



UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN

CAMPUS LOMA BONITA

INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

APLICACIÓN DEL INTERFERÓMETRO DE SAGNAC DE
FIBRA ÓPTICA PARA CONTROLAR UN MECANISMO DE
MOVIMIENTO ANGULAR

Tesis profesional que para obtener el título de:

INGENIERA EN MECATRÓNICA

Presenta:

ITZAMARY ROMERO SOSA

Director de tesis:

Dr. FRANCISCO GUTIÉRREZ ZAINOS

LOMA BONITA, OAXACA, MÉXICO, 2018



UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN
CAMPUS LOMA BONITA

INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

APLICACIÓN DEL INTERFERÓMETRO DE SAGNAC DE FIBRA ÓPTICA
PARA CONTROLAR UN MECANISMO DE MOVIMIENTO ANGULAR

Tesis que presenta la

C. Itzamary Romero Sosa

Para obtener el título de
INGENIERO

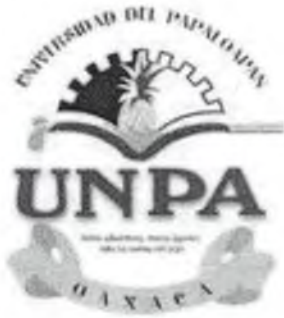
En la especialidad de

Ingeniería en Mecatrónica

Director de Tesis: **Dr. Francisco Gutiérrez Zainos**

Co-asesor de Tesis: **Dr. Mauro Sánchez Sánchez**

Loma Bonita, Oaxaca, México, 2018





UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN

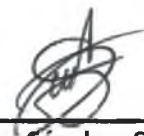
Campus Loma Bonita


INGENIERÍA EN MECATRÓNICA


LA PRESENTE TESIS TITULADA "APLICACIÓN DEL INTERFERÓMETRO DE SAGNAC DE FIBRA ÓPTICA PARA CONTROLAR UN MECANISMO DE MOVIMIENTO ANGULAR", PRESENTADA POR LA SUSTENTANTE DE LICENCIATURA C. ITZAMARY ROMERO SOSA BAJO LA DIRECCIÓN DEL DR. FRANCISCO GUTIÉRREZ ZAINOS, HA SIDO REVISADA Y ACEPTADA POR EL COMITÉ EXAMINADOR PARA SER DEFENDIDA EN EL EXAMEN PROFESIONAL Y OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERA EN MECATRÓNICA.

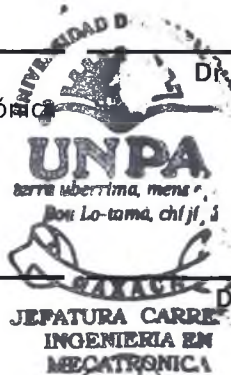

M. en C. José Luis Nájera Sánchez
Jefe de la Carrera de Ingeniería en Mecatrónica


Dr. Francisco Gutiérrez Zainos
Director de Tesis


Dr. Mauro Sánchez Sánchez
Presidente


Dr. Álvaro Cabrera Amado
Secretario


Dr. Francisco Gutiérrez Zainos
Vocal


UNPA
tierra uberrima, mensura boni Lo-tama, chíji, i
JEFATURA CARRERA DE INGENIERIA EN MECATRONICA

Loma Bonita, Oaxaca, México. Junio 2018.

Dedicatoria

A Dios por estar conmigo en cada paso que doy y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo este periodo.

A mi mamá que gracias a sus consejos y palabras de aliento me han ayudado a crecer como persona y a luchar por lo que quiero, gracias por enseñarme valores que me han llevado a alcanzar esta gran meta.

A mi papá por apoyarme en esta etapa, ya que sin usted nunca lo hubiese logrado.

A mis hermanos, gracias por su apoyo, cariño y por estar en los momentos más importantes de mi vida. Este logro también es de ustedes.

A mis sobrinos, que siempre serán mi fuente de inspiración y de superación.

A mi novio por la comprensión y confianza que me ha dado en momentos difíciles.

A mis compañeros y amigos presentes y pasados quienes sin esperar nada a cambio compartieron su conocimiento, alegría y tristeza. En especial a mi gran amiga Belem por todos los momentos que pasamos y por siempre haber estado ahí.

Agradecimientos

A la Universidad del Papaloapan por haber sido mi casa durante estos últimos años.

Al Dr. Francisco Gutiérrez Zainos, por permitirme trabajar a su lado, por compartir su tiempo y sus conocimientos.

A los revisores Dr. Mauro, Dr. Alvaro, M.C. Esteban, por tomarse el tiempo de leer este trabajo y por las observaciones realizadas.

A los profesores quienes nunca desistieron al enseñarme y a quienes les debo gran parte de mis conocimientos.

A los técnicos por el apoyo brindado durante esta etapa. En especial a Heriberto quien más que un técnico es mi amigo.

A los encargados de embellecer nuestra escuela, intendencia, jardinería y mantenimiento.

Resumen

Este trabajo presenta una aplicación del interferómetro de Sagnac de fibra óptica para controlar un mecanismo de movimiento angular. La configuración propuesta basa su funcionamiento en controlar la transmisión de luz en lugar de corriente como lo hacen los sistemas basados en potenciómetros. La inmunidad a radiaciones electromagnéticas y la alta sensibilidad del interferómetro sumados a sus propiedades de simetría hacen posible insertar dos placas retardadoras en el lazo del interferómetro de manera simétrica con el propósito de ajustar la transmisión según el ángulo de rotación de estas.

Se demuestra que girando las placas retardadoras podemos ajustar el movimiento angular de un mecanismo, en este trabajo se propone un mecanismo péndulo-hélice, formado por una varilla metálica en la que se fija en uno de sus extremos un motor con hélice, de tal manera que un cambio en el ángulo de rotación de las placas retardadoras hace variar la velocidad del motor y por lo tanto la posición angular del brazo del péndulo. La polarización de la luz dentro del interferómetro juega un papel importante para poder lograr un mayor desplazamiento angular. La amplitud de salida del interferómetro pasa primero por un detector de alta velocidad y se acondiciona mediante amplificadores operacionales a una de las entradas del convertidor analógico-digital de la tarjeta FPGA Spartan 3E 1600E que además cuenta con un amplificador de ganancia programable. La salida digital del convertidor es transformada a una señal PWM que controla la velocidad del motor con hélice. Tanto el amplificador como el convertidor analógico-digital y la señal PWM son programados en el FPGA de la tarjeta mediante máquinas de estado finito de tal forma que a cada ángulo presente en una de las placas retardadoras le corresponde un ancho de pulso que controla la velocidad del motor con hélice manteniendo al péndulo en un ángulo fijo. Se presentan simulaciones numéricas del interferómetro con dos placas retardadoras que muestran el comportamiento, y por lo tanto las variaciones, de la amplitud de salida al rotar las placas retardadoras en distintas direcciones. Por último se realiza una comparación del comportamiento de la posición angular de las placas retardadoras y la posición angular del péndulo.

Abstract

This work presents an application of the fiber optic Sagnac interferometer to control an angular movement mechanism. The proposed configuration bases its operation on controlling the transmission of light instead of current as systems based on potentiometers do. The immunity to electromagnetic radiation and the high sensitivity of the interferometer added to with its symmetry properties make it possible to insert two retarder plates in the interferometer loop symmetrically in order to adjust the transmission according to the angle of rotation of these.

We show that by rotating the retarder plates we can adjust the angular movement of a mechanism, in this paper proposed a pendulum-helix mechanism, formed by a metal rod in which a motor with a helix is fixed at one of its ends, in such a way that a change in the angle of rotation of the retarder plates varies the speed of the motor and therefore the angular position of the pendulum arm. The polarization of the light inside the interferometer plays an important role in order to achieve a greater angular displacement. The output amplitude of the interferometer passes first through a high-speed detector and is conditioned by operational amplifiers to one of the inputs of the analog-digital converter of the Spartan 3E 1600E FPGA card, which also has a programmable gain amplifier. The digital output of the converter is transformed to a PWM signal that controls the speed of the motor with helix. Both the amplifier and the analog-digital converter and the PWM signal are programmed in the FPGA of the card by means of finite state machines in such a way that to each angle present in one of the retarder plates corresponds a pulse width that controls the speed of the motor with helix holding the pendulum at a fixed angle. Numerical simulations of the interferometer are presented with two retarder plates that show the behavior, and therefore the variations, of the output amplitude when rotating the retarder plates in different directions. Finally, a comparison of the behavior of the angular position of the retarder plates and the angular position of the pendulum is made.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema	3
1.2. Justificación	3
1.3. Objetivos	4
1.3.1. Objetivo general:	4
1.3.2. Objetivos específicos:	4
1.4. Antecedentes del interferómetro de Sagnac	4
2. Teoría del Sagnac	9
2.1. Modelo matemático del interferómetro de Sagnac de fibra óptica	9
2.2. Análisis numérico del interferómetro de Sagnac empleando un acoplador simétrico y dos placas retardadoras en el lazo	12
2.3. Simulaciones numéricas del Sagnac	15
3. Arreglo experimental	20
3.1. Programación del SPARTAN-3E	29
3.1.1. Interfaz SPI	30
3.1.2. Diseño jerárquico en VHDL	30
3.2. Etapa del control de polarización	35
4. Resultados experimentales	38
4.1. Comparación de resultados teóricos y experimentales a la salida del interferómetro	38
4.2. Cambios de la señal PWM debido a la rotación de una de las placas.	40
4.3. Análisis de la posición angular de la hélice en relación con la posición de las placas retardadoras	43
5. Conclusiones	47
Bibliografía	48
Anexo 1	50
Polarización	51
Estados de polarización	51

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	IV
Anexo 2	54
Convertidor analógico-digital	55
Pre-amplificador programable	55
Convertidor Analógico-Digital (ADC)	57
Anexo 3	59
Modelo del sistema péndulo-hélice	60

Índice de figuras

1.1.	Configuración básica de un interferómetro de Sagnac de fibra óptica	2
1.2.	Interferómetro de espejos	5
2.1.	Esquema del NOLM	9
2.2.	Campos de entrada y salida en el interferómetro.	10
2.3.	Sagnac con dos placas retardadoras	13
2.4.	Resultados de simulación: a) QWP2 = 0°, b) QWP2 = 100°, c) QWP2 = 180°	16
2.5.	Resultados de simulación: a) QWP1 = 0°, b) QWP1 = 100°, c) QWP1 = 180°	17
2.6.	Resultados de simulación cuando las QWP's rotan en un mismo sentido . . .	17
2.7.	Resultado de simulación cuando las QWP's rotan en sentidos contrarios . . .	18
2.8.	Resultados de simulación cuando se consideran distintas longitudes en los brazos, a) QWP2 = 0°, b) QWP2 = 100°, c) QWP2 = 180°	18
2.9.	Resultados de simulación cuando se consideran distintas birrefringencias en los brazos, a) QWP2 = 0°, b) QWP2 = 100°, c) QWP2 = 180°	19
3.1.	Arreglo experimental	20
3.2.	Representación esquemática de la evolución de la polarización en el interferómetro bajo estudio	21
3.3.	Diodo láser L980P010	22
3.4.	Controlador de láser universal IP500	23
3.5.	Alineación del láser	23
3.6.	Adaptador de fibra óptica	24
3.7.	Controlador de polarización de tres paletas	24
3.8.	Acoplador de fibra óptica 50/50	25
3.9.	Placa retardadora	25
3.10.	Lazo de fibra óptica	26
3.11.	Detector para fibra óptica DET01CFC	26
3.12.	Arreglo de amplificadores operacionales	27
3.13.	Tarjeta Spartan 3E	27
3.14.	Osciloscopio Tektronic de cuatro canales	28
3.15.	Etapa de potencia L298	28
3.16.	Sistema péndulo-hélice	29
3.17.	Máquina de estados finitos	31
3.18.	Diagrama de estado INICIO	31

3.19. Diagrama de estado GANANCIA	32
3.20. Diagrama del estado CONVERSIÓN	33
3.21. Diagrama estado SALIDA	34
3.22. Diagrama del módulo PWM	34
3.23. Implementación de hardware de alto nivel	35
3.24. Etapa de control de polarización	36
3.25. a) Polarización elíptica, b) Polarización lineal, c) Polarización circular. Visualizadas directamente del osciloscopio	37
4.1. Comparación de resultados experimentales y teóricos: a) QWP2 = 0°, b) QWP2 = 100°, c) QWP2 = 180°	39
4.2. Comparación de resultados experimentales y teóricos: a) QWP1 = 0°, b) QWP1 = 100°, c) QWP1 = 180°	39
4.3. Comparación de resultados teóricos y de resultados experimentales cuando las QWP rotan en direcciones contrarias	40
4.4. Representación de los ejes de la placa retardadora	41
4.5. Señal de salida PWM dependiendo el ángulo de QWP2	41
4.6. Señal de salida PWM dependiente del ángulo de rotación de QWP1.	42
4.7. Representación de ejes del sistema péndulo-hélice	43
4.8. Ángulo de posición del péndulo-hélice dependiendo del ángulo de QWP2 (QWP1 permanece fija).	44
4.9. Ángulo de posición del péndulo-hélice dependiendo del ángulo de QWP1 (QWP2 permanece fija).	45
5.1. Luz polarizada linealmente	52
5.2. Luz polarizada circularmente	53
5.3. Luz polarizada elípticamente	54
5.4. Circuito de captura analógica	56
5.5. Protocolo de comunicación del Pre-Amplificador.	57
5.6. Diagrama de tiempos del Pre-Amplificador	57
5.7. Interfaz de conversión de analógico a digital	59
5.8. Vista explotada del sistema péndulo-hélice	60

Capítulo 1

Introducción

El campo de las fibras ópticas ha registrado un gran crecimiento y avance en los últimos años. Desde el comienzo, fue propuesta como medio para transmitir información en los sistemas de comunicación siendo esta uno de los medios más eficientes y confiables.

La tecnología de fibras ópticas ha sido objeto de considerables investigaciones y desarrollos lo que permitió mejorar en forma progresiva su calidad como guía de ondas. Así mismo también en los sistemas de comunicaciones ópticas se han convertido en uno de los principales métodos para transmisión de datos de un punto a otro del planeta.

Este desarrollo produjo un notable avance en la industria opto-electrónica. En donde impactaron positivamente en la tecnología de sensores de fibra óptica, la cual se ha visto beneficiada con el surgimiento de diversos componentes. Estos sensores se clasifican usualmente en dos grandes clases: extrínsecos e intrínsecos.

Los sensores de fibra óptica extrínsecos se distinguen por la característica de detección la cual tiene lugar en una región fuera de la fibra, a diferencia de los intrínsecos en los que la detección tiene lugar dentro de la propia fibra [1].

Existen gran variedad de sensores de fibra óptica que basan su funcionamiento en los cambios que se producen en la estructura de la fibra debido a una perturbación externa que origina la pérdida de potencia o un cambio en la longitud de onda de la luz que viaja dentro de ella, ocasionados por algún elemento que se acople a la misma. Estos elementos pueden producir torsión, presión, estiramiento o compresión de la fibra. Muchos diseños emplean configuraciones interferométricas debido a la alta sensibilidad que presentan los arreglos. Una de las configuraciones que presenta mayor sensibilidad se basa en el interferómetro de Sagnac.

La figura 1.1 muestra la configuración básica de un interferómetro de Sagnac de fibra óptica, el cual está compuesto por un acoplador direccional de cuatro puertos con dos de ellos unidos por un lazo de fibra. Un haz de luz que entra por uno de los puertos, es dividido por el acoplador en dos haces de igual amplitud si el acoplador es 50/50, estos haces viajan

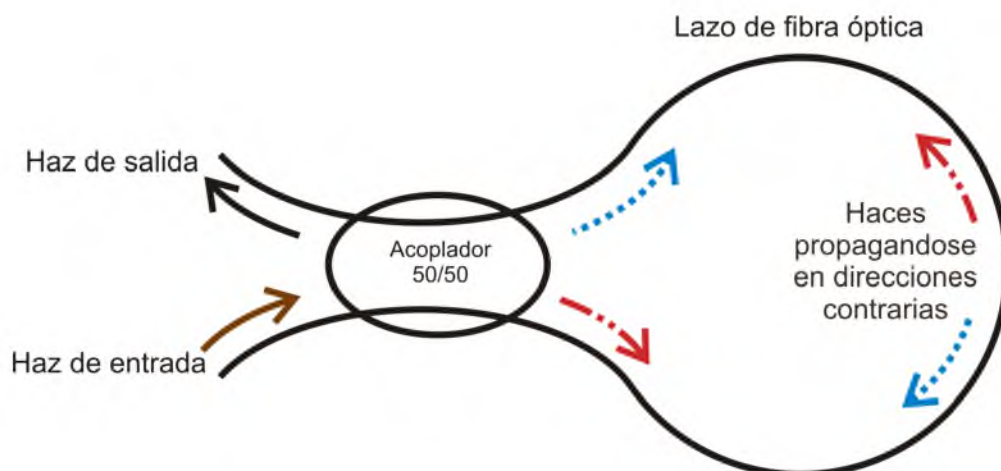


Figura 1.1: Configuración básica de un interferómetro de Sagnac de fibra óptica

en direcciones opuestas por el lazo de fibra para volver a entrar al acoplador y producir interferencia.

Este interferómetro presenta una configuración muy compacta y tiene ciertas ventajas funcionales que le permiten competir satisfactoriamente con otros dispositivos de fibra óptica. Es flexible y fácil de transportar, presenta una respuesta relativamente rápida (dependiendo de los aparatos de monitoreo y no del esquema mismo), no es afectado por perturbaciones externas como por ejemplo frecuencias eléctricas y posee pérdidas más bajas que cualquier otro esquema interferométrico formado con fibra óptica [2].

Debido a que el interferómetro de Sagnac es altamente sensible a cambios producidos en su lazo e inmune a radiaciones electromagnéticas, además de que su transmisión resulta ser simétrica a cambios producidos en los brazos del interferómetro, se puede emplear una placa retardadora de fibra en cada brazo del interferómetro que provoca un retardo en el haz de salida, esta acción provoca una variación en la señal transmitida de manera proporcional a la rotación de las placas, de esta manera se tiene un transductor que podemos emplear para controlar la posición angular de un sistema mecatrónico. En este trabajo se propone emplear el interferómetro de Sagnac de fibra óptica para controlar el movimiento angular de un mecanismo. Para esto será necesario convertir la señal transmitida por el interferómetro en una señal PWM que controlará la velocidad del motor del mecanismo. Esta conversión se hará por medio de un convertidor analógico-digital y digital-analógico configurados y programados en un FPGA de la tarjeta Spartan 3E de Xilinx, la cual cuenta con dos canales de entrada analógica provistos de un pre-amplificador de ganancia programable. La comunicación se hace a través de un bus SPI (Serial Peripheral interface) [3].

1.1. Planteamiento del problema

Existen sistemas mecatrónicos en los cuales se utilizan comúnmente potenciómetros como sensores de posición angular de un motor o mecanismo. Estos potenciómetros están fabricados a base de materiales conductores y semiconductores que presentan la desventaja de que la resistencia varía dependiendo de la posición de un contacto deslizante que puede producir fluctuaciones de señal no deseadas que puedan alterar el comportamiento del sistema al cual se acoplan. Por otro lado, la fibra óptica es un material que por sus características elimina el problema anterior ya que, en lugar de señales de voltaje a base de electrones, transmite señales de luz a base de fotones.

Dada la problemática se desarrolla un dispositivo para controlar el movimiento angular de un mecanismo basado en el interferómetro de Sagnac de fibra óptica ya que es altamente sensible a cambios producidos en su lazo e inmune a radiaciones electromagnéticas, además de que su transmisión resulta ser simétrica a cambios producidos en los brazos del interferómetro. Debido a lo anterior se propone implementar una placa retardadora en cada brazo del interferómetro con el objetivo de variar la señal transmitida de manera proporcional a la rotación de las placas, y de esta manera emplear el arreglo como un transductor y controlar la posición angular de un mecanismo.

1.2. Justificación

Debido a que los potenciómetros que se utilizan convencionalmente en el control de la velocidad y/o posición angular de un actuador producen ruido al momento de variar su resistencia, pueden afectar el funcionamiento del sistema que lo usa. Se propone utilizar el interferómetro de Sagnac de fibra óptica para controlar el movimiento angular de un mecanismo, esto con el fin de sustituir los sistemas basados en materiales conductores como es el caso del potenciómetro.

De acuerdo con la revisión bibliográfica realizada hasta el momento el interferómetro de Sagnac empleando fibra óptica ha demostrado ser el arreglo interferométrico que proporciona mayor sensibilidad a cambios producidos en la estructura de la fibra que lo conforma. Esto debido a la simetría en ambos brazos permite manipular la transmisión que puede ser aprovechada para controlar la posición angular de un mecanismo.

Los experimentos realizados con una placa retardadora [15] y debido a la propiedad de simetría en el lazo dan pauta a hacer combinaciones de rotación en las placas, rotación al mismo tiempo, en la misma dirección, rotación de una sola y rotación en direcciones opuestas.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general:

Realizar un estudio del comportamiento del interferómetro de Sagnac de fibra óptica con dos placas retardadoras en el lazo para controlar el movimiento angular de un mecanismo.

1.3.2. Objetivos específicos:

- Entender el funcionamiento del interferómetro de Sagnac de fibra óptica, con una y dos placas retardadoras en el lazo.

- Realizar una simulación numérica del comportamiento de la transmisión en función de la rotación de las placas.

- Construir en el laboratorio el interferómetro de Sagnac de fibra óptica incorporando en el lazo dos placas retardadoras.

- Realizar el estudio experimental para obtener el mejor comportamiento (estabilidad del sensor) en función de la rotación de las placas.

- Contrastar los resultados de simulación con los resultados experimentales.

- Programar un convertidor Analógico-Digital y un modulador por ancho de pulso en un FPGA.

- Analizar la señal de salida PWM en función del ángulo de rotación de las placas retardadoras.

- Realizar un estudio del comportamiento de la posición angular del mecanismo dependiendo de la posición angular de las placas retardadoras.

1.4. Antecedentes del interferómetro de Sagnac

Como antecedente al interferómetro de Sagnac de fibra está el interferómetro de espejos, el cual fue descrito por Michelson pero se asocia más comúnmente con Sagnac, quien llevó a cabo una extensa serie de experimentos con él [4]. Este interferómetro consiste en una fuente de luz coherente, tres espejos y un divisor de haz colocados como se muestra en la figura 1.2. La principal característica de este dispositivo es que los haces toman dos caminos idénticos pero opuestos en dirección y que ambos forman caminos cerrados antes de que

se unan para producir la interferencia. Parte de la onda que incide en el divisor de haz se refleja y parte se transmite con amplitudes más bajas que el haz original. Un pequeño desplazamiento deliberado en la orientación de uno de los espejos producirá una diferencia en el camino óptico obteniéndose una variación en el patrón de interferencia.

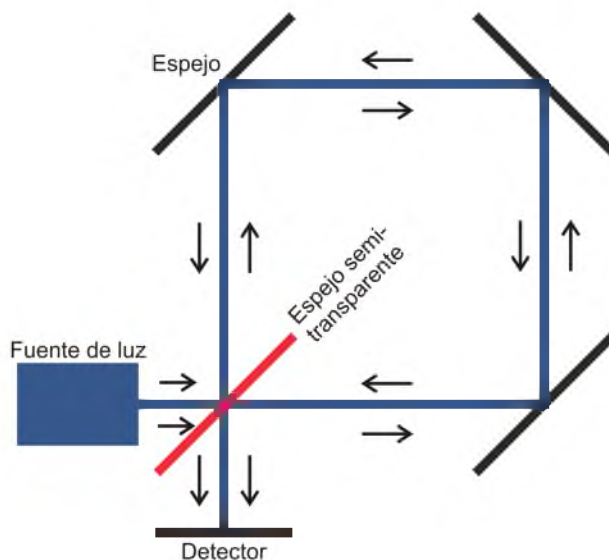


Figura 1.2: Interferómetro de espejos

De los antecedentes más cercanos al interferómetro de Sagnac compuesto de fibra óptica se encuentran los giroscopios propuesto por Vali y Shorthill [5]. En este trabajo se analiza un interferómetro de Sagnac formado por un láser, un cubo o divisor de haz y el anillo compuesto de fibra óptica.

El primer interferómetro de Sagnac realizado completamente de fibra óptica fue propuesto por Bergh en 1981. Esto surge a partir de la aparición del acoplador direccional de cuatro puertos de fibra óptica y que sustituyo al divisor de haz, en este artículo Bergh menciona que el interferómetro totalmente de fibra elimina los problemas de alineación además de que simplifica y estabiliza el sistema, también proporciona una alta sensibilidad en la detección de la rotación [6].

En 1982 Böhm, Petermann y Weidel reportan que los campos magnéticos ambientales pueden causar considerables errores en la razón de detección del giroscopio de fibra [7].

Con este nuevo esquema surge una nueva línea de investigación, en sensores basados en fibra óptica aplicable también a comunicaciones ópticas. Con el desarrollo de investigaciones en sensores de fibra, se abre una brecha entre el giroscopio y estos, ya que en el giroscopio se busca una alta estabilidad, mientras que en sensores se aprovechan estas mismas sensibilidades a cambios ambientales.

