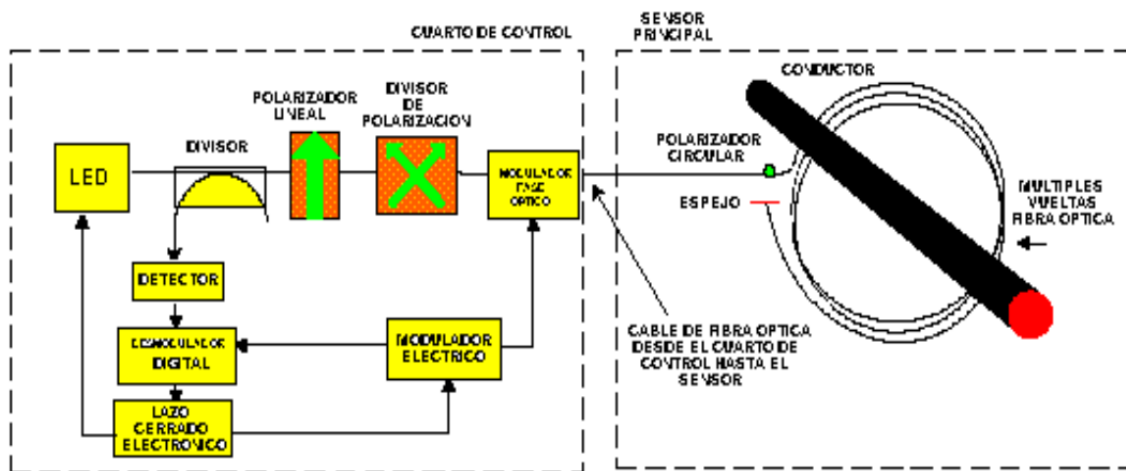


Figura 10. Proceso detallado del funcionamiento del transformador óptico de corriente.

- 1.- Una fuente de luz envía ondas luminosas a través de una guía de onda hacia un polarizador lineal, pasando por un divisor de polarización (creando dos ondas de luz linealmente polarizadas) y finalmente hacia un modulador de fase óptico.
- 2.- Esta onda luminosa es entonces enviada desde el cuarto de control hasta el sensor principal por medio de una fibra óptica.
- 3.- La onda luminosa pasa a través de una placa de cuarto de onda creando dos ondas circularmente polarizadas a partir de las ondas linealmente polarizadas.
- 4.- Las dos ondas luminosas atraviesan el lazo de fibra sensor alrededor del conductor, se refleja en un espejo al final de la fibra óptica y retorna a través del mismo camino.

5.- Mientras encierra el conductor, el campo magnético inducido por la corriente fluyendo en el conductor crea un diferencial óptico de desplazamiento entre las dos ondas luminosas debido al efecto Faraday, el cual describe cambios en el estado de polarización de la onda luminosa en presencia de un campo magnético.

6.- Las dos ondas ópticas viajan de regreso a través del circuito óptico y son finalmente dirigidas hacia el detector óptico donde los circuitos electrónicos desmodulan las ondas luminosas para determinar el desplazamiento.

7.- El desplazamiento entre las dos ondas luminosas es proporcional a la corriente y una señal análoga o digital representa la corriente por medio de circuitos electrónicos hacia el usuario final.

### **Ventajas del Transformador Óptico de Corriente:**

#### **a) Precisión para medición y protección**

El diseño de estos instrumentos permite mediciones que se pueden realizar con la más alta precisión y estabilidad. Excede las normas básicas acerca de los estrictos requerimientos sobre medición y protección. A su vez el mismo elemento puede ser usado para aplicaciones de medición y protección, eliminando la necesidad de utilizar elementos por separado para tales fines.

#### **b) Amplio Rango dinámico**

La especificación sobre precisión es mantenida sobre un amplio intervalo dinámico, desde 5% hasta 200% de la corriente nominal. Esto permite la eliminación de transformadores de corriente para intervalos altos y bajos respectivamente.

#### **c) Amplio Ancho de Banda**

La reproducción precisa de la forma de onda de DC hasta 10 KHz permite un análisis a potencia máxima de armónicos y transientes sin las limitaciones de los sensores convencionales.

#### **d) Composición de los aisladores con peso liviano**

El montaje de la columna y la línea emplean aisladores con un peso muy ligero reduciendo costos por transportación, requerimientos de estructura de soporte para subestaciones e

instalación de equipos demandados. El diseño de estos aisladores permite su ubicación en áreas sísmicamente activas.

**e) Seguridad intrínseca, diseño ambientalmente favorable.**

Los aisladores no contienen aceite mineral ó aislaciones con celulosa, tampoco gas SF6. No hay mecanismos internos para fallas violentas que puedan dañar al personal o equipos adyacentes. No hay problemas ambientales o gas que reciclar. Con un diseño óptico no hay consecuencia con secundarios abiertos.

**f) Bajo Mantenimiento**

Estos instrumentos no tienen componentes activos en la línea de alimentación, eliminando la necesidad de costosos cortes para mantener los circuitos electrónicos. Ya que no hay aislamiento en aceite o papel no hay complicación en los procedimientos de mantenimiento. La columna del aislador polímero emplea materiales como silicona y caucho que no requieren lavado frecuente.



Figura 11. Transformador óptico de corriente.

**Aplicación de los transformadores Ópticos de corriente en una Subestación**

Los sensores ópticos de corriente están obteniendo en los actuales momentos un incremento en su aceptación en subestaciones de alto voltaje debido a su precisión, ancho de banda

amplia y rango dinámico. Estos sensores han elevado su acción a un nivel que excede los parámetros de los transformadores convencionales (CT'S). [10]

Las diferencias entre los transformadores convencionales y los sensores ópticos es amplia. Estas diferencias, además de las técnicas, incluyen desde las personas que se encargan del proyecto, los ingenieros de instrumentos, los diseñadores de subestaciones, personal de mantenimiento y operadores. [10]

Proveer un método simple de interconexión entre la tecnología anterior y la nueva es un paso necesario y requerido en el camino hacia la aceptación de estos nuevos sensores, y una vez dada esta metodología será mucho más fácil la transición dentro de una subestación.

Con cualquier nueva tecnología existe la interrogante de cómo evolucionará y si es capaz de superar a la tecnología ya existente.

Sin embargo, una vez que esta tecnología ha sido comprendida, los recursos para su ejecución hayan sido provistos y el personal haya sido entrenado, existen los problemas concernientes a la integración de esta tecnología dentro de una infraestructura ya existente. [10]

Cuando el problema de integrar la tecnología existente con equipos avanzados, los cuales tienen salidas digitales y sistemas de comunicación de gran capacidad, sea superado, esta tecnología ingresará en el mercado con grandes beneficios. Con esta meta en mente, dentro de la cual las salidas electrónicas representan un determinado valor de medición, el cual varía desde una señal digital hasta una salida de alta energía (1 A), se proveerá de una solución que no requiere de un cambio completo de la tecnología existente.

Dentro de este capítulo se dará una variedad de interconexiones disponibles, las cuales son aplicables a subestaciones de 138 KV y 230 KV muy comunes en nuestro medio. Los beneficios de esta nueva tecnología pueden ser combinados con equipos convencionales en subestaciones ya existentes. [10]

### **Comparativa entre un transformador óptico de corriente y un transformador convencional:**

Técnicamente los transformadores ópticos de corriente ofrecen considerables ventajas en comparación con los transformadores convencionales de corriente. Estas son algunas de estas ventajas:

- Los sensores ópticos de corriente mantienen un rango de precisión que exceden las especificaciones dadas por las normas estándar, y por las típicas normas dadas por los transformadores para instrumentos de medición. Estos sensores también tienen la cualidad de operar a temperaturas que van desde  $-50^{\circ}\text{C}$  hasta  $50^{\circ}\text{C}$ .
- Los sensores ópticos de corriente tienen la particularidad que pueden adaptar la relación de vueltas del sensor hacia varias condiciones de carga y comunicarse hacia elementos secundarios por medio de un contacto de salida. Esta característica permite al medidor cambiar su rango previamente ajustado basado en la información del sensor, superando las limitaciones de los medidores de corriente con precisión por debajo del 1% al 5% del rango establecido. Esto permite un sistema simple de medición con un amplio rango dinámico. Los transformadores convencionales de corriente podrían requerir dos medidores y posiblemente dos núcleos de hierro o transformadores ya sea para el lado de alta como para el lado de baja con sus respectivas pérdidas. [10]
- Los transformadores convencionales de corriente requieren sistemas de reserva con rangos específicos para las muchas alternativas que podrían suscitarse. Las unidades ópticas son configuradas con rapidez y el número de sistemas de reserva puede ser minimizado.
- Un amplio ancho de banda que va desde DC hasta 6 KHz. Permite mediciones de energía de excelente calidad con una respuesta de frecuencia totalmente conocida. Los transformadores de corriente convencionales tienen una información muy limitada acerca de la respuesta de frecuencia.
- Las salidas de los sensores ópticos de corriente son inherentemente limitadores de corriente por medio de circuitos electrónicos. No hay el riesgo de secundarios abiertos debido a corrientes de falla muy altas.
- La máxima carga continua está limitada solamente por las características térmicas de los terminales no por el sensor óptico de corriente. El rango de corriente estándar es 3000 A. Los transformadores convencionales de corriente requieren un nuevo diseño.
- Las Fibras ópticas aíslan eléctricamente el cuarto de control del equipo de campo. Una aislación completa del cuarto de control puede ser considerada usando tecnología óptica. [10]

## **Selección del Sensor Óptico de Corriente para medición**

Los sensores ópticos son diferentes de los transformadores convencionales de núcleo de hierro. Estos sensores miden la corriente primaria basada en una detección óptica de parámetros y crea una representación digital de la corriente. Esta señal puede ser convertida en una señal análoga y posiblemente amplificada. Cuando se utilizan los sensores ópticos hay la posibilidad de que existan resultados peculiares desde sus medidores, especialmente en bajas corrientes primarias. Estas particularidades y su dependencia al diseño del sensor óptico son debidas primero a la cantidad de ruido (perturbación con origen en aparatos e instalaciones eléctricas) contenida dentro de la señal digital y segundo al método de calcular ciertos valores dentro de la construcción de un medidor. Lo primero puede ser controlado por los constructores del sensor, lo segundo puede variar de medidor a medidor y aun así, tener limitada la capacidad de ser modificado. Para ejecutar un exitoso sistema de medición el ruido desde el sensor debe ser reducido.

La contribución del ruido, o alternativamente, la sensibilidad de un sensor óptico de corriente es importante porque los medidores pueden reportar resultados incorrectos, tales como valores altos de potencia reactiva, factores de potencia incorrectos o altas distorsiones debido a corrientes armónicas. Estas lecturas incorrectas aparecerán en bajos niveles de corrientes, pero dependiendo del diseño del sensor, corrientes bajas pueden significar 100 A o más fluyendo en el primario. Dependiendo de la sensibilidad del sensor, el ruido puede ser reducido a un nivel por debajo de los 5 amperios primarios donde resultará insignificante.

Los sistemas de medición han aparecido como un componente en la desregulación de los sistemas de potencia como generación, transmisión, distribución y operación, los cuales están siendo separados hacia compañías independientes. La medición ha aparecido con mayor importancia y se la asocia con la compra y venta de energía, la cual se desea medir con una precisión determinada y con un mejor costo efectivo.

### **Sensor Óptico de Corriente para Medición:**

Para reducir las perturbaciones en las señales a causa del ruido en un sensor óptico de corriente, un método práctico y exitoso es hacer un devanado de múltiples vueltas de fibra óptica alrededor del conductor, esto a su vez incrementa la sensibilidad del elemento y reduce el nivel del ruido hacia un nivel donde se vuelve insignificante. Incrementando las vueltas con fibra el resultado será una señal que llegará hasta los módulos opto-electrónicos y a su vez a

los medidores, con una señal muy superior o una señal con perturbaciones debido al ruido. Reduciendo la componente del ruido cualquier sensor óptico podrá ser utilizado con cualquier medidor. [10]

La figura 9 ilustra la magnitud de esta componente con una sola vuelta de fibra y en un sensor con 16 vueltas. El sensor con una sola vuelta de fibra tendrá una significativa componente de ruido, lo cual puede causar lecturas mucho más altas en el medidor de las que realmente están fluyendo en el primario. Un sensor con varias vueltas de fibra lleva esta componente por debajo a niveles por debajo del sensor anterior. Las implicaciones de un sensor con una avanzada sensibilidad radican en que puede haber interconexión con cualquier medidor. Cuando un sensor con altos contenidos de ruido es interconectado con medidores, las lecturas comenzarán a elevarse progresivamente hasta el peor de los casos. Sin embargo, a menos que el medidor examine señales puras a 60 Hz, el medidor puede registrar valores incorrectos. Usando múltiples vueltas de fibra en unión de avanzados circuitos ópticos y electrónicos, esta limitación podrá ser superada. [10]

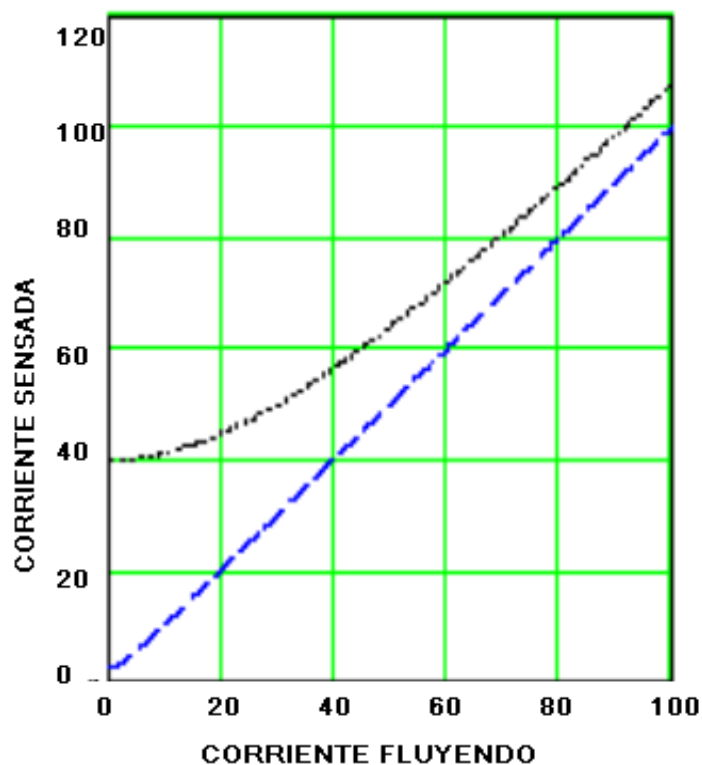


Figura 12. Valores medidos con un sensor de corriente con determinado número de vueltas.

### Transformadores convencionales con salida óptica:

Consiste en la utilización de un transformador de corriente tradicional al que se añade una salida óptica que sustituye a la salida por cables, de tal forma que se mantienen las ventajas tanto de la tecnología convencional como de las nuevas tecnologías ópticas. El transformador de corriente que se usa con esta metodología puede diferir del diseño de un transformador de corriente normal para Alta Tensión. En primer lugar el transformador de corriente no necesita aislamiento de Alta Tensión. En segundo la carga es constante (y consume muy poca potencia) pudiéndose reducir las dimensiones del núcleo, e incluso utilizar núcleos de otros materiales (o de aire para obtener una buena respuesta en altas frecuencias). [5]

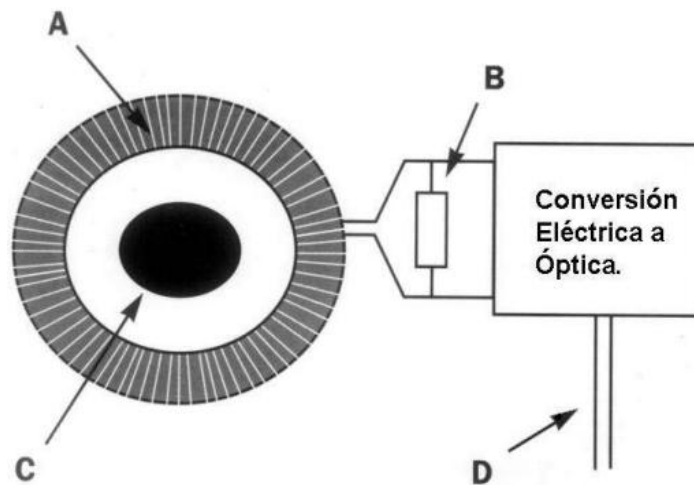


Figura 13. Transformador convencional con salida óptica.

#### Donde:

- A: Transformador de corriente.
- B: Carga.
- C: Conductor circuito de alta tensión.
- D: Fibra óptica.

### Sistemas Ópticos para Medición de Tensión y Corriente.

El desarrollo de transformadores ópticos pasivos utilizados como sensores de voltaje y corriente en aplicaciones de medición y protección en alta tensión ha evolucionado rápidamente en los últimos años. Sistemas de medición y protección basados en esta tecnología han sido instalados en sistemas eléctricos desde 115 hasta 550 kV en los Estados

Unidos, Canadá, Alemania y Chile. Actualmente las compañías suministradoras de energía eléctrica pueden aprovechar las ventajas ofrecidas por esta tecnología. Sus dimensiones compactas, menor peso, precisión en un rango amplio ofrecen una alternativa atractiva en el diseño de subestaciones modernas. [5]

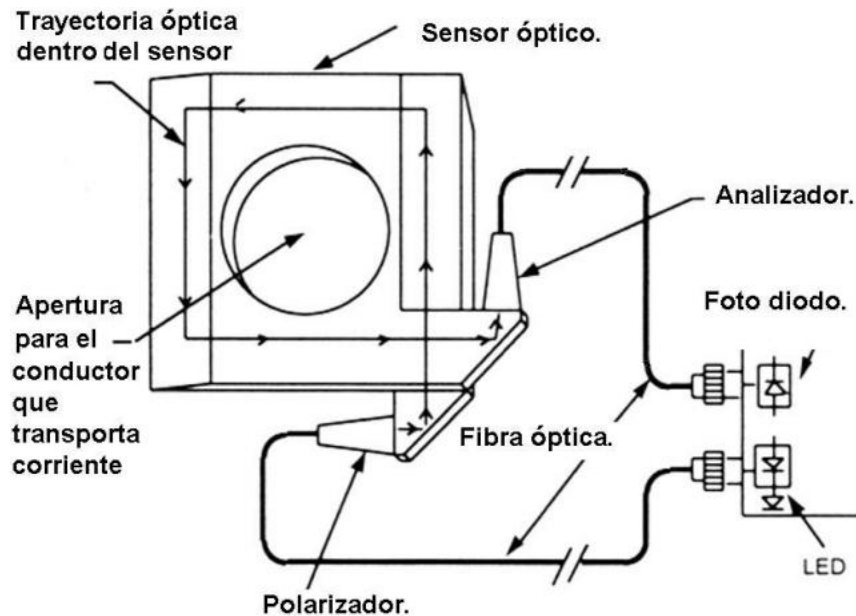


Figura 14. Transformador de Corriente óptico.

## TÉCNICAS E INSTRUMENTOS:

### Matlab

Es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Está disponible para las plataformas Unix, Windows, Mac OS X y GNU/Linux.

Entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware. El paquete MATLAB dispone de dos herramientas adicionales que expanden sus prestaciones, a saber, Simulink (plataforma de simulación multidominio) y GUIDE (editor de interfaces de usuario - GUI). Además, se pueden ampliar las capacidades de MATLAB con las cajas de herramientas (toolboxes); y las de Simulink con los paquetes de bloques (blocksets).

## **Simulink**

Es un entorno de programación visual, que funciona sobre el entorno de programación Matlab.

Es un entorno de programación de más alto nivel de abstracción que el lenguaje interpretado Matlab (archivos con extensión .m). Simulink genera archivos con extensión .mdl (de "model").

En las imágenes, se puede apreciar el diagrama en bloques de un Radar, en el cual se muestra que uno de sus bloques de procesamiento de señal, es un filtro Kalman realizado en un script de Matlab. Luego, se puede apreciar un sistema de control automático, junto a su modelización y finalmente un sistema de un automóvil, vinculando la simulación a un entorno de realidad virtual.

Simulink viene a ser una herramienta de simulación de modelos o sistemas, con cierto grado de abstracción de los fenómenos físicos involucrados en los mismos. Se hace hincapié en el análisis de sucesos, a través de la concepción de sistemas (cajas negras que realizan alguna operación).

Es ampliamente usado en Ingeniería Electrónica en temas relacionados con el procesamiento digital de señales (DSP), involucrando temas específicos de ingeniería biomédica, telecomunicaciones, entre otros. También es muy utilizado en Ingeniería de Control y Robótica.

Este simulador MATLAB va a ser el elemento principal en el cual en el proyecto va a ser realizado la simulación propuesta y específicamente en la herramienta SIMULINK. En esta simulación se va a plasmar el modelo matemático del transformador óptico de corriente y se podrá apreciar la relación entre corriente en el conductor y el ángulo de desfase de las señales ópticas en la fibra.

## **9. PREGUNTAS CIENTÍFICAS O HIPÓTESIS:**

Cuál es el comportamiento de los transformadores ópticos de corriente frente a diferentes corrientes en el sistema eléctrico de potencia.

## **10. METODOLOGÍAS Y DISEÑO EXPERIMENTAL:**

### **10.1. Metodología de la Investigación:**

#### **Investigación aplicada:**

Se indagará toda la información que sea necesaria con el objetivo de desglosar de manera más detallada lo que comprende a un transformador óptico de corriente explicando así las ventajas que se tienen frente a los transformadores convencionales.

#### **Investigación Explicativa:**

Con este tipo de investigación se detallan los diferentes efectos físicos que se producen en los transformadores ópticos de corriente, y como se relacionan para el funcionamiento del mismo.

#### **Investigación Cuantitativa**

Esta investigación será utilizada en la toma de datos tras la simulación y la aplicación de las formulas detalladas previamente.

### **Métodos de Investigación:**

#### **Método Lógico Inductivo**

Nos basaremos en trabajos previamente realizados sobre el tema planteado para partir con bases sólidas hacían nuestra investigación.

## **11. PRESUPUESTO PARA LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO:**

<b>Actividad</b>	<b>Presupuesto (\$)</b>
Asesoramiento en Matlab	80
Adquisición de Toolbox Optic Fiber	40
Transporte	50
Total	170

## PRINCIPIOS MATEMÁTICOS DEL TRANSFORMADOR ÓPTICO DE CORRIENTE

### Transformadores ópticos que utilizan el efecto Faraday.

El efecto Faraday consiste en la rotación del plano de polarización de la luz por la acción de un campo magnético. El ángulo de rotación dependerá de la intensidad del campo magnético y de la longitud que recorra la luz polarizada:

$$\varnothing F = V \int H \cdot dl$$

Fórmula 9. Fórmula para el cálculo del ángulo de rotación.

Siendo:

$\varnothing F$  = ángulo de rotación.

$V$  = constante de Verdet característica propia del material óptico y dependiente de la temperatura y de la frecuencia de la señal luminosa.

$H$  = intensidad del campo magnético.

$l$  = longitud recorrida por la señal luminosa bajo la acción de la inducción magnética.

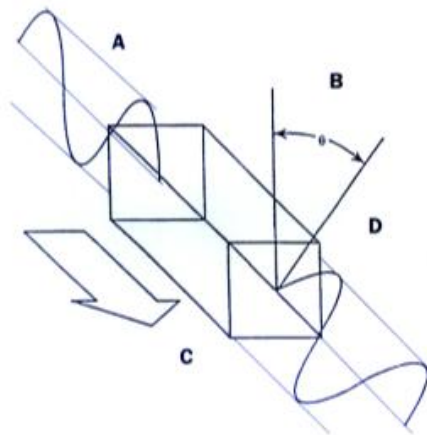


Figura 15. Incidencia de la Luz

Donde:

A: Luz polarizada incidente.

B: Rotación del plano del polarización.

C: Cristal óptico.

D: Luz polarizada transmitida.

El esquema de un captador óptico por efecto Faraday es el de la siguiente figura

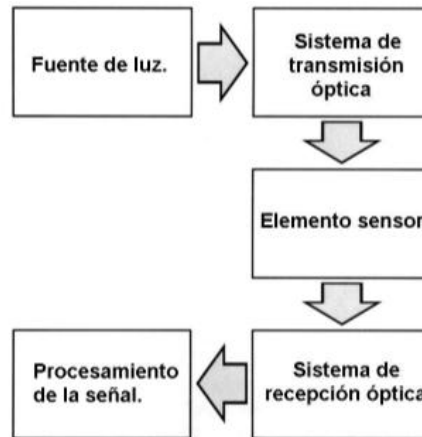


Figura 16. Proceso de funcionamiento.

Si el elemento sensor se corresponde con un cristal óptico de constante de Verdet elevada (vidrio FLINT, etc.) el captador se denomina extrínseco. En el caso de utilizar fibra óptica como elemento sensor, el captador recibe el nombre de intrínseco. Uno de los aspectos más críticos de los sistemas de medida basados en el efecto Faraday es el control preciso de los ángulos de polarización de la luz incidente y la transmitida. Otro es la influencia en el estado de polarización de la luz de factores como la temperatura, reflexiones en las caras del cristal, influencia de las otras fases, y en el caso de la fibra óptica, de imperfecciones en la sección.

### **Transformadores que utilizan el efecto Pockels.**

El efecto Pockels consiste en la rotación del plano de polarización de la luz por la acción de un campo eléctrico. El ángulo de rotación viene representado por la siguiente expresión:

$$\phi = \left(\frac{2\pi}{\lambda_0}\right)n_0^3(k * v)$$

Fórmula 10. Ángulo de rotación.

Donde:

$\lambda_0$ : longitud de onda de la señal luminosa en el vacío.

$n_0$ : índice de refracción normal de la luz.

K: constante electroóptica de proporcionalidad.

v: tensión eléctrica.

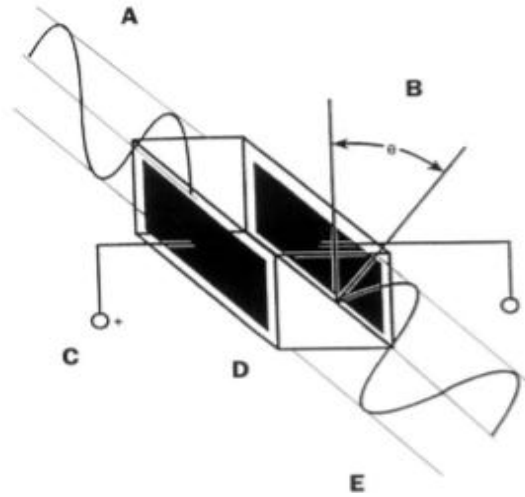


Figura 17. Rotación de plano de polarización.

En la figura tenemos:

A: Luz polarizada incidente.

B: Rotación del plano del polarización.

C: Tensión de control.

D: Cristal óptico.

E: Luz polarizada transmitida.

El efecto Pockels se produce solamente en cristales desprovistos de centros de simetría tales como los óxidos de bismuto (Bi), de silicio (Si), de litio (Li), de tantalio (Ta),... Además de la rareza de los materiales empleados, estos captadores presentan piezo electricidad e influencia de la temperatura que pueden distorsionar la medida.

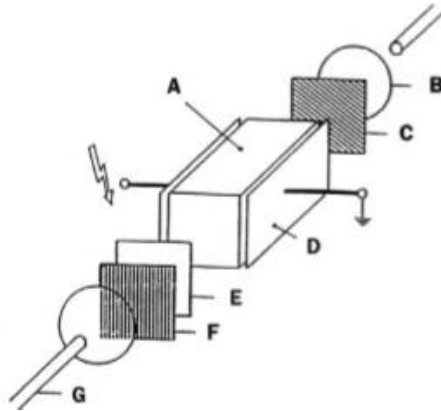


Figura 18. Estructura de un captador Óptico.

La estructura de un captador por efecto Pockels es la siguiente:

A: Cristal óptico.

B: Lentes.

C: Polarizador.

D: Electrodo.

E: Retardador de  $\frac{1}{4}$  de longitud de onda.

F: Analizador.

G: Transmisión óptica.

### Intensidad de Campo Magnético H

Los campos magnéticos generados por las corrientes y que se calculan por la ley de Ampere o la ley de Biot-Savart, se caracterizan por el campo magnético B medido en Teslas. Pero cuando los campos generados pasan a través de materiales magnéticos que por sí mismo contribuyen con sus campos magnéticos internos, surgen ambigüedades sobre que parte del campo proviene de las corrientes externas, y que parte la proporciona el material en sí. Como práctica común se ha definido otra cantidad de campo magnético, llamada usualmente "intensidad de campo magnético", designada por la letra H. Se define por la relación:

$$H = \frac{B}{\mu_m} = \frac{B}{\mu_0} - M$$

Fórmula 11. Intensidad de Campo magnético.

y tiene un valor que designa de forma inequívoca, la influencia que ejerce la corriente externa en la creación del campo magnético del material, independientemente de la respuesta magnética del material. La relación de B se puede escribir de forma equivalente, así:

$$B = \mu_0(H + M)$$

Fórmula 12. Densidad de flujo magnético.

H y M tendrán las mismas unidades, amperios/metro. Para distinguir aún más B de H, a veces se le llama a B densidad de flujo magnético o inducción magnética. A la cantidad M en estas fórmulas, se le llama magnetización del material.

Otro uso común para la relación entre B y H es

$$B = \mu_m H$$

Fórmula 13. Densidad de flujo con relación a la permeabilidad magnética del vacío.

Donde:

$$\mu = \mu_m = K_m \mu_0$$

Fórmula 14. Permeabilidad magnética del vacío.

Siendo  $\mu_0$  la permeabilidad magnética del vacío y  $K_m$  la permeabilidad relativa del material. Si el material no responde al campo magnético externo, no produciendo ninguna magnetización, entonces  $K_m = 1$ . Otra cantidad magnética comúnmente usada es la susceptibilidad magnética, la cual especifica en cuanto difiere de 1, la permeabilidad relativa.

Susceptibilidad magnética 
$$x_m = K_m - 1$$

En los materiales paramagnéticos y diamagnéticos, la permeabilidad relativa está muy próxima a 1, y consiguientemente la susceptibilidad magnética muy próxima a 0. En los materiales ferromagnéticos, estas cantidades pueden ser muy grandes.

La unidad para la intensidad del campo magnético H, se puede obtener de su relación con el campo magnético B,  $B = \mu H$ . Como la unidad de permeabilidad magnética  $\mu$  es N/A<sup>2</sup>, entonces la unidad para la intensidad del campo magnético es:

$$\frac{T}{\frac{N}{A^2}} = \frac{N}{\frac{Am}{\frac{N}{A^2}}} = \frac{A}{m}$$

Fórmula 15. Unidad para la intensidad de campo magnético.

El Oersted es una unidad más antigua de intensidad de campo magnético:  $1 \text{ A/m} = 0.01257$  Oersted.

### Constante de Verdet

La constante Verdet mide la fuerza del efecto Faraday para un material particular. Su valor depende no solo el material sino de la longitud de la onda electromagnética. Un efecto de interés es que la rotación no depende de la dirección de propagación de tal forma que el efecto puede ser duplicado, retornando el rayo por el material utilizado.

Sustancia	Longitud de onda ( $\square$ )	V(min.de arco gauss-1 cm-1)	V(arcmin /T cm)	V(rad /T m)
Agua	589,3		1,31E+02	3,8113795
CS2	589,3		4,17E+02	12,1324065
Lámina de vidrio Flint	589,3		3,17E+02	9,2229565
Vidrio Crown	632,8		7,27E+02	21,1517015
Cuarzo	632,8		4,83E+02	14,0526435
Fósforo	589,3		1,23E+03	35,786235
Cuarzo	698			4
Sulfuro de Zinc	698			82
Vidrio Grown	698			6.4
Vidrio Flint	698			23
Cloruro de Sodio	698			9.6
Vidrio Flint ligero	698	0,0317		9,222958465
Vidrio Flint extra denso	698	0,0442		12,85977174
Vidrio Flint pesado	698	0,0608		17,68945977
Vidrio Flint muy pesado	698	0,0888		25,83592151
Aire(760)	698	6,25E-06		0,001818407

Tabla 1. Constante de Verdet para algunos materiales. [Autores]

Este efecto es particularmente útil para hacer sensores de alto voltaje y corriente. Aquí la fibra presenta la característica de que no es conductora, lo que hace tan atractiva para estas aplicaciones.

### Transformadores ópticos que utilizan el efecto Faraday.

El efecto Faraday consiste en la rotación del plano de polarización de la luz por la acción de un campo magnético. El ángulo de rotación dependerá de la intensidad del campo magnético y de la longitud que recorra la luz polarizada:

$$\theta F = V \int H \cdot dl$$

Fórmula 16. Constante de Verdet.

El efecto Faraday fue el primer efecto magneto-óptico que se propuso y demostró en los sensores de corriente de fibra. La figura muestra una configuración esquemática de la rotación de Faraday. Cuando un haz de luz pasa a través de un medio de vidrio en un campo magnético, su vector de polarización gira en proporción al campo. La constante de Verdet  $V$  relaciona la integral de línea del campo magnético  $\mathbf{B}$  con la rotación del plano de polarización de una polarización lineal.

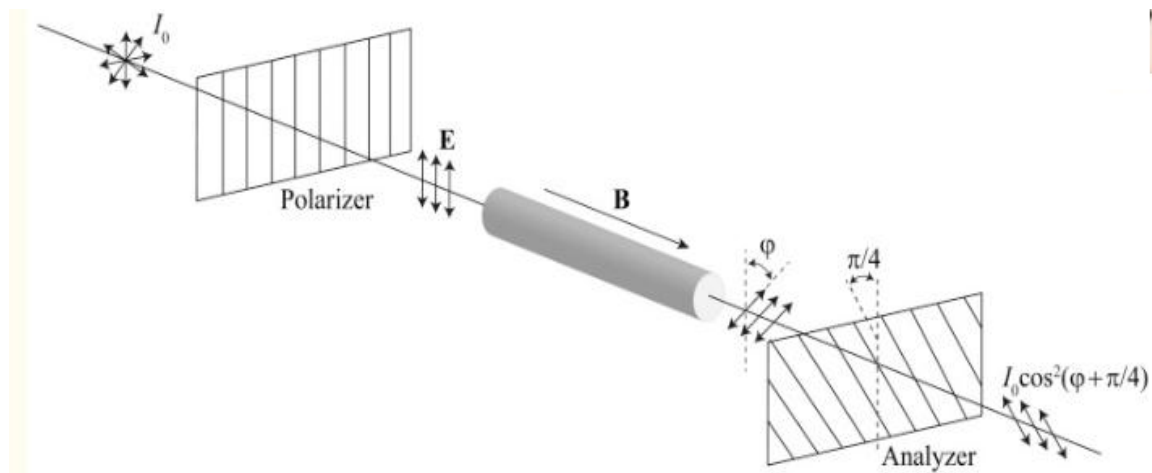


Figura 19. Rotación de Faraday.

Como  $\mathbf{B}$  es proporcional a la corriente,  $\varphi$  también es directamente proporcional a la corriente. La ecuación indica que la rotación de Faraday  $\varphi$ , y por lo tanto, la sensibilidad del cristal, aumenta con la constante  $V$  de Verdet y también muestra que cuanto más larga es la trayectoria óptica (longitud de la barra de cristal  $d$ ), mayor es la rotación de Faraday. Estos

parámetros son importantes y nos dan dos grados de libertad para optimizar la cabeza óptica del sensor. [11]

La constante de Verdet tiene valores positivos para materiales diamagnéticos, como el vidrio SF2 utilizado en nuestro diseño, y valores negativos para materiales paramagnéticos [11]. La figura muestra la geometría de nuestro enfoque específico, con la varilla de vidrio colocada perpendicular al cable de metal. El campo magnético  $\mathbf{B}$  producido por la corriente de un alambre metálico es:

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi R}$$

Fórmula 17. Campo magnético.

Donde  $R$  es la distancia desde el eje del cable,  $i$  es la corriente eléctrica y  $\mu_0$  la permeabilidad del espacio libre [11]. Si la longitud de la varilla de vidrio SF2  $d$  es lo suficientemente pequeña, el campo magnético puede considerarse constante dentro del material de vidrio y la Ecuación dice:

$$\varphi \approx V B d = \frac{\mu_0 V i d}{2\pi R}$$

Fórmula 18. Ecuación básica que rige el diseño de una cabeza óptica.

La fórmula de irradiancia de salida es:

$$I = I_0 \cos^2 \left( \frac{\pi}{4} + \varphi \right)$$

Fórmula 19. Irradiancia de Salida.

Donde  $\varphi$  viene dado por la ecuación:

$$I = I_0 \cos^2 \left( \frac{\pi}{4} + V i d \frac{\mu_0 i}{2\pi R} \right) = I_0 \cos^2 \left( \frac{\pi}{4} + 2 * 10^{-7} \frac{V i d}{R} \right)$$

Fórmula 20. Irradiancia en función de  $\varphi$ .

## Polarización y Ley de Malus

### Polarización:

Las ondas electromagnéticas son ondas transversales. En toda onda transversal, la vibración es perpendicular a la dirección de propagación de la onda. Por tanto en una onda electromagnética plana que se propague en la dirección del eje  $x$ , el campo eléctrico  $\mathbf{E}$ , es perpendicular a esta dirección al igual que el campo magnético  $\mathbf{B}$  que, además, también es perpendicular a  $\mathbf{E}$ .

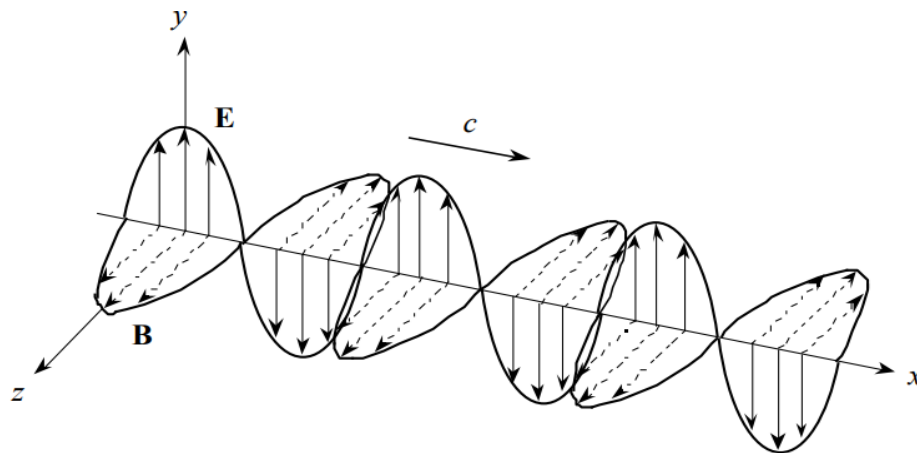


Figura 20. Representación de la luz propagándose.

Se puede obtener luz polarizada a partir de una luz no polarizada debido a alguno de estos cuatro fenómenos: absorción, dispersión, reflexión o birrefringencia. En este contexto nos interesa aclarar el fundamento de dos de ellos.

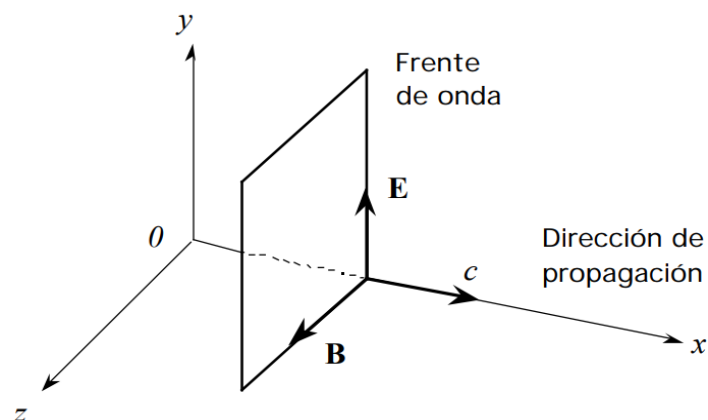


Figura 21. Dirección de propagación de la onda.

El estudio acerca del comportamiento y la naturaleza de la luz incluye nombres de grandes maestros a través de la historia, además de ser un tema bastante amplio. Una de las propiedades físicas de la luz es que puede ser polarizada. Siendo la luz un tipo de radiación electromagnética, posee tanto campo eléctrico como campo magnético; es precisamente su campo eléctrico el que produce el fenómeno de la polarización.

Se sabe que los campos eléctrico y magnético guardan una cierta relación entre sí, por lo que una vez conocido el campo eléctrico, entonces se puede determinar el campo magnético (transversal al campo eléctrico):

$$\vec{B}(z, t) = \hat{e}_z * [E_+(z, t) - E_-(z, t)]$$

Fórmula 21. Campo magnético transversal al campo eléctrico.

El campo eléctrico de la luz puede ser descrito mediante un vector, el cual se encuentra en un plano perpendicular a la dirección de propagación de la misma, oscilando a medida que la luz avanza en el medio o en el vacío. Es debido a esto que a la luz se le considera una *onda electromagnética transversal* (conviene recordar que una onda transversal es aquella donde la perturbación o vibración ocurre en los planos perpendiculares a la dirección del movimiento).

[12]

### **Polarización por reflexión:**

La luz reflejada en una superficie plana que separa dos medios transparentes está parcialmente polarizada, y el grado de polarización depende del ángulo de incidencia y de los índices de refracción de ambos medios. Como se indica en la figura 3, la luz reflejada está completamente polarizada cuando el ángulo de incidencia ( $\theta_P$ ) es tal que los rayos reflejado y refractado son perpendiculares entre sí. La luz reflejada con ángulo  $\theta_P$ , denominado ángulo de polarización o ángulo de Brewster, está totalmente polarizada en un plano perpendicular al plano de incidencia.

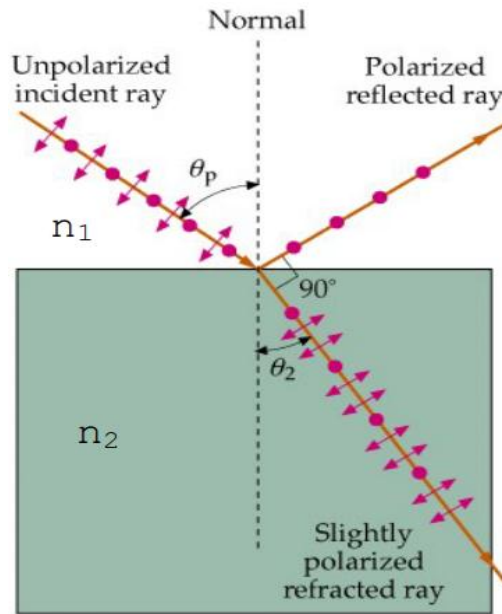


Figura 22. Polarización por refracción.

En la figura 8 el plano de incidencia es el del dibujo, y la dirección de polarización del rayo reflejado es perpendicular al plano del dibujo. La luz reflejada está totalmente polarizada.

### **Polarización lineal:**

Cuando se habla de polarización lineal se dice que la magnitud y dirección del vector “Campo eléctrico” en un punto a lo largo de la trayectoria de la onda es una función del tiempo y espacio.

Se dice que la luz es linealmente polarizada (o polarizada plana), cuando la componente (x) y la componente (y) del vector del campo eléctrico se encuentran en *fase*, conservando constante su dirección y cambiando únicamente (de forma senoidal con el tiempo y el espacio) su magnitud y sentido.

Se puede suponer que dos ondas de luz *linealmente polarizadas* de la misma frecuencia, moviéndose a través de la misma región del espacio, en la misma dirección, siendo sus vectores campo eléctrico colineales. Las perturbaciones superpuestas se combinarán simplemente para formar una onda resultante *linealmente polarizada*. Si pudiéramos observar las oscilaciones del campo eléctrico en un haz de luz linealmente polarizada, viniendo de frente (saliendo de la pantalla), entonces el movimiento descrito sería lineal, o una recta. [12]

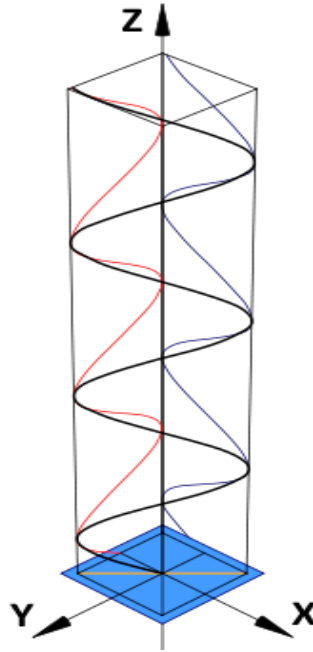


Figura 23. Polarización lineal.

Tomando el plano **XZ** como referencia, podemos considerar a las vibraciones del campo eléctrico (**E**) en ese plano como una onda armónica simple, la cual se propaga a lo largo del eje-**Z**. Así, por considerarse a la luz una onda electromagnética, el campo eléctrico oscila en el eje-**X** perpendicularmente a **Z**, a determinada frecuencia. [12]

Análogamente, tomando el plano **YZ** como referencia, se consideran de igual forma las vibraciones del campo eléctrico en ese plano como una onda armónica simple, que también se propaga a lo largo de **Z**, y cuyas oscilaciones se dan en el eje- **Y** perpendicularmente a **Z**. [12]

La onda en **XZ** y la onda en **YZ** pueden ser descritas matemáticamente, por las siguientes ecuaciones:

$$\vec{E}_x(z, t) = \hat{e}_x E_{0x} \cos(kz - wt)$$

Fórmula 22. Fórmula para la obtención de la onda XZ.

$$\vec{E}_y(z, t) = \hat{e}_y E_{0y} \cos(kz - wt + \epsilon)$$

Fórmula 23. Fórmula para la obtención de la onda YZ.

En estas expresiones,  $\epsilon$  es la diferencia de fase entre las ondas, las cuáles viajan en dirección de  $\mathbf{Z}$ . La amplitud de estas ondas puede ser diferente, y esta diferencia únicamente determina la dirección de la línea recta (o qué tanto se inclina en el plano  $\mathbf{XY}$ ) que traza el vector del campo eléctrico mientras se propaga.

Hablando del campo eléctrico como una perturbación óptica, la suma vectorial de sus componentes produce un  $\vec{E}$  resultante: [12]

$$\vec{E}(z, t) = \vec{E}_x(z, t) + \vec{E}_y(z, t)$$

Fórmula 24. Campo eléctrico.

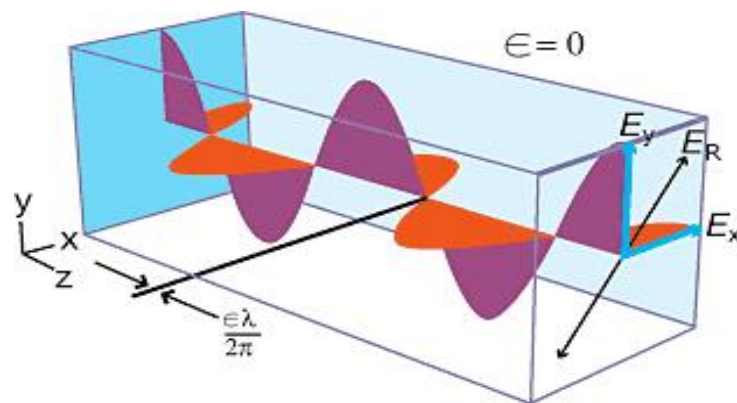


Figura 24. Representación de la luz polarizada.

En la Figura 24 se puede apreciar la representación de la luz (linealmente polarizada), propagándose a lo largo del eje-z, como la suma ( $E_r$ ) de dos ondas co-propagantes y ortogonales entre sí: una donde el campo eléctrico oscila a lo largo del eje-x ( $E_x$ ), y la otra a lo largo del eje-y ( $E_y$ ). La fase (o retraso) entre las dos ondas es  $\epsilon=0$ , por lo que el desplazamiento espacial entre ambas ( $\epsilon\lambda/2\pi$ ) es también cero.