Mortimore en 1988 realiza los primeros análisis formales del interferómetro de Sagnac, él le llama lazo reflector de fibra, muestra la teoría del interferómetro por medio de ecuaciones matriciales que describen el funcionamiento y considera en su análisis que la fibra contiene dos modos de propagación. Mide las reflectividades del lazo en términos de la longitud de onda y de la razón de acoplamiento [8].

Por su parte Dakin en 1992 realiza una revisión muy completa de los sensores distribuidos de fibra óptica, en el que se puede ver que el uso del interferómetro de Sagnac es una alternativa viable [9]. En este artículo Dakin menciona un ejemplo del interferómetro de Sagnac como un sensor de posición en el cual ocurre un disturbio.

En 1994 Udd [10] hace una revisión sobre la aplicación de este interferómetro a sensores e instrumentación y realiza una revisión más completa sobre aplicaciones en la cual incluye sensores de rotación, detección de variables temporales, detección de efectos ambientales con variación lenta, sensores distribuidos y mediciones espectrales.

Para 1997, Kuzin et. al., proponen un sensor de fibra óptica basado en un interferómetro de Sagnac con lazo de fibra de alta birrefringencia. El interferómetro propuesto en este trabajo presenta un coeficiente de transmisión y reflexión que dependen de la birrefringencia y de la longitud de la fibra. Se muestra que este interferómetro puede ser usado como un sensor ambiental de tipo polarimétrico. La característica específica de este interferómetro es su insensibilidad a la polarización de la luz en la entrada. La operación del interferómetro fue mostrada en la medición de temperatura [11].

Al siguiente año, un equipo formado por Kuzin, proponen el reflector de lazo de fibra no lineal (NOLM) con fibra de baja birrefringencia y torcida en el lazo [12], muestran el fenómeno de rotación de la elipse no lineal y que éste solo se presenta en las fibras ópticas si estas son de baja birrefringencia.

Estudillo et. al., examinan en 2001 el interferómetro de Sagnac de fibra de baja birrefringencia y torcida en la región lineal, muestran un método para medir la birrefringencia en las fibras rotando los ejes dentro de la fibra del lazo del interferómetro [13].

Ibarra en 2003 propone un método experimental para medir la birrefringencia en fibras cortas de baja birrefringencia. Este método se basa en la torsión de la fibra en un espejo de lazo de fibra óptica [14].

Pottiez et. al., investigan teóricamente el funcionamiento de una estructura de espejo de lazo óptico no lineal (NOLM) en 2004. El dispositivo propuesto es un interferómetro Sagnac de fibra que incluye fibra de baja birrefringencia, fibra altamente torcida y una placa retardadora de un cuarto de onda en el lazo. A partir del estudio analítico y numérico, proponen un modo sencillo de ajustar la posición de la transmisión máxima de NOLM, simplemente ajustando el ángulo de la placa retardadora [15].

Nuevamente un equipo formado por Pottiez investigan el funcionamiento de un espejo de lazo óptico no lineal (NOLM) [16]. Su principio se basa en la creación de una asimetría

de polarización entre los haces contra-propagándose, mediante el uso de una placa de cuarto de onda y fibra altamente torcida en el lazo. Mediante el ajuste del ángulo de la placa de cuarto de onda, el interferómetro puede sintonizarse continuamente de una operación que no depende de la potencia a una conmutación no lineal, de una manera muy conveniente.

En el mismo año Ibarra et. al., presentan un método experimental para variar la transmisión a través de un espejo de lazo óptico de fibra con un acoplador simétrico, una fibra altamente torcida y una placa retardadora de un cuarto de onda en el lazo. Demuestran que al girar la placa es posible ajustar la transmisión en un amplio rango (del 2% al 82%) y que al ajustar el giro en el lazo se puede lograr una operación casi ideal [17].

Posteriormente en 2005, Gutiérrez et. al., investigaron experimentalmente la configuración de un espejo de lazo óptico no lineal de fibra formado por un acoplador simétrico, fibra altamente torcida y una placa retardadora de un cuarto de onda insertada en el lazo como controlador de polarización. La placa retardadora se utiliza para crear una asimetría en polarización y se usa la rotación de la polarización no lineal para producir un retraso en fase entre los haces que se propagan dentro del lazo de fibra. Rotando la placa retardadora podemos también variar la característica de transmisión [18].

González et. al., demuestran experimentalmente una configuración sencilla para el desarrollo de un láser en 2010, el cual incluye un segmento de fibra dopada con erbio y un interferómetro de Sagnac que actúa como filtro espectral, así como un acoplador simétrico. Dependiendo del ajuste de placas retardadoras en el anillo y en el filtro de Sagnac, se puede obtener laseo para una longitud de onda sintonizable o a varias longitudes de onda simultáneamente al variar la temperatura [19].

En 2012 Villagómez et. al., realizan un estudio sobre la influencia de birrefringencia circular en el funcionamiento del interferómetro de Sagnac, determinan que la torsión del lazo de fibra elimina la birrefringencia lineal, al mismo tiempo, la torsión produce birrefringencia circular y las propiedades no lineales del interferómetro de Sagnac lo hacen útil para láseres de pulsos cortos, procesamiento de señales, etcetera [20].

Para 2014 Lutang et. al., presentan un sensor acústico de fibra óptica que utiliza un láser de anillo de fibra dopado con Erbio y un interferómetro de Sagnac para la detección acústica de la descarga parcial en los transformadores de potencia y llevan a cabo una investigación experimental sobre cómo las variaciones de la birrefringencia de la fibra afectan el desempeño de los sensores [21].

Por su parte Hyunjin et. al., en 2015, proponen un novedoso sistema de sensores de fibra óptica de múltiples tensiones para su posible uso en el monitoreo de condiciones de sistemas de energía eléctrica a gran escala y determinan que este sistema de sensor híbrido sería atractivo como un sistema de sensor de monitoreo de condiciones cuasi-distributivas con una estructura simple y de bajo costo [22].

En 2015 Osorio justificó, teórica y experimentalmente, que la polarización juega un papel importante para el mejor desempeño del interferómetro de fibra. Mediante diferentes arreglos

mostró el potencial que puede alcanzar el interferómetro de Sagnac de fibra al incluir una segunda QWP en el lazo del interferómetro cuya función es la de obtener dos estados de polarización iguales recorriendo el lazo en direcciones opuestas [23].

Esta tesis retoma la línea de investigación de Osorio y propone el uso de interferómetro de sagnac, debido a sus características de sensibilidad y robustez, empleando dos placas retardadoras en el lazo, para controlar un mecanismo de movimiento angular.

Capítulo 2

Teoría del Sagnac

El interferómetro de Sagnac de fibra óptica (figura 2.1), está formado por un acoplador de cuatro puertos con dos de estos puertos unidos por un lazo de fibra [8]. Si nosotros introducimos un haz de luz (E1) por uno de los puertos (P1) del acoplador, este será dividido en dos haces que viajan dentro del lazo en direcciones contrarias, uno se propagara en sentido de las manecillas del reloj y otro en sentido contrario a las manecillas del reloj. Estos haces viajan a lo largo del lazo de fibra para entrar nuevamente al acoplador para recombinarse y producir un haz de salida (E2) que se conoce como señal transmitida.

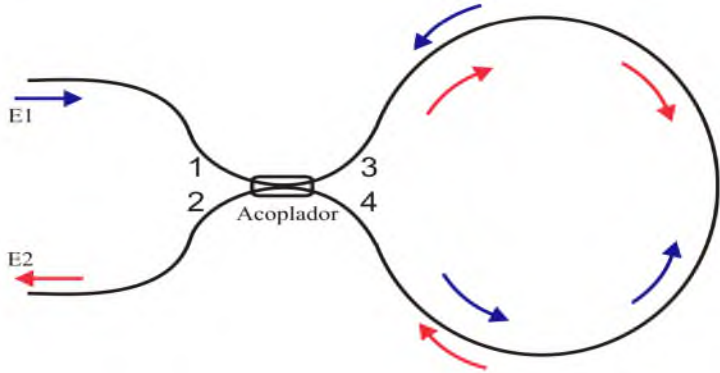


Figura 2.1: Esquema del NOLM

2.1. Modelo matemático del interferómetro de Sagnac de fibra óptica

Para entender el funcionamiento del interferómetro de Sagnac de fibra óptica observe la figura 2.2 que es el modelo general propuesto por Mortimore [8], que basa su análisis en el comportamiento de los campos eléctrico y magnético de los haces en el interferómetro como se observa en la figura (únicamente se representa el campo eléctrico).

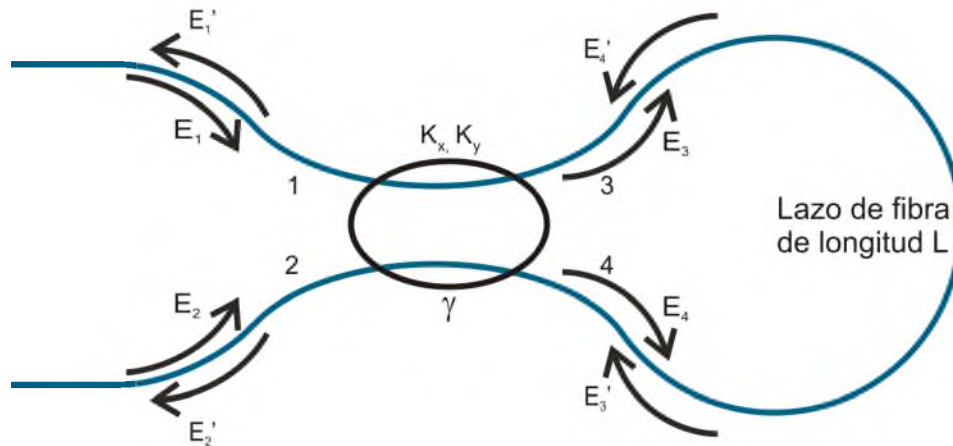


Figura 2.2: Campos de entrada y salida en el interferómetro.

En su trabajo, Mortimore realiza un análisis matricial de dicho arreglo interferométrico, describe un modelo en ecuaciones generales en términos matriciales para los campos de entrada y salida que gobiernan el comportamiento de este interferómetro, considerando en su análisis que la fibra contiene dos modos de propagación y que los efectos de la polarización de la luz de uno o varios dispositivos pueden describirse en términos de una matriz (matriz de Jones) y el modelo que describe el comportamiento de dicho dispositivo puede relacionar sus entradas y salidas con esta matriz, se tiene lo siguiente.

De la figura 2.2, E_1 y E_2 , son los campos de entrada y E'_1 y E'_2 los campos de salida, cada uno de ellos tiene tanto componente x como componente y . En el puerto 3 se tiene un campo eléctrico E_3 y en el puerto 4 se tiene un campo eléctrico E_4 . Como los puertos 3 y 4 forman un lazo cerrado, se tienen dos haces que viajan en direcciones opuestas, uno del puerto 3 al puerto 4 con un campo eléctrico denotado como E'_3 y otro que va del puerto 4 al puerto 3 con un campo E'_4 .

Considerando solo el campo eléctrico, Mortimore llega a la siguiente matriz que describe el comportamiento de los campos de salida del interferómetro,

$$\begin{bmatrix} E'_{1x} \\ E'_{1y} \\ E'_{2x} \\ E'_{2y} \end{bmatrix} = (1 - \gamma) e^{-\alpha L} \begin{bmatrix} \begin{pmatrix} a & e \\ e & b \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} c & h \\ g & d \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} c & g \\ h & d \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} a & f \\ f & b \end{pmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{1x} \\ E_{1y} \\ E_{2x} \\ E_{2y} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

donde γ representa las pérdidas en el acoplador, α es el coeficiente de absorción de la fibra, L es la longitud del lazo de la fibra. Las otras componentes matriciales están definidas de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
a &= -2j(1 - K_x)^{1/2}K_x^{1/2}J_{xx} \\
b &= 2j(1 - K_y)^{1/2}K_y^{1/2}J_{yy} \\
c &= (2K_x - 1)J_{xx} \\
d &= (1 - 2K_y)J_{yy} \\
e &= j [K_x^{1/2}(1 - K_y)^{1/2}J_{xy} - (1 - K_x)^{1/2}K_y^{1/2}J_{yx}] \\
f &= j [K_y^{1/2}(1 - K_x)^{1/2}J_{xy} - (1 - K_y)^{1/2}K_x^{1/2}J_{yx}] \\
g &= (1 - K_x)^{1/2}(1 - K_y)^{1/2}J_{xy} + K_x^{1/2}K_y^{1/2}J_{yx} \\
h &= - [K_x^{1/2}K_y^{1/2}J_{xy} + (1 - K_x)^{1/2}(1 - K_y)^{1/2}J_{yx}]
\end{aligned}$$

K_x y K_y son los coeficientes de acoplamiento en las componentes x y y respectivamente y J_{ij} (con $i=x, j=y$), es la matriz de Jones que nos describe el comportamiento de las componentes en el lazo de fibra del interferómetro.

Reduciendo la ecuación (2.1),

$$\begin{bmatrix} E'_{1x} \\ E'_{1y} \\ E'_{2x} \\ E'_{2y} \end{bmatrix} = (1 - \gamma) e^{-\alpha L} \begin{pmatrix} J_{11} & J_{21} \\ J_{12} & J_{22} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} E_{1x} \\ E_{1y} \\ E_{2x} \\ E_{2y} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Donde $\begin{pmatrix} J_{11} & J_{21} \\ J_{12} & J_{22} \end{pmatrix}$ contiene la información completa del lazo del interferómetro, incluyendo información del lazo de fibra y del acoplador direccional y donde $J_{11} = \begin{pmatrix} a & e \\ e & b \end{pmatrix}$, $J_{12} = \begin{pmatrix} c & g \\ h & d \end{pmatrix}$, $J_{21} = \begin{pmatrix} c & h \\ g & d \end{pmatrix}$ y $J_{22} = \begin{pmatrix} a & f \\ f & b \end{pmatrix}$.

De la figura 2.2 se observa que para los campos de entrada y salida, E_1 , E_2 , E'_1 y E'_2 la ecuación (2.2) queda de la forma,

$$\begin{pmatrix} E'_1 \\ E'_2 \end{pmatrix} = (1 - \gamma) e^{-\alpha L} \begin{pmatrix} J_{11} & J_{21} \\ J_{12} & J_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

Si se considera solo introducir un haz de luz por el puerto 1 y que por el puerto 2 se detecta la salida, entonces la ecuación (2.3) queda de la forma,

$$\begin{pmatrix} E'_1 \\ E'_2 \end{pmatrix} = (1 - \gamma) e^{-\alpha L} \begin{pmatrix} J_{11} & J_{21} \\ J_{12} & J_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

Por lo tanto, el campo transmitido a la salida del puerto 2 es:

$$\begin{pmatrix} E'_{2x} \\ E'_{2y} \end{pmatrix} = (1 - \gamma) e^{-\alpha L} J_{12} E_1 = (1 - \gamma) e^{-\alpha L} \begin{pmatrix} c & g \\ h & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{1x} \\ E_{1y} \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

sustituyendo c , g , h y d en la ecuación (2.5) se tiene:

$$\begin{pmatrix} E'_{2x} \\ E'_{2y} \end{pmatrix} = (1 - \gamma) e^{-\alpha L} \begin{pmatrix} (2K_x - 1)J_{xx} & (1 - K_x)^{1/2}(1 - K_y)^{1/2}J_{xy} \\ -K_x^{1/2}K_y^{1/2}J_{xy} & +K_x^{1/2}K_y^{1/2}J_{yx} \\ -(1 - K_x)^{1/2}(1 - K_y)^{1/2}J_{yx} & (1 - 2K_y)J_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{1x} \\ E_{1y} \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

Considerando cero pérdidas, cero absorción y una constante de acoplamiento igual, la ecuación (2.6) que representa el campo transmitido queda de la siguiente forma:

$$\begin{pmatrix} E'_{2x} \\ E'_{2y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (2K - 1)J_{xx} & (1 - K)J_{xy} + KJ_{yx} \\ -KJ_{xy} - (1 - K)J_{yx} & (1 - 2K)J_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{1x} \\ E_{1y} \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

La ecuación (2.7) describe el comportamiento de los campos eléctricos a la salida del interferómetro, donde J_{ij} (con $i = x, j = y$), es descrita por la matriz de Jones y es la que nos da la información acerca del lazo de fibra del interferómetro de Sagnac.

2.2. Análisis numérico del interferómetro de Sagnac empleando un acoplador simétrico y dos placas retardadoras en el lazo

Existen trabajos previos de Ibarra-Escamilla et al. [17], en el cual agregan una placa retardadora de, $\lambda/4$ (QWP, Quarter-Wave Plate) a uno de los brazos del interferómetro y emplean fibra altamente torcida para que la birrefringencia residual presente no afecte la operación del interferómetro, demostrando que con solo una rotación de QWP se puede ajustar fácilmente la transmisión del interferómetro.

Tomando en cuenta estos resultados y considerando que la torsión de la fibra elimina la birrefringencia lineal haciéndolo menos sensible a las condiciones ambientales y que al mismo tiempo, la torsión produce birrefringencia circular y aparece una diferencia de velocidades de grupo para campos con polarización circular. En este trabajo se propone el esquema que se muestra en la figura 2.3. Este consiste en un acoplador simétrico 50/50 donde sus puertos

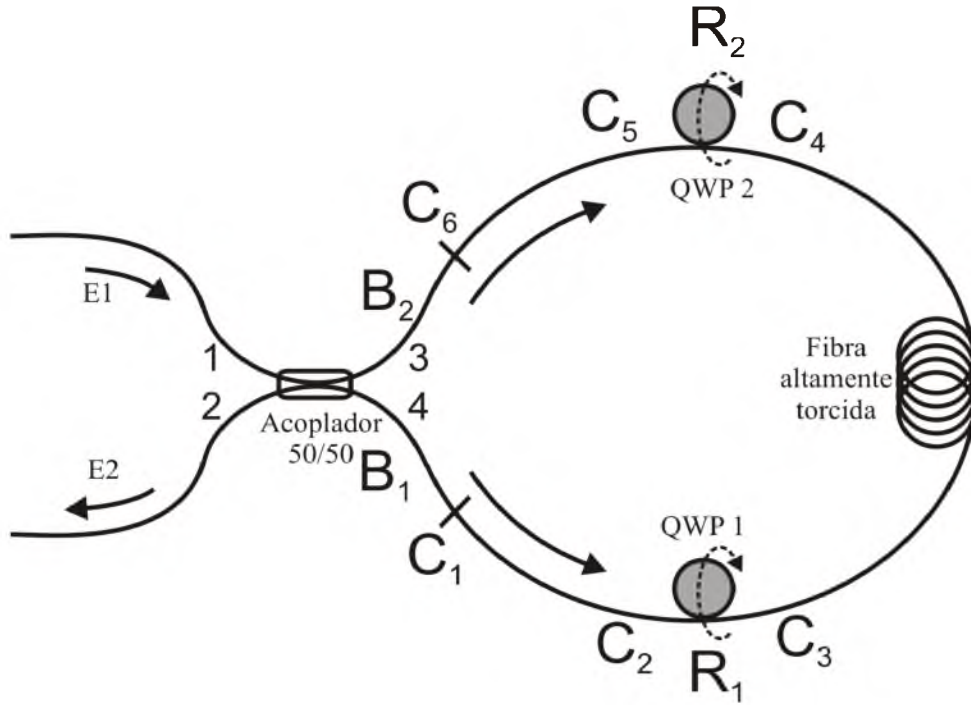


Figura 2.3: Sagnac con dos placas retardadoras

3 y 4 están conectados a través de una fibra altamente torcida, dos QWP se empalman en el lazo de manera simétrica.

Para analizar el comportamiento del esquema y posteriormente hacer comparaciones con resultados experimentales es necesario contar con simulaciones numéricas en las que se puedan variar parámetros que difícilmente podrían variarse en laboratorio. De esta manera se realizó un análisis numérico del comportamiento de la transmisión en función del ángulo de rotación de las QWPs.

Este análisis se basa en los estudios del FOLM [8], [13], [14], [17], donde utilizan una matriz (matriz de Jones) para modelar cada elemento que forma el lazo del interferómetro. Suponiendo que el campo eléctrico a la salida y entrada de cada matriz es presentado en un sistema coordinado que coincide con los ejes principales de la fibra. El haz de entrada con un campo E_1 se introduce por el puerto 1 y el haz de salida con un campo E_2 es medido en el puerto 2.

Para analizar la transmisión se emplea la ecuación (2.7) para el campo transmitido que se describió anteriormente. La matriz J es calculada empleando lo que se obtiene de un producto de matrices de Jones ecuación (2.8) que representan el comportamiento de cada elemento que compone el lazo del interferómetro (ver figura 2.3).

$$J = B_1 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot C_3 \cdot F \cdot C_4 \cdot R_2 \cdot C_5 \cdot C_6 \cdot B_2. \quad (2.8)$$

De esta manera se tiene que las matrices B_1 y B_2 describen la birrefringencia y torsión existentes en la fibra de los puertos 3 y 4 del acoplador respectivamente, estas matrices están dadas por,

$$B_1 = \begin{pmatrix} \cos \eta_{B_1} - i (\delta_{l,B_1}/2) \sin \eta_{B_1}/\eta_{B_1} & (\delta_{c,B_1}/2) \sin \eta_{B_1}/\eta_{B_1} \\ (\delta_{c,B_1}/2) \sin \eta_{B_1}/\eta_{B_1} & \cos \eta_{B_1} + i (\delta_{l,B_1}/2) \sin \eta_{B_1}/\eta_{B_1} \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

$$B_2 = \begin{pmatrix} \cos \eta_{B_2} - i (\delta_{l,B_2}/2) \sin \eta_{B_2}/\eta_{B_2} & (\delta_{c,B_2}/2) \sin \eta_{B_2}/\eta_{B_2} \\ (\delta_{c,B_2}/2) \sin \eta_{B_2}/\eta_{B_2} & \cos \eta_{B_2} + i (\delta_{l,B_2}/2) \sin \eta_{B_2}/\eta_{B_2} \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

Donde $\eta_{B_1} = \sqrt{(\delta_{l,B_1}/2)^2 + (\delta_{c,B_1}/2)^2}$ y $\eta_{B_2} = \sqrt{(\delta_{l,B_2}/2)^2 + (\delta_{c,B_2}/2)^2}$, $\delta_{l,B_1} = (2\pi/\lambda) L_1 \Delta_{n_1}$ y $\delta_{l,B_2} = (2\pi/\lambda) L_2 \Delta_{n_2}$ son el retardo lineal, L_1 y L_2 son las longitudes de la fibra del brazo, Δ_{n_1} y Δ_{n_2} la birrefringencia lineal de la fibra en los brazos 3 y 4 del acoplador respectivamente, λ es la longitud de onda del haz de entrada, $\delta_{c,B_1} = 2(1 - g/2n) \cdot \tau_1$ y $\delta_{c,B_2} = 2(1 - g/2n) \cdot \tau_2$ son el retardo circular, n es el índice de refracción de la fibra, τ_1 y τ_2 son el ángulo de torsión de la sección de fibra acoplada a los puertos 3 y 4 respectivamente. El parámetro g encierra la birrefringencia circular y la torsión de la fibra, para fibras de silicio-vidrio $g = 0,13 - 0,16$ [24].

La matriz C_1 y C_6 incluye un ángulo inicial no conocido θ_1 y θ_4 , entre los ejes principales del acoplador (puerto 3 y 4) y el eje de QWP1 y QWP2 respectivamente. Dicha matriz está dada por,

$$C_1 = \begin{pmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

$$C_6 = \begin{pmatrix} \cos \theta_4 & -\sin \theta_4 \\ \sin \theta_4 & \cos \theta_4 \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

Las matrices C_2 , C_3 y C_4 , C_5 describen las rotaciones de QWP1 y QWP2 respectivamente,

$$C_2 = \begin{pmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

$$C_3 = \begin{pmatrix} \cos \theta_2 & \sin \theta_2 \\ -\sin \theta_2 & \cos \theta_2 \end{pmatrix} \quad (2.14)$$

$$C_4 = \begin{pmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

$$C_5 = \begin{pmatrix} \cos \theta_3 & \sin \theta_3 \\ -\sin \theta_3 & \cos \theta_3 \end{pmatrix} \quad (2.16)$$

donde θ_2 es el ángulo de rotación de QWP1 y θ_3 de QWP2.

Las matrices R_1 y R_2 describen las placas retardadoras de un cuarto de onda QWP1 y QWP2.

$$R_1 = \begin{pmatrix} \exp(i\pi/4) & 0 \\ 0 & \exp(-i\pi/4) \end{pmatrix} \quad (2.17)$$

$$R_2 = \begin{pmatrix} \exp(i\pi/4) & 0 \\ 0 & \exp(-i\pi/4) \end{pmatrix} \quad (2.18)$$

Finalmente la matriz de Jones que describe el lazo de fibra torcida y birrefringente F es,

$$F = \begin{pmatrix} \cos \eta - \pi i L_n \sin \eta / \eta & \delta_c / 2 \sin \eta / \eta \\ -\delta_c / 2 \sin \eta / \eta & \cos \eta + \pi i L_n \sin \eta / \eta \end{pmatrix} \quad (2.19)$$

Donde $\eta = \sqrt{(\pi L_n)^2 + (\delta_c/2)^2}$, $L_n = L_{fiber}/L_{beat}$ es la relación entre la longitud de la fibra (L_{fiber}) y la longitud de repetición (L_{beat}); $\delta_c = 2(1 - g/2n)\tau$ es la birrefringencia circular, n es el índice de refracción de la fibra y τ la fibra torcida.

Si sustituimos el producto obtenido de la ecuación (2.8) con todos los parámetros descritos anteriormente en la ecuación (2.7) podemos simular el comportamiento del haz transmitido en función de los ángulos de las QWP's. Para encontrar la transmitancia se emplea la siguiente ecuación,

$$T = \frac{I_{out}}{I_{in}} \quad (2.20)$$

donde $I_{out} = K|E_2'|^2$ es la intensidad transmitida, K es una constante que depende de las unidades que se estén utilizando y E_2' es la ecuación (2.7), I_{in} es la intensidad de entrada. Con estas ecuaciones se realiza el análisis numérico.

2.3. Simulaciones numéricas del Sagnac

Las ecuaciones descritas en el apartado anterior nos permiten simular el comportamiento del haz transmitido a la salida del interferómetro, que será la señal que nos permita controlar un mecanismo de movimiento angular. Por esta razón es necesario observar y analizar, en simulación numérica, el comportamiento de la transmisión en función de la rotación de las placas retardadoras QWP1 y QWP2.

Una vez que las ecuaciones han sido identificadas en el arreglo interferométrico (figura 2.3) se analiza el comportamiento de la transmitancia considerando que los brazos del acoplador tienen igual grado de birrefringencia.

Retomando los experimentos realizados con una placa retardadora [15] y debido a la propiedad de simetría en el lazo dan pauta a hacer combinaciones de rotación en las placas.

Para realizar los cálculos numéricos se usó el paquete de programación "Matlab", en el cual se utilizaron los siguientes valores: longitud de onda de 980 nm , polarización circular a la entrada del NOLM, $n = 1,46$, L_{fiber} de 20 m de $16\pi/m$ de fibra torcida, L_{beat} de 19 m , el parámetro $g = 0,145$ y las fibras B_1 y B_2 con misma torsión ($\tau_1 = \tau_2 = \frac{1}{2}\pi$). Cabe destacar que se tomaron características idénticas en los brazos del interferómetro, tanto en longitud de estos como el grado de torsión y birrefringencia presentes en los mismos.

Numéricamente se rotó QWP1 mientras que QWP2 permanece fija a diferentes ángulos, la figura 2.4 muestra el comportamiento del haz transmitido por el puerto 2 con respecto al ángulo de rotación de QWP1, para la figura 2.4 a) QWP2 se encuentra fija a 0 grados, puede observarse que se obtiene una amplitud máxima cuando QWP1 llega a un ángulo de 75 ó 255 grados, también se observa que existen intervalos en los que la amplitud transmitida se comporta de manera lineal como es el caso en el intervalo de 29 a 59 y de 89 a 119 grados, por otra parte cuando QWP2 está a 100 grados la amplitud máxima es de $0,65\%$ y esta se obtiene cuando QWP1 se encuentra en 167 ó 347 grados como se observa en la figura 2.4 b), también se observa que el comportamiento lineal se encuentra en los intervalos 124 a 154 y 180 a 210 grados. En la figura 2.4 c) QWP2 se encuentra a 180 grados, se observa que el comportamiento es idéntico al obtenido cuando QWP2 se encuentra a 0 grados.

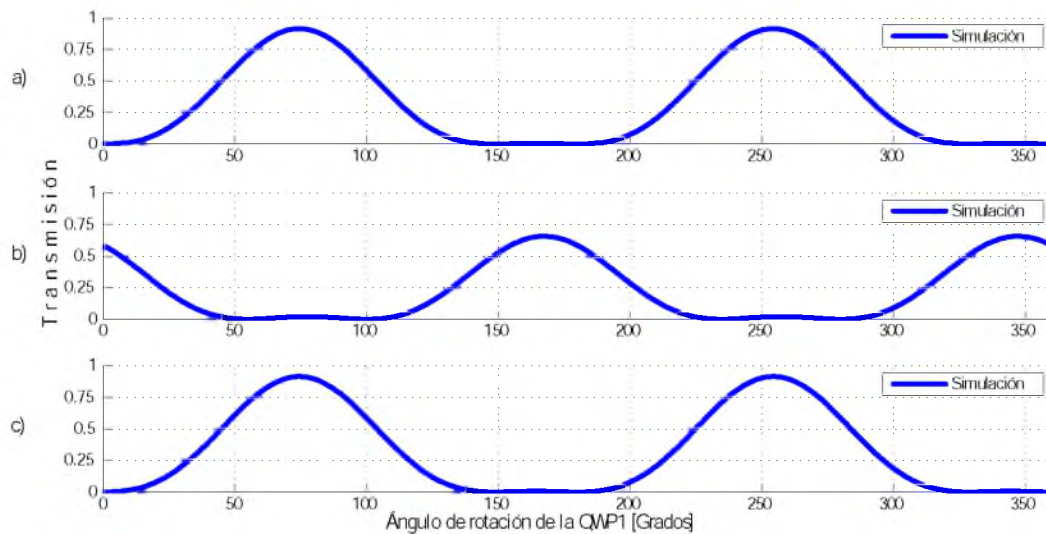


Figura 2.4: Resultados de simulación: a) QWP2 = 0° , b) QWP2 = 100° , c) QWP2 = 180°

Por otra parte, la figura 2.5 muestra el efecto contrario, se deja fija QWP1 a diferentes ángulos y se rota QWP2, obteniendo un comportamiento idéntico al anterior.

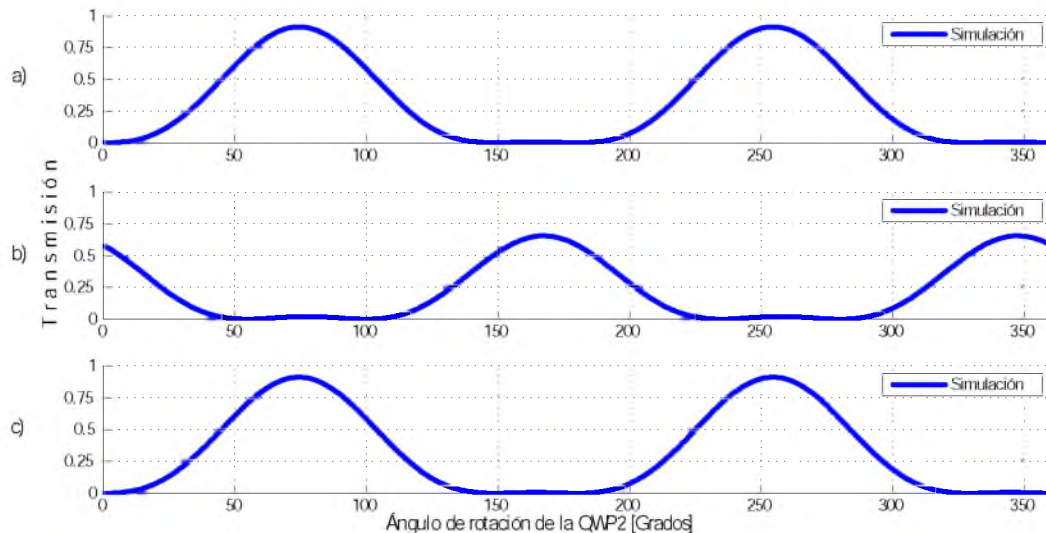


Figura 2.5: Resultados de simulación: a) $\text{QWP1} = 0^\circ$, b) $\text{QWP1} = 100^\circ$, c) $\text{QWP1} = 180^\circ$

Posteriormente se rotaron las 2 placas retardadoras hacia un mismo sentido, teniendo como resultado la gráfica de la figura 2.6, en la cual se puede observar que la amplitud máxima se encuentra cuando ambas placas están a 75° y 255° con una transmisión de 90% y el comportamiento lineal de la transmisión se encuentra en los intervalos de 30° a 60° y 90° a 120° .

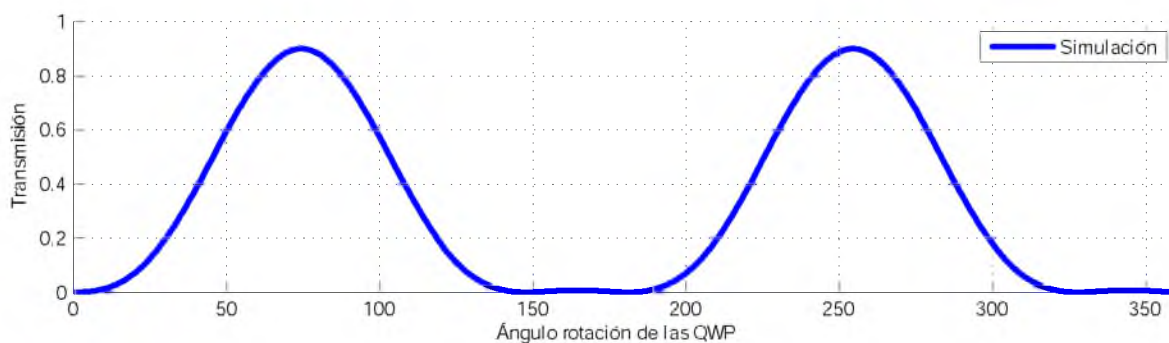


Figura 2.6: Resultados de simulación cuando las QWP's rotan en un mismo sentido

Por último la figura 2.7 muestra como al girar ambas placas en direcciones contrarias a la misma velocidad se puede mantener la amplitud transmitida sin cambios.

Para los siguientes casos se consideraron características diferentes en los brazos del interferómetro, para el primer caso se consideraron distintas longitudes en los brazos del in-

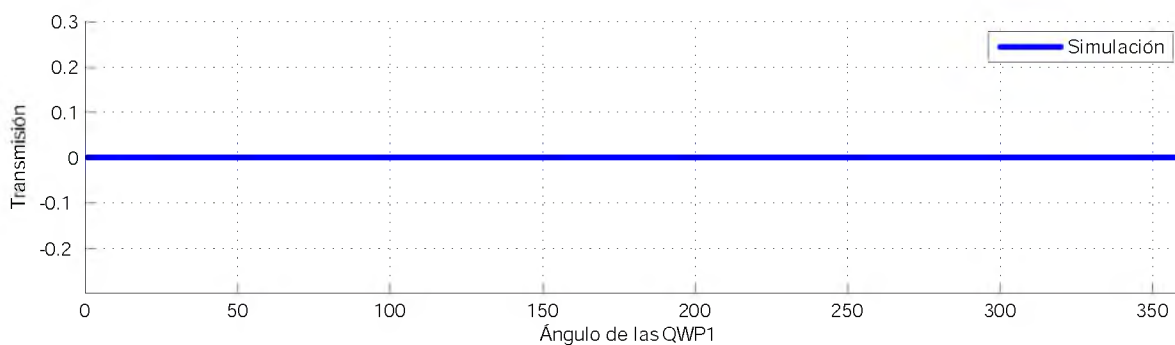


Figura 2.7: Resultado de simulación cuando las QWP's rotan en sentidos contrarios

terferómetro y los resultados obtenidos se muestran en la figura 2.8. Numéricamente se rotó QWP1 mientras que QWP2 permanece fija a diferentes ángulos, para la figura 2.8 a) QWP2 se encuentra fija a 0 grados, puede observarse que se obtiene una amplitud máxima cuando QWP1 llega a un ángulo de 70 o 250 grados, sin embargo la amplitud mínima es de 0,13%, y el mismo comportamiento se observa en la figura 2.8 c) pero ahora QWP2 se encuentra a 180 grados, por otra parte cuando QWP2 está a 100 grados la amplitud máxima es de 0,56% y mientras QWP1 se encuentra en 162 o 342 grados como se puede observar en la figura 2.8 b).

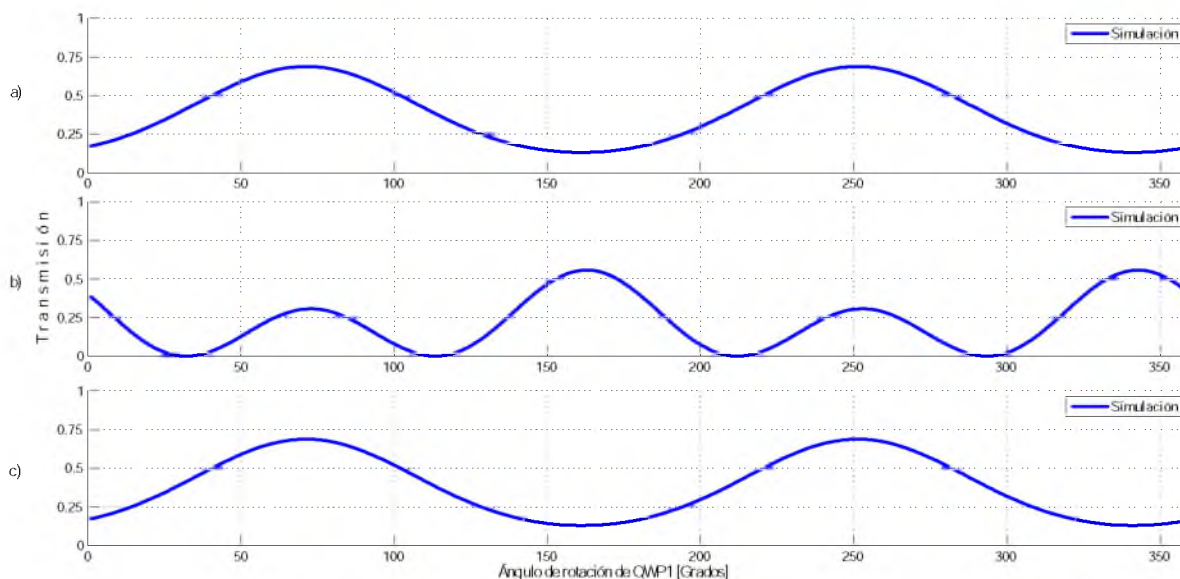


Figura 2.8: Resultados de simulación cuando se consideran distintas longitudes en los brazos, a) $QWP2 = 0^\circ$, b) $QWP2 = 100^\circ$, c) $QWP2 = 180^\circ$

En el segundo caso se consideraron diferentes grados de birrefringencia en los brazos del

interferómetro, nuevamente se rotó QWP1 y QWP2 permanece fija a diferentes ángulos, en la figura 2.9 a-c) la amplitud máxima es de 0,8 % y se encuentra cuando QWP1 está a 167° o 347° , en este caso QWP2 permanece fija a 0° y 180° respectivamente, para la figura 2.9 b), QWP2 se encuentra a 100° la amplitud máxima se localiza a 60° o 240° y es de 0,76 % y la amplitud mínima no llega a 0 %.

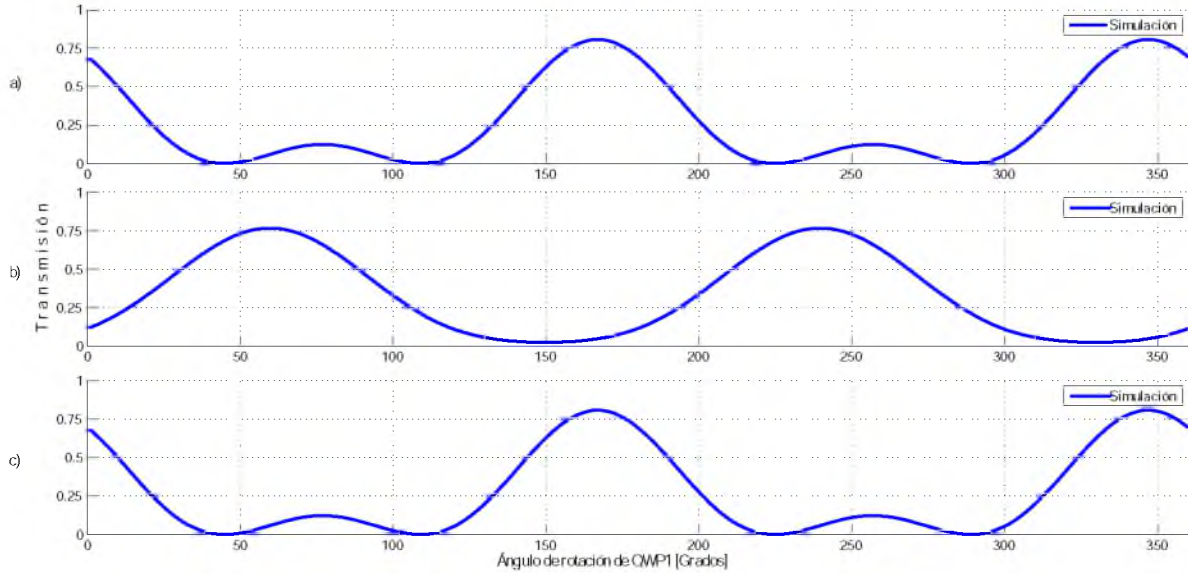


Figura 2.9: Resultados de simulación cuando se consideran distintas birrefringencias en los brazos, a) QWP2 = 0° , b) QWP2 = 100° , c) QWP2 = 180°

Se puede concluir que se necesita tener las mismas condiciones en los brazos de interferómetro para obtener un mejor comportamiento (amplitud mínima en 0 % y amplitudes mayores) que sería lo más viable para el diseño.

A partir de las simulaciones, se encontró que podemos controlar la transmisión del interferómetro con ambas placas pues el comportamiento es el mismo incluso si fijamos un valor de transmisión inicial, está la podemos aumentar o disminuir rotando cualquier placa y con la otra regresar al valor inicial sin problema. Es preciso mencionar que cada 180° se tiene el mismo comportamiento en la transmisión.

Capítulo 3

Arreglo experimental

El arreglo del sistema propuesto se muestra en la figura 3.1, a la entrada del interferómetro se emplea un diodo láser L980P010 a una longitud de onda de 980nm, este es alimentado por una tarjeta de control universal IP500. El diodo se alinea a la fibra óptica mediante un mecanismo que nos permite ajustar manualmente movimientos en los planos xy y xz . Este sistema permitió tener a la entrada del interferómetro una potencia de 1 mW .

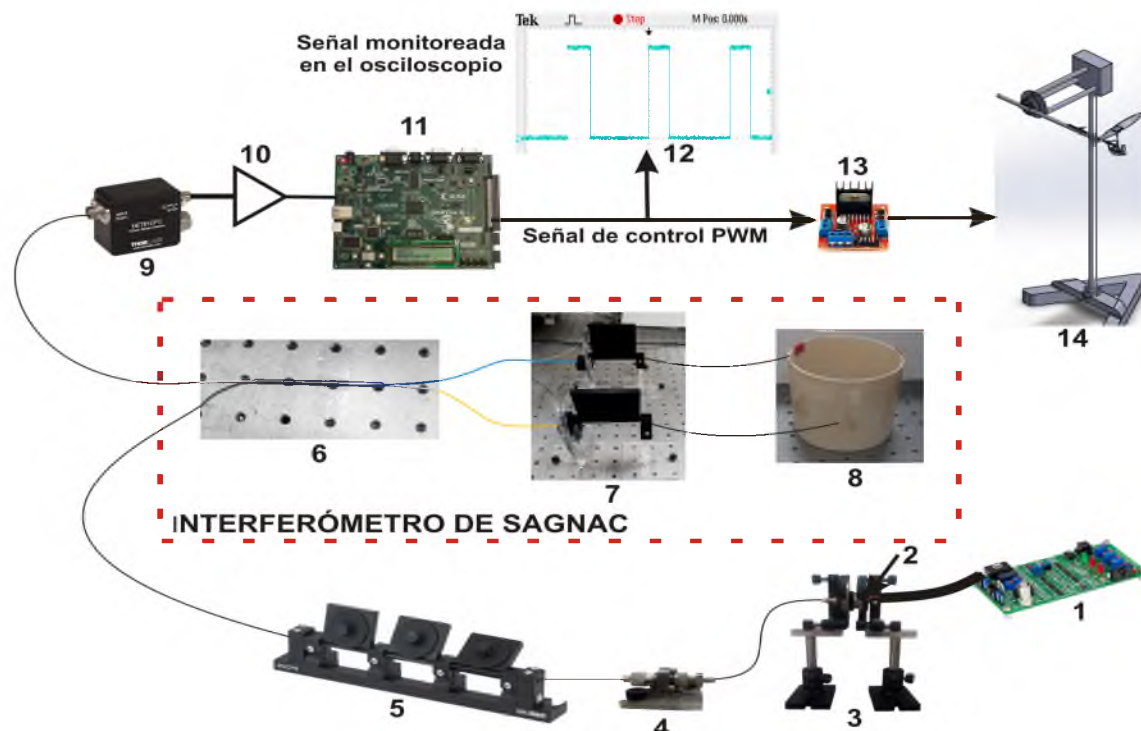


Figura 3.1: Arreglo experimental

Después el haz de luz pasa por un controlador de polarización de tres paletas, cuya

finalidad es la de polarizar el haz de luz circularmente (Anexo I) y de esta manera entre al interferómetro para obtener una mejor respuesta en transmisión.

El interferómetro de Sagnac está formado por un acoplador de fibra óptica simétrico (50/50), dos placas retardadoras de un cuarto de onda y un lazo de 20 metros de fibra óptica estándar SMF28 con una razón de torsión de $16 \pi/m$. A la salida del interferómetro se conecta un detector DET01CFC de InGaAs que opera en un rango de voltajes de salida de 0 a 10 volts. La señal de salida es acondicionada mediante un arreglo de amplificadores operacionales antes de pasar a la entrada analógica de la tarjeta FPGA Spartan 3E.

En la tarjeta Spartan 3E se programa un convertidor analógico digital mediante una máquina de estados y un módulo PWM. La señal PWM se monitorea en un osciloscopio digital y es enviada al módulo L298N, el cual es una etapa de potencia que nos permite dar la corriente necesaria para mover el motor del sistema. El mecanismo propuesto para estudiar el comportamiento de la posición angular de las placas retardadoras es el péndulo-hélice.

En vista del arreglo interferométrico se tiene la representación esquemática de la evolución de la polarización en el interferómetro (figura 3.2).

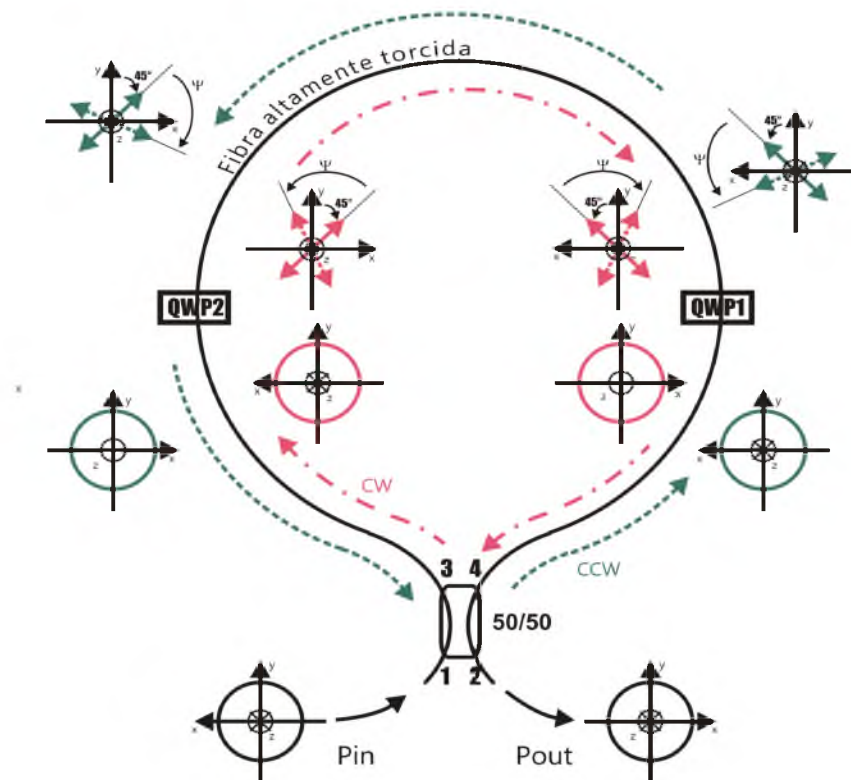


Figura 3.2: Representación esquemática de la evolución de la polarización en el interferómetro bajo estudio

Teniendo un haz de entrada con polarización circular, el acoplador simétrico divide el haz de entrada en dos haces con igual amplitud sin cambiar su estado de polarización, dichos haces se propagarán en el lazo en las direcciones contrarias, un haz viaja en sentido de las manecillas del reloj (CW) y el otro en sentido contrario a las manecillas del reloj (CCW). El haz en dirección CCW cambia de polarización circular a polarización lineal por acción de QWP1, la cual hará un ángulo de 45° con los ejes principales de QWP1. En el lazo, la polarización será rotada debido a la actividad óptica, pero permanecerá en un estado de polarización lineal. Después de propagarse en el lazo, la polarización lineal cambia a polarización circular por operación de QWP2. Para el haz en dirección a CW los cambios en polarización son los mismos que el haz en dirección CCW, por lo tanto, la salida del interferómetro es entonces obtenida por la combinación de dos haces circularmente polarizados.