Una onda electromagnéticamente plana se dice que esta linealmente polarizada. El campo eléctrico transversal de la onda va acompañado de un campo magnético como el que se ilustra.

La orientación de una onda electromagnética polarizada linealmente se define por la dirección del campo eléctrico vectorial. Por ejemplo, si el vector de campo eléctrico es vertical (alternativamente, hacia arriba y hacia abajo conforme viaja la onda) la radiación se dice que está polarizada verticalmente. [13]

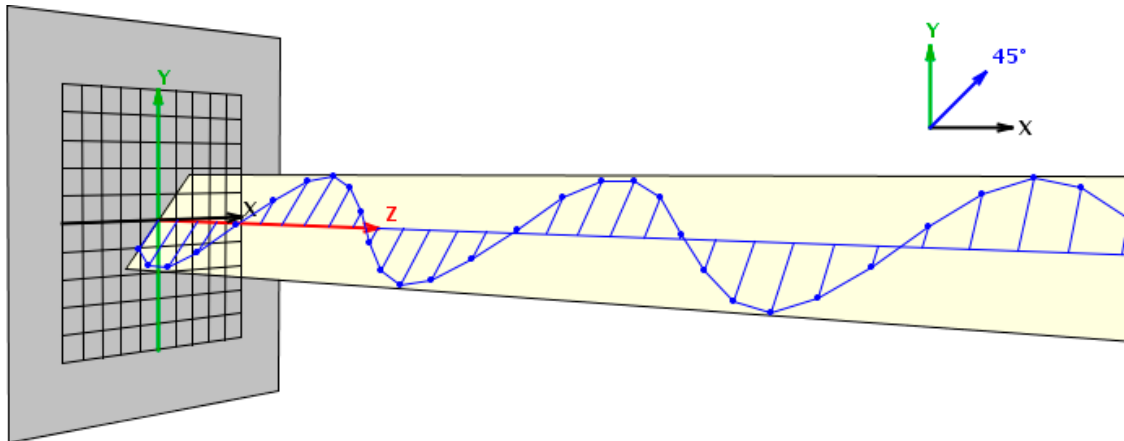


Figura 25. Inclinación de la onda a 45°.

La Figura 25. Representa una Polarización lineal en donde la onda viaja a través del eje Z mientras el campo eléctrico oscila linealmente con una inclinación de 45°.

### **Polarización circular**

Luz polarizada circularmente consta de dos ondas electromagnéticas planas perpendiculares con una diferencia de fase de 90°. La luz que se muestra a continuación, está polarizada circularmente. [13]

Si la luz está compuesta de dos ondas planas de igual amplitud pero con una diferencia de fase de 90°, entonces se dice que la luz está polarizada circularmente. Si se pudiera ver la punta del vector del campo eléctrico, aparecería moviéndose en un círculo a medida que se acerca. Si mientras se mira la fuente de luz, el vector del campo eléctrico de la luz, viniendo hacia adelante aparece girando en sentido anti horario, se dice que la luz está polarizada circularmente hacia la derecha. Si fuera en sentido horario, se diría que está polarizada circularmente hacia la izquierda. El vector del campo eléctrico dibuja una vuelta completa, cuando la luz avanza una longitud de onda completa. Otra forma de decirlo es que si el dedo pulgar de la mano derecha apuntara en la dirección de propagación de la luz, el vector del campo eléctrico estaría girando en la dirección marcada por los demás dedos. [13]

La luz polarizada circularmente se puede producir haciendo pasar la luz polarizada linealmente a través de una placa de un cuarto de onda con un ángulo incidente de  $45^\circ$  respecto del eje óptico de la placa.

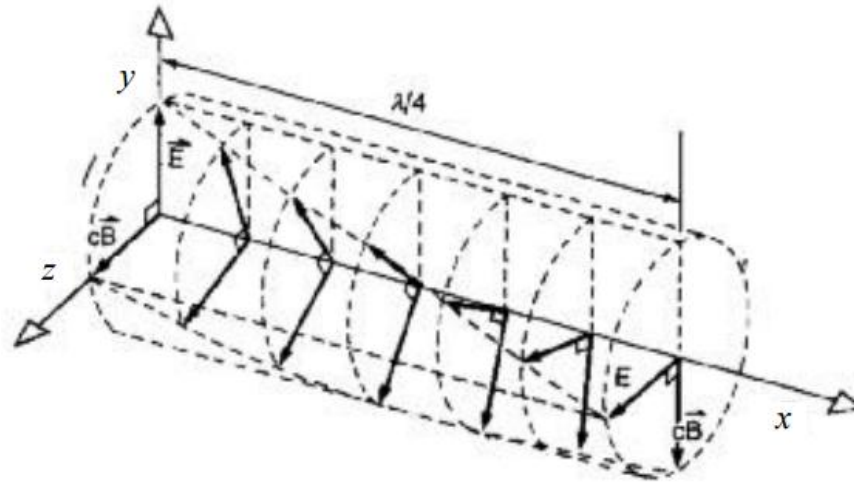


Figura 26. Polarización Circular (a).

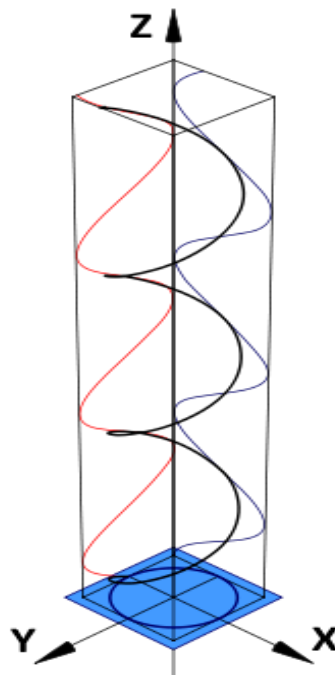


Figura 27. Polarización Circular (b).

En el caso de considerar ondas electromagnéticas correspondientes a la zona visible, se tiene que la luz que emite una fuente ordinaria no está polarizada. Este es el caso del filamento de una bombilla, en el que los átomos y moléculas actúan independientemente, emitiendo trenes

de ondas de luz cuyas polarizaciones no están relacionadas, de modo que la luz resultante consiste en una mezcla de polarizaciones al azar y la luz es no polarizada, recibiendo el nombre de luz natural. [13]

### **Polarización elíptica**

La polarización elíptica se presenta cuando las componentes  $E_x$  y  $E_y$  se encuentran desfasadas un valor  $\delta$  arbitrario, y a su vez presentan una amplitud arbitraria.

La luz polarizada elípticamente consiste de dos ondas perpendiculares de amplitudes desiguales y con una diferencia de fase de  $90^\circ$ . La ilustración muestra una luz polarizada elípticamente a la derecha. [13]

Si podemos considerar "arbitrario" como *cualquier* valor, entonces se pueden presentar los casos donde  $\delta = n\pi$  (o múltiplos enteros de éste), así como cuando la amplitud de las componentes sea la misma, que es cuando se manifiesta la polarización lineal y polarización circular. Es por esto que a la polarización lineal y polarización circular se les considera casos especiales de *polarización elíptica*, a pesar de que éstos no manifiesten estrictamente un movimiento elíptico.

En este caso, si pudiéramos observar las oscilaciones del campo eléctrico en un haz de luz elípticamente polarizada, viniendo de frente (saliendo de la pantalla), entonces el movimiento descrito sería, en la mayoría de los casos, elíptico.

Si el dedo pulgar de la mano derecha estuviera apuntando en la dirección de propagación de la luz, el vector del campo eléctrico, estaría girando en la dirección que señala el resto de los dedos.

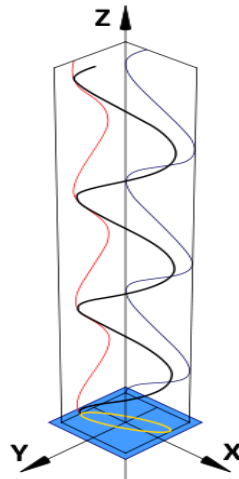


Figura 28. Polarización elíptica.

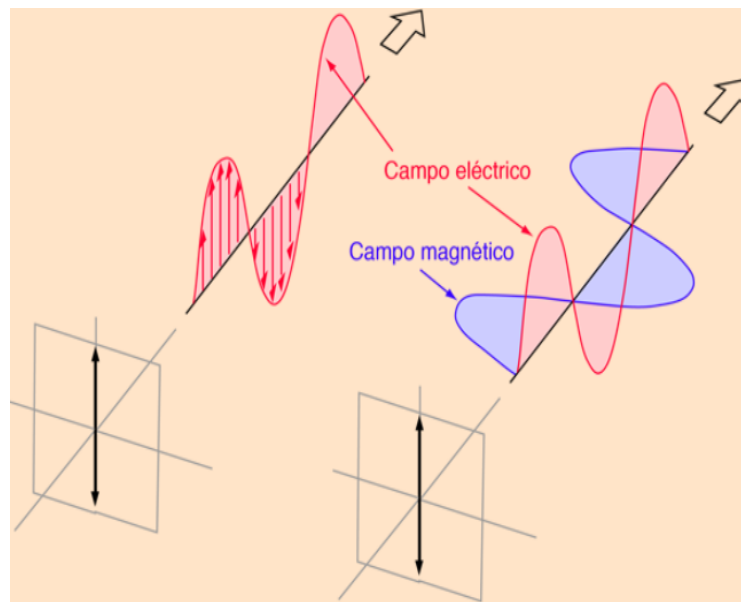


Figura 29. Comparación entre la polarización circular y elíptica.

### Métodos para polarizar la luz:

El uso de la luz polarizada en sus diversas formas es frecuente en distintos sistemas ópticos, pero las fuentes naturales de luz no producen luz polarizada pura, por lo que es necesario recurrir a ciertos métodos y dispositivos para obtener luz polarizada a partir de luz natural. Lo más cómodo es obtener luz linealmente polarizada, pues a partir de ella se puede obtener fácilmente luz polarizada circularmente y elípticamente de determinada especificación. Entre los fenómenos más utilizados para producir luz linealmente polarizada figuran la absorción selectiva y la reflexión y refracción en medios isotrópicos y anisotrópicos.

### LEY DE MALUS

Un polarizador lineal está formado por un material que únicamente permite el paso de luz cuyo campo eléctrico vibre paralelamente a una dirección determinada, conocida como eje de transmisión del polarizador. La ley de Malus expresa cuantitativamente la relación entre la intensidad  $I_0$  de la luz incidente, el ángulo  $\theta$  que su plano de vibración forma con el eje de transmisión y la intensidad  $I$  de la luz transmitida.

Para comprobar experimentalmente si un dispositivo óptico polariza linealmente la luz incidente, se introduce un segundo polarizador lineal (que se denomina analizador) y se mide la intensidad  $I$  de la luz emergente de este segundo elemento dicróico, la cual deberá ser menor y adicionalmente deberá variar al rotar éste, Figura 15 (a). En la ecuación se describe matemáticamente la relación entre la intensidad  $I_0$  de la luz natural (que es luz no polarizada: contiene equiprobablemente todos los estados de polarización) que incide en el primer polarizador y la irradiancia de la luz linealmente polarizada que emerge de los dos polarizadores, cuyos ejes de transmisión forman un ángulo  $\phi$ . [14]

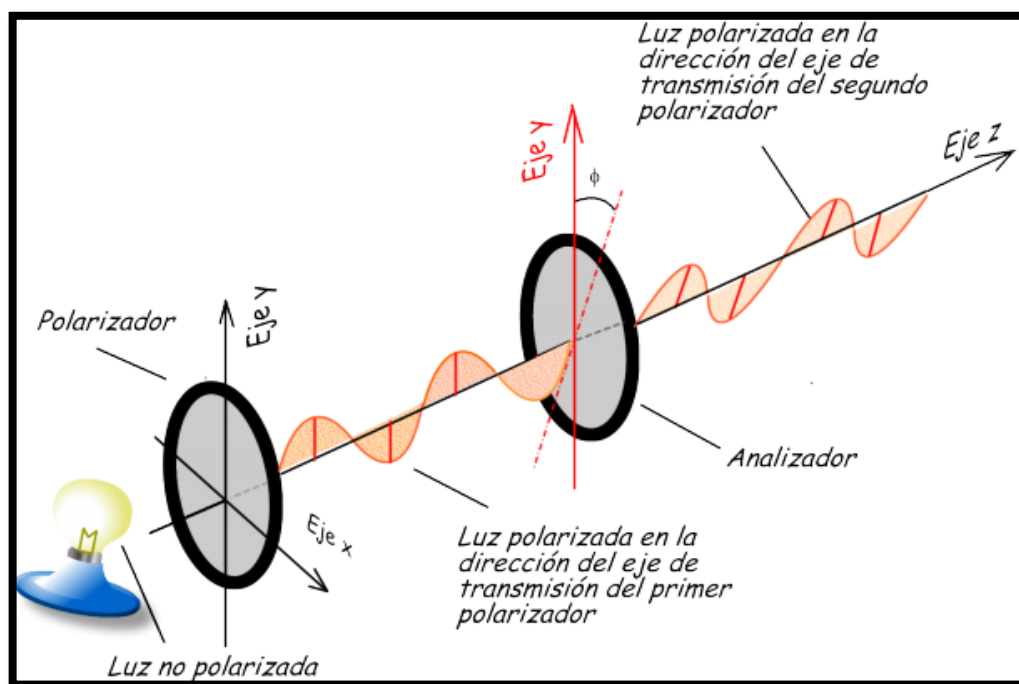


Figura 30. Polarizadores Cruzados (a).

Como la intensidad  $I$  de la onda es proporcional a la amplitud  $E$ , tenemos que:

$$I_0 \mu E_0^2$$

$$I_0 \mu E_0^2 \cos^2 \theta$$

Fórmula 25. Intensidad de onda.

Como la constante de proporcionalidad es la misma en ambos casos queda:

$$I = I_0 \cos^2 \theta$$

Fórmula 26. Ley de Malus.

Supongamos que la luz polarizada previamente por un polarizador pasa a través de un segundo polarizador, como se ve en la figura.

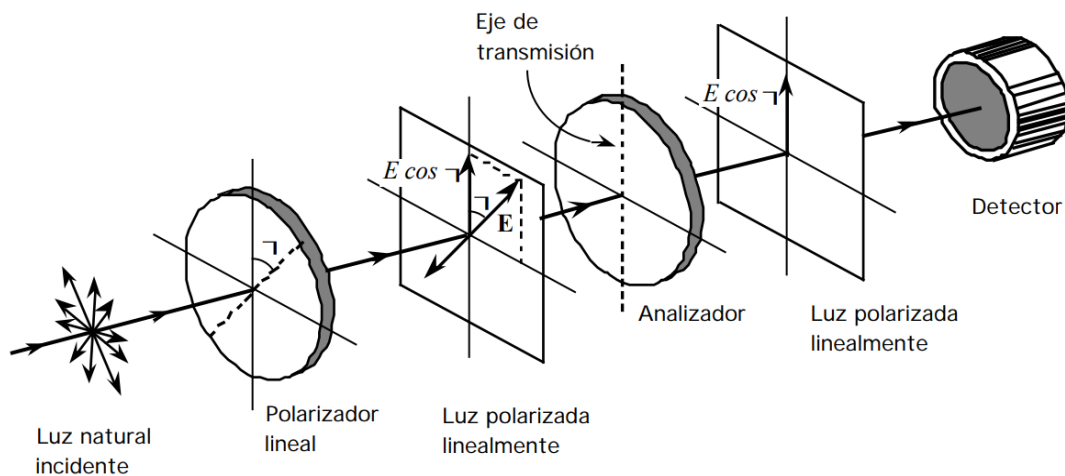


Figura 31. Polarizadores Cruzados (b).

Por eso, si sobre un polarizador lineal se hace incidir luz linealmente polarizada, la intensidad de la radiación que lo atraviesa irá disminuyendo progresivamente a medida que el ángulo  $\theta$  vaya aumentando. Obsérvese que la ecuación predice la extinción de la luz que atraviesa el polarizador cuando  $\theta = 90^\circ$ . [13]

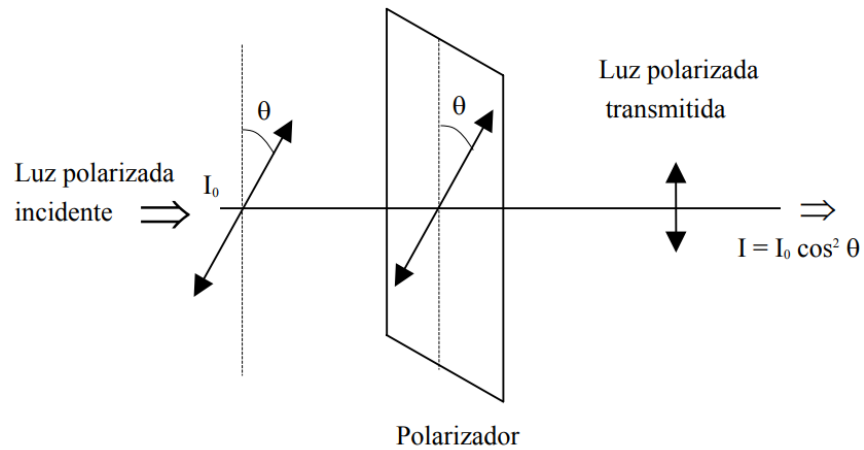


Figura 32. Transmisión de la luz a través de un polarizador.

La ley de Malus concerniente a la luz polarizada dice “La intensidad  $I$  de un haz luminoso que ha atravesado sucesivamente un polarizador y un analizador, varía con el cuadrado del coseno del ángulo  $\alpha$  formado por los planos de sección principal de ambos aparatos  $I = I_m \cos^2 \alpha$ . Se ve que la intensidad  $I$  alcanza su valor máximo cada vez que el ángulo alcanza uno de los valores  $0, 2\pi$ , etc. Se dice entonces, convencionalmente, que polarizador y analizador son paralelos. Se anula por el contrario para  $\alpha = \pi/2, 3\pi/2$ , etc. Se dice, en ese caso, que polarizador y analizador están cruzados. [15]

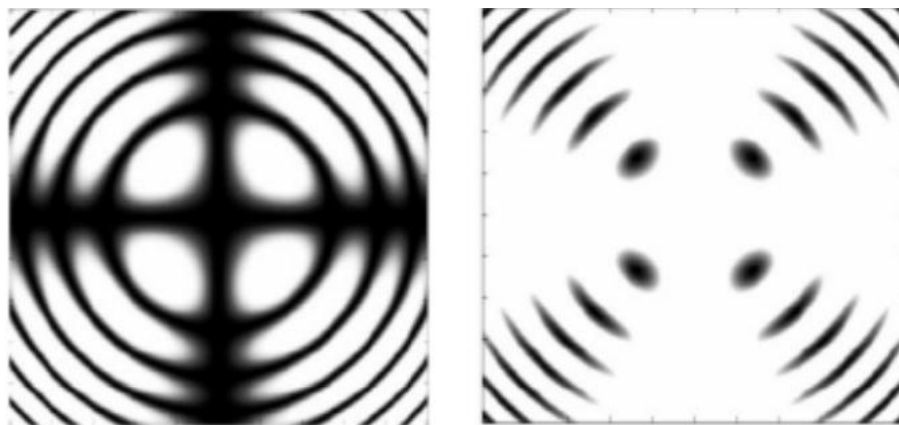


Figura 33. Patrón de distribución de intensidad de la luz.

En la Figura 33. Se puede apreciar un patrón de distribución de intensidad de luz de la interferencia conóscopica: (a) La dirección de la polarización de la luz incidente y la dirección de transmisión del analizador son perpendiculares (el ángulo de rotación de Faraday es de  $90^\circ$ ); (b) La dirección de la luz incidente.

La polarización y la dirección de transmisión de la dirección del analizador son paralelas (el ángulo de rotación de Faraday es  $0^\circ$ ).

Cuando la dirección de transmisión del polarizador es perpendicular a la del analizador, observaremos la cruz oscura (se denomina isogiro) como la Figura 17 (a). A la inversa, observaremos la cruz brillante como en la Figura 17 (b). Este fenómeno puede explicarse por (6). Cuando  $2\theta = \pi/2$  (la dirección de transmisión del polarizador es perpendicular a la del analizador), la intensidad de la luz será cero en la ubicación de  $1\theta = 0$  o  $\pi/2$ , se observará la cruz oscura. Cuando  $2\theta = 0$  (la dirección de transmisión del polarizador es paralela a la del analizador), la intensidad de la luz se vuelve más intensa en la ubicación de  $1\theta = 0$  o  $\pi/2$ , se observará la cruz brillante. [16]

### **Faraday y la teoría electromagnética de la luz**

Uno de los fenómenos descubiertos por Faraday, quizás menos conocido, es el de la influencia de un campo magnético sobre un haz de luz polarizada, fenómeno conocido como efecto Faraday o efecto magneto-óptico. La mente investigadora de Faraday no se conformaba con revelar la relación entre electricidad y magnetismo, sino que quería saber también si los imanes afectaban a los fenómenos ópticos. Él creía en la unidad de todas las fuerzas de la naturaleza y en particular entre la luz, la electricidad y el magnetismo. [17]

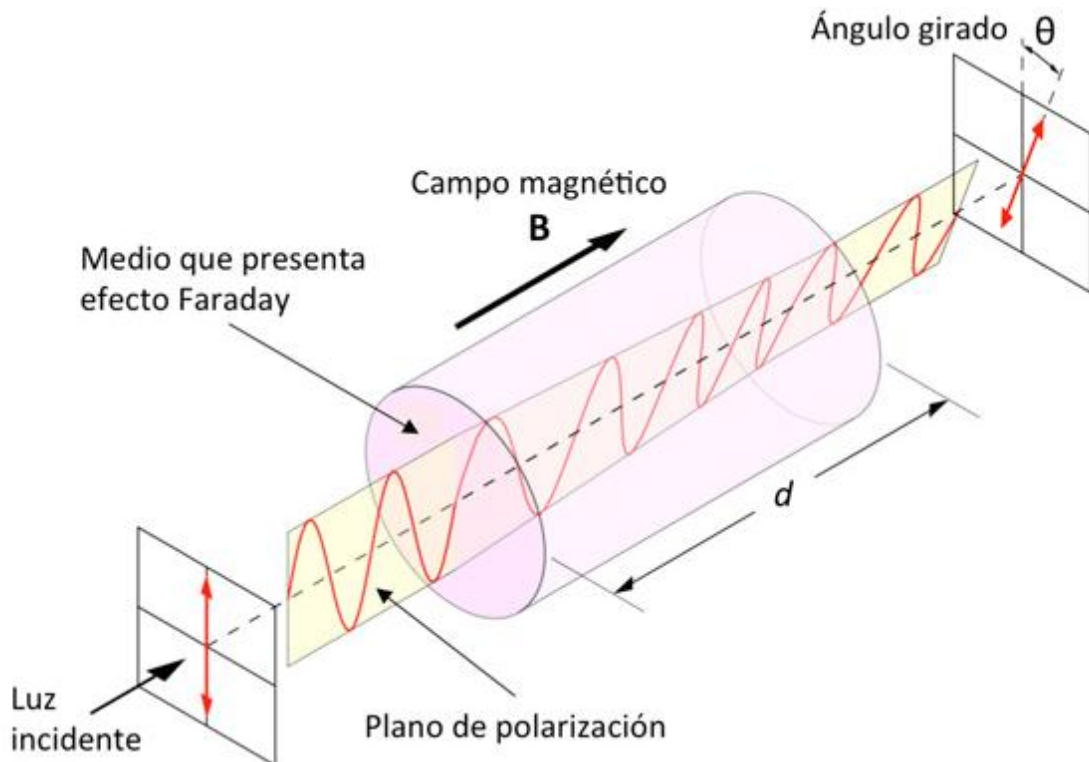


Figura 34. Polarización de la luz.