Los principales detalles técnicos de los equipos y materiales que se utilizan para el montaje del arreglo experimental se describen a continuación.

1.- Diodo láser L980P010

El diodo láser L980P010 se muestra en la figura 3.3 es de baja potencia, a una longitud de onda de 980 nm (970 nm – 990 nm). Cuando opera dentro de sus especificaciones, tienen una vida útil extremadamente larga. El haz de luz que emite es ampliado más no puntual por lo que es necesario una lente colimadora para poder introducir la máxima cantidad de luz a la fibra óptica.



Figura 3.3: Diodo láser L980P010

2.- Controlador de láser universal IP500

El IP500 es un controlador universal que proporciona un máximo de 500 mA a nivel de tarjeta (figura 3.4). Este controlador puede ser configurado para operar ya sea en modo de corriente constante o potencia constante y permite ajustar la corriente límite de operación del diodo para evitar daños.



Figura 3.4: Controlador de láser universal IP500

3.- Alineación de láser.

Para evitar fluctuaciones de amplitud a la salida del interferómetro debe de existir una buena alineación entre el diodo láser y la fibra óptica. Esto se realiza como se muestra en la figura 3.5. Una vez ajustados los valores de corriente y voltaje de operación del diodo láser en la tarjeta IP500, se hace el proceso de colimado y centrado del haz láser en el núcleo de la fibra. Para esto se hace uso de una lente objetivo montada, en un mecanismo que tiene la posibilidad de ajustar, mediante tornillos milimétricos, los ejes x y y de la lente, el eje z se ajusta subiendo y bajando el poste que sujeta el mecanismo que contiene la lente objetivo. Los ajustes se hacen de manera manual por lo que el proceso resulta ser algo complicado pues se tiene que conseguir que el haz colimado no rebase la apertura numérica de la fibra y así lograr que entre la mayor cantidad de luz a la fibra. Se utilizó un tramo de fibra conectada a un adaptador de acoplamiento con el fin de evitar desalinearse el haz láser.

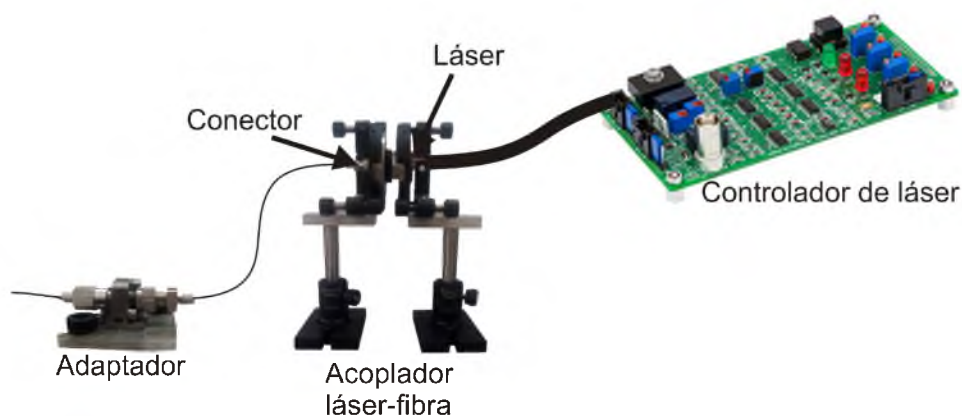


Figura 3.5: Alineación del láser

4.- Adaptador de fibra óptica

Los adaptadores de fibra óptica tienen un cuerpo metálico y están diseñados con guía roscada para mejorar la inserción del conector (figura 3.6), además de contar con una guía

interna para permitir la alineación precisa de los conectores respectivamente y por su sistema de instalación tipo mecánico, previene deslizamiento, proporcionando estabilidad en el acoplamiento.



Figura 3.6: Adaptador de fibra óptica

5.- Controlador de polarización de tres paletas

El control de polarización de tres placas (figura 3.7), utiliza birrefringencia inducida por estrés para crear placas de onda independientes que altera la polarización de la luz transmitida en fibra monomodo, combina una placa de cuarto de onda en cada extremo de una placa de media onda en serie para transformar un estado de polarización arbitraria en cualquier otro estado de polarización. La primera placa de cuarto de onda transforma el estado de polarización de entrada en un estado de polarización lineal. La placa de media onda gira el estado de polarización lineal y la última placa de cuarto de onda transforma el estado lineal en un estado de polarización arbitrario. Por lo tanto, el ajuste de cada una de las tres placas (retardadores de fibra) permite el control completo del estado de polarización que entra al interferómetro. En nuestro caso, polarización circular.

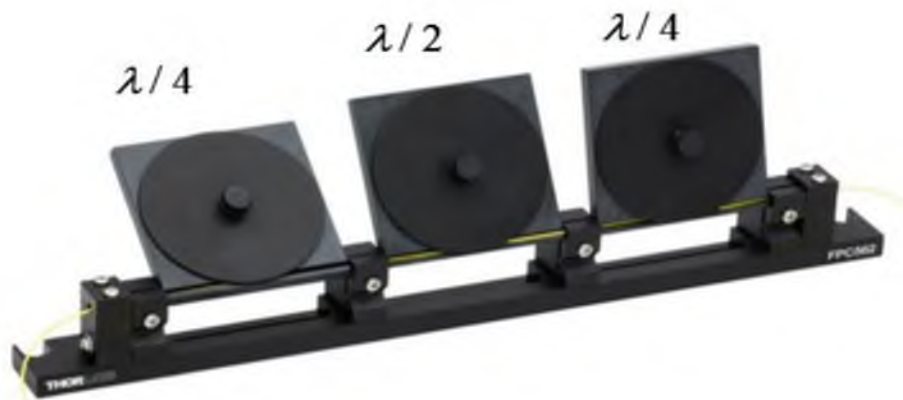


Figura 3.7: Controlador de polarización de tres paletas

6.- Acoplador de fibra óptica 50/50

El acoplador de fibra óptica es necesario para implementar el interferómetro de fibra, tiene una razón de potencia dividida de 50/50 y opera con una longitud de onda de 980 nm (figura 3.8). Este es construido al fusionar dos fibras con las mismas características para formar un elemento con cuatro puertos por lo que al entrar, por ejemplo, un haz de luz de 10 mW por el puerto de entrada, la razón de acoplamiento dividiría el haz en dos de 5 mW cada uno por los puertos contrarios de salida. Su construcción puede combinar y/o separar el haz o haces de luz.



Figura 3.8: Acoplador de fibra óptica 50/50

7.- Placa retardadora

La placa retardadora (figura 3.9) es un dispositivo controlador de polarización de una paleta (placa) completamente equivalente a la placa de onda fraccionaria de la óptica clásica y es derivado del principio de funcionamiento descrito por Lefevre del controlador de tres paletas para su uso con fibra óptica monomodo [25]. La paleta consiste en una bobina de fibra donde el radio R y el número de vueltas de esta determinan el cambio de fase. La bobina introduce a la fibra birrefringencia por el estrés ocasionado al flexionar esta y por lo tanto un cambio en el índice de propagación que provoca un cambio de fase en los estados de polarización del haz que viaja dentro de la fibra.

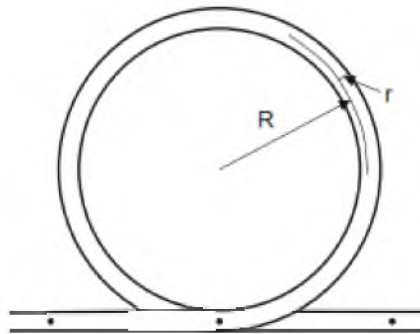


Figura 3.9: Placa retardadora

8.- Lazo de fibra

El lazo de fibra (figura 3.10) es una bobina de 20 metros de fibra óptica estándar SMF28 que se tuerce a una razón de $16 \pi/m$ (8 vueltas por metro), en sentido a las manecillas del reloj, enrollada en un tubo de PVC de 4 pulgadas de diámetro. El propósito de torcer la fibra es el de tratar de mantener sin cambios el estado de polarización de la luz que viaja por el lazo.



Figura 3.10: Lazo de fibra óptica

9.- Detector para fibra óptica

El detector de fibra óptica DET01CFC, que se muestra en la figura 3.11, se conecta directamente con la fibra óptica a la salida del interferómetro para poder analizar su transmisión. Está diseñado para ser usado dentro de un rango espectral de los 800 - 1700 nm. Utiliza un elemento detector de InGaAs (Indio-Galio-Arsénico) con base en el fotodiodo FGA01FC y cuenta con un ancho de banda de 1,2 GHz. Opera en un rango de voltajes de salida de 0 a 10 volts que pueden ser visualizados directamente en un osciloscopio.



Figura 3.11: Detector para fibra óptica DET01CFC

10.- Arreglo de amplificadores operacionales

La salida del detector es ajustada mediante un arreglo de amplificadores operacionales, con el fin de no sobrepasar el rango de entrada analógica del FPGA. El arreglo, que se muestra en la figura 3.12, consiste en un sumador inversor y un inversor configurados para operar al voltaje de referencia de 1,65 V requerido por el convertidor analógico-digital de la tarjeta Spartan 3E. Con este arreglo, el voltaje de salida del detector es multiplicado por una ganancia de 0,125 con el fin de estar en el rango de entrada analógica.

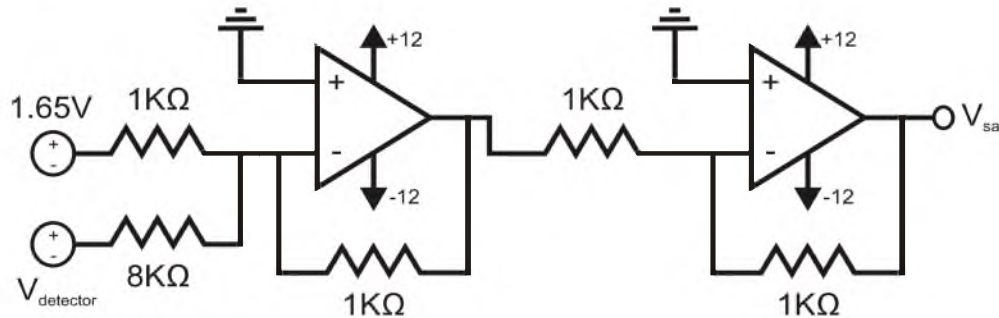


Figura 3.12: Arreglo de amplificadores operacionales

11.- Tarjeta Spartan 3E

La tarjeta Spartan 3E (figura 3.13), es útil para realizar prácticas de programación en VHDL dado que cuenta con varios componentes de uso común en electrónica digital integrados en la misma. El FPGA Xilinx XC3S1600E se emplea para programar en VHDL el convertidor analógico-digital, y el módulo convertidor digital a señal PWM para controlar la velocidad del motor con hélice. El módulo de captura analógica con el que cuenta la tarjeta puede ser controlado por el FPGA empleado el bus SPI.



Figura 3.13: Tarjeta Spartan 3E

12.- Osciloscopio de cuatro canales Tektronix

Para visualizar la señal PWM y analizar la transmisión directamente de la salida del interferómetro se emplea un osciloscopio de cuatro canales Tektronix, el cual se muestra en la figura 3.14. Cuenta con un ancho de banda de hasta 200 MHz y una velocidad máxima de muestreo de 2 GS/s en tiempo real, una pantalla LCD a color, así como almacenamiento removible por medio de un puerto USB para analizar los datos y graficas obtenidos de manera individual en una PC.



Figura 3.14: Osciloscopio Tektronix de cuatro canales

13.- Módulo L298N

El módulo L298N (figura 3.15), es una etapa de potencia que nos permite controlar dos motores de corriente continua y motores paso a paso, este dispositivo soporta corriente de hasta 2 amperes en operación constante, 5 amperes en pico y permite una alimentación de 12 a 36 volts de CD. Este módulo es ideal para controlar motores en aplicaciones de robótica.



Figura 3.15: Etapa de potencia L298

14.- Péndulo hélice

El mecanismo péndulo-hélice se muestra en la figura 3.16, este consta de una base, una varilla que cae libremente y en cuyo extremo se sujeta un motor con hélice, dicho sistema fue diseñado con el software SolidWorks (Anexo 3) para posteriormente realizar la construcción.



Figura 3.16: Sistema péndulo-hélice

3.1. Programación del SPARTAN-3E

El uso de FPGA's para la implementación de sistemas electrónicos cada vez es más demandante, por su velocidad de procesamiento y flexibilidad. En este sentido, en el mercado se ofertan diferentes tarjetas de aplicación y desarrollo, las cuales incluyen una diversidad de periféricos para aumentar su versatilidad. Un ejemplo es la tarjeta Spartan 3E la cual se muestra en la figura 3.13, dicha tarjeta nos servirá para capturar la señal de salida del interferómetro y convertirla en una señal PWM que se usará para controlar la velocidad del motor del mecanismo péndulo-hélice.

En la actualidad el lenguaje de descripción de hardware más utilizado es VHDL (Hardware Description Language) el cual es un lenguaje orientado a la descripción o modelado de sistemas digitales; es decir, se trata de un lenguaje mediante el cual se puede describir, analizar y evaluar el comportamiento de un sistema electrónico digital.

3.1.1. Interfaz SPI

Para garantizar un correcto envío y recepción de datos es necesario tener un protocolo de comunicación entre ellos. El protocolo SPI (del inglés Serial Peripheral Interface) consiste en la transmisión de bits por medio de la sincronización de un reloj de forma serial, esto es, bit por bit. El dispositivo que envía información recibe el nombre de maestro (master) y los dispositivos que reciben la información son nombrados esclavos (slave).

El protocolo SPI está constituido por cuatro señales:

- 1.- CLK. Es la señal de reloj que indica los pulsos de sincronización para la transmisión de datos.
- 2.- MOSI. Señal que va del maestro al esclavo.
- 3.- MISO. Señal que va del esclavo al maestro.
- 4.- SS. Esta señal es usada para la activación del protocolo o la selección de un esclavo (en caso de tener más de uno).

La tarjeta Spartan 3E cuenta con una interfaz periférica serial (SPI) con dos canales de captura analógica que constan de un circuito preamplificador programable y un convertidor ADC.

3.1.2. Diseño jerárquico en VHDL

El diseño jerárquico es una herramienta de apoyo que permite la programación de extensos diseños mediante la unión de pequeños bloques; es decir, un diseño jerárquico agrupa varias entidades electrónicas, las cuales se pueden analizar y simular de manera individual con facilidad, para luego relacionarlas a través de un algoritmo de integración llamado Top Level [26].

Una ventaja importante del diseño jerárquico en la programación de grandes diseños es la facilidad para trabajar al mismo tiempo con otros diseñadores (paralelismo), ya que mientras uno puede diseñar una parte del sistema, otro puede desarrollar un bloque distinto para unirlos en un solo proyecto más tarde.

En este diseño se programarán dos módulos (convertidor analógico-digital y PWM) y posteriormente se coordinará el funcionamiento de estos módulos a través del algoritmo de programación Top Level.

Módulo VHDL del Convertidor analógico-digital

Se diseña en forma de una máquina de estados finitos el módulo del convertidor analógico-digital, dicha máquina de estados finitos se muestra en la figura 3.17. Internamente se cuentan los ciclos de reloj requeridos para el protocolo de comunicación de cada dispositivo (pre-amplificador y ADC) y se hace una condicional para tener activado únicamente el dispositivo deseado (Anexo 2).

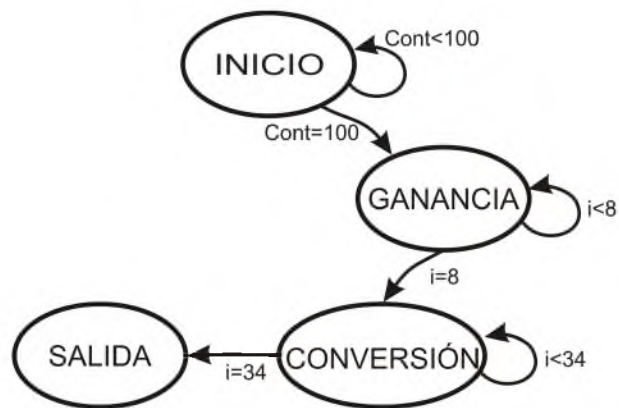


Figura 3.17: Máquina de estados finitos

En el estado INICIO las señales del amplificador programable y del convertidor (AMP_CS, SPI_SCK, SPI_MOSI y AD_CONV) se inicializan de acuerdo a los valores lógicos requeridos, una vez inicializado se pasa al estado siguiente que es GANANCIA, tomando en cuenta la figura 3.18.

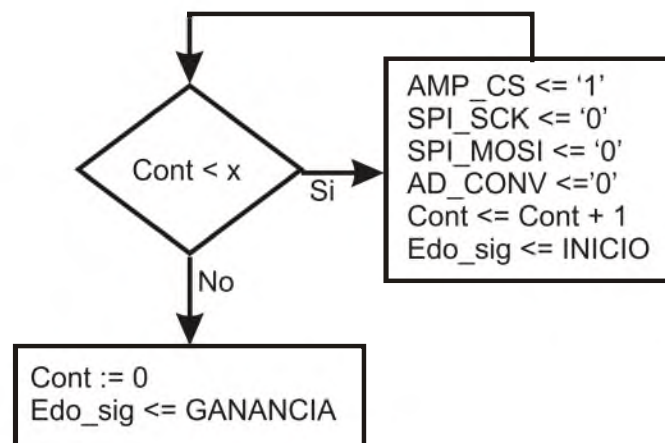


Figura 3.18: Diagrama de estado INICIO

En el estado GANANCIA se implementa una rutina que manda una palabra de 8 bits formada por dos niveles de 4 bits para configurar la ganancia del amplificador esto a través de SPI_MOSI de la tarjeta y considerando la relación con el reloj SPI_SCK como se observa en la figura 3.19. En nuestro caso la ganancia programada fue de -1, debido a que el rango máximo de voltaje de entrada que nos proporciona la tarjeta Spartan es de 0.4V a 2.9V (Anexo 2).

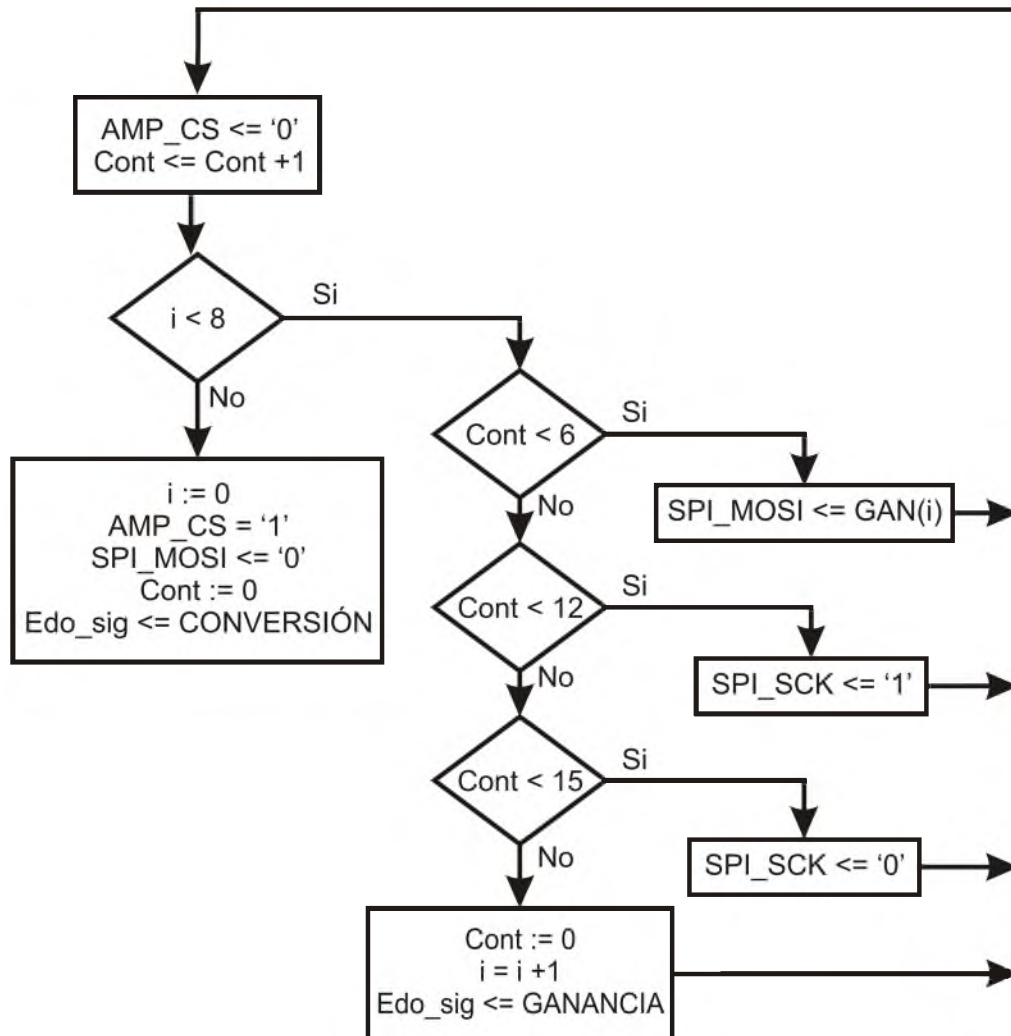


Figura 3.19: Diagrama de estado GANANCIA

En la figura 3.20 se ilustra el estado CONVERSIÓN, el cual utiliza una secuencia de comunicación de 34 ciclos y lee bit a bit el resultado de la representación digital de ambos canales analógicos tomando en cuenta las señales que permiten la transferencia de información entre el FPGA y el ADC, así como los ciclos de reloj SPI_SCK para que el ADC deje la señal SPI_MISO en el estado de alta impedancia.

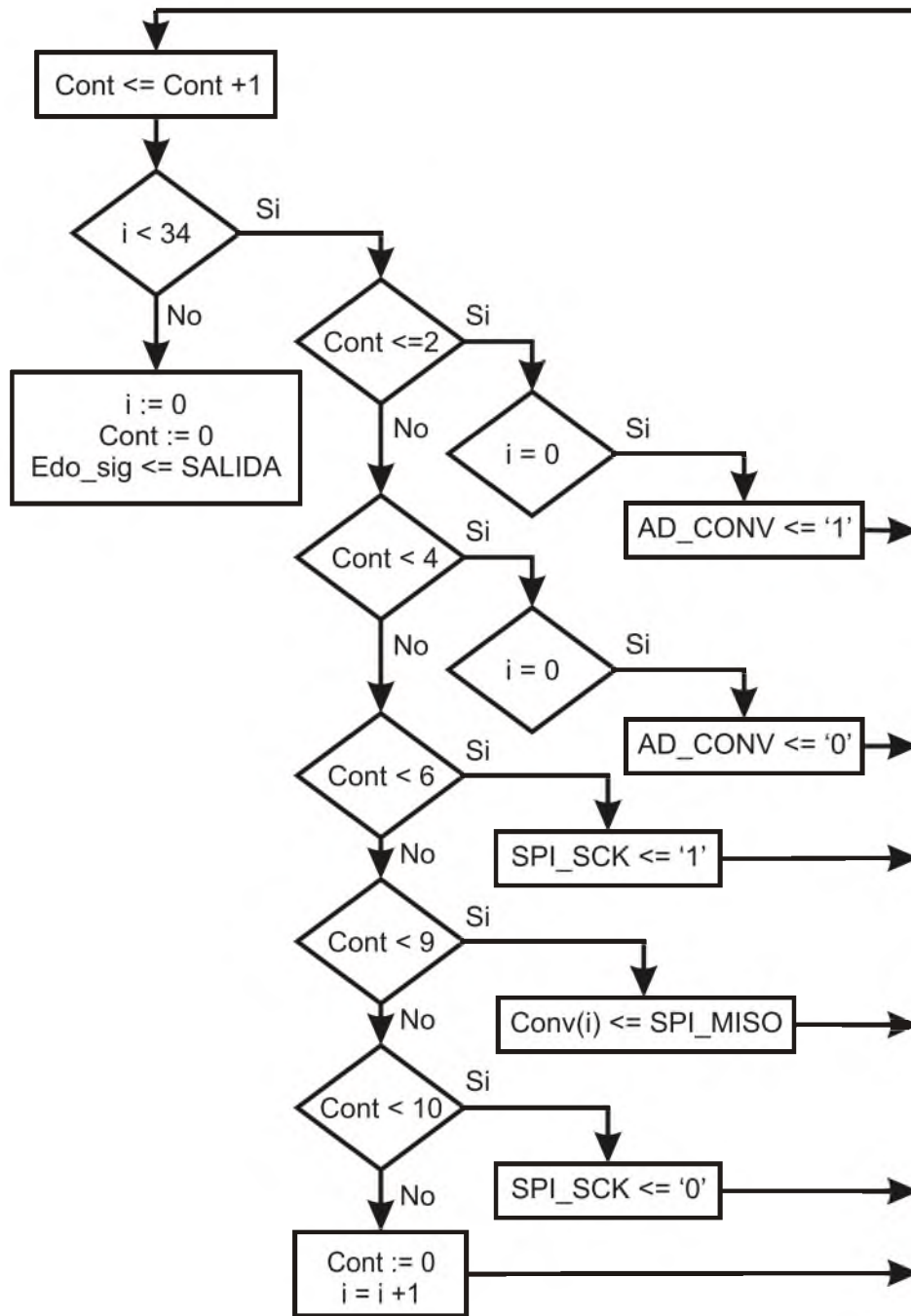


Figura 3.20: Diagrama del estado CONVERSIÓN

Una vez obtenida la representación digital de ambos canales analógicos; estos, son separados en el estado SALIDA en forma de dos palabras de 14 bits tal como se muestra en la figura 3.21, tomamos únicamente los bits de la palabra de canal 1 para ser enviados al módulo PWM.

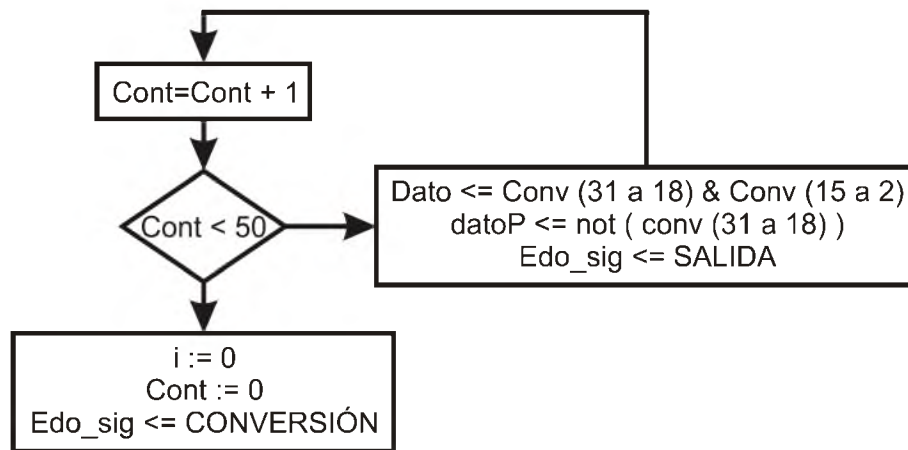


Figura 3.21: Diagrama estado SALIDA

Módulo VHDL del PWM

El modulo PWM sirve para implementar una rutina de conversión, de tal forma que a cada palabra de 14 bits, entregada por el modulo convertidor analógico-digital, le corresponde un ancho de pulso. La máquina de estados finito utilizada para realizar el modulo PWM se muestra en la figura 3.22, en el cual se considera una ganancia de 4096 debido a la frecuencia del motor con el que se está trabajando.

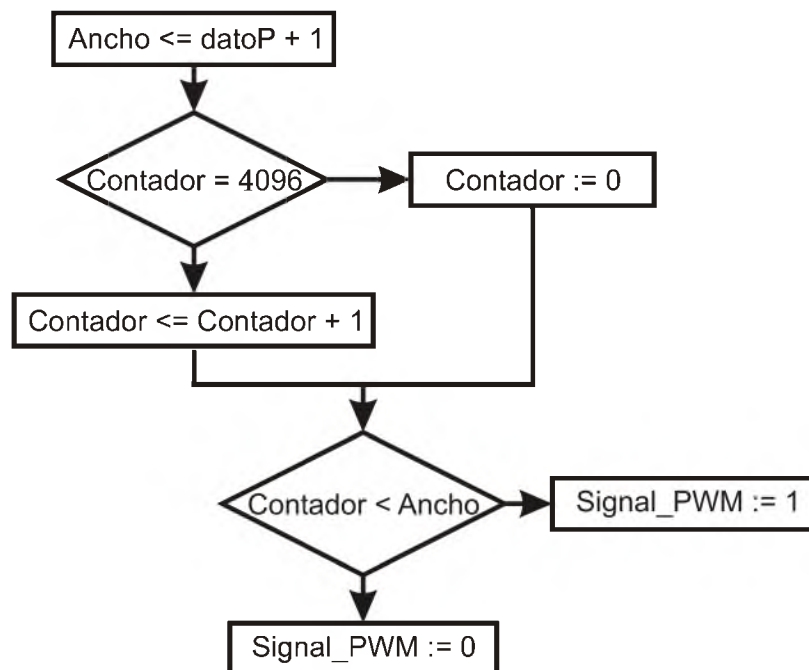


Figura 3.22: Diagrama del módulo PWM

Implementación de hardware de alto nivel

La figura 3.23 muestra la implementación del hardware de alto nivel (top_nivel) con los módulos que se programan en la tarjeta FPGA así como sus interconexiones, los cuales se sintetizan en el software ISE Design Suite 14.7 de la compañía Xilinx. Se observa que del módulo de conversión analógica (Conv_Analog_Dig) se toma la salida DatoPWM[13:0] de 14 bits para llevarlos a la entrada del módulo PWM, obteniendo como salida de este módulo una señal PWM, con la cual se controla el motor del mecanismo péndulo-hélice.

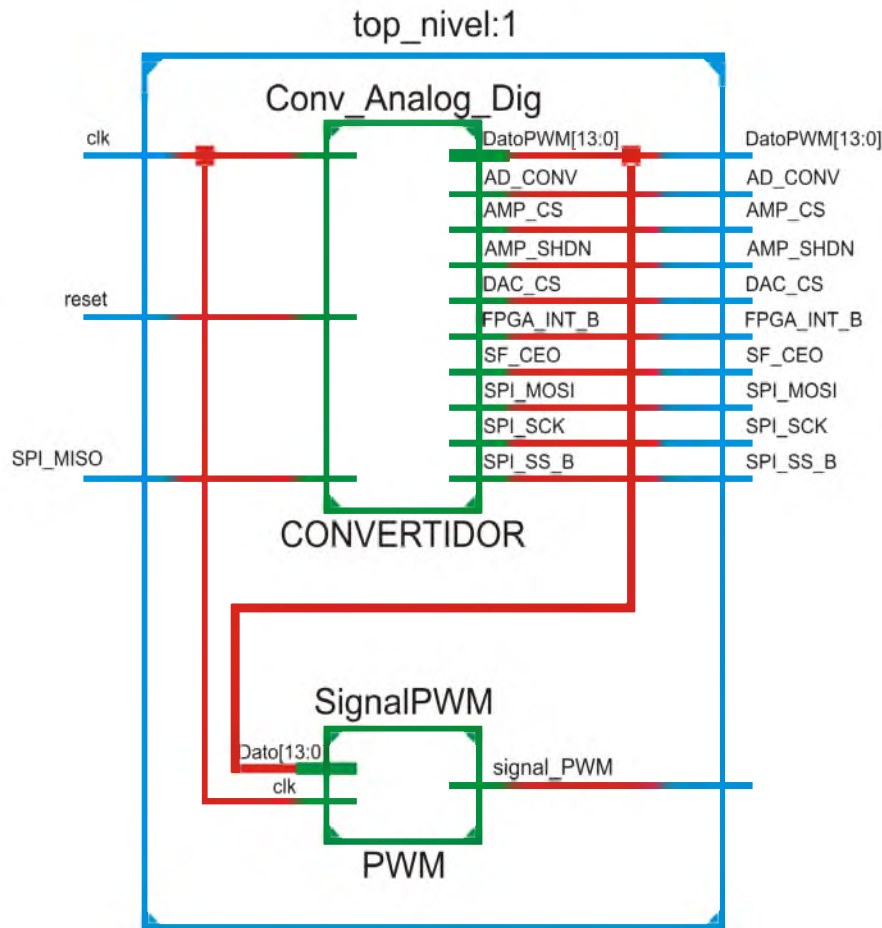


Figura 3.23: Implementación de hardware de alto nivel

3.2. Etapa del control de polarización

La figura 3.24 representa el montaje en laboratorio de la ley de Malus empleada para controlar la polarización de la luz que entra al sistema. En este caso, para tener a la entrada

del interferómetro un haz polarizado circularmente fue necesario comprobar experimentalmente si el control de polarización de tres placas realiza un control completo del estado de polarización de la luz, para esto se coloca un polarizador lineal (que se denomina analizador) y se mide la intensidad de la luz emergente ayudados de un osciloscopio como se muestra en la figura.



Figura 3.24: Etapa de control de polarización

Al ir ajustando cada una de las placas del control de polarización en distintas posiciones y rotando para cada selección el analizador, la intensidad de luz emergente presentó diferentes amplitudes las cuales representan diferentes tipos de polarización (lineal, elíptica y circular). Estas amplitudes se visualizaron en un osciloscopio tal como se muestra en la figura 3.25. En nuestro caso ajustamos al controlador de polarización para tener polarización circular donde la amplitud permanece constante, figura 3.25 c).

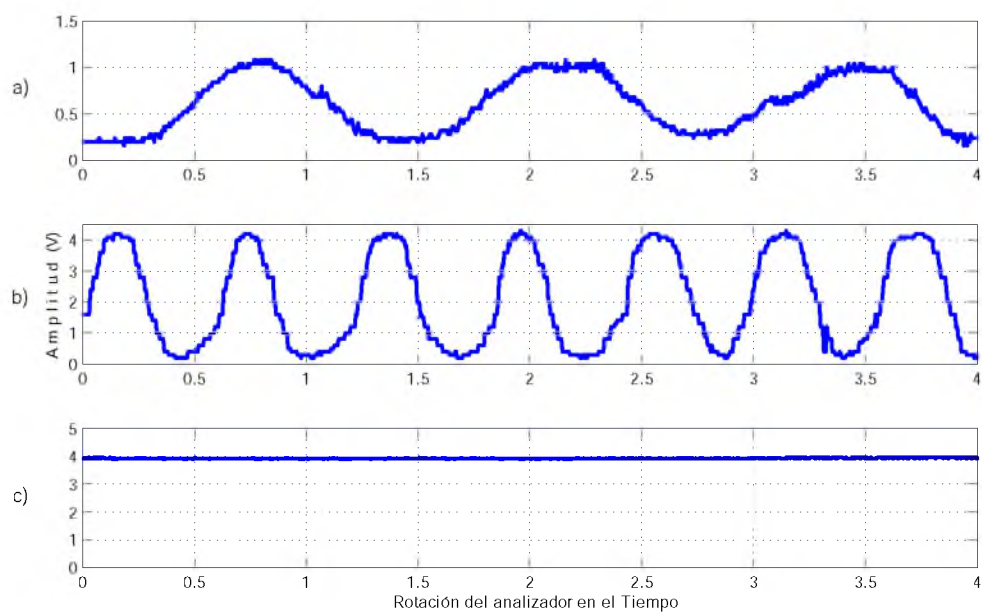


Figura 3.25: a) Polarización elíptica, b) Polarización lineal, c) Polarización circular. Visualizadas directamente del osciloscopio

Capítulo 4

Resultados experimentales

En esta parte del trabajo se hace un análisis del comportamiento de la posición angular del péndulo-hélice en relación con el ángulo de rotación de las placas retardadoras, para esto, primero se validaron los resultados experimentales haciendo una comparación con los obtenidos en las simulaciones numéricas en relación al comportamiento que tiene la transmisión del interferómetro con respecto al ángulo de rotación de las placas retardadoras. Estos validan el uso del sistema propuesto para controlar el movimiento angular del mecanismo péndulo hélice.

Posteriormente se demuestra que la amplitud de salida del interferómetro puede ser empleada para variar en ancho de pulso de una señal PWM misma que es empleada para controlar el motor con hélice del mecanismo

4.1. Comparación de resultados teóricos y experimentales a la salida del interferómetro

La comparación entre los resultados experimentales y los obtenidos en las simulaciones descritas en el apartado 2, cuando se toman características idénticas en los brazos del interferómetro, se muestran en las figuras 4.1 y 4.2. Se puede observar la dependencia que tiene la amplitud de salida del interferómetro con la rotación de una de las placas retardadoras. La línea en rojo es la gráfica experimental obtenida directamente del osciloscopio y la azul es la simulación. Para superponer ambas gráficas se tuvo especial cuidado en que el ángulo de rotación inicial de la placa retardadora en ambos casos coincidiera. En el primer caso se dejó fija QWP2 en aproximadamente 0, 100 y 180 grados, y la otra placa, QWP1, se rotó de 0 a 360 grados.

Para el segundo caso se muestra el efecto contrario se dejó fija QWP1 y QWP2 se rotó de 0 a 360 grados.

Se puede observar una gran similitud entre los resultados teóricos y los resultados experimentales.

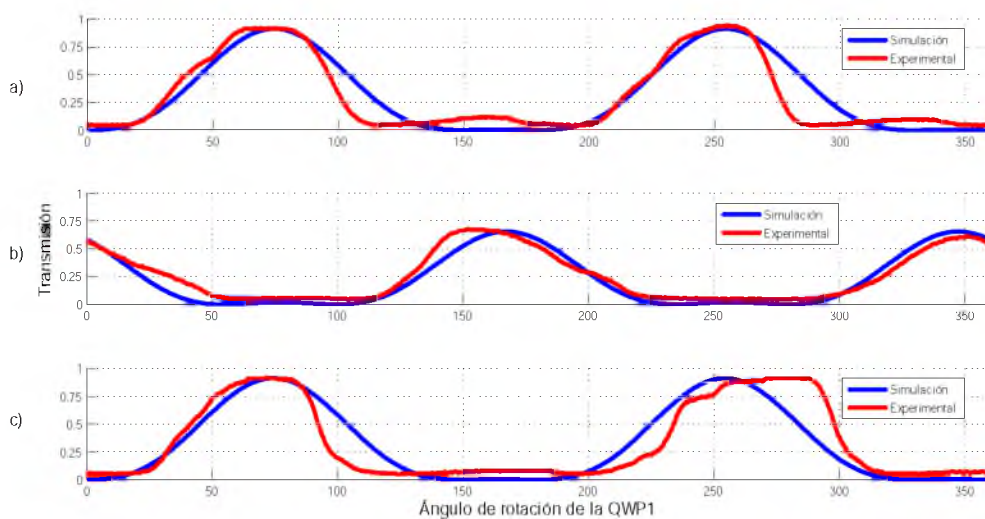


Figura 4.1: Comparación de resultados experimentales y teóricos: a) $QWP2 = 0^\circ$, b) $QWP2 = 100^\circ$, c) $QWP2 = 180^\circ$

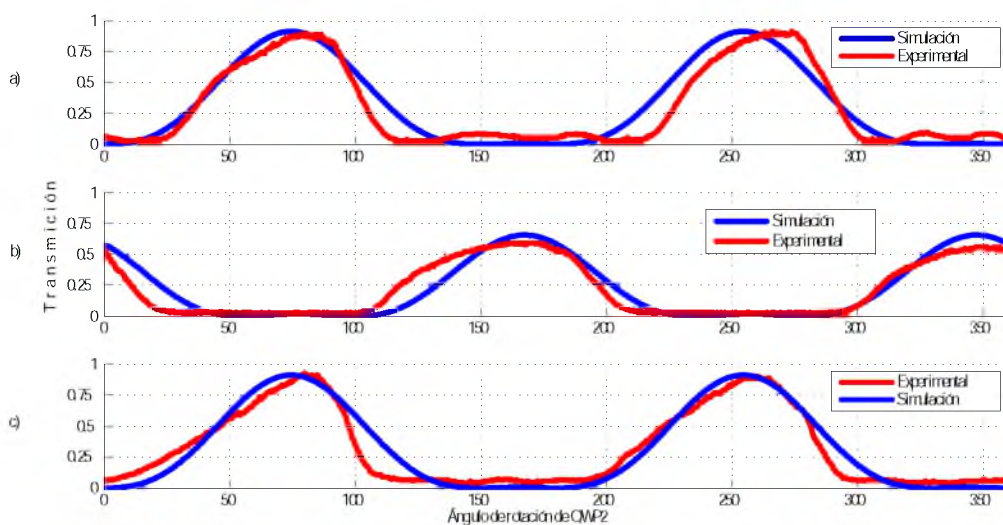


Figura 4.2: Comparación de resultados experimentales y teóricos: a) $QWP1 = 0^\circ$, b) $QWP1 = 100^\circ$, c) $QWP1 = 180^\circ$

Otra característica interesante que presenta este sistema interferométrico se observa en la figura 4.3 en la cual se rotaron ambas placas retardadoras a la misma velocidad y en direcciones contrarias, de esta forma se mantiene sin cambios la amplitud de salida (transmisión), logrando demostrar la gran similitud que tienen los resultados de la simulación con los obtenidos en laboratorio. De igual manera con estos resultados se demuestra que con rotar solo una de las placas retardadoras (cualquiera) se puede controlar la amplitud de salida del interferómetro misma que nos servirá para controlar el ancho de pulso de la señal PWM que será proporcional al ángulo en que se encuentre colocada la placa retardadora.

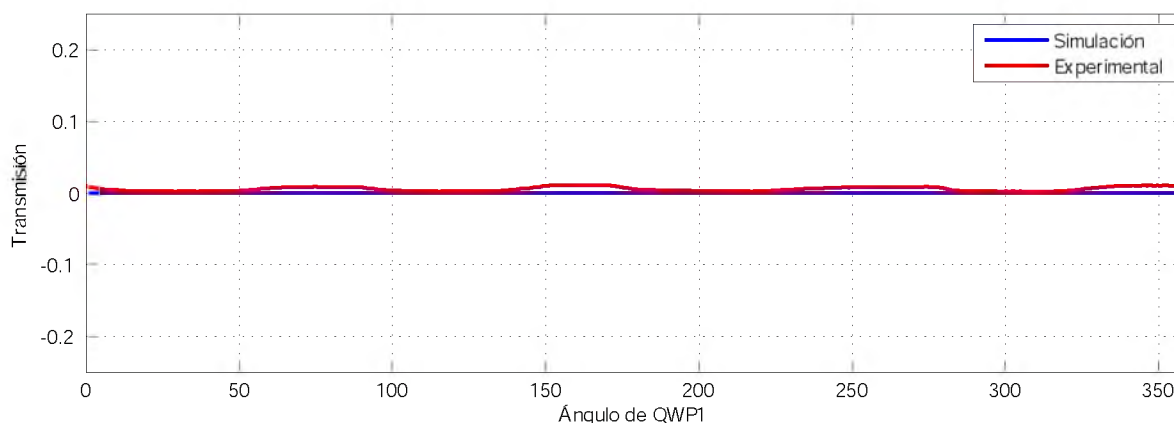


Figura 4.3: Comparación de resultados teóricos y de resultados experimentales cuando las QWP rotan en direcciones contrarias

Cabe mencionar que la rotación de las placas retardadoras se hizo de manera manual por lo que presenta un aspecto no uniforme.

4.2. Cambios de la señal PWM debido a la rotación de una de las placas.

La rotación de una de las placas retardadoras produce cambios en la amplitud del haz de salida del interferómetro que a su vez genera cambios en el ancho de la señal PWM que controla el sistema. En la figura 4.4, se muestra la representación considerada de los ejes de las placas retardadoras.

En un primer caso se rotó QWP2, mientras que QWP1 permanece fija, los resultados obtenidos se muestran en la figura 4.5. Donde claramente se observa la variación que tiene la señal PWM (en rojo) con respecto a la salida del interferómetro, (línea en azul) salida del detector (figura 3.1). La línea en verde representa la salida ya acondicionada a la entrada del FPGA mediante amplificadores operacionales.

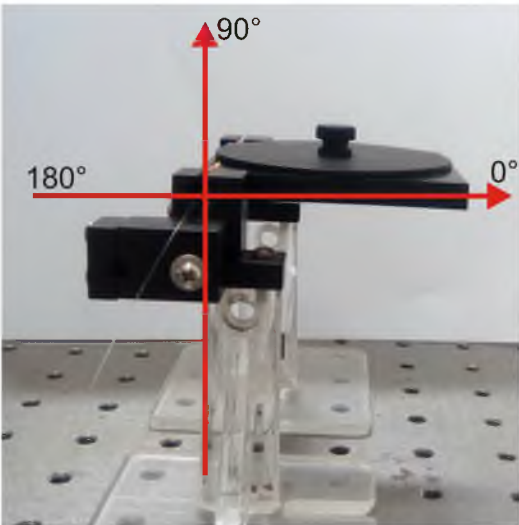


Figura 4.4: Representación de los ejes de la placa retardadora

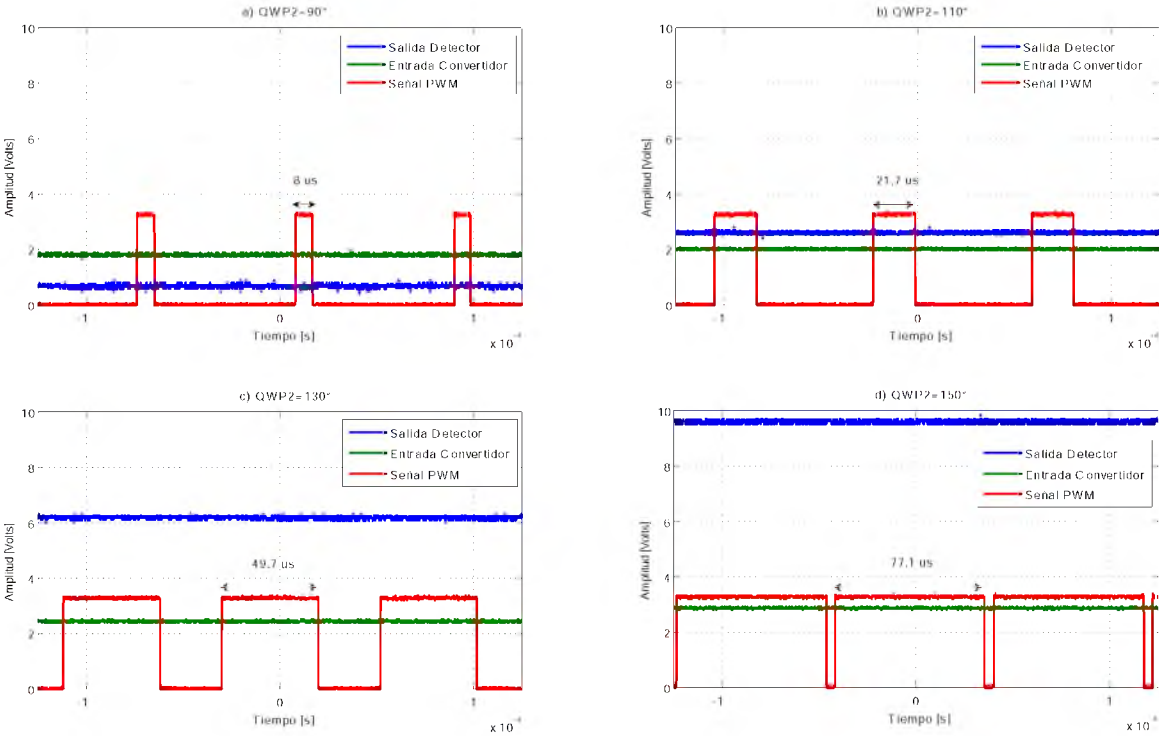


Figura 4.5: Señal de salida PWM dependiendo el ángulo de QWP2

Inicialmente ambas placas se colocaron a un ángulo de 90° con respecto a los ejes de mostrados en a figura 4.4, en esta posición se tiene una señal de 0.68 volts a la salida del interferómetro que es escalada a 1.79 volts mediante el arreglo de amplificadores operacionales, para que se ajuste al rango de voltajes de entrada que acepta el ADC de la tarjeta. Una vez convertido el voltaje de 1.79 volts en una señal digital de 14 bits, esta es convertida en la señal PWM observada, en este caso de $8 \mu s$ (figura 4.5 a)). La frecuencia de la señal PWM se programa en el FPGA y puede adecuarse a las características del motor a controlar, para el caso del motor empleado se tomó de 12.2 kHz. El ancho de la señal lo da la palabra digital entregada por el convertidor de la tarjeta por lo que el ancho de pulso PWM únicamente cambia dependiendo de la amplitud de salida del interferómetro.

Claramente se observa cómo va aumentando el ancho del pulso a medida que varía el ángulo de la placa QWP2 y permaneciendo fija QWP1 a 90° . En la figura 4.5 b-c-d) se puede ver que para ángulos de QWP2 de 110° , 130° y 150° se tienen anchos de pulso de 21.7, 49.7 y $77.1 \mu s$ respectivamente.

Por otra parte, la figura 4.6 muestra el efecto contrario, ahora se deja fija QWP2 y se rota QWP1, se observa que para los ángulos de 90° , 115° , 135° y 160° se tienen anchos de pulso de 5.6, 27, 51, y $78.2 \mu s$. Comparando ambas figuras se observa que se tienen comportamientos similares.