Sin embargo, esta idea de Faraday fue recibida con gran escepticismo y nadie la aceptó hasta la publicación en 1865 del artículo de Maxwell titulado **A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field** (Una teoría dinámica del campo electromagnético). Este gran artículo de Maxwell no sólo contiene la teoría electromagnética de la luz –uno de los hitos que se conmemoran en este Año Internacional Año de la Luz 2015– sino que Maxwell atribuye a las consideraciones sobre las vibraciones de los rayos de Faraday las ideas que le sirvieron de base para la elaboración de su teoría electromagnética de la luz. [17] En la página 466 de su trabajo de 1865, y con la modestia que siempre caracterizó Maxwell, éste se refiere al artículo de Faraday de 1846 de la siguiente forma:

*“La concepción de la propagación de perturbaciones magnéticas transversales y la exclusión de las normales está claramente establecida por el Profesor Faraday en sus ‘Consideraciones sobre las vibraciones de los rayos’. La teoría electromagnética de la luz, según lo propuesto por él [Faraday], es la mismo en esencia, a la que yo he comenzado a desarrollar en este trabajo, a excepción de que en 1846 no había datos para calcular la velocidad de propagación”. [17]*

## **La Teoría ondulatoria de la luz**

Uno de los primeros en proponer una teoría ondulatoria de la luz fue el físico y matemático holandés Christian Huygens en el siglo XVII. Se basaba en que cada punto de un frente de ondas lumínicas podía considerarse como una nueva fuente. La teoría ondulatoria de la luz sufrió un impulso definitivo a principios del siglo XIX cuando Thomas Young realizó una serie de experimentos que la apoyaban. En uno de ellos, interponía una tarjeta de 0.2 mm a un haz de luz procedente de un pequeño agujero en una habitación oscurecida redirigido mediante un espejo. Ligeramente más ancho que la tarjeta, el haz quedaba dividido en dos antes de proyectarse sobre la pared. En esta proyección se podía observar un patrón de bandas claras y oscuras parecido a otros fenómenos ondulatorios. Young propuso también que los distintos colores correspondían a distintas frecuencias de onda y que la visión se articulaba a través de tres únicos tipos de receptores en la retina para sendos colores primarios. [17]

En las décadas siguientes al experimento de Young, Augustin Fresnel dio rigor matemático a esta teoría considerando que las ondulaciones lumínicas eran transversales y no longitudinales como se había creído hasta entonces. Se basaba en que dos haces de luz polarizada de forma paralela interferían, aunque no así si estaban polarizados con un giro de 90°. Por otro lado, las ondas transversales necesitaban un medio de propagación sólido o al menos dotado de cierta rigidez o elasticidad transversal. Así que, se consideraba para las ondas lumínicas un medio etéreo con tales características. [17]

## **LA LUZ ES UNA ONDA ELECTROMAGNÉTICA**

En el otoño de 1860 Maxwell se disponía a iniciar su nueva etapa como profesor en el *King's College* de Londres. Después de los cuatro años en Aberdeen preparando el curso de filosofía natural, había desarrollado una amplia visión global del estado de la física. Había analizado e incluso ayudado en el desarrollo de las teorías e hipótesis más novedosas de su tiempo situándose en primera línea del conocimiento científico. Cabe destacar que los trabajos realizados sobre Saturno y los gases le permitieron profundizar sus conocimientos de mecánica y elasticidad. Lo cual le resultaría de muchísima utilidad en sus posteriores aproximaciones al fenómeno electromagnético. Con veintinueve años estaba a un paso de realizar su aportación más importante a la historia de la ciencia. [17]

*“Faraday descubrió que cuando un rayo de luz polarizada plana atraviesa un medio diamagnético transparente en la dirección de las líneas de fuerza magnética producidas por imanes o corrientes situados en sus alrededores, se produce un giro en el plano de polarización de la luz”.*

Maxwell cita seis veces y lo menciona tres veces más en su artículo sobre la teoría dinámica del campo electromagnético. Esto no puede ser considerado como algo fuera de lo normal y no es en absoluto extraño. Maxwell admiraba a Faraday y gran parte de su trabajo sobre electromagnetismo está basado en el trabajo previo de Faraday y además fue Maxwell quien modeló matemáticamente los descubrimientos experimentales de Faraday sobre electromagnetismo en la teoría que ha llegado a nuestros días. [17]

## **MODELAMIENTO EN MATLAB**

En esta parte se detalla el modelamiento realizado en el Software Matlab explicando las variables y demás herramientas que se utilizaron, también se aplica la ley del físico Michael Faraday en base a los efectos del campo magnético sobre la luz.

Se demuestra matemáticamente la alteración que tiene una señal de luz polarizada en fibra óptica, dicha alteración es proporcional a la intensidad del componente del campo magnético en la dirección de propagación de la onda luminosa.

El modelamiento planteado está compuesto por tres partes dentro del mismo software que es MATLAB las cuales son:

### Modelamiento

- Los cálculos matemáticos están programados en la herramienta Simulink para poder tener la facilidad de observar de una manera simple el proceso matemático de la modelación.
- Se realiza el modelamiento matemático del ingreso de la señal de luz dentro de la programación de la herramienta Command Window, donde la señal ingresada es polarizada a  $90^\circ$  y realiza la filtración de los ruidos de las ondas de luz. Por otro lado, se realiza una interfaz para el valor de la intensidad de la luz que es la misma de los cálculos matemáticos del Simulink.

- Un programa en modo “fig”, está hecho en la herramienta grafica de Matlab “GUIDE” en donde se ingresaran los datos de las variables y se realiza una interfaz entre el GUIDE y el Simulink para el ingreso de las mismas. Además se realiza la interfaz de salida de las variables resultantes del modelamiento matemático de igual forma la graficación de los mismos en relación con las señales de luz de ingreso y su variación en el tiempo.

### **Primera Parte- Modelamiento en simulink.**

Al inicio se plantea el efecto físico de manera matemática, la alteración de la señal con la intensidad del campo magnético. El modelamiento se realizó en la función SIMULINK ingresando todas las variables que influyen en este modelamiento. Las cuales son:

1. Intensidad del componente del campo magnético.
2. Permeabilidad magnética del vacío.
3. Distancia al hilo conductor (en nuestro caso sería el radio del conductor).
4. Longitud del camino óptico (longitud de conductor de fibra óptica).
5. Constante de Verdet (de aquí nos da la longitud de onda de la señal).
6. Intensidad de luz en la fibra óptica.

El modelamiento matemático se va a desglosar en tres bloques los cuales son:

- Bloque de la intensidad del componente del campo magnético.
- Bloque de cálculo del campo magnético o inducción magnética, relación Rad/Amp y corriente detectada
- Bloque de cálculo de la ley de Malus y la salidas el GUIDE.

### **Intensidad del componente del campo magnético.**

La variable de ingreso como intensidad va dada como una señal de corriente alterna, va representada como una onda sinusoidal con una frecuencia de 60 Hz y el valor de la corriente es variable, podemos ingresar su valor en el modelamiento. En el software se compone de una señal de onda, un controlador de corriente y un circuito en serie RLC, para conocer el valor de la corriente luego del circuito se conectó a un amperímetro y un Scope para poder observar la onda que se genera.

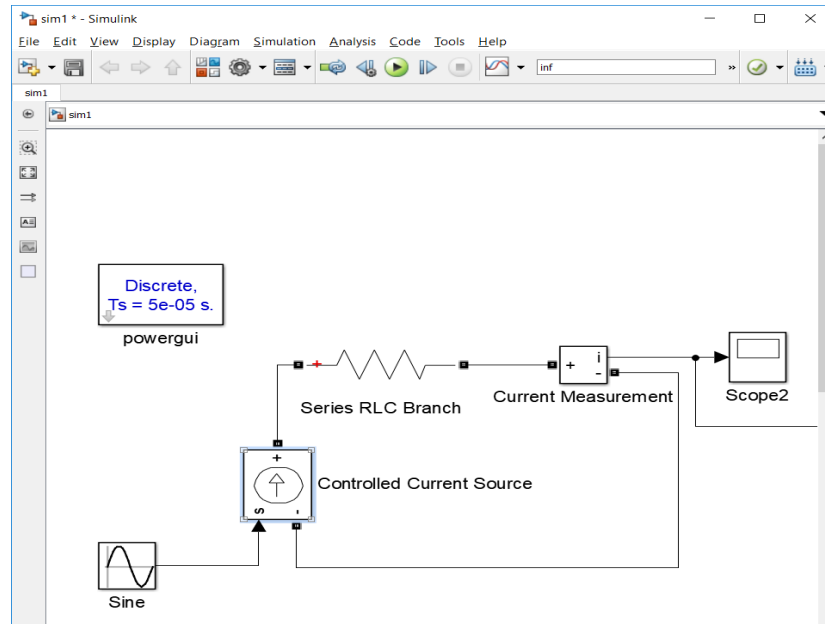


Figura 35. Modelamiento de la entrada de señal de corriente. Fuente [Autores]

El bloque que se encuentra como Discrete es la función la cual nos permite relacionar valores eléctricos con funciones matemáticas dentro del software.

### **Cálculo del campo magnético o inducción magnética.**

En este bloque es donde influyen la mayoría de las variables definidas al inicio ya que desde aquí parte la relación de corriente-inducción magnética. La ecuación definida por Michael Faraday:

$$\oint F = V \int H \cdot dl$$

Fórmula 27. Ecuación de Faraday.

Se resuelve la integral para poder cambiar de variables y tener una facilidad en el cálculo con las variables que disponemos y con ello nos queda la siguiente ecuación.

$$\oint F = VBd$$

Fórmula 28. Ángulo de Rotación en radianes.

Donde:

- $\oint F$  Es el ángulo de rotación (en radianes)
- B Es flujo de densidad magnética en la dirección de propagación (en teslas)
- d Es la longitud del camino óptico (en metros)
- V Es la constante de Verdet del material.

La ecuación anteriormente es la que nos da el ángulo pero en si necesitamos otra ecuación para poder tener la densidad magnética aplicamos la siguiente:

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r}$$

Fórmula 29. Flujo de la densidad Magnética.

Donde:

$B$  Es flujo de densidad magnética en la dirección de propagación (en teslas)

$\mu_0$  Permeabilidad del vacío (constante) =  $4\pi \cdot 10^{-7}$

$i$  Intensidad de corriente (Amperio)

$r$  Distancia al hilo conductor o entre dos hilos conductores m

Todas las variables y ecuaciones que se menciona anteriormente son las que ingresamos al cálculo en el software y obtenemos de primera mano con la segunda ecuación la densidad magnética y al aplicad la primera ecuación tenemos como resultado el ángulo de alteración que tiene la señal óptica al inducirle una corriente.

Es importante mencionar que la señal de corriente pasa por un filtro que nos entrega solo el valor RMS de la señal y con él se trabaja en los cálculos matemáticos. Los resultados de cada operación matemática tiene un display, con el podemos ver la variación que tiene cada resultado al variar los valores, en el proceso propuesto para la obtención de la variable requerida llamada ángulo de alteración.

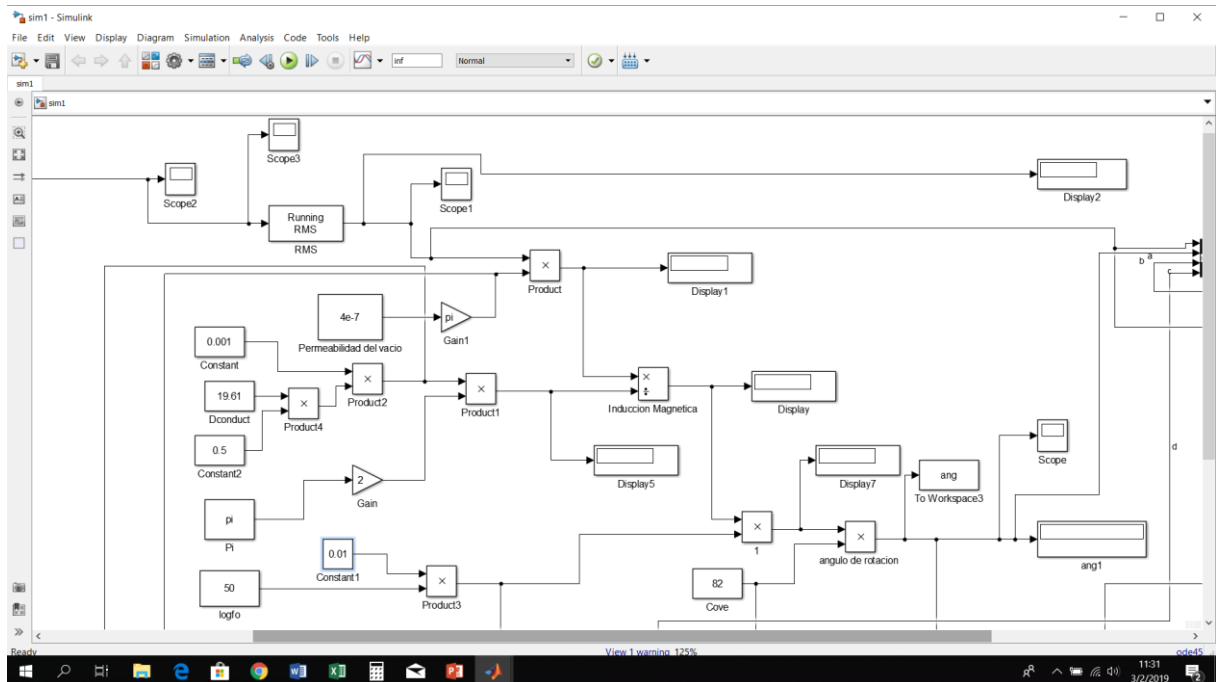


Figura 36. Cálculo matemático del ángulo de alteración. [Autores]

### Calculo de la variación rad/Amp, corriente detectada y ángulo de actuación del TOC

En el cálculo realizado se propone conocer la variación del transformador óptico de corriente en radianes por cada amperio que va a tener el sistema esto para cada material que está compuesto la fibra óptica.

Se propone el cálculo de la variación del ángulo de alteración que va a tener el sistema que sería que cantidad en radianes varía por cada amperio, para esto se va variando el material de la fibra óptica con lo que también varía su constante de Verdet.

Para esto se realizó el cálculo de la derivada de las funciones del ángulo de alteración antes ya descritas y la ecuación resultante es la siguiente:

$$\frac{d\theta_F}{di} = \frac{\mu_0 V d}{2\pi r}$$

Fórmula 30. Cálculo de la variación de radianes por cada amperio.

Donde:

$\frac{d\theta_F}{di}$  Es la variación de la cantidad de radianes por cada amperio ingresado.

$\mu_0$  Permeabilidad del vacío (constante) =  $4\pi \cdot 10^{-7}$

$r$  Distancia al hilo conductor o entre dos hilos conductores m



que va como dato de ingreso al analizador, el mismo que en la práctica será el que active los sistemas de protecciones. Esta ley viene dada y aplicada por la ecuación:

$$I = I_0 \cos^2 \varnothing$$

Fórmula 31. Cálculo intensidad de luz incidente.

Donde:

$I_0$  La intensidad de la luz incidente

$\varnothing$  El ángulo que su plano de vibración forma con el eje de transmisión

$I$  La intensidad de la luz transmitida

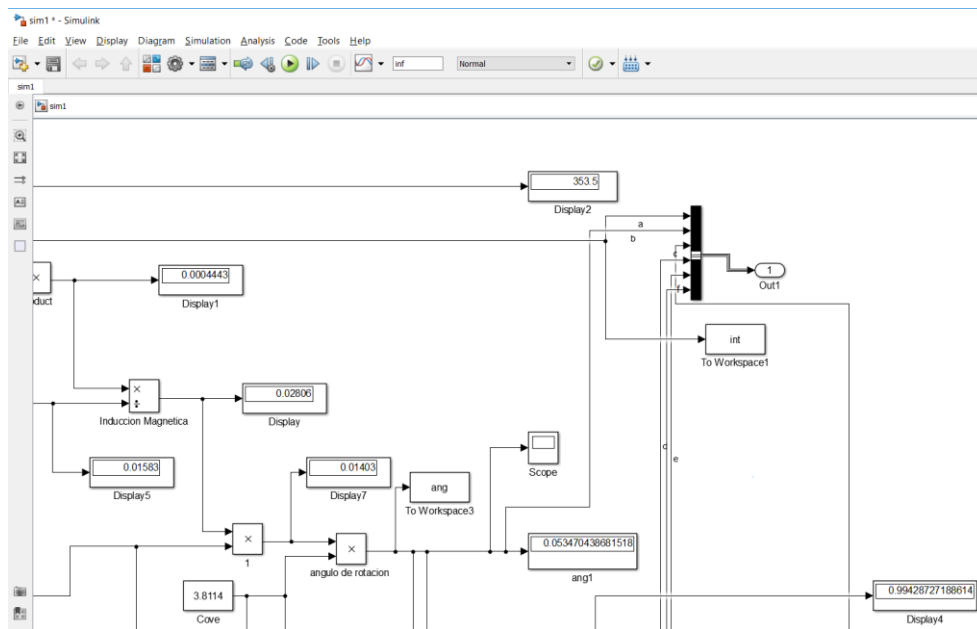


Figura 38. Aplicación de la ley de Malus. [Autores]

De igual manera que de los bloques anteriores se aplica los Display a la salida de cada variable para poder saber el valor de cada una de ellas y apreciar la variación.

También se utilizó un bloque el cual almacena datos unidos con una salida los que se etiqueto como A, B, C,D y E que son

A: La corriente de ingreso al cálculo del ángulo de alteración.

B: Es el valor del ángulo.

C: Es el valor que se obtiene de la ley de Malus.

D: Es la relación de variación de por cada amperio ingresado la cantidad de radianes varia.

E: Es la corriente detectada por el transformador óptico

F: El angulo de actuación del TOC.

Estos son los bloques de los cuales está compuesta el modelamiento en la aplicación SIMULINK el ingreso de datos se realiza de manera gráfica en la aplicación GUIDE. Por otro lado el resultado del modelamiento no es solo los valores son graficas presentadas en las siguientes partes.

### Segunda Parte- Programación de las graficas

Para las gráficas las cuales se va a ingresar se basó en las formulas

$$y = A \cos(2\pi f + x)$$

Fórmula 32. Variación de la onda en el tiempo.

Donde:

- y** Valor de la onda en relación al tiempo.
- A** La Amplitud.
- f** Frecuencia de la onda.
- x** Variación en función del tiempo.

Esta ecuación es la base para el ingreso de la señal de luz, esta esta compuesta por una en sentido vertical y otra horizontal propias de la señal. Para el modelamiento se ingresan más ondas las cuales son interpretadas como ruidos existentes en la luz los cuales son eliminadas al pasar por el cristal polarizador.

La programación es la siguiente:

```
%----- GRAFICACION DE ONDAS DE LUZ DE ENTRADA- FILTRACION Y POR
ULTIMO DE SALIDA -----
x=0:0.01*pi/frec:3*pi/frec;
tamx=int16(length(x)/2);
y1=zeros(1,length(x));
matrizGiro45=[1 0 0;
              0 cos(pi/4) -sin(pi/4);
              0 sin(pi/4) cos(pi/4)];
matrizGiro90=[1 0 0;
              0 cos(pi/2) -sin(pi/2);
              0 sin(pi/2) cos(pi/2)];
matrizGiro135=[1 0 0;
               0 cos(3*pi/4) -sin(3*pi/4);
               0 sin(3*pi/4) cos(3*pi/4)];
fase=fase+0.5;
matrizGiro=[1 0 0;
            0 cos(ang) -sin(ang);
```

```

0 sin(ang) cos(ang)];

%onda original en el eje Z
z1=Amp*sin(2*pi*frec*x+fase);
z2=IntLuz2*sin(2*pi*frec*x+fase);
onda1=[x;y1;[z1(1:tamx) z2(tamx+1:end)]];
%onda girada 45 en angulos
onda2=zeros(3,tamx);
%onda girada 90 en angulos
onda3=zeros(3,tamx);
%onda girada 135 en angulos
onda4=zeros(3,tamx);
for i=1:tamx
    %generar onda 1 con desfase de parametro
    onda1(:,i+tamx-1)=matrizGiro*[x(i+tamx-1);y1(i+tamx-1);z1(i+tamx-
1)];
    %generar onda 2 con giro de 45
    onda2(:,i)=matrizGiro45*[x(i);y1(i);z1(i)];
    %generar onda 3 con giro de 90
    onda3(:,i)=matrizGiro90*[x(i);y1(i);z1(i)];
    %generar onda 4 con giro de 135
    onda4(:,i)=matrizGiro135*[x(i);y1(i);z1(i)];
end
%graficar la rejilla del filtro
for i=-Amp:Amp/5:Amp
    plot3(ax2,[x(tamx) x(tamx)],[-Amp Amp],[i i],'k');
    plot3(ax2,[2*x(tamx) 2*x(tamx)],[-Amp Amp],[i i],'k');
    hold(ax2,'on');
end
plot3(ax2,onda1(1,1:tamx),onda1(2,1:tamx),onda1(3,1:tamx),'b-');

plot3(ax2,(onda1(1,tamx))+onda1(1,tamx:end),onda1(2,tamx:end),onda1(3,tamx:
end),'b-');

plot3(ax2,(onda1(1,tamx))+onda1(1,1:tamx),onda1(2,1:tamx),onda1(3,1:tamx),'
b-');

plot3(ax2,onda2(1,:),onda2(2,:),onda2(3,:),'-');
plot3(ax2,onda3(1,:),onda3(2,:),onda3(3,:),'-');
plot3(ax2,onda4(1,:),onda4(2,:),onda4(3,:),'-');
grid(ax2,'on');
xlabel(ax2,'Transición en el Tiempo');
ylabel(ax2,'');
zlabel(ax2,'Intensidad de Luz');
view(ax2,az,el);
hold(ax2,'off');

```

### **Tercera Parte- Modelamiento en GUIDE**

El modelamiento en GUIDE se da para tener una interfaz gráfica para poder tener una manera más didáctica de ingresar las variables y poder apreciar de mejor manera las gráficas de los resultados del modelamiento.

La programación en el guide se divide en tres partes importantes las cuales son:

- Datos de ingreso para los cálculos y botones de control.
- Datos de salida del resultado de los cálculos.
- Graficas de la modelación.

#### **Datos de ingreso para los cálculos y botones de control**

Los datos a ingresarse serían las mismas variables que son necesarias para el cálculo del ángulo de alteración que son los siguientes:

1. Intensidad del componente del campo magnético.
2. Distancia al hilo conductor (en nuestro caso sería el radio del conductor de cada calibre).
3. Longitud del camino óptico (longitud de conductor de fibra óptica).
4. Constante de Verdet (de aquí nos da la longitud de onda de la señal).
5. Intensidad de luz en la fibra óptica.
6. Corriente Máxima Admisible(cada calibre de conductor tiene su corriente máxima y es proyectada en pantalla)

Los botones de control están compuestos por los siguientes componentes

1. Corriente base del sistema.
2. Ingreso de datos (para la transferencia de datos del GUIDE al SIMULINK).
3. Inicio (comienzo de los cálculos matemáticos con los datos ingresados).
4. Detener (Detener el calculo y poder ingresar datos nuevos).

Adicionando funciones unas funciones más a los valores ingresados como es la corriente que tiene su grafica que es intensidad vs ángulo de alteración, de igual manera la intensidad de luz que se va a ingresar va a tener varias funciones por un lado nos da la intensidad de luz para el cálculo de la ley de Malus. En esta sección seguirá siendo el valor de la intensidad de luz pero en estos gráficos las ondas incidentes el valor de su amplitud.

Datos de Ingreso		Botones de Control	
Corriente Pico de Ingreso (A)	500	Tipo de Conductor ASCR (AWG Ó MCM)	6
Longitud de la Fibra Óptica (cm)	50	Corriente Max. Admisible(A):	0
Constante de Verdet (Rad/T.m)	Agua	Intensidad de luz (dB)	15
		INGRESO DE DATOS	INICIO
		DETENER	Corriente Base del Sistema (A): 500

Figura 39. Datos de ingreso y botones de control en el GUIDE. [Autores]

El ingreso de datos se hizo con señalética utilizando la herramienta llamada Static Box, que contiene el nombre del dato y la unidad que es ingresada. Para el ingreso de los valores se utiliza la herramienta llamada Edit Box.