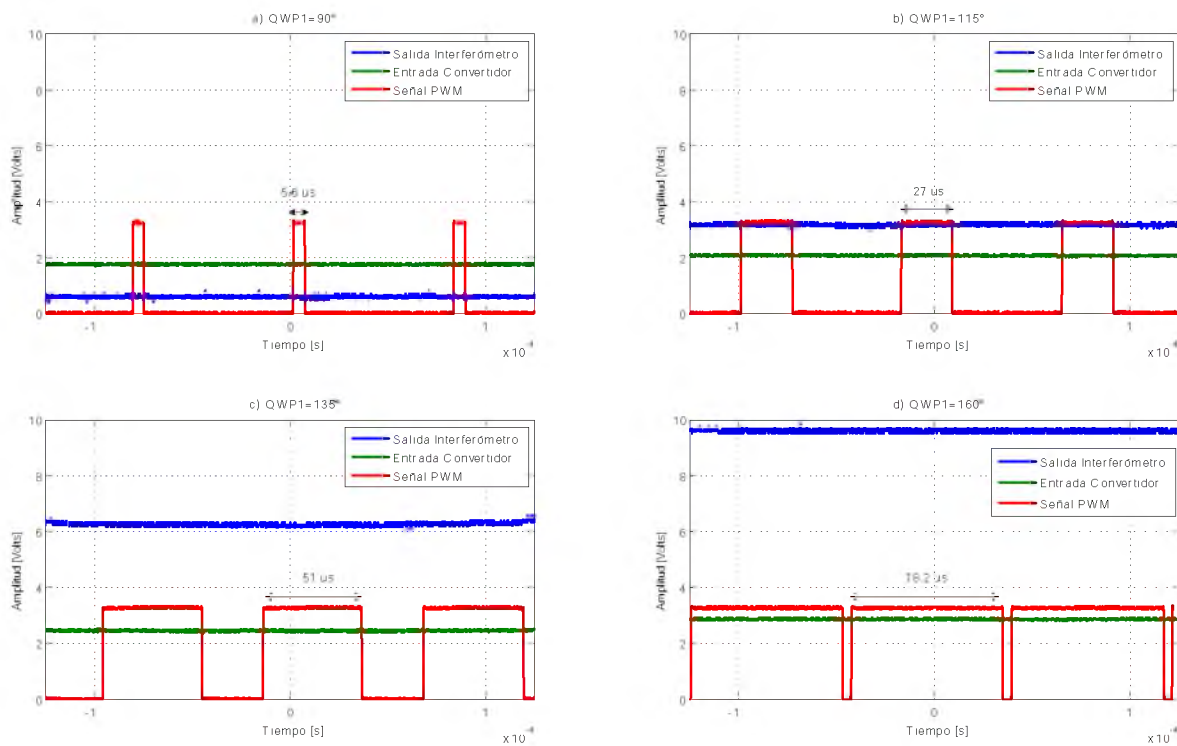


Figura 4.6: Señal de salida PWM dependiente del ángulo de rotación de QWP1.

En el caso de la figura 4.6, para alcanzar el mayor ancho de pulso QWP1 tiene que hacer un recorrido angular de 90° a 160° , a diferencia del caso anterior (figura 4.5), donde QWP2 tiene que hacer un recorrido angular de 90° a 150° . Esto era de esperarse pues es muy difícil tener condiciones idénticas en los brazos del interferómetro, que de ser así, se tendrían exactamente los mismos resultados rotando las placas retardadoras como se hizo anteriormente.

4.3. Análisis de la posición angular de la hélice en relación con la posición de las placas retardadoras

Debido a que el mecanismo propuesto para medir la posición angular es un péndulo-hélice, en la figura 4.7 se muestra la representación de ejes del péndulo.

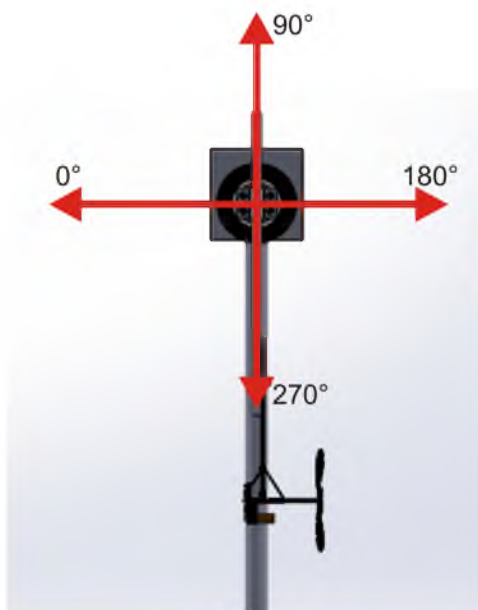


Figura 4.7: Representación de ejes del sistema péndulo-hélice

La Tabla 4.1 muestra la relación existente entre la posición angular del péndulo y la posición de las placas. Teniendo inicialmente ambas placas retardadoras a 90° y el péndulo colocado a 270° con respecto a los ejes mostrados en las figuras 4.4 y 4.7, se toman muestras cada 5° del ángulo que alcanza el péndulo al variar QWP2 de 90° hasta 150° mientras QWP1 permanece sin cambios. Se observa que el péndulo disminuye su posición la misma cantidad de grados con la que varió QWP2. Este hecho se observa de manera gráfica en la figura 4.8 donde se muestra la relación que existe entre el cambio de ángulo QWP2 y la posición angular del péndulo-hélice, son perfectamente simétricas con relación a 180° .

QWP2 [$^\circ$]	Ángulo del péndulo [$^\circ$]
90	270
95	265
100	260
105	255
110	250
115	245
120	240
125	235
130	230
135	225
140	220
145	215
150	210

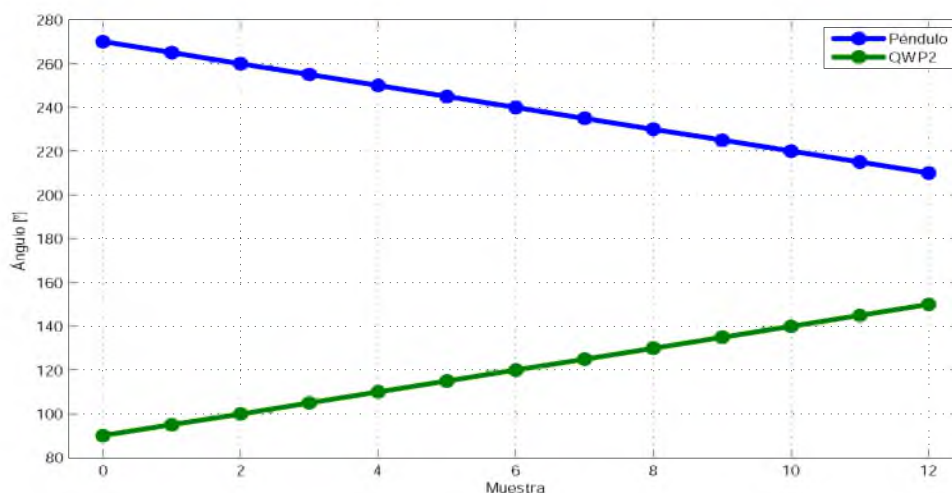


Figura 4.8: Ángulo de posición del péndulo-hélice dependiendo del ángulo de QWP2 (QWP1 permanece fija).

La Tabla 4.2 muestra la posición angular que adquiere el péndulo-hélice dependiendo el ángulo de QWP1, ahora QWP2 permanece fija. Tomando las mismas condiciones que el caso anterior (condiciones iniciales e intervalos de variación), en la figura 4.9 se observa que se conserva el mismo comportamiento que en el caso anterior, esto es, al variar la placa QWP1 5° la posición del péndulo-hélice varía en la misma proporción, a reserva del intervalo de 270 a 260 grados. Esto puede ser debido a un pequeño desajuste en los brazos del interferómetro

propiciado por la torsión que sufre la fibra óptica que se empalma en los extremos de las placas retardadoras que rotan, ya que estas se encuentran libres de cualquier alteración causado por algún sistema de fijación, más sin embargo el resultado es idéntico al de la figura 4.8.

Tabla 4.2: Posición angular del péndulo-hélice con respecto al ángulo de la placa QWP1 (QWP2 permanece fija a 90°)

QWP1 [$^\circ$]	Ángulo del péndulo [$^\circ$]
90	270
95	268
100	265
105	262
110	260
115	255
120	250
125	245
130	240
135	235
140	230
145	225
150	220
155	215
160	210

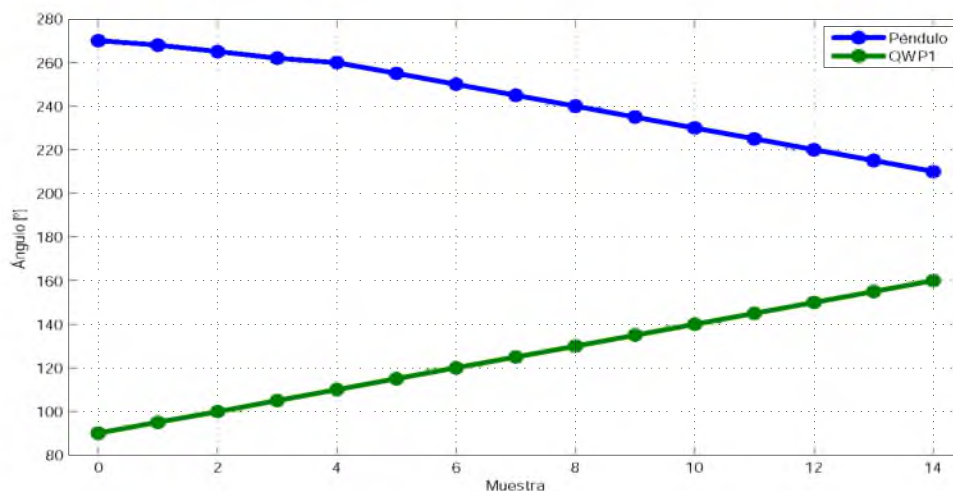


Figura 4.9: Ángulo de posición del péndulo-hélice dependiendo del ángulo de QWP1 (QWP2 permanece fija).

Por otra parte, los resultados mostrados anteriormente nos llevan a concluir que, si se rotan las dos placas a la misma velocidad, es decir con las mismas condiciones que la simulación de la figura 4.3 el mecanismo péndulo-hélice se mantendría en una posición fija sin cambio alguno. Este comportamiento nos lleva a pensar que el arreglo podría ser empleado en sistemas mecatrónicos de lazo cerrado donde las placas retardadoras puedan ser colocadas de una manera tal que una compense el movimiento de la otra.

Capítulo 5

Conclusiones

En este trabajo de tesis se presentó un sistema basado en el interferómetro de Sagnac de fibra óptica con dos placas retardadoras de un cuarto de onda, para controlar un mecanismo de movimiento angular. Dicho mecanismo basa su funcionamiento en los cambios que se producen en la señal de salida del interferómetro debido a la rotación de las placas retardadoras.

Experimentalmente observamos una alta sensibilidad en el lazo del interferómetro y una rápida respuesta a los cambios producidos al rotar las placas retardadoras. Además, teniendo las mismas condiciones en los brazos del lazo del interferómetro se puede obtener una operación ideal, esto quiere decir que al rotar el mismo ángulo en cualquiera de las placas se puede obtener el mismo ancho de pulso, además podemos configurar el arreglo de tal manera que el péndulo-hélice se desplace la misma cantidad de grados que la placa retardadora, ajustando tanto las características de los brazos del interferómetro como la frecuencia de la señal PWM. Esto es de interés ya que si se acopla la placa retardadora al eje de giro del péndulo se puede determinar, midiendo la amplitud de salida, el desplazamiento angular del mismo.

Otra característica interesante que muestra este sistema es que si se logra tener las mismas condiciones en los brazos del interferómetro (longitud de fibra, torsión, birrefringencia), se podría mantener sin cambios la amplitud de salida aun cuando las placas retardadoras estén rotando, pero con la condición de que roten a la misma velocidad y en direcciones contrarias. Se piensa que si se logra esto último y acoplando las placas retardadoras a un sistema de control retroalimentado se puede obtener con este diseño un sistema con gran estabilidad debido a la alta sensibilidad del interferómetro.

La razón por la que se empleó la tarjeta Spartan 3E, es debido a que se pretende como trabajo futuro agregar más módulos al sistema como el LCD que viene incorporado en la tarjeta con el fin de monitorear los resultados.

Bibliografía

- [1] Udd E. (Ed.). (1991). *Fiber Optics Sensors – An introduction for Engineers and Scientists*. USA: Wiley, J. & Sons.
- [2] Cerecedo-Núñez H. H, Kuzin E. (2000). Breve revisión del estado actual del interferómetro de Sagnac formado con fibra óptica de alta birrefringencia. *Revista Mexicana de Física*, 46 (5), 512-517.
- [3] Xilinx, (2007). “MicroBlaze Development Kit Spartan-3E 1600E Edition User Guide”, UG257 (v1.1).
- [4] Sagnac. G. (1913). L'éther lumineux démontré par l'effet du vent relatif d'éther dans un interféromètre en rotation uniforme. *C. R. Acad. Sci.*, 157, 708-710.
- [5] Vali V. and Shorthill R. W. (1976). Fiber laser gyroscopes. *Proc. SPIE*, 77,110-115.
- [6] Bergh R. A., Lefevre H. C., and Shaw H. J. (1981). All single mode fiber optic gyroscope. *Optics Letters*, 6 (4), 198-200.
- [7] Böhm K., Petermann K. and Weidel E. (1982). Sensitivity of a fiber optic gyroscope to environmental magnetic fields. *Optics Letters*, 7 (4), 180-182.
- [8] Mortimore D. (1988). Fiber loop reflectors. *Journal of Lightwave Technology*, 6, 1217-1224.
- [9] Dakin J. P. (1992). Distributed and multiplexed fiber optic sensors II. *Proc. SPIE*, 1797, 76.
- [10] Udd E. (1994). Sensing and instrumentation applications of the Sagnac fiber optic interferometer. *Proc. SPIE*, 2341, 52.
- [11] Kuzin E., Ramírez-Renero M., Ibarra-Escamilla B., Sánchez-Mondragón J., Cerecedo-Núñez H. (1997). Interferómetro de Sagnac con fibra birrefringente y torcida en lazo. *Revista Mexicana de Física*, 43 (3), 374-380.
- [12] Kuzin E., Ibarra-Escamilla B., Rojas-Laguna R., Sánchez-Mondragón J. (1998). Non-linear optical loop mirror with low birefringence twisted fiber in the loop. *Optics Communications*, 149, 73-76.

- [13] Estudillo-Ayala J. M., Kuzin E. y Ibarra-Escamilla B. (2001). Teoría del interferómetro de Sagnac de fibra de baja birrefringencia y torcida. *Revista Mexicana de Física*, 47(3), 271-274.
- [14] Ibarra-Escamilla B., Kuzin E., Gutiérrez-Zainos F., Téllez-García R., Haus J.W., Rojas-Laguna R., Estudillo-Ayala J. M. (2003). Measurement of beat length in short low-birefringence fibers using the fiber optical loop mirror. *Optics Communications*, 217, 211-219.
- [15] Pottiez O., Kuzin E., Ibarra-Escamilla B. and Méndez-Martínez F. (2004). Easily tuneable nonlinear optical loop mirror including low-birefringence, highly twisted fiber with invariant output polarization. *Optics Communications*, 229, 147-159.
- [16] Pottiez O., Kuzin E., Ibarra-Escamilla B., Camas-Anzueto J. T. and Gutiérrez-Zainos F. (2004). Easily tunable nonlinear optical loop mirror based on polarization asymmetry. *Optics Express*, 12 (16), 3878-3887.
- [17] Ibarra-Escamilla B., Kuzin E., Pottiez O., Haus J.W., Gutiérrez-Zainos F., Grajales-Coutiño R., Zaca-Moran P. (2004). Fiber optical loop mirror with a symmetrical coupler and a quarter-wave retarder plate in the loop. *Optics Communications*, 242, 191-197.
- [18] Gutiérrez-Zainos F., Ibarra-Escamilla B., Kuzin E., Ruiz-Corona U. y Pottiez O. (2005). Investigación experimental del espejo de lazo óptico no lineal con un acoplador simétrico y una placa retardadora de un cuarto de onda en el lazo, *Revista Mexicana de Física*, 51 (6), 574-576.
- [19] González-García A., Pottiez O. y Grajales-Coutiño R. (2010). Estudio experimental de un láser sintonizable en longitud de onda usando un filtro de Sagnac con selectividad espectral mediante cambios en la temperatura. *Revista Mexicana de Física*, 56 (4), 275-280.
- [20] Villagómez-Bernabé B. A., Kuzin E., Ibarra-Escamilla B., Korneev N. (2012). Estudio sobre la influencia de birrefringencia circular y dispersión Raman estimulada en el funcionamiento del interferómetro Sagnac, XXV Reunión Anual de Óptica, Morelia, Michoacán.
- [21] Lutang W, Nian F., Chunxu W., Haijuan Q., Zhaoming H. (2014). A Fiber Optic PD Sensor Using a Balanced Sagnac Interferometer and an EDFA-Based DOP Tunable Fiber Ring Laser, *Sensors*, 14, 8398-8422.
- [22] Hyunjin K., Umesh S. (2015), Multi-Stress Monitoring System with Fiber-Optic Mandrels and Fiber Bragg Grating Sensors in a Sagnac Loop, *Sensors*, 15, 18579-18586.
- [23] Osorio-Ignacio A. (2015). Estudio teórico y experimental del interferómetro de Sagnac de fibra óptica para aplicaciones como dispositivo sensor. Loma Bonita, Oaxaca (México), Universidad del Papaloapan.

- [24] McIntyre P. and Snyder A. W. (1978). Light propagation in twisted anisotropic media: Application to photoreceptors. *Journal of the Optical Society of America*, 68 (2), 149-157.
- [25] Lefevre H. C. (1980) Single-modo fibre fractional wave devices and polarisation controllers, *Electronics Letters*,16 (20), 778-780.
- [26] Maxinez, Alcalá. "VHDL El arte de programar sistemas digitales", Ed, Continental, pp 197.
- [27] Reitz, Milford, Christy, "Fundamentos de la teoria electromagnetica", Ed, Addison-Wesley Iberoamericana, pp 395.

Anexo 1

Polarización

Para la comprensión de la polarización es necesario considerar la luz como una onda electromagnética, compuesta por un campo eléctrico \mathbf{E} y un campo magnético \mathbf{H} , que viajan juntos a la misma velocidad y en la misma dirección \mathbf{k} , estas cantidades siempre están desfasadas 90° y mutuamente perpendiculares la una con la otra y a \mathbf{k} [27].

Estados de polarización

Un estado de polarización lo describe el vector de campo eléctrico \mathbf{E} y especifica su frecuencia, dirección de propagación y su dirección de oscilación de este vector. Hay básicamente tres estados de polarización: Lineal, Circular y Elíptico, esta forma geométrica describe el camino que sigue la pautilla del vector de campo eléctrico \mathbf{E} cuando se propaga en el espacio.

Sean dos ondas de luz armónicas dadas por las ecuaciones vectoriales siguientes:

$$E_x(z, t) = iE_{0x} \cos(kz - \omega t) \quad (5.1)$$

$$E_y(z, t) = jE_{0y} \cos(kz - \omega t + \varepsilon) \quad (5.2)$$

Donde ε es la diferencia de fase entre las dos ondas viajando en dirección z , E_{0x} y E_{0y} son sus amplitudes, k es una constante positiva conocida como el número de onda, ω es la frecuencia angular y t es el tiempo. Por consiguiente el campo eléctrico asociado a la luz que es la perturbación óptica que resulta de sumar estas dos ondas que son perpendiculares, es:

$$E_x(z, t) = iE_{0x} \cos(kz - \omega t) + jE_{0y} \cos(kz - \omega t + \varepsilon) \quad (5.3)$$

Polarización lineal

La polarización lineal (figura 5.1) se origina cuando $\varepsilon = 0$ o un entero múltiplo de 2π , esto quiere decir que las ondas están en fase. Para este caso:

$$E(z, t) = [iE_{0x} + jE_{0y}] \cos(kz - \omega t) \quad (5.4)$$

La onda resultante tiene una amplitud fija igual a $[iE_{0x} + jE_{0y}]$ y genera un plano de vibración constante.

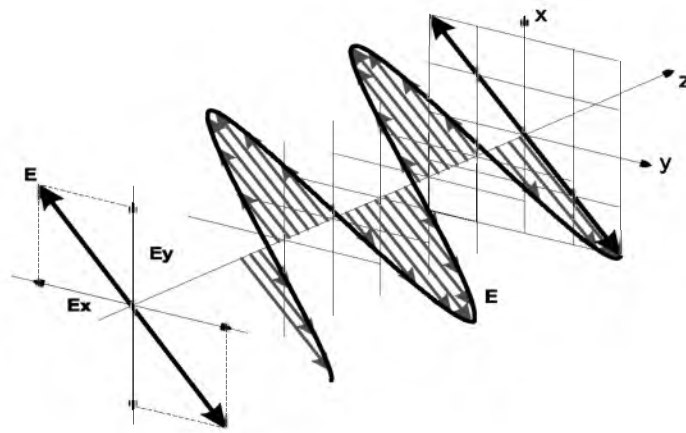


Figura 5.1: Luz polarizada linealmente

Polarización circular

La polarización circular (figura 5.2) se produce cuando la dirección del campo eléctrico gira a través de 360° durante una longitud de onda. Por supuesto, el campo magnético asociado gira con él, cuando las amplitudes de las ondas (ecuación 5.1 y 5.2) son iguales $[E_{0x} + E_{0y} = E_0]$ y están desfasadas por $\varepsilon = \pm\frac{\pi}{2}$, la suma vectorial de las dos ondas resulta ser:

$$E(z, t) = E_0 [i \cos(kz - \omega t) \pm j \sin(kz - \omega t)] \quad (5.5)$$

Donde \pm determina polarización circular derecha si es $+$ y polarización circular izquierda si es $-$.

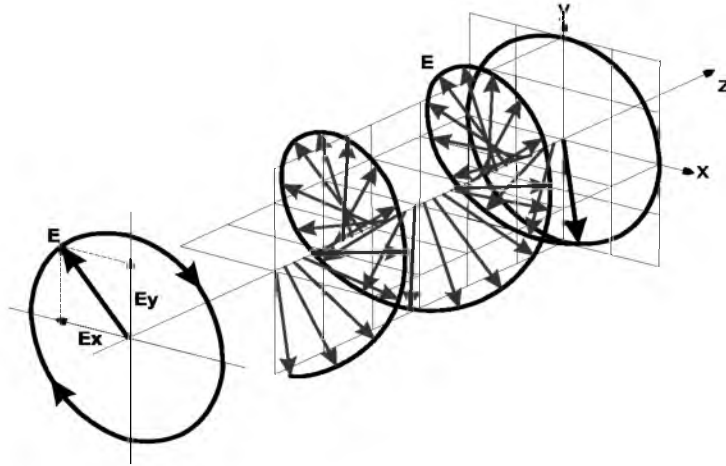


Figura 5.2: Luz polarizada circularmente

Polarización elíptica

La polarización lineal y circular son casos especiales de la polarización elíptica (figura 5.3). Para describirlas se partirá de las ecuaciones 5.1 y 5.2 para eliminar la dependencia del tiempo. De la ecuación 5.2 se tiene:

$$\frac{E_y}{E_{0y}} = \cos(kz - \omega t + \varepsilon) \quad (5.6)$$

Usando la identidad trigonométrica $\cos(u + v) = \cos u \cos v - \sin u \sin v$

$$\frac{E_y}{E_{0y}} = \cos(kz - \omega t) \cos(\varepsilon) - \sin(kz - \omega t) \sin(\varepsilon) \quad (5.7)$$

Dado que de la ecuación 5.1 se tiene

$$\cos(kz - \omega t) = \frac{E_x}{E_{0x}} \quad (5.8)$$

Entonces la ecuación 5.7 queda

$$\frac{E_y}{E_{0y}} - \frac{E_x}{E_{0x}} \cos(\varepsilon) = -\sin(kz - \omega t) \sin(\varepsilon) \quad (5.9)$$

Elevando al cuadrado la ecuación 5.1 en ambos miembros

$$E_x^2 = E_{0x}^2 \cos^2(kz - \omega t) \quad (5.10)$$

$$\frac{E_x^2}{E_{0x}^2} = 1 - \sin^2(kz - \omega t) \quad (5.11)$$

$$\sin(kz - \omega t) = \left[1 - \frac{E_x^2}{E_{0x}^2}\right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.12)$$

Ahora también elevando al cuadrado la ecuación 5.9 en ambos miembros

$$\left[\frac{E_y}{E_{0y}} - \frac{E_x}{E_{0x}} \cos(\varepsilon)\right]^2 = [-\sin(kz - \omega t) \sin(\varepsilon)]^2 \quad (5.13)$$

$$\frac{E_y^2}{E_{0y}^2} - 2\frac{E_y}{E_{0y}} \frac{E_x}{E_{0x}} \cos(\varepsilon) + \frac{E_x^2}{E_{0x}^2} \cos^2(\varepsilon) = \left(1 - \frac{E_x^2}{E_{0x}^2}\right) \sin^2(\varepsilon) \quad (5.14)$$

$$\frac{E_y^2}{E_{0y}^2} + \frac{E_x^2}{E_{0x}^2} - 2\frac{E_y}{E_{0y}} \frac{E_x}{E_{0x}} \cos(\varepsilon) = \sin^2(\varepsilon) \quad (5.15)$$

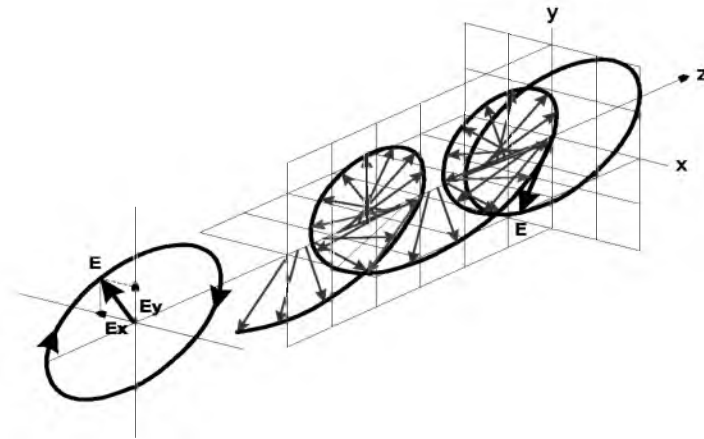


Figura 5.3: Luz polarizada elípticamente

En conclusión la ecuación, representa una elipse, cuya excentricidad y orientación de sus ejes en el plano xy depende solamente de ε , pero no de t . Igualmente que la polarización circular, la polarización elíptica es de dos tipos: izquierda o derecha, de acuerdo a si la elipse que traza el extremo del vector de campo eléctrico gira en sentido antihorario u horario, respectivamente, para un observador hacia el cual se propaga la luz.

Este tema ilustra de forma comprensible el fenómeno de la polarización y permite estudiar la luz láser para entender su propagación en un medio birrefringente (fibra óptica). El control de la polarización es una característica importante para la fabricación de sensores basados en fibra óptica porque es uno de los parámetros que se modifica torciendo, comprimiendo y estirando la fibra. La medición de este cambio es un camino útil para sensar diferentes efectos.

Anexo 2

Convertidor analógico-digital

La placa Spartan 3E incluye un circuito de captura analógico de dos canales, dicho circuito se muestra en la figura 5.4 y consiste en un pre-amplificador de ganancia programable LTC6912 que escala la señal analógica entrante en el jumper J7, la ganancia del amplificador es programada por el usuario, y su selección está en relación al rango de voltajes de la aplicación. La salida del amplificador está conectada a un convertidor analógico digital (ADC) LTC1407A de 14 bits [3]. Tanto el preamplificador como el ADC son controlados por el FPGA.

Pre-amplificador programable

El LTC6912 proporciona dos amplificadores inversores independientes con ganancia programable. El propósito del amplificador es escalar el voltaje entrante en VINA o VINB de modo que maximice el rango de conversión. Cada canal analógico tiene un amplificador asociado (figura 5.4). Las señales analógicas presentes en las entradas VINA o VINB en el jumper J7 se amplifican con relación a 1.65V. Esta referencia se genera usando un divisor de voltaje empleando la fuente de voltaje de 3.3 volts de la tarjeta.

La ganancia de cada amplificador puede ser programada de -1 a -100, como se muestra en la Tabla 1.

Ganancia	A3	A2	A1	A0	Rango de voltajes de entrada	
	B3	B2	B1	B0	Mínimo	Máximo
0	0	0	0	0		
-1	0	0	0	1	0.4	2.9
-2	0	0	1	0	1.025	2.275
-5	0	0	1	1	1.4	1.9
-10	0	1	0	0	1.525	1.775
-20	0	1	0	1	1.5875	1.7125
-50	0	1	1	0	1.625	1.675
-100	0	1	1	0	1.6375	1.6625

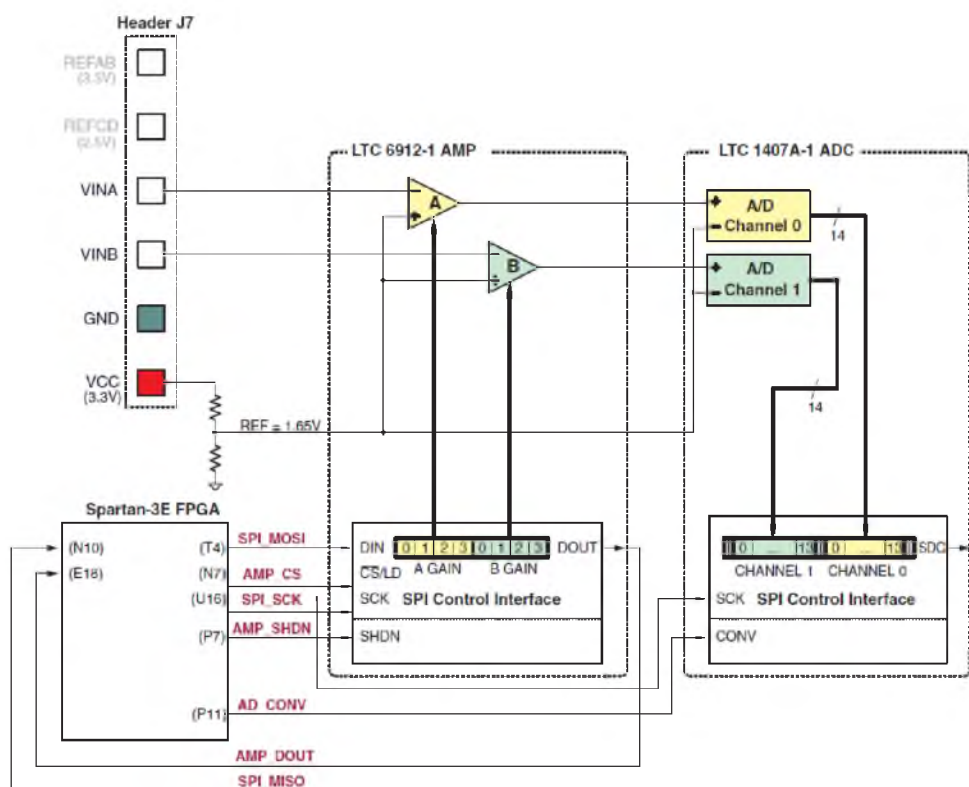


Figura 5.4: Circuito de captura analógica

La Tabla 2 indica las señales que permiten la comunicación de datos entre el FPGA y el amplificador en su función de maestro, algunas de estas señales también son compartidas con otros dispositivos a través del bus SPI.

Señal	Pin FPGA	Dirección	Descripción
SPI_MOSI	T4	FPGA→AD	Datos en serie para el Pre-Amplificador.
AMP_CS	N7	FPGA→AMP	Bit de selección. Activo en bajo.
SPI_SCK	U16	FPGA→AMP	Señal de reloj.
AMP_SHDN	P7	FPGA→AMP	Reset.
AMP_DOUT	E18	FPGA←AMP	Datos en serie. Configuración.

La interfaz de comunicaciones basada en SPI con el amplificador se ilustra en la figura 5.5. El Pre-Amplificador consta de dos canales de recepción, cada uno puede programarse con una ganancia independiente. Este protocolo consta de 8 bits, 4 bits determinan la ganancia del amplificador A y los otros 4 bits los del amplificador B.

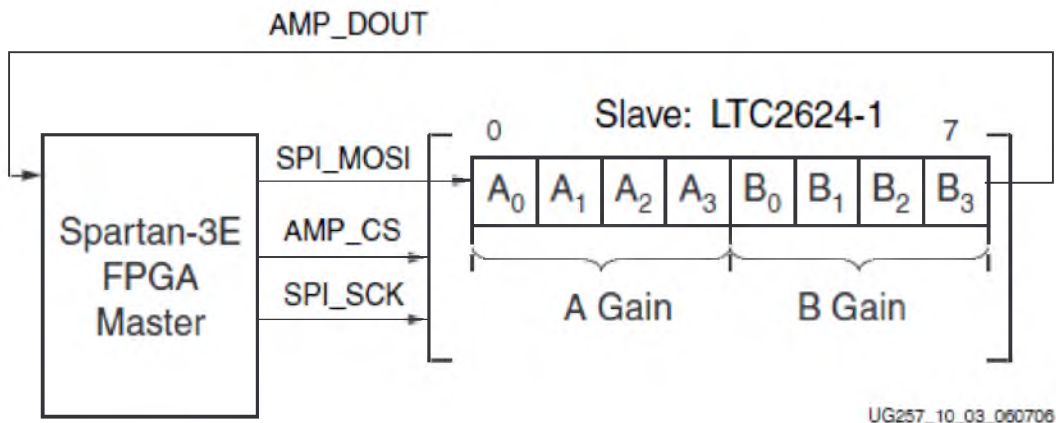


Figura 5.5: Protocolo de comunicación del Pre-Amplificador.

En la entidad destinada a la interface SPI se debe considerar el diagrama de tiempos de cada dispositivo. En este diagrama se especifica el orden en que se interpretan las señales. La figura 5.6 presenta el diagrama de tiempos necesario para el protocolo del Pre-Amplificador.

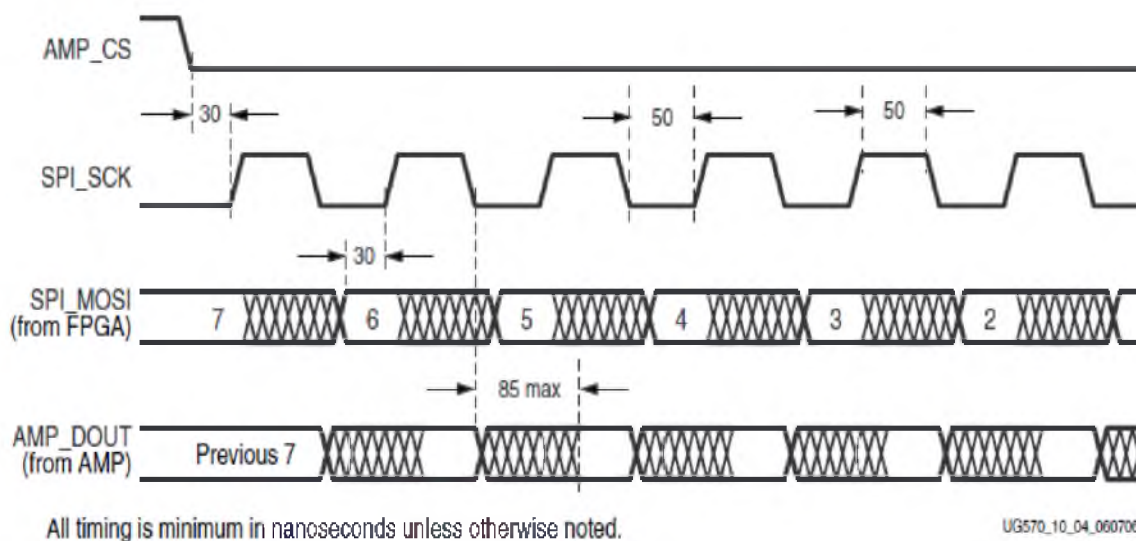


Figura 5.6: Diagrama de tiempos del Pre-Amplificador

Convertidor Analógico-Digital (ADC)

De acuerdo con el circuito de captura analógica la salida del Pre-Amplificador está conectada al CAD LTC1407, el cual convierte el voltaje analógico en VINA o VINB en una

representación de 14 bits. La representación obtenida está basada en la siguiente ecuación:

$$D [13 : 0] = GAIN * \frac{(v_{in} - 1,65V)}{1,25V} * 8192$$

donde GAIN es la ganancia programada previamente en el pre-amplificador, V_{in} es el Voltaje analógico en la entrada.

La tensión de referencia para el amplificador y el ADC es de 1.65V. En consecuencia, se restará 1.65V de la tensión de entrada en VINA o VINB. El rango máximo del ADC es $\pm 1,25V$, centrado alrededor del voltaje de referencia, 1.65V. Por lo tanto, 1.25V aparece en el denominador para escalar la entrada analógica en consecuencia. Finalmente, el ADC presenta una salida digital de 14 bits, complemento a dos. Un número de complemento a dos de 14 bits representa valores entre -2^{13} y 2^{13} . Por lo tanto, la cantidad es escalada por 8192 o 2^{13} .

Las señales que permiten la transferencia de información entre en FPGA y el ADC se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Señales de comunicación entre el FPGA y el ADC.			
Señal	Pin FPGA	Dirección	Descripción
SPI_SCK	U16	FPGA→AMP	Señal de reloj.
AD_CONV	P11	FPGA→AMP	Bit para la conversión.
SPI_MISO	N10	FPGA←AMP	Datos en serie. Presenta la representación digital de los valores analógicos como dos valores binarios de 14 bits en complemento a dos.

La figura 5.7 proporciona un ejemplo de transacción de bus SPI al ADC. Cuando la señal AD_CONV pasa a Alto, el ADC mide simultáneamente ambos canales analógicos. Los resultados de esta conversión no se presentan hasta que el siguiente tiempo AD_CONV se afirme.

Las señales de bus SPI son compartidas por otros dispositivos en la placa. Es vital que otros dispositivos se desactiven cuando el FPGA se comunique con el AMP o ADC para evitar la contención del bus. La tabla 4 proporciona las señales y los valores lógicos requeridos para desactivar los otros dispositivos.

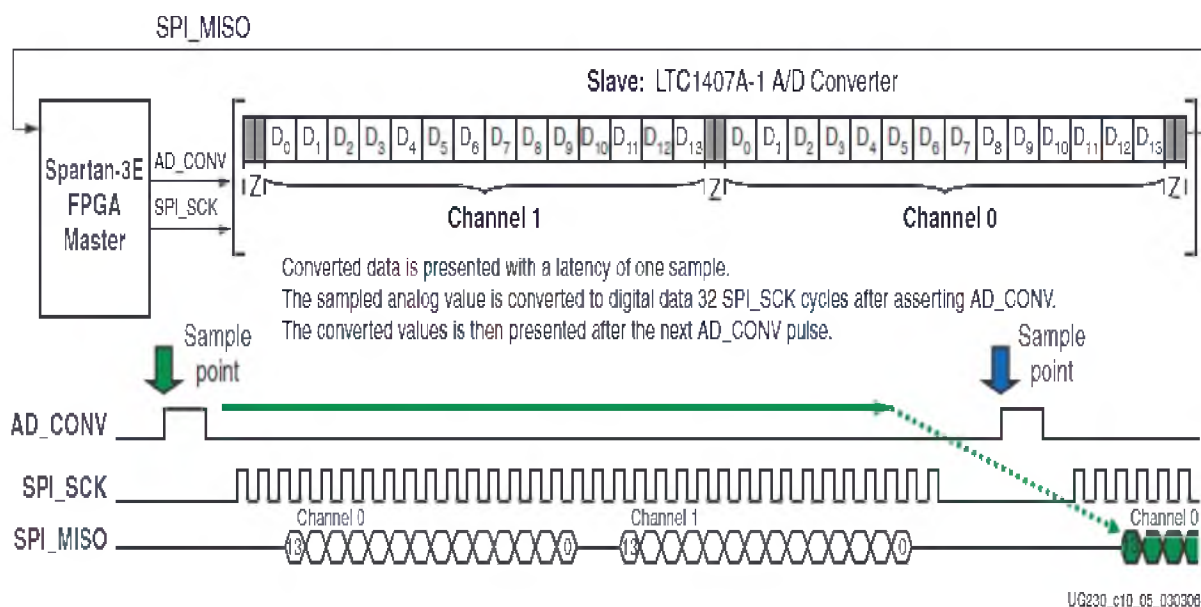


Figura 5.7: Interfaz de conversión de analógico a digital

Tabla 4. Señales necesarias para deshabilitar otros dispositivos de la tarjeta Spartan 3E.		
Señal	Dispositivo desactivado	Valor
SPI_SS_B	SPI Serie Flash	1
AMP_CS	Pre-Amplificador Programable	1
DAC_CS	DAC	1
SF_CEO	StrataFlash Paralelo Flash PROM	1
FPGA_INIT_B	Plataforma Flash PROM	1

Anexo 3

Modelo del sistema péndulo-hélice

A continuación se presentan los planos del sistema péndulo - hélice. El modelo fue construido en el software SolidWorks. En la figura 5.8 se muestra una vista explotada del sistema indicándose cada una de las partes que lo integran.

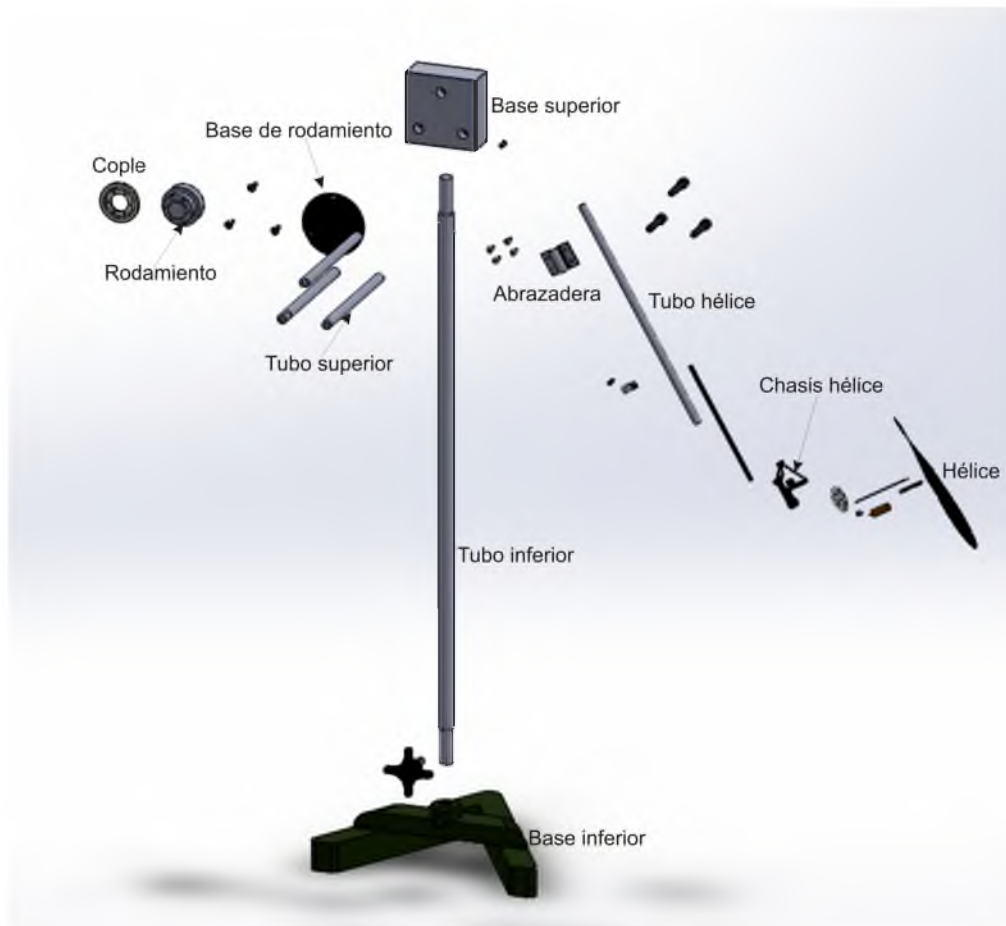
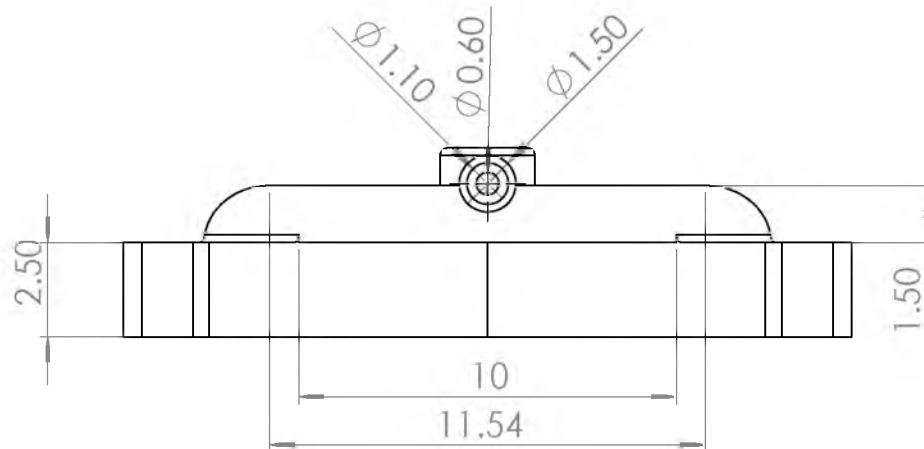
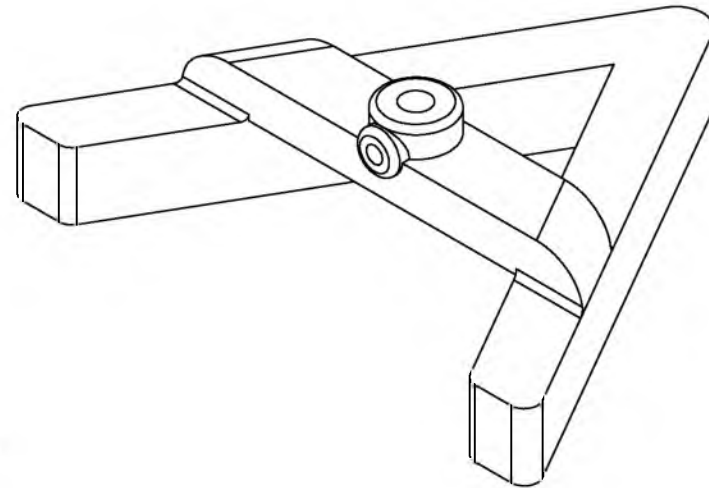
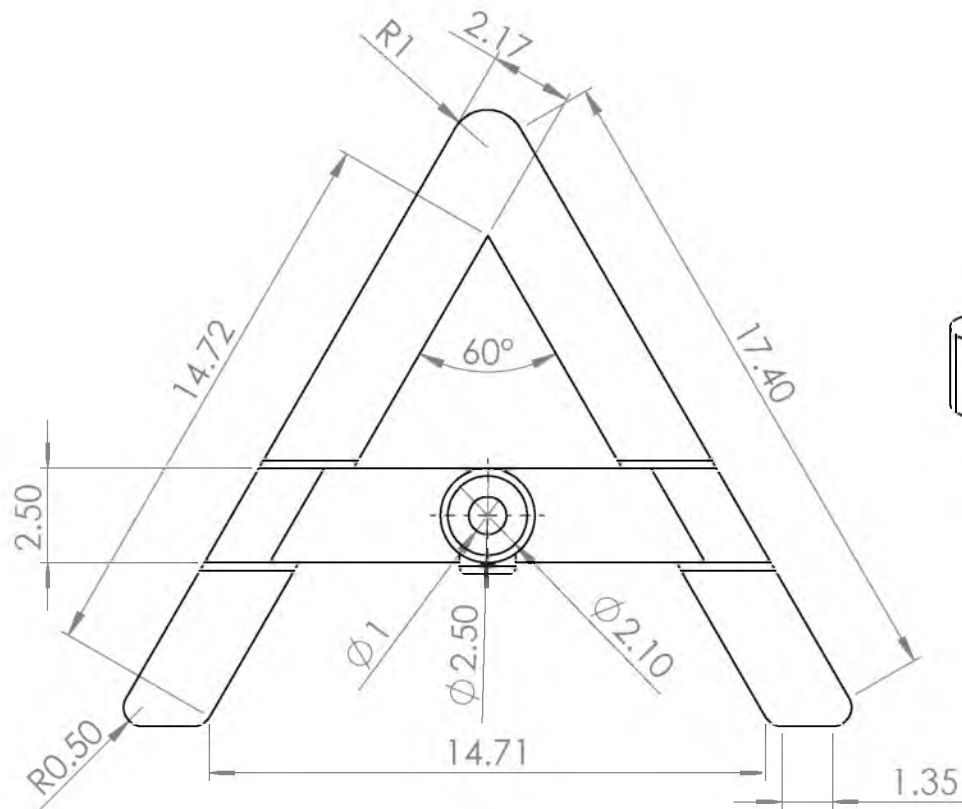
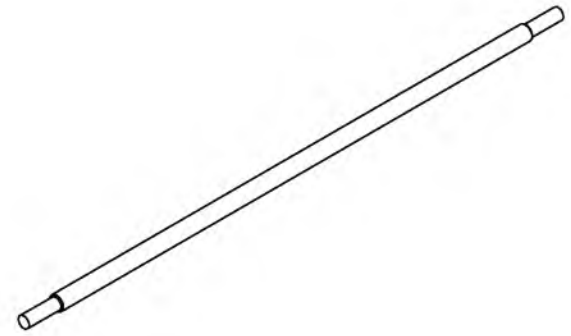
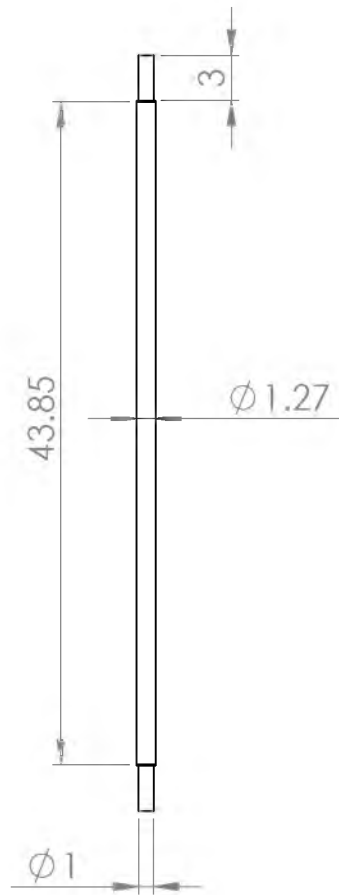