Por otra parte para el ingreso de la constante de Verdet se utilizó la función List Box ya que en la investigación se obtuvo que las constantes tienen valores decimales y para su facilidad se procedió a hacer que el ingreso sea solo del nombre del material y la programación misma sea la que ingresa automáticamente el valor. Por parte del radio del conductor se elige el calibre de conductor de una lista desplegable y en una base de datos se guarda los radios de cada uno con su respectiva corriente máxima la cual también se da como un dato de salida para evitar sobrecargar al conductor. Se plantea el calibre del tipo de conductor que se aplica:

### A.C.S.R



Figura 40. Conductor A.S.C.R.

### Aplicaciones A.C.S.R

Los conductores de aluminio desnudo reforzados con acero tipo A.C.S.R. (Aluminum conductor steel reinforced) son utilizados para líneas de transmisión y distribución de energía eléctrica. Estos conductores ofrecen una resistencia a la tracción o esfuerzo de tensión mecánico óptimo para el diseño de estas líneas. El alma de acero de estos conductores está disponible en diversas formaciones, de acuerdo al esfuerzo de tensión deseado, sin sacrificar la capacidad de corriente del conductor.

### **Especificaciones A.C.S.R**

Los conductores de aluminio desnudo A.C.S.R. fabricados por ELECTROCABLES C.A., cumplen con las siguientes especificaciones y normas:

ASTM B-230: Alambres de Aluminio, aleación 1350-H19 para propósitos eléctricos.

ASTM B-231: Conductores trenzados de aluminio tipo 1350-H19 en capas concéntricas.

ASTM B-232: Conductores trenzados de aluminio reforzados con acero (A.C.S.R.)

ASTM B-498: Alambres de acero zincado (galvanizado) para conductores de aluminio reforzados con acero (A.C.S.R.)

ASTM B-500: Cable de acero zincado (galvanizado) para conductores de aluminio reforzados con acero (A.C.S.R.).

### **Construcción A.C.S.R**

Los conductores de aluminio desnudo tipo A.C.S.R. son cableados concéntricamente con alambres de aleación 1350-H19, sobre un alma de acero, que puede ser un alambre o un cable de acero con galvanizado clase A, B o C (de acuerdo a lo que el cliente especifique). Su forma de embalaje son carretes en longitudes de acuerdo a las necesidades del cliente.

### **Detalles del Cable A.C.S.R**

Conductor elaborado bajo normas:

ASTM B230 • ASTM B232 • INEN

Forma de Embalaje:

Para todos los calibres

Z - Long. a requerimiento del cliente.

Capacidad de corriente en amperios:

Calculada para una temperatura del conductor de 75 °C, temperatura ambiente 25 °C, emisividad de 0.5, viento de 0.61 m/seg. y con efecto del sol (1033 watts/m<sup>2</sup>).

Se presenta la tabla de conductores con sus nombres y especificaciones:

NOMBRE CLAVE	CALIBRE AWG Ó MCM	SECCION AL mm2	SECCION TOTAL mm2	FORMACION No. de hilos por diámetro mm.	DIAMETRO EXTERIOR MM.	PESOTAL Kg/Km	PESO ACERO Kg/Km	PESOTAL Kg/Km	TENSION DE RUPTURA Kg.	RESISTENCIA C.C. A 20°C ohms/Km.	CAP. DE CORRIENTE DE AMP
Turkey	6	13,3	15,46	6x1,68 + 1x1,68	5,,04	36,39	17,22	53,61	530	2,154	105
Swan	4	21,15	24,71	6x2,12 + 1x2,12	6,36	57,89	27,42	85,31	830	1,353	140
Sparrow	2	33,62	29,22	6x2,67 + 1x2,67	8,01	92,02	43,63	135,65	1265	0,8507	184
Raven	1/0	53,49	62,38	6x3,37 + 1x3,37	10,11	146,5	69,4	215,9	1940	0,5351	242
Quail	2/0	67,43	78,64	6x3,78 + 1x3,78	11,34	184,6	87,5	272,1	2425	0,4245	276
Pigeon	3/0	85,01	99,23	6x4,25 + 1x4,25	12,75	232,7	110,2	342,9	3030	0,3367	315
Penguin	4/0	107,2	125,1	6x4,77 + 1x4,77	14,31	293,5	139	432,5	3820	0,2671	357
Waxwing	266,8	135,2	157,2	18x3,09 + 1x3,09	15,47	371,5	58,3	429,8	3210	0,2126	449
Partridge	266,8	135,2	142,6	26x2,57 + 7x2,00	16,28	373,5	171,9	545,4	5100	0,2117	457
Ostrich	300	152	176,7	26x2,73 + 7x2,12	17,28	419,7	193	612,7	5730	0,19	492
Piper	300	152	187,5	30x2,54 + 7x2,54	17,78	420,2	276,8	697	7000	0,1902	490
Merlin	336,4	170,5	179,9	18x3,47 + 1x3,47	17,37	468,4	73,6	542	4060	0,1686	519
Linnet	336,4	170,5	198,3	26x2,89+ 7x2,25	18,31	470,7	216,7	687,4	6375	0,1671	529
Oriole	336,4	170,5	210,3	30x2,69 + 7x2,69	18,83	471,3	310,3	781,6	7735	0,1666	535
Chickadee	397,5	201,42	212,5	18x3,77 + 1x3,77	18,87	554,4	87,1	641,5	4717	0,1427	576
Brant	397,5	201,42	227,55	24x3,27 + 7x2,18	19,61	557,9	203,9	761,8	6622	0,1418	584
Ibis	397,5	201,42	234,2	26x3,14 + 7x2,44	19,88	556,1	255,6	811,7	7340	0,1414	587
Lark	397,5	201,42	248,4	30x2,92 + 7x2,92	20,44	556,6	366,7	923,3	9060	0,1405	594
Pelikan	477	241,7	255,1	18x4,14 + 1x4,14	20,68	666,3	104,6	770,9	5579	0,1189	646
Flicker	477	241,7	273,1	24x3,58 + 7x2,39	21,48	669,7	244,4	914,1	7802	0,1175	655
Hawk	477	241,7	281,1	26x3,44 + 7x2,68	21,8	667,4	307,5	974,9	8820	0,1175	659
Hen	477	241,7	298,1	30x3,20 + 7x3,20	22,4	668	440	1108	10590	0,117	666
Heron	500	253,3	312,4	30x3,28 + 7x3,28	22,96	701	461	1162	11090	0,1141	694

Osprey	556,5	282	298,2	$18 \times 4,47 + 1 \times 4,47$	23,22	784,5	125,6	910,1	6215	0,1015	711
Parakeet	556,5	282	318,52	$24 \times 3,87 + 7 \times 2,58$	23,22	781,3	285,5	1066,8	9004	0,101	721
Dove	556,5	282	327,9	$26 \times 3,72 + 7 \times 2,89$	23,55	779	358	1137	10140	0,1007	726
Eagle	556,5	282	347,8	$30 \times 3,46 + 7 \times 3,46$	24,22	779	514	1293	12360	0,1001	734
Peacock	605	306,6	346,39	$24 \times 4,03 + 7 \times 2,69$	24,21	849,8	309,5	1159,3	9798	0,0942	760
Squab	605	306,6	356,45	$26 \times 3,87 + 7 \times 3,01$	24,54	850,4	389,8	1240,2	10954	0,0941	765
Teal	605	306,6	376,45	$30 \times 3,61 + 19 \times 2,16$	25,25	851,2	546,2	1397,4	13630	0,09402	773
Rook	636	322,3	364	$24 \times 4,14 + 7 \times 2,76$	24,82	892,9	325,8	1218,7	10274	0,08966	784
Grosbeck	636	322,3	374,7	$26 \times 3,97 + 7 \times 3,09$	25,15	890	409	1299	11340	0,8953	789
Egret	636	322,3	395,6	$30 \times 3,70 + 19 \times 2,22$	25,9	891	575	1466	14330	0,08948	798
Flamingo	666,6	337,74	381,55	$24 \times 4,23 + 7 \times 2,82$	25,4	936	341	1277	10773	0,0855	817
Starling	715,5	362,5	421,6	$26 \times 4,21 + 7 \times 3,28$	26,68	1001	461	1462	12750	0,07966	849
Redwing	715,5	362,5	445,1	$30 \times 3,92 + 19 \times 2,35$	27,43	1002	646	1648	15690	0,07958	859
Drake	795	402,8	468	$26 \times 4,44 + 7 \times 3,45$	28,11	1116,2	511,2	1627,4	14290	0,07051	907
Mallard	795	402,8	494,7	$30 \times 4,14 + 19 \times 2,48$	28,96	1114	719	1833	17440	0,06977	918

Tabla 1. Datos técnicos de los conductores utilizados. [Autores]

Por último el ingreso de datos se produce con la herramienta Push Button, en su programación se hace el enlace entre el GUIDE Y SUMULINK. Este enlace nos permite que los valores ingresados en todos los Edit Box sean transferidos a las entradas correctas y con ello proceder a los cálculos correspondientes.

#### Datos de salida del resultado de los cálculos.

Los datos que obtendremos como salida con los que se calculó en el SIMULINK pero se realizó un enlace muy similar al de la entrada pero su función es diferente que es para poder visualizarlos en la herramienta grafica GUIDE. Los datos que se van a visualizar son:

1. Intensidad de luz(salida)
2. Angulo de alteración en Radianes.

3. Angulo de alteración en Grados.
4. Relación Rad/Amp
5. Corriente detectada por el Transformador óptico.

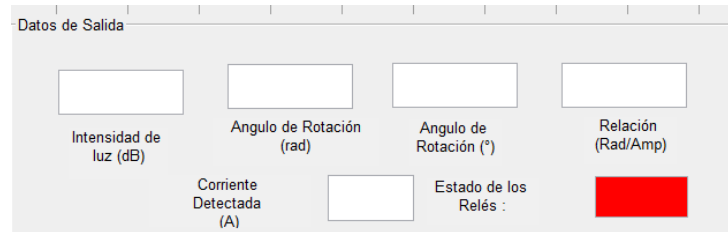


Figura 41. Datos de salida en el GUIDE. [Autores]

Todas variables se visualizan en la herramienta Edit Box que están etiquetadas con el mismo nombre. Estos datos provienen del SIMULINK que a su vez tiene una interfaz por la función OUTPORT que está compuesto por cuatro salidas que son llamadas A, B, C, D. La variable A se utiliza para la traficación en cambio en la variable B nos da la salida del valor del ángulo de alteración y C la intensidad de luz resultante, el dato B se cambia la unidad para obtener de radianes a grados. Por último la variable de la relación es también proviene del SIMULINK pero en este caso del puerto llamado D y la corriente que es asimilada por el transformador óptico es el puerto E. Tiene un Push Button el cual funciona como la interfaz para que los datos extraídos del simulink sean visualizados en el GUIDE.

### Graficas de la modelación.

Los datos que se va a poder visualizar van a ser cuatro graficas que son las siguientes:

- Demostración grafica del funcionamiento del trasformador óptico de corriente
- Relación ángulo de alteración vs Corriente ingresada
- Variación entre la señal polarizada y señal alterada por el efecto Faraday.

Las gráficas están visualizadas en la herramienta Axis, la llamada Demostración grafica del funcionamiento del trasformador óptico de corriente está demostrada en tres dimensiones y en función de la variación tiempo donde se visualiza todo el efecto desde el ingreso de la señal, luego a su polarización a  $90^\circ$  y posterior a ello la alteración que tiene la señal polarizada en el efecto Faraday y la ley de Malus.

La grafica de la relación entre el angulo y la corriente se realizó en dos dimensiones, con ello se puede ver el vector que forma esta relación y poder ver gráficamente en cada valor de corriente cual es el ángulo que tendría en ese punto. Con estas graficas se puede visualizar el

comportamiento que va a tener un transformador óptico de corriente para posteriormente poder diseñar un transformador óptico con las características que más sean adecuadas a las necesidades que tenga el sistema al que se va a aplicar.

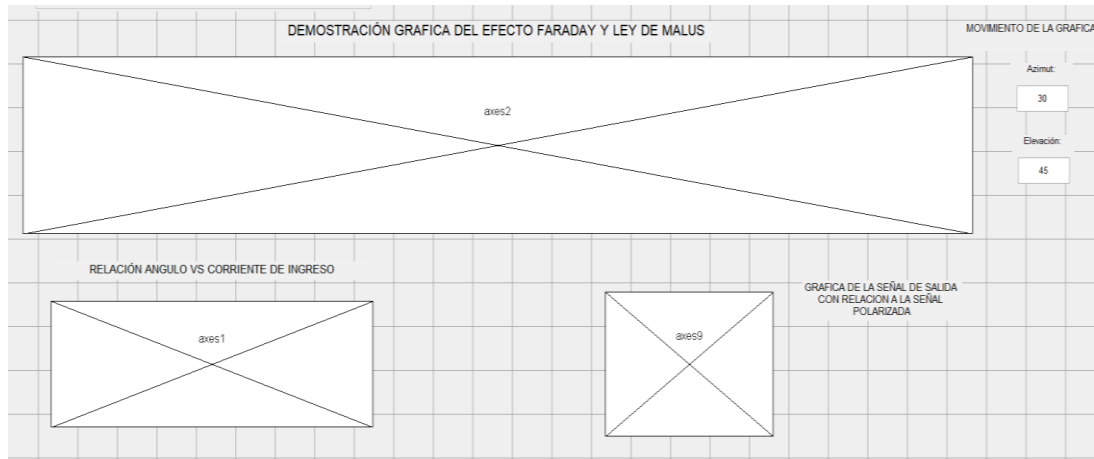


Figura 42. Herramienta para ver las gráficas. [Autores]

Para culminar se instaló un Push Button para poder detener la simulación y poder cambiar de datos para realizar cambios a los datos y revisar el comportamiento con otros materiales y componentes.

## RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Aquí presentaremos los resultados del análisis de los datos obtenidos en nuestro modelamiento. Los resultados mostrarán el comportamiento del transformador óptico de corriente al alterar sus variables de ingreso y con ello poder saber las diferentes combinaciones que se puede tener para la construcción de un transformador óptico de corriente para sistemas de protecciones. Otro detalle serían las posibles señales de luz a la salida de la fibra óptica. Al saber los posibles valores que el sensor óptico puede tener en su entrada se podrían ya saber la gama de valores de corriente nominal del sistema y poder programar los valores a los cuales la corriente entraría en falla con una exactitud de fracciones de amperios.

Mediante la experimentación del modelamiento se espera poder ver la capacidad del transformador óptico para captar la capacidad de censar las variaciones de corriente que se puede percibir con los materiales planteados y las variaciones que va a tener al cambiar un componente por otro.

## Pruebas y valoraciones

Las pruebas que se realizaron fueron para poder analizar como varían los resultados y las gráficas dependiendo de los datos ingresados, con estas pruebas se busca identificar los elementos con los que el transformador óptico tendría un mejor rendimiento y sensibilidad a la variación de la corriente.

### Prueba número 1

Se realiza una prueba a la modelación ingresando una corriente de 300 A, el conductor para la medición es un 266.88 AWG. La fibra óptica está hecha de Sulfuro de Zinc y la señal tiene una intensidad de luz de 15 dB.

Datos:

$$R_{conduc} \quad 7.737 \text{ mm}$$

$$I \quad 300 \text{ Amperios} \quad I_{rms} \quad 212.13203 \text{ Amperios}$$

$$IL \quad 15 \text{ dB}$$

$$L_f \quad 50 \text{ cm}$$

$$Cv_{ZnS} \quad 82 \text{ rad/T.m}$$

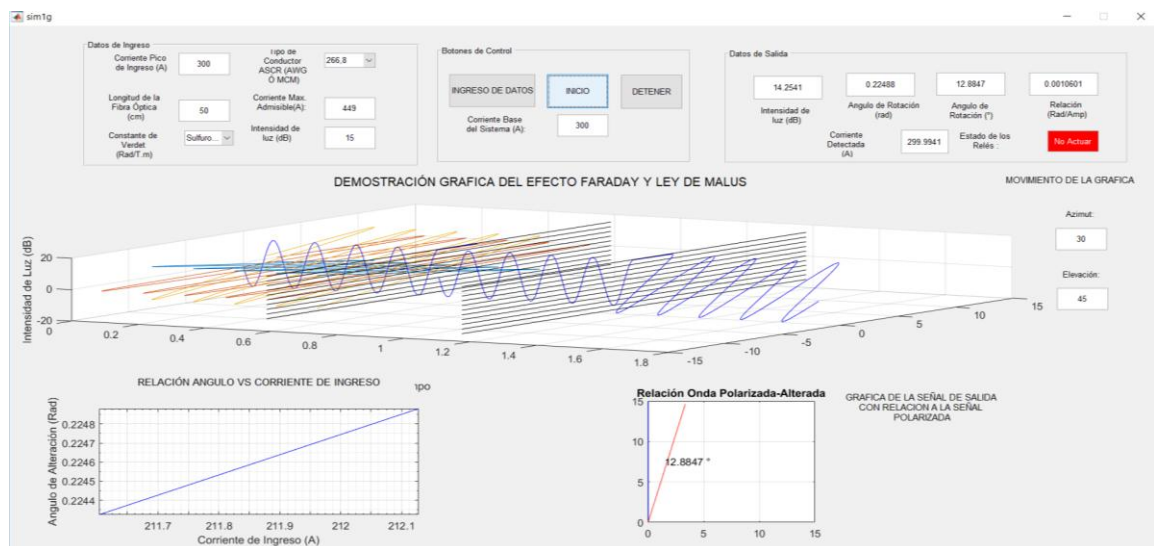


Figura 43. Resultados de la primera prueba al modelamiento. [Autores]

Los resultados obtenidos en la prueba son los siguientes:

- La señal de luz tiene una alteración de 0.22486 rad o 12.8847°.
- La intensidad de luz luego de aplicación de la ley de Malus es de 14.2541 dB.

- El transformador óptico planteado en las condiciones establecidas va a tener una relación por cada amperio inyectado al ángulo se suma la cantidad de 0.0010601 radianes.
- La grafica nos muestra tal cual es el funcionamiento del transformador óptico de corriente se puede apreciar de manera muy clara los efector físicos-ópticos establecidos teóricamente en los capítulos anteriores.

### Prueba número 2

En esta prueba se evalúa la variación que tiene los resultados al cambiar el material de composición de la fibra óptica ya que de ello depende la constante de Verdet. Se mantienen los datos de ingreso del ejemplo numero 1 solo se va variando el material que ahora será todos los tipos de materiales ingresados en la tabla la corriente.

Datos:

$R_{conduc}$  7.737 mm

$I$  300 Amperios       $I_{rms}$  212.13203 Amperios

$IL$  15 dB

$L_f$  50 cm

$C_{V_{cuarzo}}$

Sustancia	Longitud de onda ( $\lambda$ )	V(min.de arco gauss-1 cm-1)	V(arcmin /T cm)	V(rad /T m)
Agua	589,3		1,31E+02	3,8113795
CS2	589,3		4,17E+02	12,1324065
Lámina de vidrio Flint	589,3		3,17E+02	9,2229565
Vidrio Crown	632,8		7,27E+02	21,1517015
Cuarzo	632,8		4,83E+02	14,0526 435
Fósforo	589,3		1,23E+03	35,786235
Sulfuro de Zinc	698,0			82
Vidrio Grown	698,0			6.4
Vidrio Flint	698,0			23
Cloruro de Sodio	698,0			9.6
Vidrio Flint ligero	698,0	0,0317		9,222958465

Vidrio Flint extra denso	698,0	0,0442		12,85977174
Vidrio Flint pesado	698,0	0,0608		17,68945977
Vidrio Flint muy pesado	698,0	0,0888		25,83592151
Agua	698,0	0,0131		3,811380312
Aire(760)	698,0	6,25E-06		0,001818407

Tabla 2. Materiales con sus respectivas constantes de Verdet. [Autores]

Los resultados obtenidos en la prueba son los siguientes:

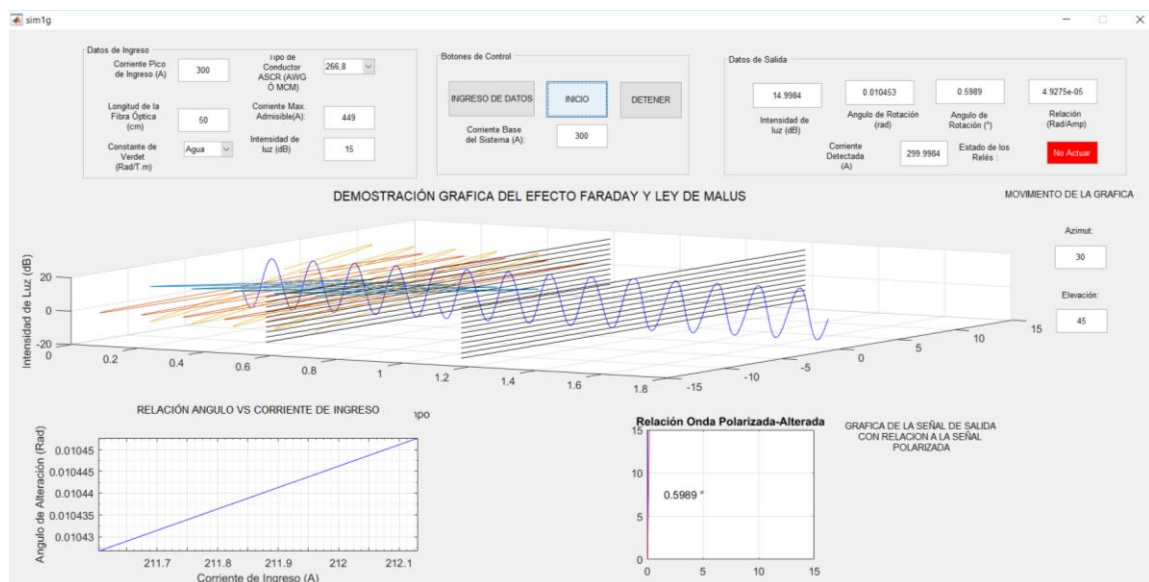


Figura 44. Resultado del modelamiento del transformador óptico de corriente con el material Agua. [Autores]

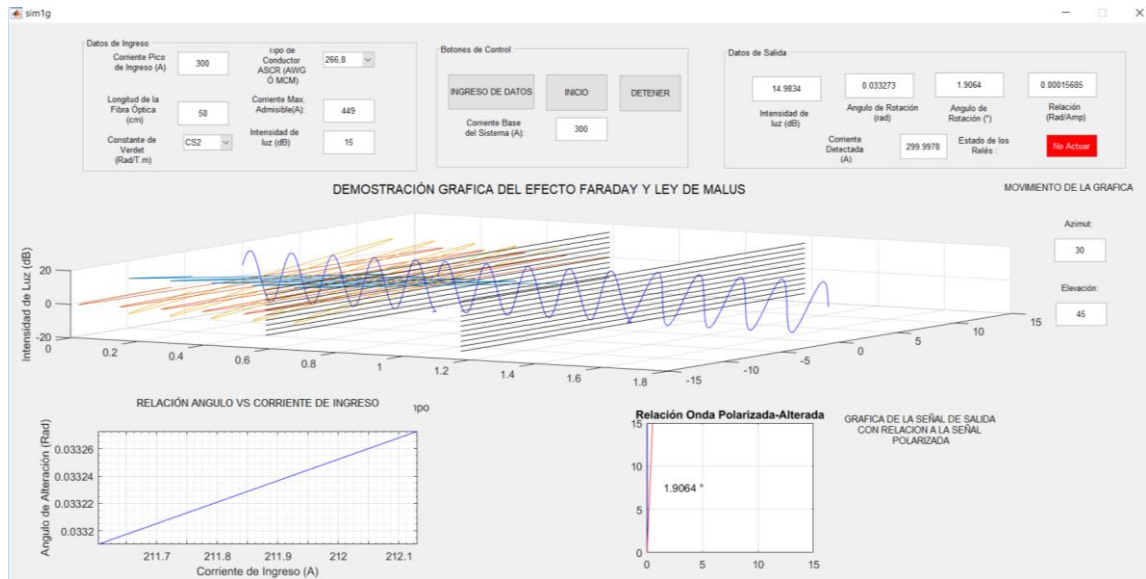


Figura 45. Resultado del modelamiento del transformador óptico de corriente con el material CS2 (Sulfuro de carbono). [Autores]

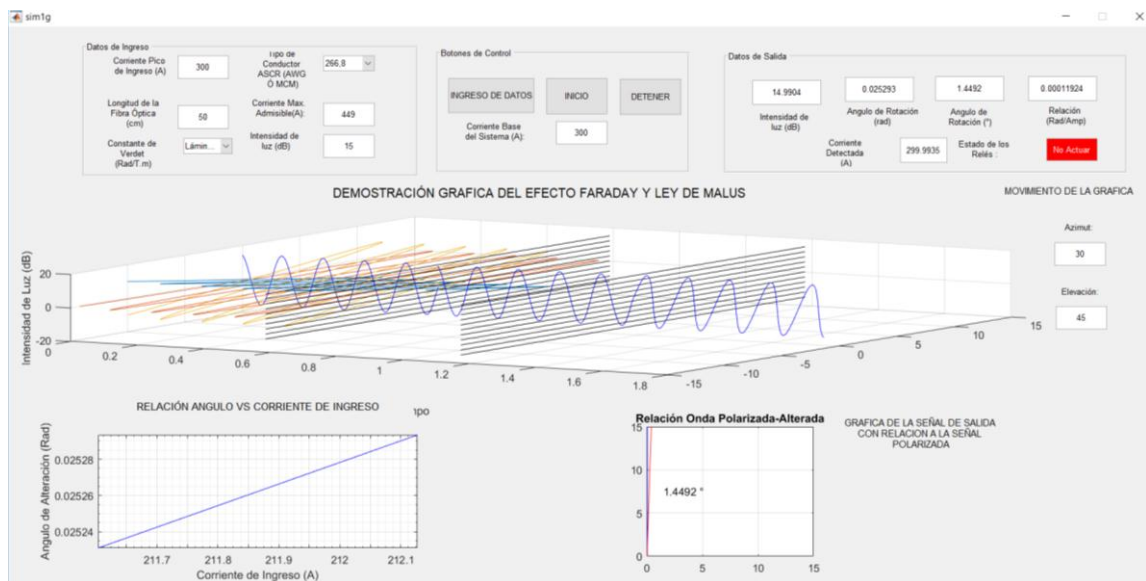


Figura 46. Resultado del modelamiento del transformador óptico de corriente con el material Lámina de vidrio Flint. [Autores]

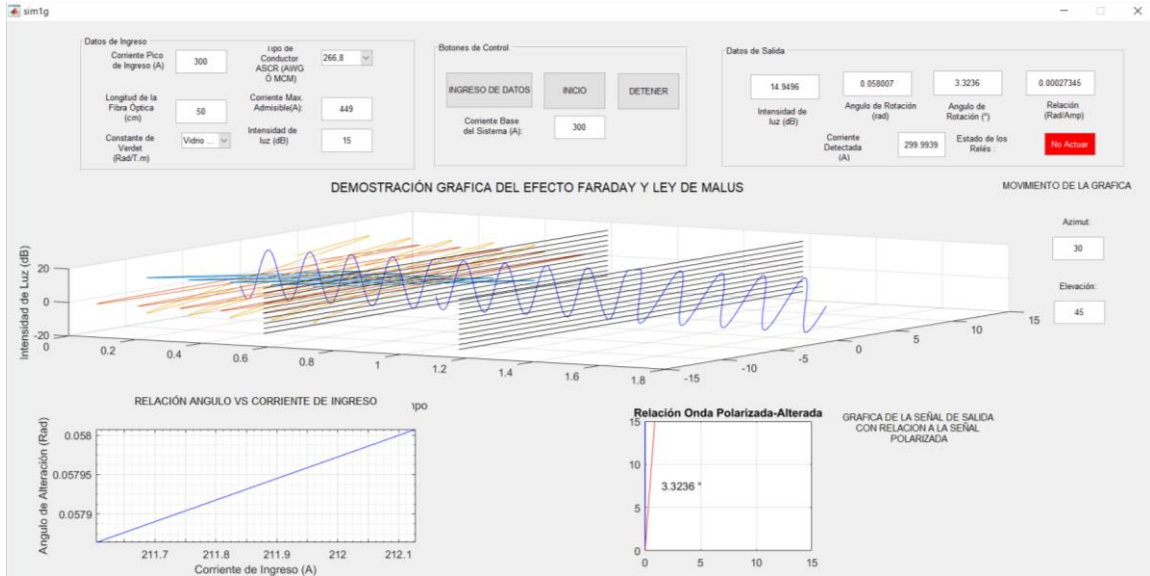


Figura 47. Resultado del modelamiento del trasformador óptico de corriente con el material Vidrio Crown. [Autores]

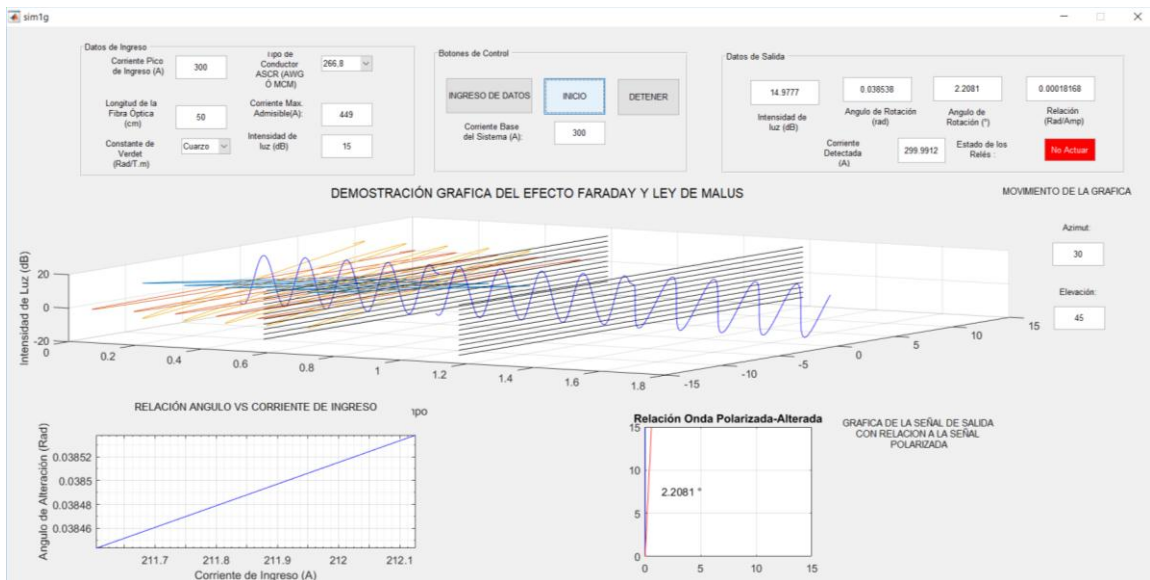


Figura 48. Resultado del modelamiento del trasformador óptico de corriente con el material Cuarzo. [Autores]

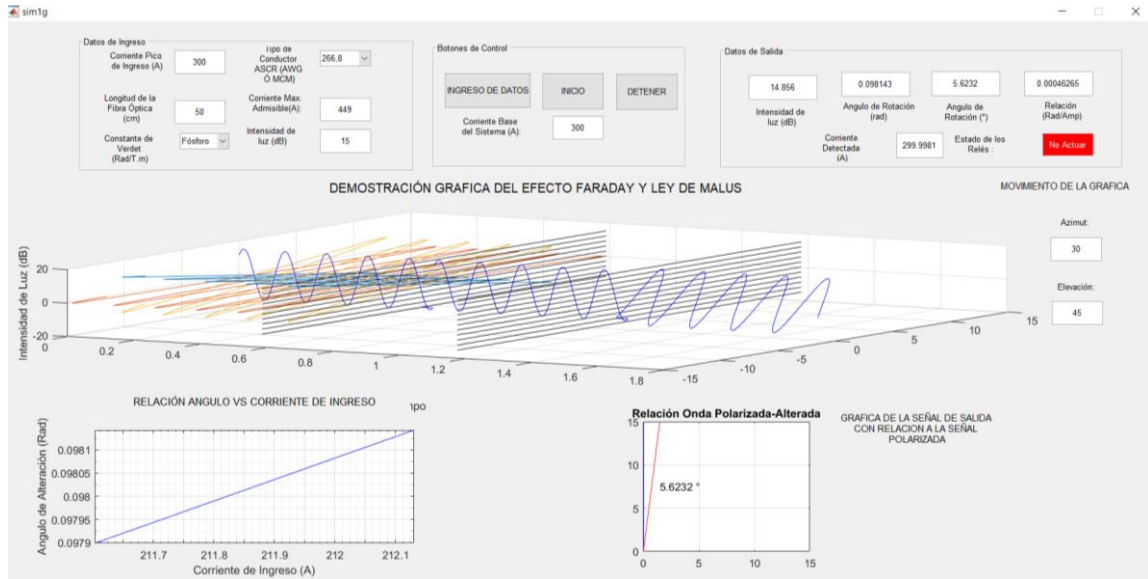


Figura 49. Resultado del modelamiento del trasformador óptico de corriente con el material Fósforo. [Autores]

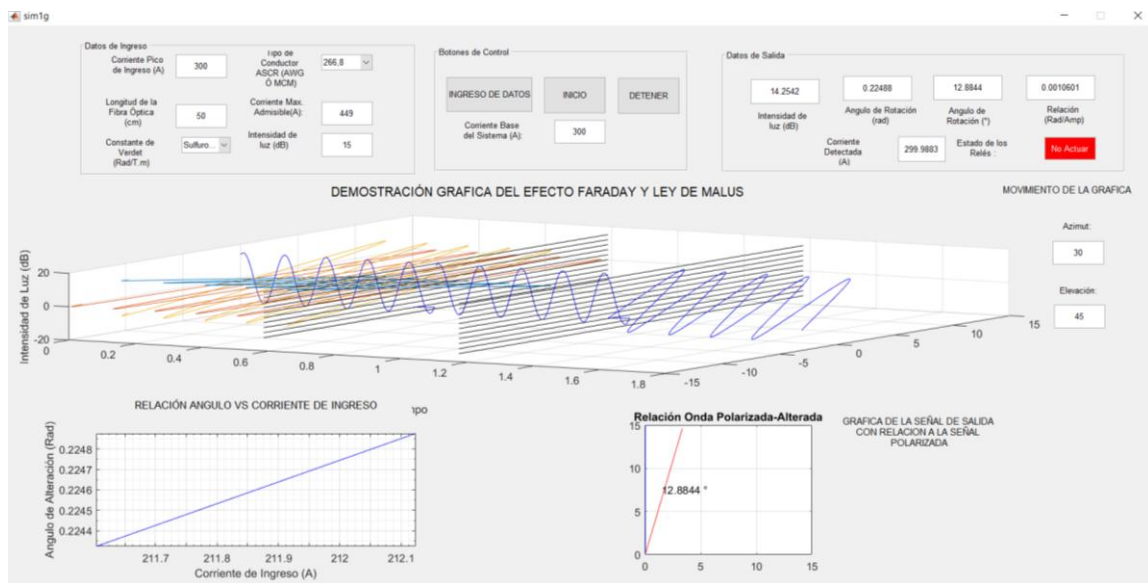


Figura 50. Resultado del modelamiento del trasformador óptico de corriente con el material Sulfuro de Zinc. [Autores]

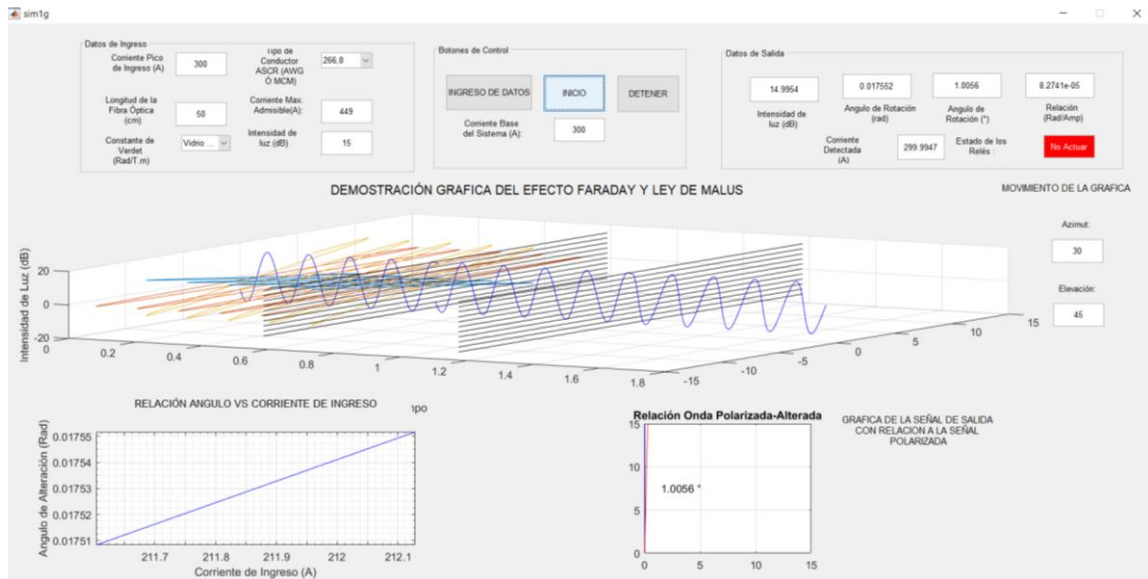


Figura 51. Resultado del modelamiento del transformador óptico de corriente con el material Vidrio Grown. [Autores]

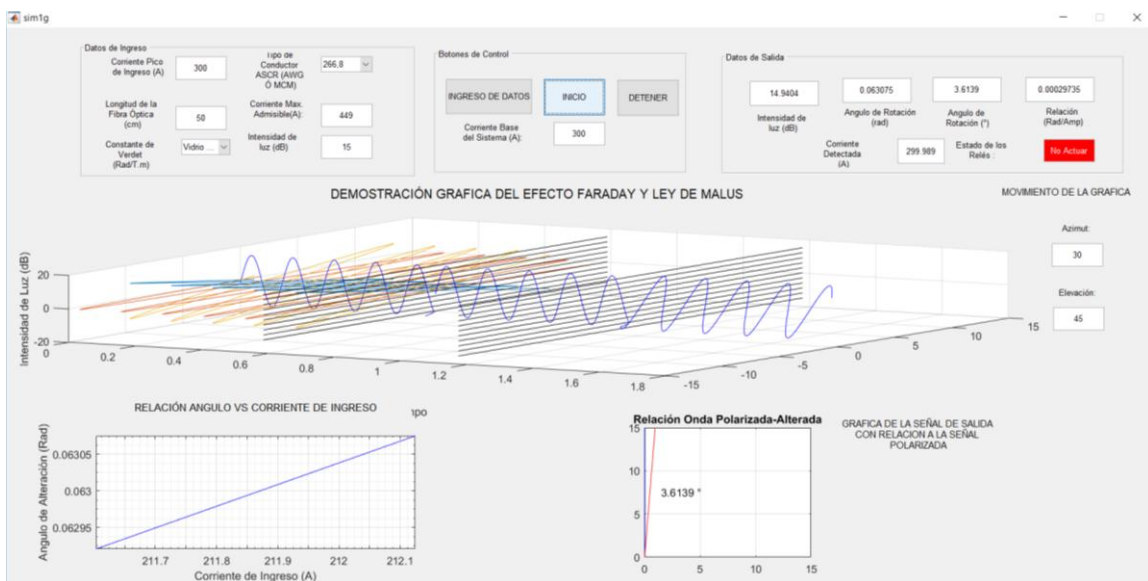


Figura 52. Resultado del modelamiento del transformador óptico de corriente con el material Vidrio Flint. [Autores]

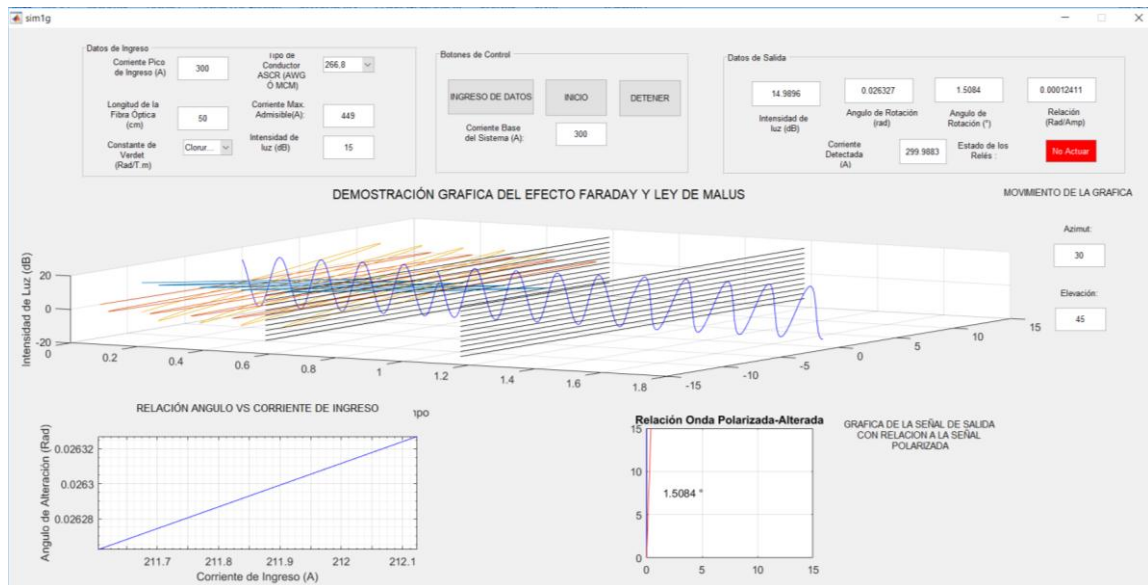


Figura 53. Resultado del modelamiento del transformador óptico de corriente con el material Cloruro de Sodio. [Autores]

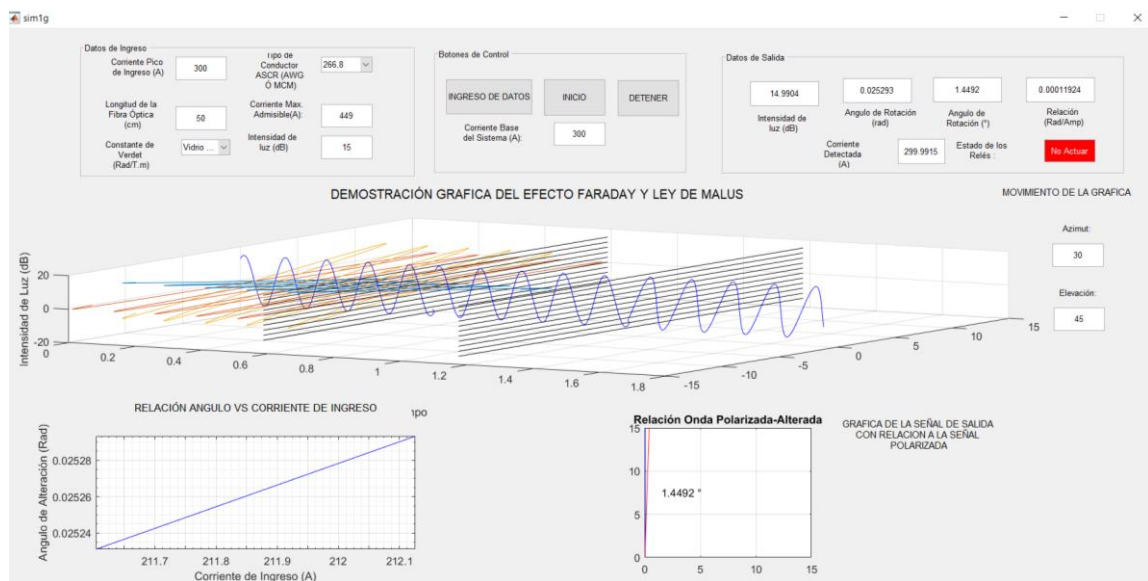


Figura 54. Resultado del modelamiento del transformador óptico de corriente con el material Vidrio Flint ligero. [Autores]

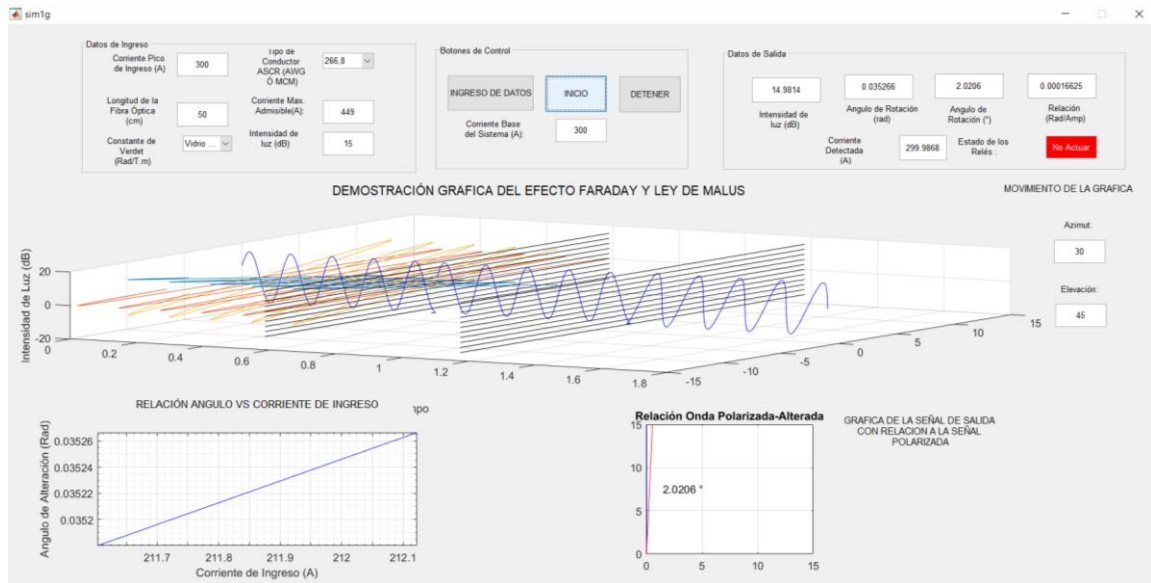


Figura 55. Resultado del modelamiento del trasformador óptico de corriente con el material Vidrio Flint extra denso. [Autores]

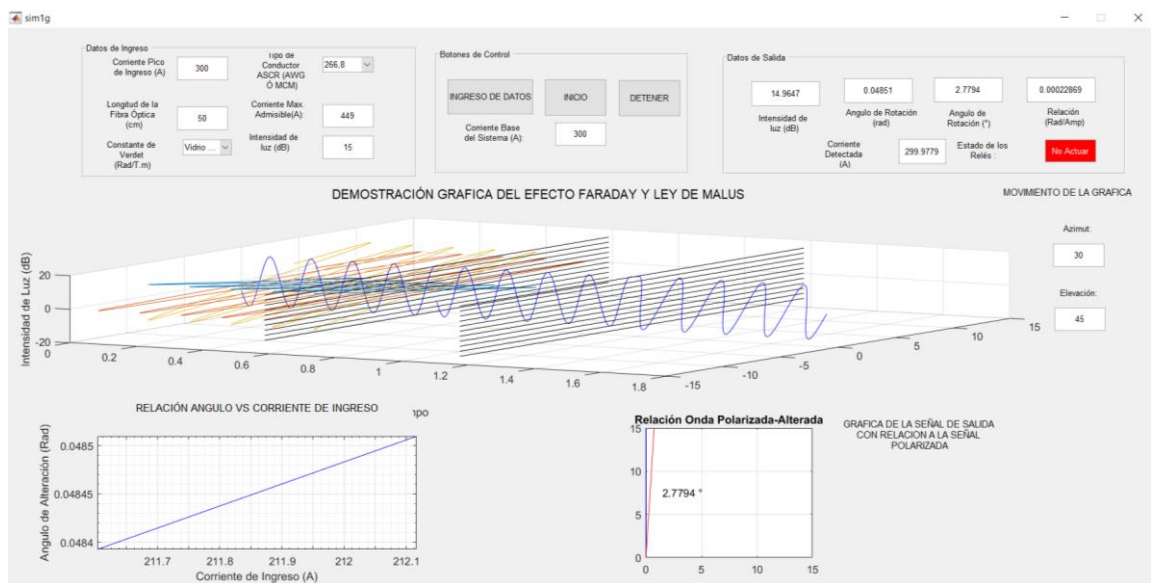


Figura 56. Resultado del modelamiento del trasformador óptico de corriente con el material Vidrio Flint pesado. [Autores]

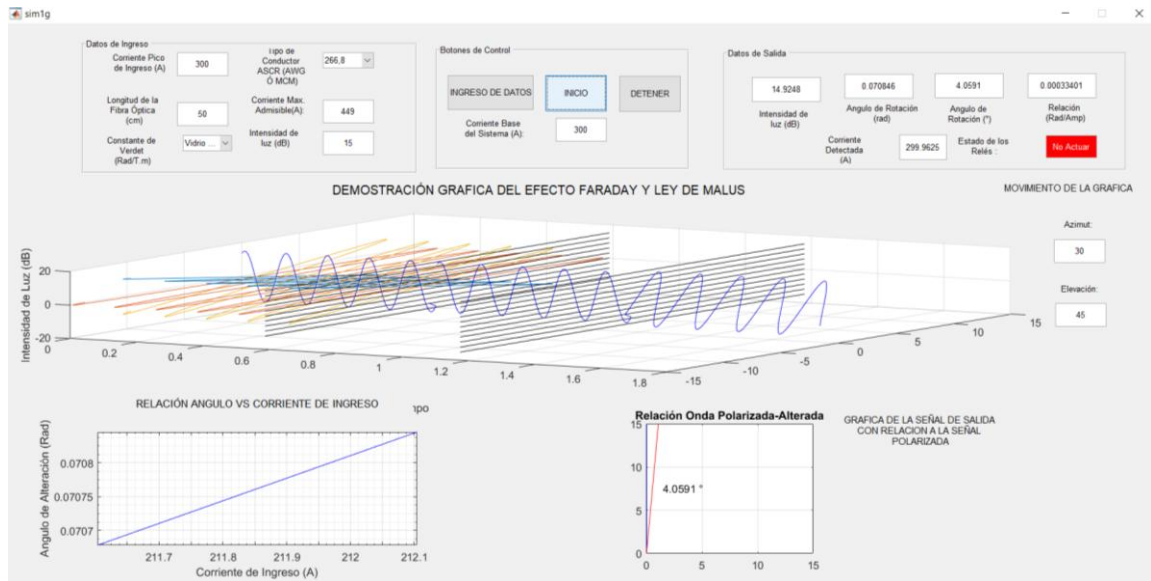


Figura 57. Resultado del modelamiento del transformador óptico de corriente con el material Vidrio Flint muy pesado. [Autores]

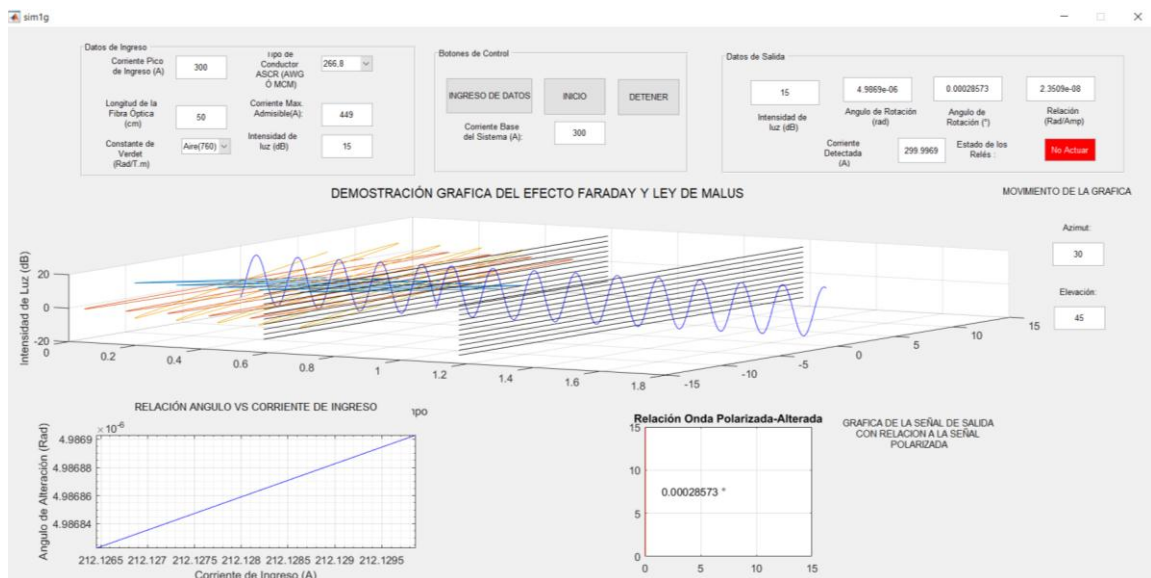


Figura 58. Resultado del modelamiento del transformador óptico de corriente con el material Aire (760). [Autores]

A continuación se muestra la tabla de resultados con los valores obtenidos con todos los materiales usados.

Longitud de la Fibra Óptica en cm	Diámetro del Conductor en mm	Material	Constante de Verdet	Variación del ángulo por cada Amperio
50	7.737	Agua	3,8113795	4.9275e-05
50	7.737	CS2(Sulfuro de carbono)	12,1324065	0.00015685
50	7.737	Lámina de vidrio Flint	9,2229565	0.00011924
50	7.737	Vidrio Crown	21,1517015	0.00027345
50	7.737	Cuarzo	14,0526435	0.00018168
50	7.737	Fósforo	35,786235	0.00046265
50	7.737	Sulfuro de Zinc	82	0,0010601
50	7.737	Vidrio Crown	6.4	9,05E-05
50	7.737	Vidrio Flint	23	0,0003251
50	7.737	Cloruro de Sodio	9.6	0,0001357
50	7.737	Vidrio Flint ligero	9,22295847	0.00011924
50	7.737	Vidrio Flint extra denso	12,8597717	0.00016625
50	7.737	Vidrio Flint pesado	17,6894598	0.00022869
50	7.737	Vidrio Flint muy pesado	25,8359215	0.00033401
50	7.737	Aire(760)	0,00181841	2.3509e-08

Tabla 3. Resultados de la variación del ángulo respecto a cada Amperio.

Se establece que el ángulo de alteración es proporcional al material que está hecho la fibra óptica. De igual manera con esto se concluye que la constante de Verdet nos da la sensibilidad del transformador óptico de corriente. Y podemos ver que la Fibra óptica que tenga valores de constante de Verdet pequeños no debe ser usada en los transformadores ópticos de corriente

donde que vayan a realizar trabajos donde su lectura vaya a ser de variaciones pequeñas de corriente.

### Prueba número 3

En la tercera prueba se varió la longitud de la fibra óptica que se enrolla al conductor por donde circula la corriente para poder mirar cual va a ser la variación de los resultados. Los valores ingresados a excepción de la longitud de la fibra óptica son los mismo de la prueba número 1.

Datos:

$$R_{conduct} 7.737 \text{ mm}$$

$$I \quad 300 \text{ Amperios} \quad I_{rms} \quad 212.13203 \text{ Amperios}$$

$$IL \quad 15 \text{ dB}$$

$$L_f \quad 5 \text{ cm}$$

$$Cv_{ZnS} \quad 82 \text{ rad/T.m}$$

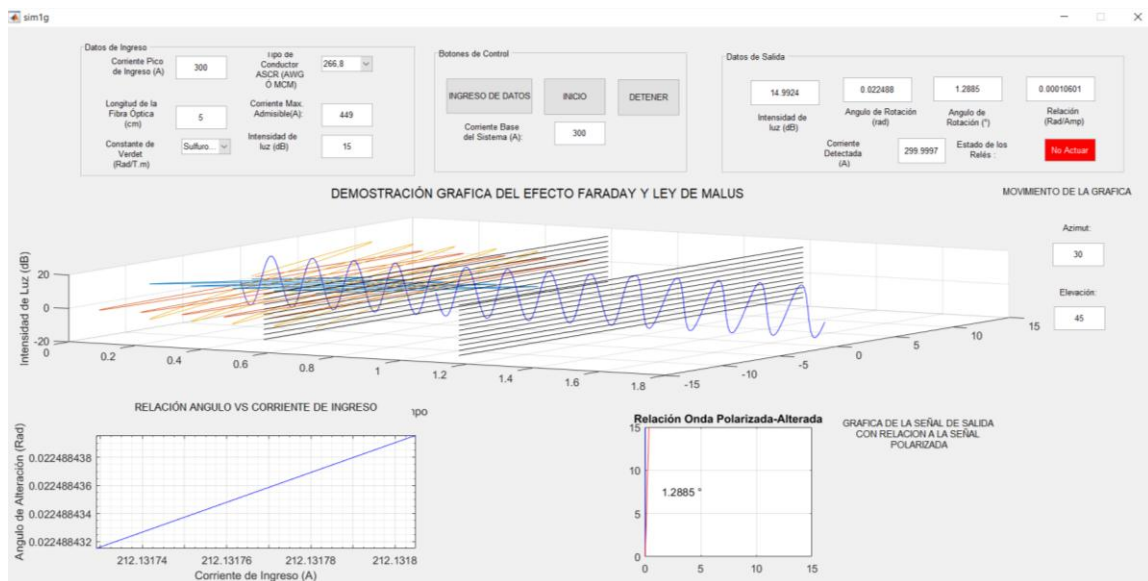


Figura 59. Resultados de la tercera prueba al modelamiento. [Autores]

Los resultados obtenidos en la prueba son los siguientes:

- La señal de luz tiene una alteración de 0.022488 rad o 1.2885°. Al reducir la longitud de la fibra óptica afecta a la sensibilidad que va a tener el transformador óptico ya que se puede ver que el ángulo de alteración es menor al de la prueba 1 pero mayor al de la prueba 2. Así se determina que la longitud de la fibra óptica sin importante el material de que este compuesta su

rendimiento es mayor al aumentar la longitud del enrollamiento que va tener conductor que conduce la corriente que se va a medir.

- La intensidad de luz luego de aplicación de la ley de Malus es de 14.9924 dB. Tal y como paso en la prueba dos se puede ver que la intensidad de luz resultante es inversamente proporcional al ángulo de alteración de la señal de luz.
- Se puede concluir que para cuando la longitud de la fibra óptica del transformador sea corta se debe usar sensores de luz mucho más precisos ya que la alteración del ángulo de la señal de salida y de la señal polarizada va a ser pequeño.

#### Prueba número 4

En la presente prueba se varía el radio del conductor donde va a estar el enrollamiento de la fibra óptica, el radio del conductor va ser mayor ya que se usara un cable 2 AWG. Los valores de las demás variables van a ser las mismas de la prueba numero 1.

Datos:

$R_{conduc}$  4,005 mm

$I$  300 Amperios       $I_{rms}$  212.13203 Amperios

$IL$  15 dB

$L_f$  50 cm

$Cv_{ZnS}$  82 rad/T.m

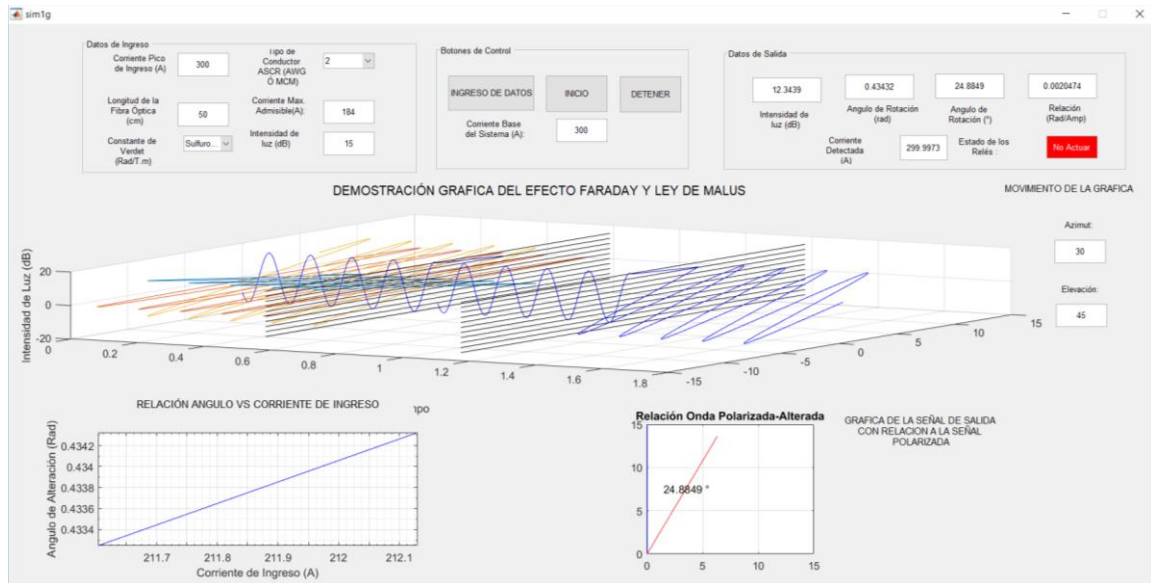


Figura 60. Resultados de la cuarta prueba al modelamiento. [Autores]

Los resultados obtenidos en la prueba son los siguientes:

- La señal de luz tiene una alteración de 0.43432 rad o 24.885°. Se puede ver que el ángulo tiene poco cambio en relación a la prueba 1 con esto se puede determinar que el transformador óptico de corriente puede ser utilizado para una variedad de calibres de conductores lo cual se determina que se podría utilizar los mismos modelos en subestaciones tanto en el lado primario como secundario solo variaría en la calibración que debe tener el dispositivo de actuación que recibe la señal.
- La intensidad de luz luego de aplicación de la ley de Malus es de 8.4205 dB. Hay una diferencia menor con el ejemplo 1 que el transformador óptico tiene una facilidad de calibración ya que se puede seleccionar el mismo dispositivo para diferentes potencias, lo que variaría sería el dispositivo de lectura de la señal óptica.

## Prueba numero 5

### Prueba número 5-A

Se realiza la prueba para la sensibilidad que tiene el transformador óptico a la variación de fracciones de amperio. Con ello poder saber si los datos de la prueba número 1 se pueden utilizar para trabajos con exactitud.

Datos:

$R_{conduc}$  7.737 mm

$I$  0.05 Amperios

$I_{rms}$  0.0353 Amperios

$IL$  15 dB

$L_f$  50 cm

$Cv_{ZnS}$  82 rad/T.m

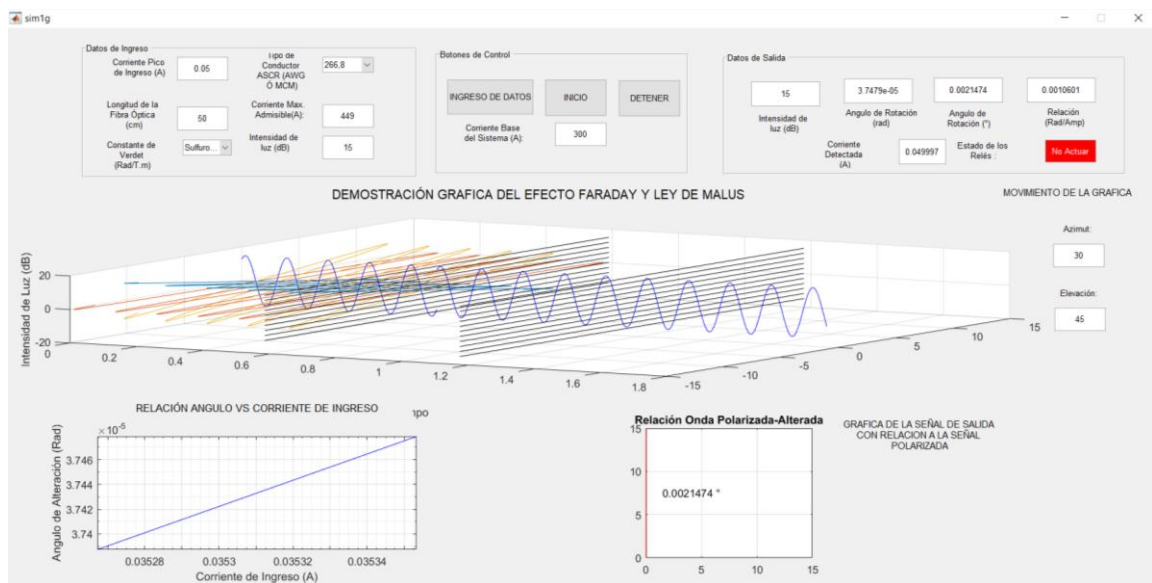


Figura 61. Resultados de la quinta prueba A al modelamiento. [Autores]

### Prueba número 5-B

Se realiza la prueba para la sensibilidad que tiene el transformador óptico a la variación de corrientes elevadas. Con ello poder saber si los datos de la prueba número 1 como va a actuar al ser alimentada con corrientes mayores a 1000 Amperios

Datos:

$R_{conduc}$  7.737 mm

$I$  1950 Amperios

$I_{rms}$  1378085822 Amperios

$IL$  15 dB

$L_f$  50 cm

$Cv_{ZnS}$  82 rad/T.m

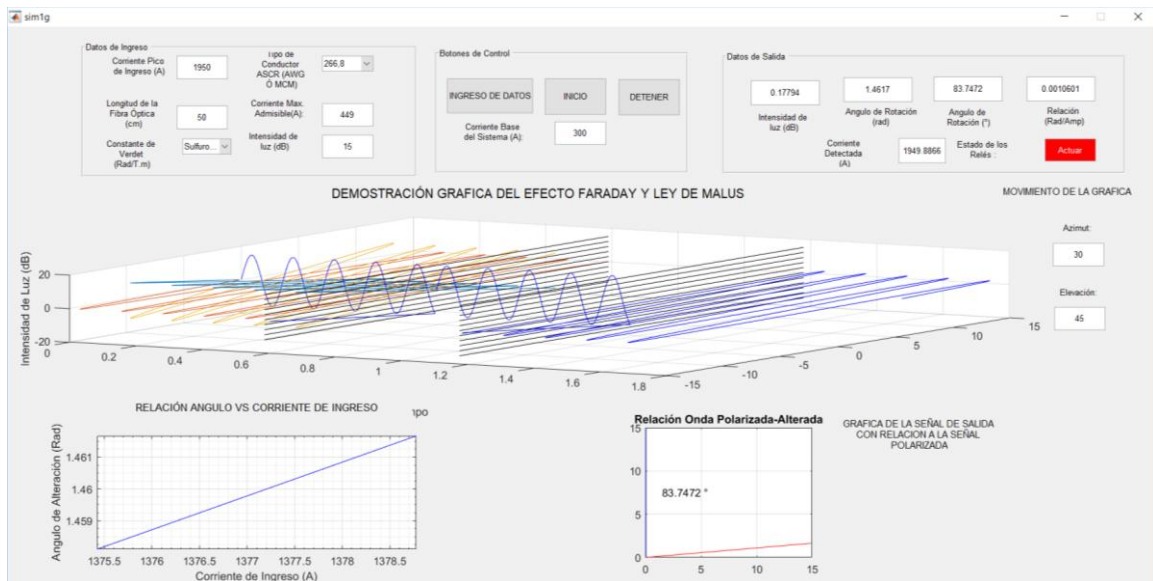


Figura 62. Resultados de la quinta prueba B al modelamiento. [Autores]

Los resultados obtenidos en la prueba son los siguientes:

- El transformador óptico de corriente es una alternativa muy eficiente para la lectura de corrientes de sistemas de protecciones y medida, por una parte es capaz de medir corrientes muy bajas como fracciones de amperios y por otro lado corrientes muy altas llegando a las kA sin tener una alteración de su medida.
- Se pueden utilizar los mismos dispositivos para diferentes medidas tanto corrientes extremadamente altas como pueden ser en fallas o tan bajas como podrían ser de control, al no variar de manera significativa la intensidad de luz de salida a la variación de los radios de los diferentes conductores. La única variación del transformador óptico sería en la programación a su vez el rango de lectura de datos del sensor de luz ya solo variaría en la intensidad de luz que va a recibir. Aparte de ello se puede apreciar que el dispositivo detecta un ángulo de la corriente como de falla y envía a que se active los relés de protección
- No necesita protecciones adicionales para corrientes altas o sensores diferentes para corrientes bajas el dispositivo sería el mismo. Lo que hace que sea mucho más amplio su campo donde puede ser utilizado y al depender de una programación sus datos son confiables y con rango de error mínimo.

## 12. BIBLIOGRAFÍA:

- [1] M. A. Rodríguez Pozueta, Transformadores, Cantabria , 2008.
- [2] E. Ras, Transformadores de potencia de medida y de protección, Barcelona : Edición renovada , 2001.
- [3] A. L., Transformadores, Mexico , 2015.
- [4] J. J. Alvarado Salcedo , Dispositivos Opticos Digitales para medición y protección en sistemas de Alta tension, Guayaquil, 2002.
- [5] F. A. Aldana de León, SISTEMAS ÓPTICOS DIGITALES PARA MEDICIÓN, Guatemala, 2007.
- [6] M. J. García, «Polarizacion de ondas electromagnéticas planas,» UAL, 2013.
- [7] J. A. D. D. P. C. R. L. S. F. M. S. J. L. Higuera, Diseño de un transductor óptico de volumen con espejo interno para la medida de corrientes mediante el efecto Faraday.
- [8] Osorio, Jaramillo y Smith , «Revision del efecto Kerr magneto óptico,» 1 Diciembre 2008. [En línea]. Available: <http://www.scielo.org.mx/pdf/rmfe/v55n1/v55n1a9.pdf>. [Último acceso: 19 06 2018].
- [9] C. L., Dispositivos fotónicos basados en medios cristalinos, 2012.
- [10] M. H, Transductor óptico de corriente, Editora 3, 2014.
- [11] A. M. -. L. Casado, «Diseño y desarrollo de un sensor de corriente óptico de bajo costo,» PMC, EE.UU, 2013.
- [12] R. M. Sosa, «Ondas: Polarización,» CreativeCommons, México, 2012.
- [13] M. O. Nave, «Clasificación de la Polarización,» Luz y Visión , 2009.
- [14] L. Aristazábal, «Polarización de la Luz - Ley de Malus,» Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2010.
- [15] R. M. David, «Polarización y Ley de Malus,» Universidad Nacional Autónoma de

Mexico, México D.F. , 2016.

- [16] J. Kang, «Faraday Rotation Angle Measurement Based on Conoscopic Interference Pattern in Optical Current Transducer,» Energy Procedia , China , 2012.
- [17] B. Augusto, «Faraday y la teoría Electromagnética de la luz,» OpenMind, Alicante , 2015.
- [18] W. Durán, Desfasamiento de una señal óptica, Mexico, 2008.
- [19] G. R. Muñoz, «Nuevas tendencias en las medidas de intensidades,» Energy Harvesting, 2012.

# **ANEXOS**

## PROGRAMACIÓN:

### Programación llamada SIM 1G.m de en la ventana Command Window de MATLAB

En ella constan todos los interfaces hechos entre los programas y también funciones realizadas con los datos. Además la programación de las ecuaciones de las gráficas y sus datos. Por ultimo el llamado a una base de datos para los ingresos por selección que hay en el GUIDE. [Autores]

```
function varargout = sim1g(varargin)
% SIM1G MATLAB code for sim1g.fig
%   SIM1G, by itself, creates a new SIM1G or raises the existing
%   singleton*.
%
%   H = SIM1G returns the handle to a new SIM1G or the handle to
%   the existing singleton*.
%
%   SIM1G('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
%   function named CALLBACK in SIM1G.M with the given input arguments.
%
%   SIM1G('Property','Value',...) creates a new SIM1G or raises the
%   existing singleton*. Starting from the left, property value pairs
are
%   applied to the GUI before sim1g_OpeningFcn gets called. An
%   unrecognized property name or invalid value makes property
application
%   stop. All inputs are passed to sim1g_OpeningFcn via varargin.
%
%   *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
%   instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help sim1g

% Last Modified by GUIDE v2.5 11-Feb-2019 10:49:39

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @sim1g_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @sim1g_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [] , ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT
```

```

% --- Executes just before simlg is made visible.
function simlg_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to simlg (see VARARGIN)

% Choose default command line output for simlg
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes simlg wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);
global Ghandles;
global cont;
global Amp;
global run;
Amp=1;
Ghandles=handles;
axes(handles.axes1);
open_system('sim1');
set_param('sim1','StartFcn','localAddEventListener');
cont=0;
run=0;

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = simlg_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout  cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

function corri_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to corri (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of corri as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of corri as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function corri_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to corri (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

end

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function radco_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to radco (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
```

```
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
```

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
function lof_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
% hObject    handle to lof (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
```

```
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of lof as text
%       str2double(get(hObject,'String')) returns contents of lof as a
double
```

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
```

```
function lof_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to lof (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
```

```
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
```

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
```

```
function pop_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pop (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
```

```
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
```

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```

% --- Executes on button press in pushbutton2.
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

    rto= get_param('sim1/ang1','string');
set(angu,'string1',rto);

    %update the gui
% --- Executes on button press in detener.
function detener_Callback(hObject, eventdata, handles)
global run;
run=0;
set_param('sim1','SimulationCommand','stop');
clear;

% --- Executes on button press in pushbutton4.
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton4 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
global Amp;
db=load('BaseDatos.mat');
conductor=db.ConductorDB;
verdett=db.DatosVerdett;

Amp=str2double(get(handles.int1,'String'));

amp=(get(handles.corri,'String'));
set_param('sim1/Sine','Amplitude',amp);

radio=get(handles.radco,'Value');
rad=num2str(conductor(radio,1));
cmax=num2str(conductor(radio,2));
set(handles.txtCMax,'String',cmax)
%load_system('sim1');
%find_system('Name','sim1');
%open_system('sim1');
set_param('sim1/Dconduct','value',rad);

long=get(handles.lof,'string');
%load_system('sim1');
%find_system('Name','sim1');
%open_system('sim1');
set_param('sim1/logfo','value',long);

intluz=get(handles.int1,'string');
%load_system('sim1');
%find_system('Name','sim1');
%open_system('sim1');
set_param('sim1/intu','value',intluz);

ibase=get(handles.ibase,'string');
%load_system('sim1');
%find_system('Name','sim1');

```

```

%open_system('sim1');
set_param('sim1/ibase','value',ibase);

a=get(handles.pop,'value');
texto=num2str(verdett(a));
%load_system('sim1');
%find_system('Name','sim1');
%open_system('sim1');
set_param('sim1/Cove','value',texto);

set_param('sim1','SimulationCommand','Update');

function intl_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to intl (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of intl as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of intl as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function intl_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to intl (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%        See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit6_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit6 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit6 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit6 as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit6_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit6 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%        See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function edit7_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit7 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit7 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit7 as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit7_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit7 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%        See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in pushbutton5.
function pushbutton5_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton5 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% --- Executes on selection change in pop.
function pop_Callback(hObject, eventdata, handles)

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function popupmenu2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pop (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: popupmenu controls usually have a white background on Windows.
%        See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function cov_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to cov (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of cov as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of cov as a
double

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function cov_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to cov (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function angu_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to angu (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of angu as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of angu as a
double

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function angu_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to angu (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

% --- Executes on button press in inicio.
function inicio_Callback(hObject, eventdata, handles)
global Ghandles;
global cont;
global fase;
global run;
fase=0;
cont=0;
Ghandles=handles;
axes(handles.axes1);
hold off;
set_param('sim1','SimulationCommand','Start');
run=1;

```

```

function eventhandle = localAddEventListener
eventhandle = add_exec_event_listener('sim1/Out1', ...
    'PostOutputs',
@localEventListener);

```

```

function localEventListener(block, eventdata)
global Ghandles;
global cont;
global Xant;
global Yant;
global Xmax;
global Ymax;
global fase;
global Amp;
global X;
global Y;
global IntLuz2;
global simTime

frec=8;
fase=fase+0.5;
Amp=str2double(get(Ghandles.int1, 'String'));
az=str2double(get(Ghandles.txtAz, 'String'));
el=str2double(get(Ghandles.txtEl, 'String'));

% obtener los valores
simTime = block.CurrentTime;
X = block.InputPort(1).Data.a;
Y = block.InputPort(1).Data.b;
IntLuz2 = block.InputPort(1).Data.c;
Relacion = block.InputPort(1).Data.d;
set(Ghandles.txtRel, 'String', num2str(Relacion));
corrien = block.InputPort(1).Data.e;
set(Ghandles.corrien, 'String', num2str(corrien));
ang2 = block.InputPort(1).Data.f;

if (Y >=ang2)
    set(Ghandles.estado, 'String', 'Actuar');
else
    set(Ghandles.estado, 'String', 'No Actuar');
end

ang=-Y;
if (cont==0)
    Xant=X;
    Yant=Y;
    Xmax=0;
    Ymax=0;
end
if (X>Xmax)
    Xmax=X;
end
if (Y>Ymax)
    Ymax=Y;
end
cont=cont+1;
ax1=Ghandles.axes1;
ax2=Ghandles.axes2;
ax3=Ghandles.axes9;
loglog(ax1, [Xant X], [Yant Y], 'b');
%axis(ax1, [0 Xmax 0 Ymax]);
grid (ax1, 'on');
hold (ax1, 'on');
xlabel(ax1, 'Corriente de Ingreso (A)');
ylabel(ax1, 'Angulo de Alteración (Rad)');
%----- graficar las ondas -----

```

```

x=0:0.01*pi/frec:3*pi/frec;
tamx=int16(length(x)/2);
y1=zeros(1,length(x));
matrizGiro45=[1 0 0;
              0 cos(pi/4) -sin(pi/4);
              0 sin(pi/4) cos(pi/4)];
matrizGiro90=[1 0 0;
              0 cos(pi/2) -sin(pi/2);
              0 sin(pi/2) cos(pi/2)];
matrizGiro135=[1 0 0;
               0 cos(3*pi/4) -sin(3*pi/4);
               0 sin(3*pi/4) cos(3*pi/4)];
fase=fase+0.5;
matrizGiro=[1 0 0;
            0 cos(ang) -sin(ang);
            0 sin(ang) cos(ang)];

%onda original en el eje Z
z1=Amp*sin(2*pi*frec*x+fase);
z2=IntLuz2*sin(2*pi*frec*x+fase);
onda1=[x;y1;[z1(1:tamx) z2(tamx+1:end)]];
%onda girada 45 en angulos
onda2=zeros(3,tamx);
%onda girada 90 en angulos
onda3=zeros(3,tamx);
%onda girada 135 en angulos
onda4=zeros(3,tamx);
for i=1:tamx
    %generar onda 1 con desfase de parametro
    onda1(:,i+tamx-1)=matrizGiro*[x(i+tamx-1);y1(i+tamx-1);z1(i+tamx-
1)];
    %generar onda 2 con giro de 45
    onda2(:,i)=matrizGiro45*[x(i);y1(i);z1(i)];
    %generar onda 3 con giro de 90
    onda3(:,i)=matrizGiro90*[x(i);y1(i);z1(i)];
    %generar onda 3 con giro de 90
    onda4(:,i)=matrizGiro135*[x(i);y1(i);z1(i)];
end
%graficar la rejilla del filtro
for i=-Amp:Amp/5:Amp
    plot3(ax2,[x(tamx) x(tamx)],[-Amp Amp],[i i],'k');
    plot3(ax2,[2*x(tamx) 2*x(tamx)],[-Amp Amp],[i i],'k');
    hold(ax2,'on');
end
plot3(ax2,onda1(1,1:tamx),onda1(2,1:tamx),onda1(3,1:tamx),'b-');

plot3(ax2,(onda1(1,tamx))+onda1(1,tamx:end),onda1(2,tamx:end),onda1(3,tamx:
end),'b-');

plot3(ax2,(onda1(1,tamx))+onda1(1,1:tamx),onda1(2,1:tamx),onda1(3,1:tamx),'
b-');

plot3(ax2,onda2(1,:),onda2(2,:),onda2(3,:),'-');
plot3(ax2,onda3(1,:),onda3(2,:),onda3(3,:),'-');
plot3(ax2,onda4(1,:),onda4(2,:),onda4(3,:),'-');
grid(ax2,'on');
xlabel(ax2,'Transición en el Tiempo');
ylabel(ax2,'');
zlabel(ax2,'Intensidad de Luz (dB)');
view(ax2,az,el);
hold(ax2,'off');

```

```

%      %graficar la rejilla del filtro
%      for i=-Amp:Amp/5:Amp
%          plot3(ax3,[x(tamx) x(tamx)],[-Amp Amp],[i i],'k');
%          hold (ax3,'on');
%      end
%      plot3(ax3,onda1(1,tamx:end),onda1(2,1:tamx),onda1(3,1:tamx),'-');
%      grid (ax3,'on');
%      xlabel(ax3,'Transición en el Tiempo');
%      ylabel(ax3,'');
%      zlabel(ax3,'Intensidad de Luz');
%      view(ax3,35,45);
%      hold (ax3,'off');
%      %graficar la rejilla del filtro
%      for i=-Amp:Amp/5:Amp
%          plot3(ax4,[x(tamx) x(tamx)],[-Amp Amp],[i i],'k');
%          hold (ax4,'on');
%      end
%      plot3(ax4,onda1(1,tamx:end),onda1(2,tamx:end),onda1(3,tamx:end),'-');
%      grid (ax4,'on');
%      xlabel(ax4,'Transición en el Tiempo');
%      ylabel(ax4,'');
%      zlabel(ax4,'Intensidad de Luz');
%      view(ax4,35,45);
%      hold (ax4,'off');
plot(ax3,[0 0],[0 Amp'],'-b',[0 Amp*sin(Y)],[0 Amp*cos(Y)],'-r');
grid (ax3,'on');
axis(ax3,[0 Amp 0 Amp]);
title(ax3,'Relación Onda Polarizada-Alterada');

axes(ax3)
text(Amp/10,Amp/2,strcat(num2str(rad2deg(Y)),' °'))

%-----

set(Ghandles.angu,'String',num2str(IntLuz2));
set(Ghandles.angu2,'String',num2str(Y));
set(Ghandles.angu2grad,'String',num2str(rad2deg(Y)));
Xant=X;
Yant=Y;

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function angu2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to angu2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function txtRel_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

% hObject    handle to txtRel (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of txtRel as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of txtRel as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function txtRel_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to txtRel (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function angu2grad_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to angu2grad (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of angu2grad as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of angu2grad as
a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function angu2grad_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to angu2grad (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function txtAz_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to txtAz (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of txtAz as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of txtAz as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function txtAz_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

```

```
% hObject    handle to txtAz (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     empty - handles not created until after all CreateFcns called
```

```
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
```

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
function txtEl_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
% hObject    handle to txtEl (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)
```

```
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of txtEl as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of txtEl as a
double
```

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
```

```
function txtEl_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
% hObject    handle to txtEl (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     empty - handles not created until after all CreateFcns called
```

```
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
```

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
function txtCMax_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
% hObject    handle to txtCMax (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)
```

```
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of txtCMax as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of txtCMax as a
double
```

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
```

```
function txtCMax_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
% hObject    handle to txtCMax (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     empty - handles not created until after all CreateFcns called
```

```
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
```

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```

function corrien_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to corrien (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of corrien as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of corrien as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function corrien_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to corrien (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%        See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function ibase_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to ibase (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of ibase as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of ibase as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function ibase_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to ibase (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%        See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function estado_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to estado (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of estado as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of estado as a
double

```

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function estado_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to estado (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

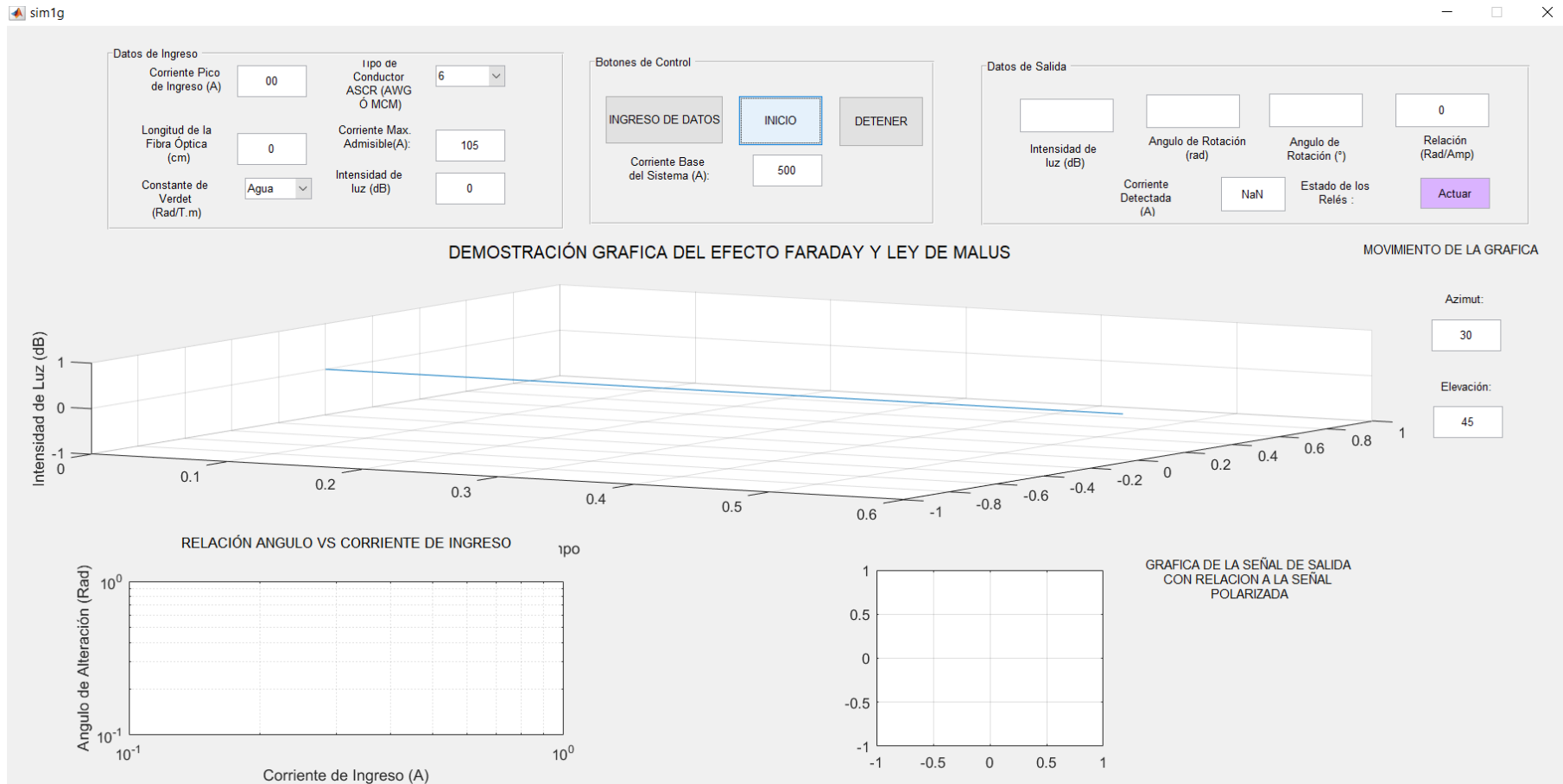
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

**Programa ejecutándose en condiciones optimas**

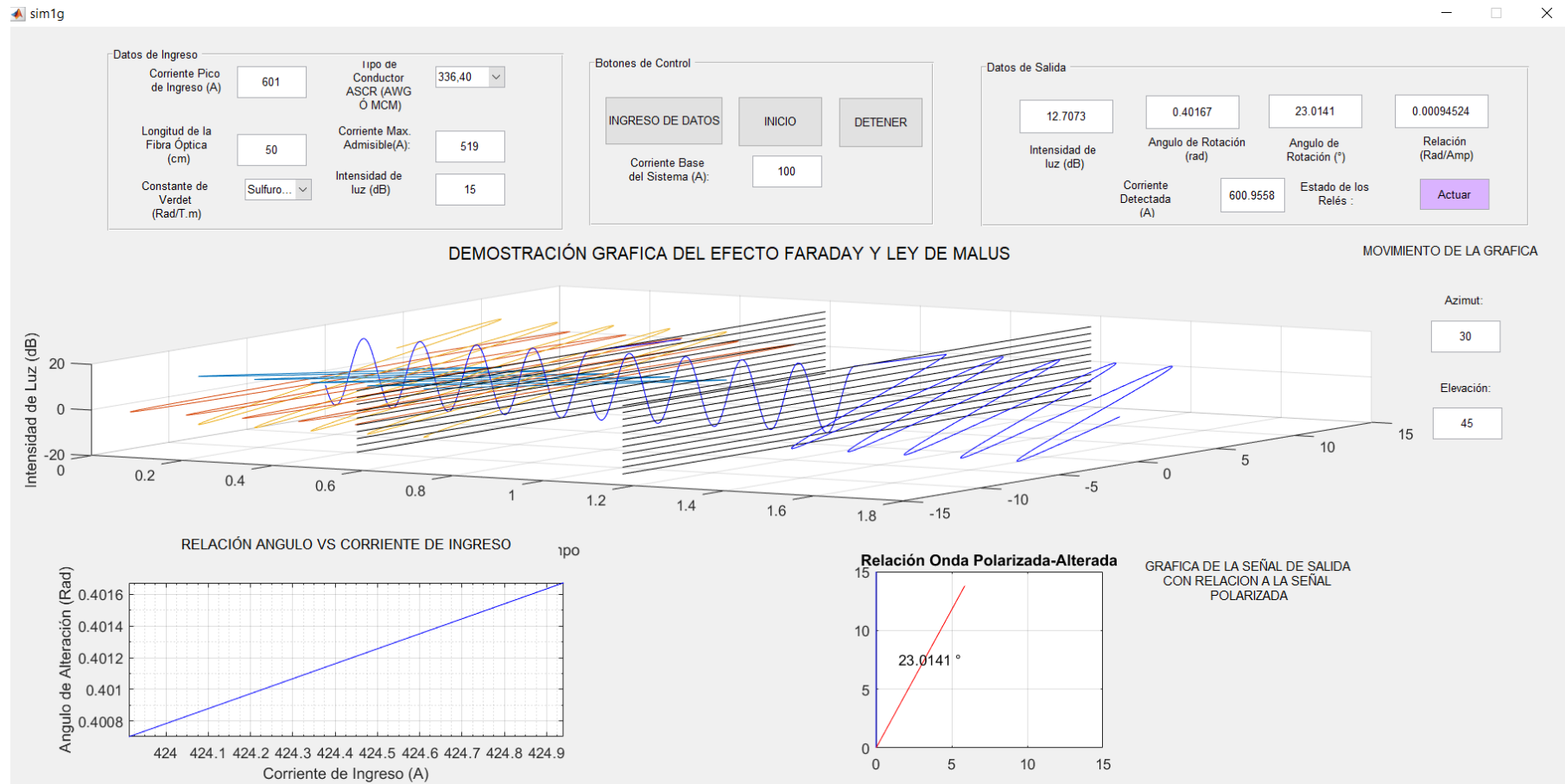
Portada que da inicio al programa. [Autores]



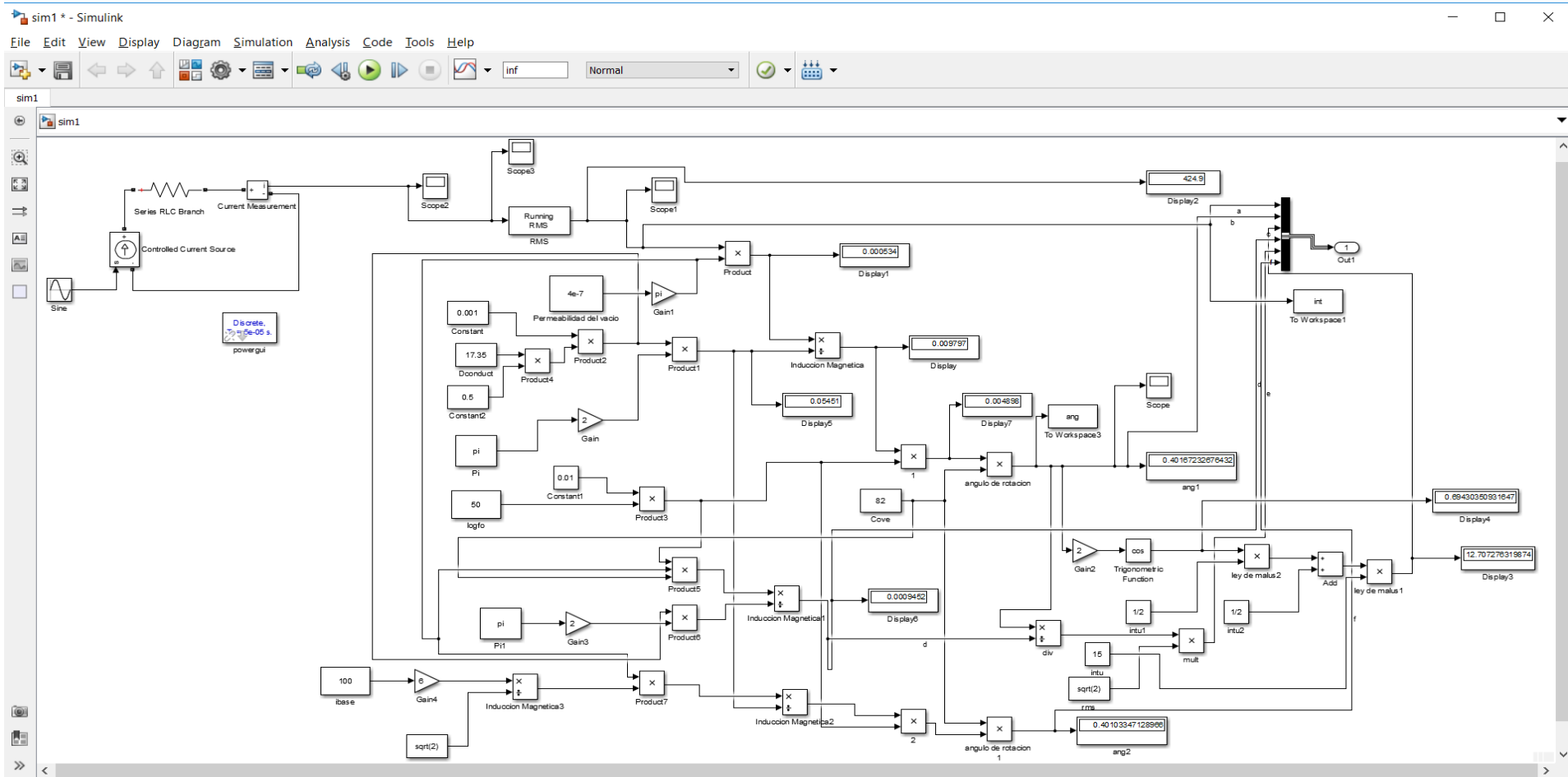
Luego de que presionar el botón de modelamiento en la portada, procede a ejecutar el archivo “.fig” donde ingresamos los datos de ingreso.  
 [Autores]



Una vez ingresado los datos se procede a presionar el botón de ingreso de datos y posterior el botón inicio con ello se puede observar los resultados en las gráficas y en el bloque de datos de salida. [Autores]



En la pantalla del SIMULINK se puede observar en tiempo real los valores de cada uno de los cálculos matemáticos hechos por la programación matemática. [Autores]



**DATOS DEL GRUPO DE TRABAJO:**

*Docente Tutor: Msc. Edwin Marcelo Lema Guamán*

*E-mail: [edwin.lema@utc.edu.ec](mailto:edwin.lema@utc.edu.ec)*

*Teléfono: 0959046577*

*Autor 1: Klever Santiago Chasi Alarcón*

*E-mail: [santychazzi1995@gmail.com](mailto:santychazzi1995@gmail.com)*

*Teléfono: 0998023602*

*Autor 2: Edison Stalyn López Bonito*

*E-mail: [eddi.94lopez@gmail.com](mailto:eddi.94lopez@gmail.com)*

*Teléfono: 0999722919*