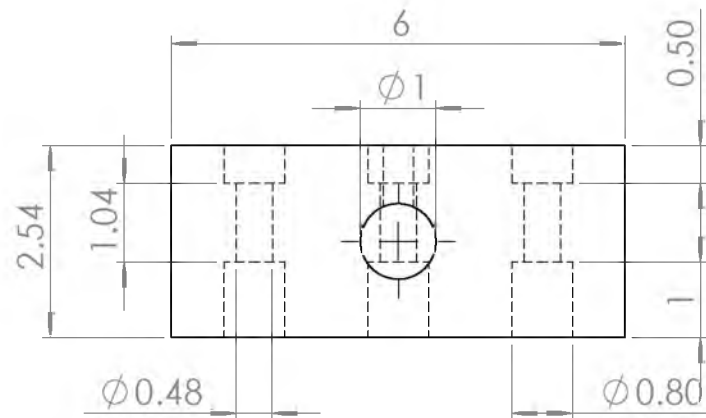
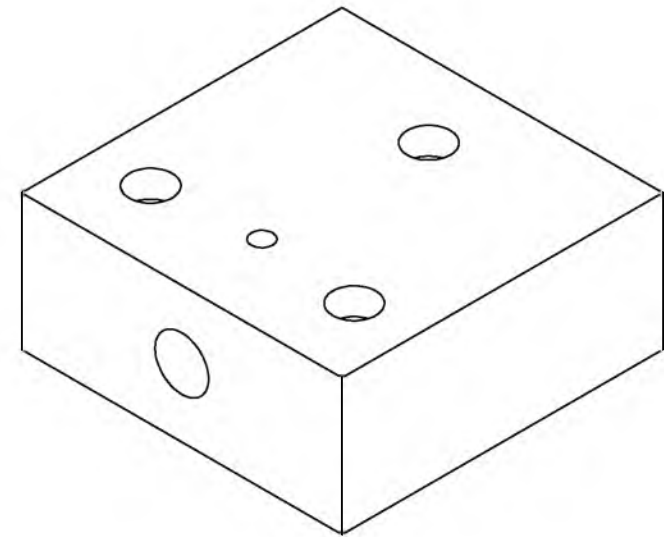
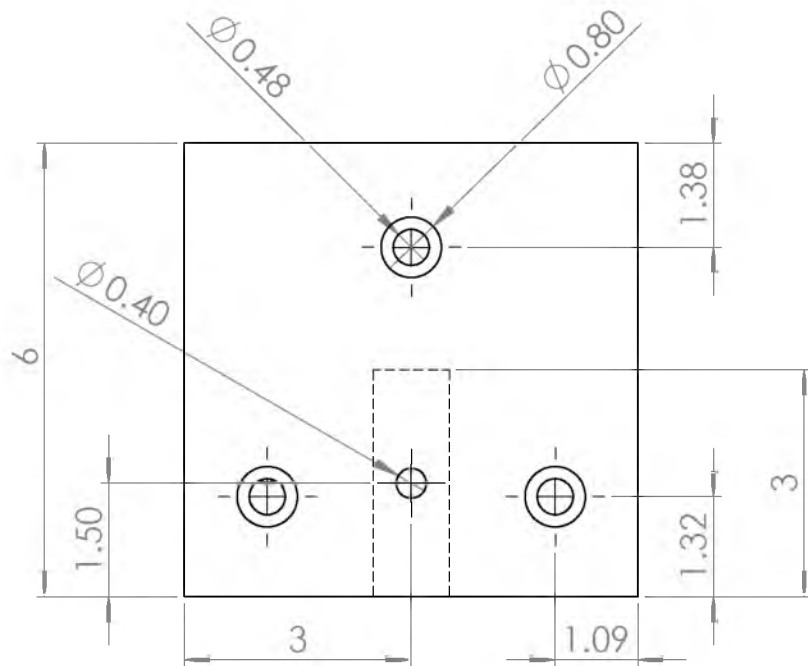
Figura 5.8: Vista explotada del sistema péndulo-hélice



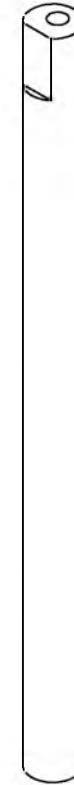
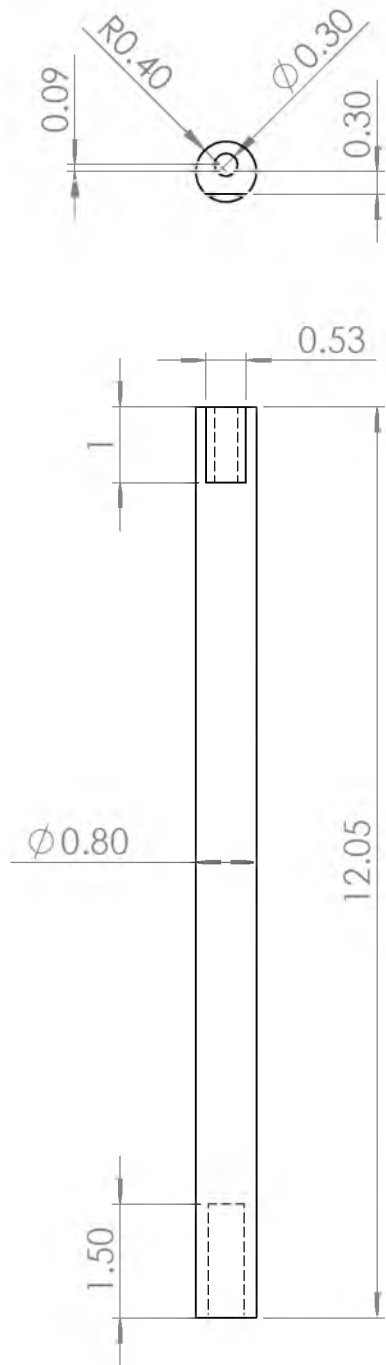
NO. DIBUJO: 1	BASE INFERIOR DEL SISTEMA		
TIPO DE DIBUJO:	VISTA SUPERIOR, FRONTAL E ISOMÉTRICO DE LA BASE	ESCALA:	UNIDADES:
		1:2	cm
BASE INFERIOR DEL SISTEMA PÉNDULO-HÉLICE			
AUTOR:	ITZAMARY ROMERO SOSA	FECHA:	MARZO/2018
SISTEMA PÉNDULO-HÉLICE		Vo. Bo.	
INGENIERÍA EN MECATRÓNICA			
UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN			



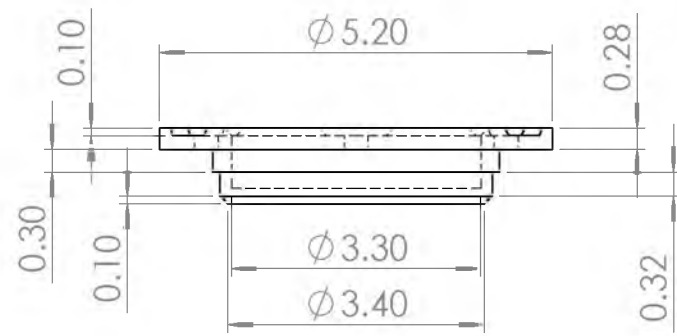
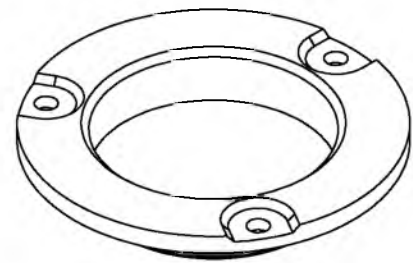
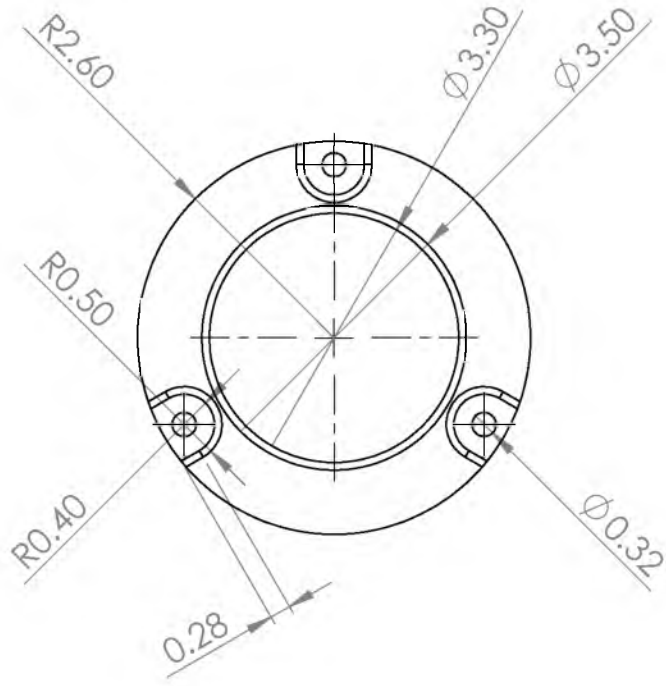
NO. DIBUJO: 2	TUBO INFERIOR DEL SISTEMA		
TIPO DE DIBUJO:	VISTA SUPERIOR E ISOMÉTRICO DE LA BASE	ESCALA: 1:5	UNIDADES: cm
TUBO INFERIOR DEL SISTEMA PÉNDULO-HÉLICE			
AUTOR:	ITZAMARY ROMERO SOSA	FECHA:	MARZO/2018
SISTEMA PÉNDULO-HÉLICE		Vo. Bo.	
INGENIERÍA EN MECATRÓNICA			
UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN			



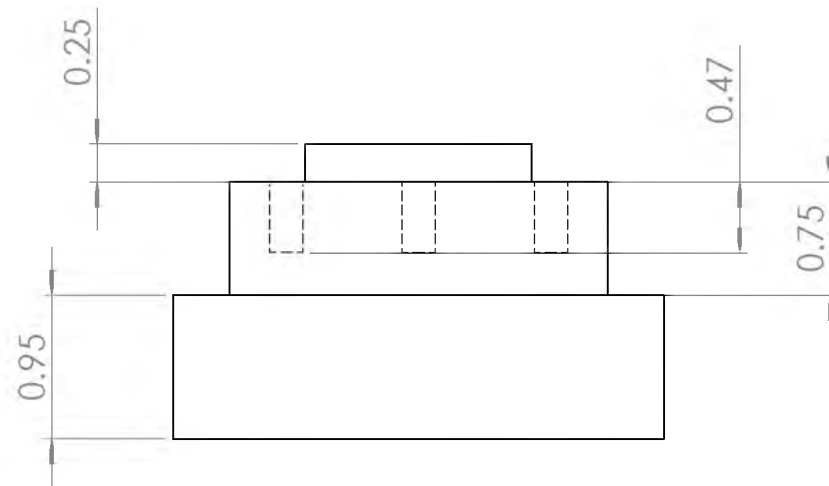
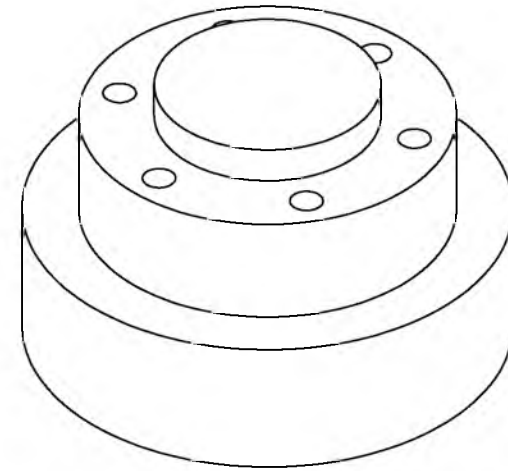
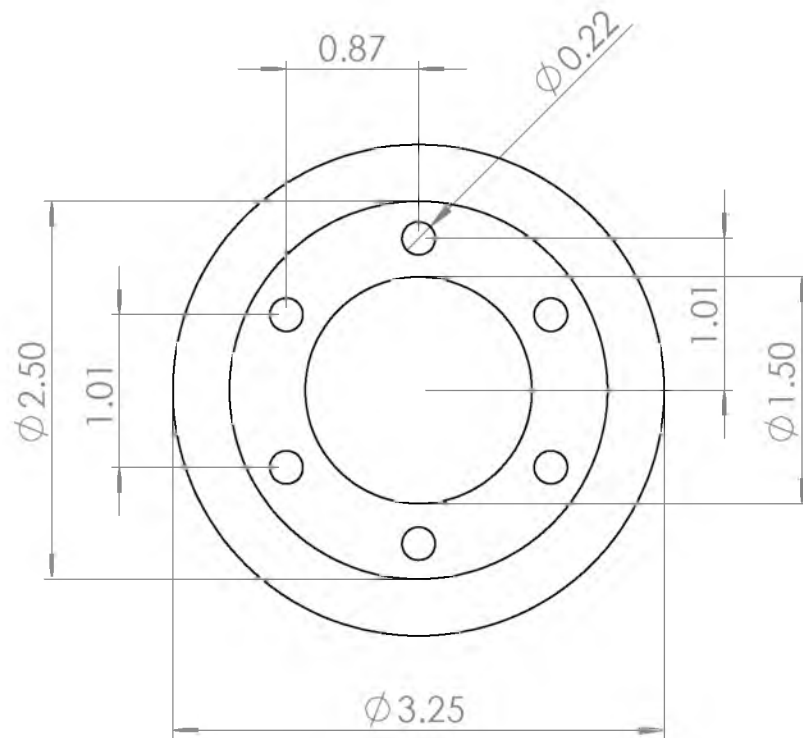
NO. DIBUJO: 3	BASE SUPERIOR DEL SISTEMA		
TIPO DE DIBUJO:	VISTA SUPERIOR, FRONTAL E ISOMÉTRICO DE LA BASE	ESCALA: 1:1	UNIDADES: cm
BASE SUPERIOR DEL SISTEMA PÉNDULO-HÉLICE			
AUTOR:	ITZAMARY ROMERO SOSA	FECHA:	MARZO/2018
SISTEMA PÉNDULO-HÉLICE		Vo. Bo.	
INGENIERÍA EN MECATRÓNICA			
UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN			



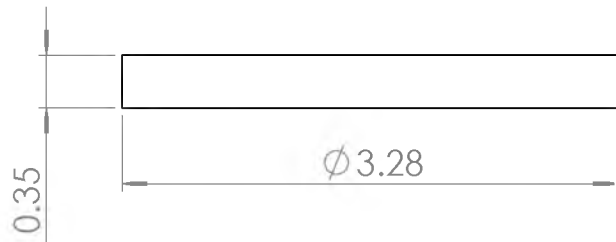
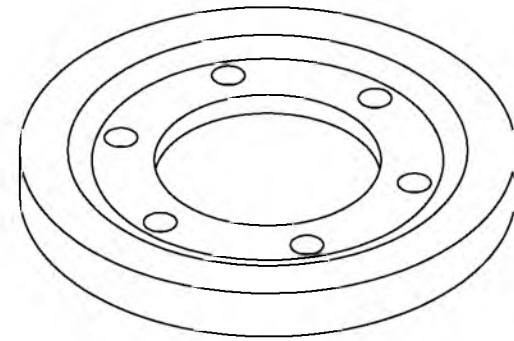
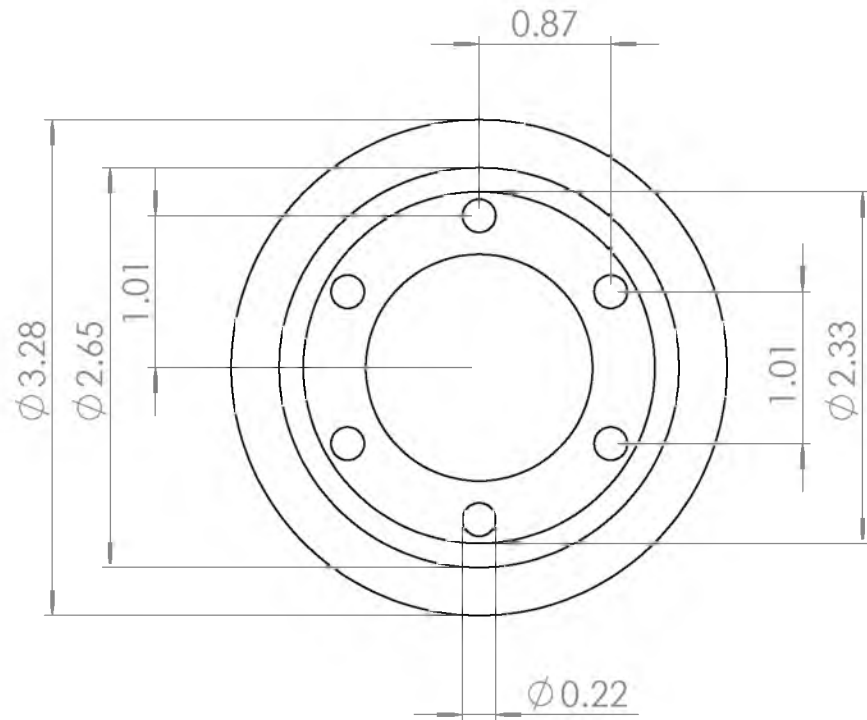
NO. DIBUJO: 4		TUBO SUPERIOR DEL SISTEMA	
TIPO DE DIBUJO:		ESCALA:	UNIDADES:
VISTA SUPERIOR, FRONTAL E ISOMÉTRICO DEL TUBO		1:1	cm
TUBO SUPERIOR DEL SISTEMA PÉNDULO-HÉLICE			
AUTOR:		FECHA:	
ITZAMARY ROMERO SOSA		MARZO/2018	
SISTEMA PÉNDULO-HÉLICE			Vo. Bo.
INGENIERÍA EN MECATRÓNICA			
UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN			



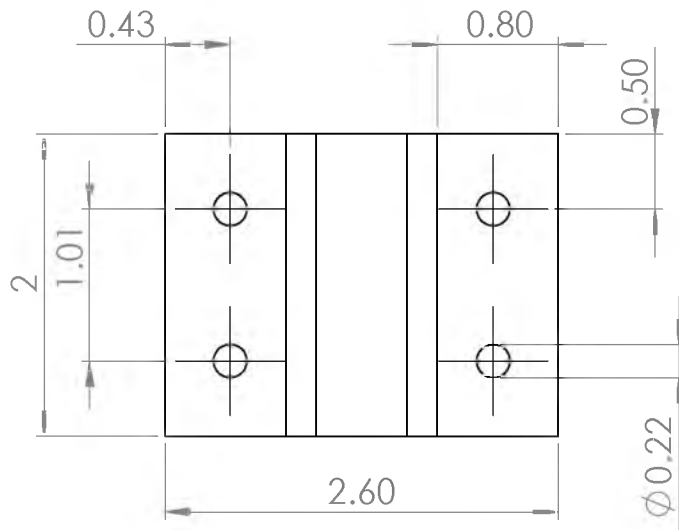
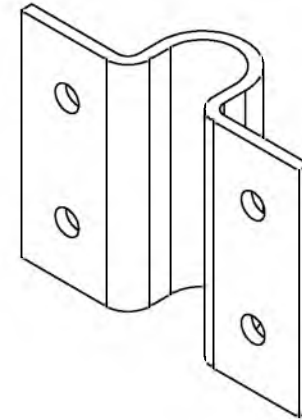
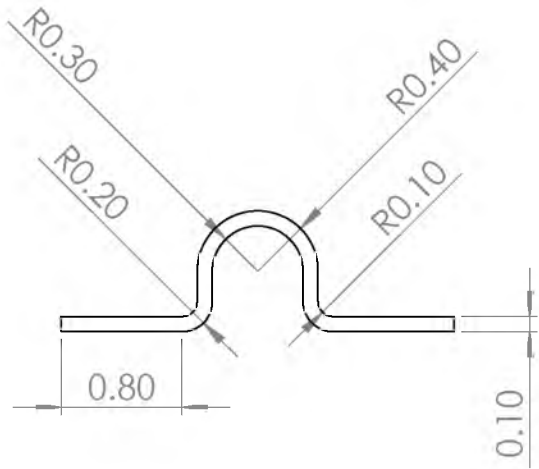
NO. DIBUJO: 5	BASE DEL RODAMIENTO		
TIPO DE DIBUJO: VISTA SUPERIOR, FRONTAL E ISOMÉTRICO DE LA BASE	ESCALA: 1:1	UNIDADES: cm	
BASE DEL RODAMIENTO DEL SISTEMA PÉNDULO-HÉLICE			
AUTOR: ITZAMARY ROMERO SOSA	FECHA: MARZO/2018		Vo. Bo.
SISTEMA PÉNDULO-HÉLICE			
INGENIERÍA EN MECATRÓNICA			
UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN			



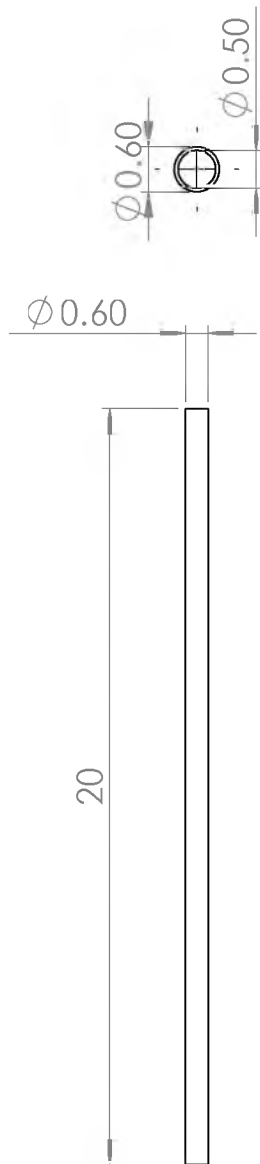
NO. DIBUJO: 6	RODAMIENTO DEL SISTEMA		
TIPO DE DIBUJO:	VISTA SUPERIOR, FRONTAL E ISOMÉTRICO DEL RODAMIENTO	ESCALA: 2:1	UNIDADES: cm
RODAMIENTO DEL SISTEMA PÉNDULO-HÉLICE			
AUTOR:	ITZAMARY ROMERO SOSA	FECHA:	MARZO/2018
SISTEMA PÉNDULO-HÉLICE		Vo. Bo.	
INGENIERÍA EN MECATRÓNICA			
UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN			



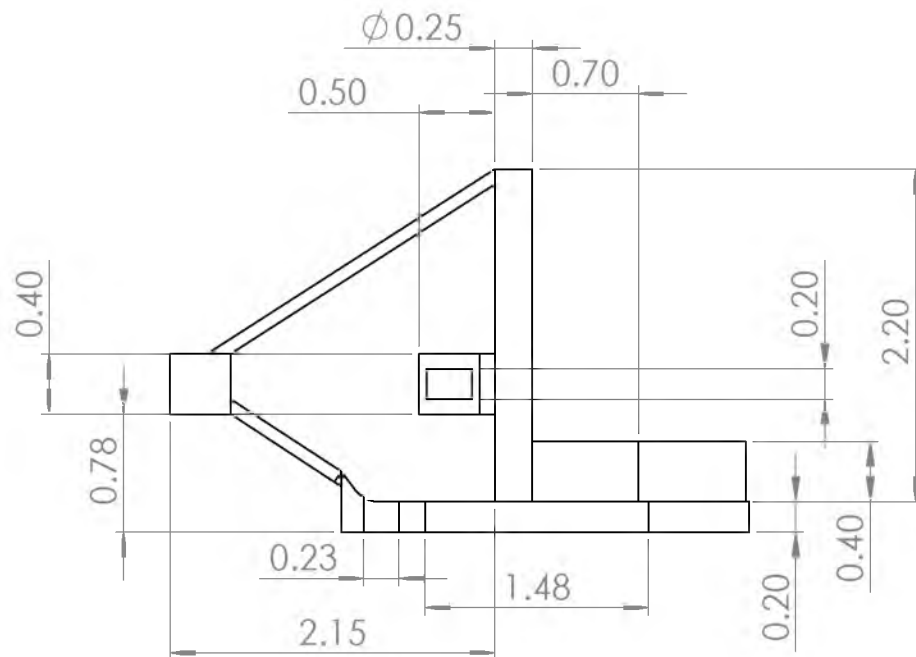
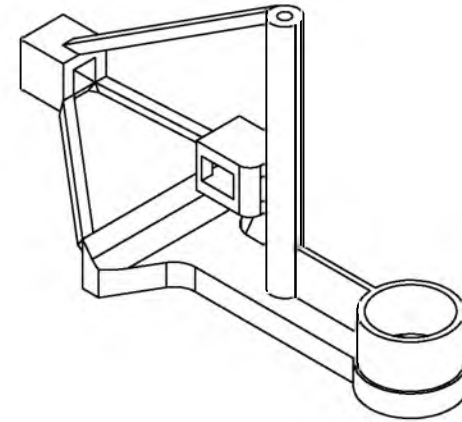
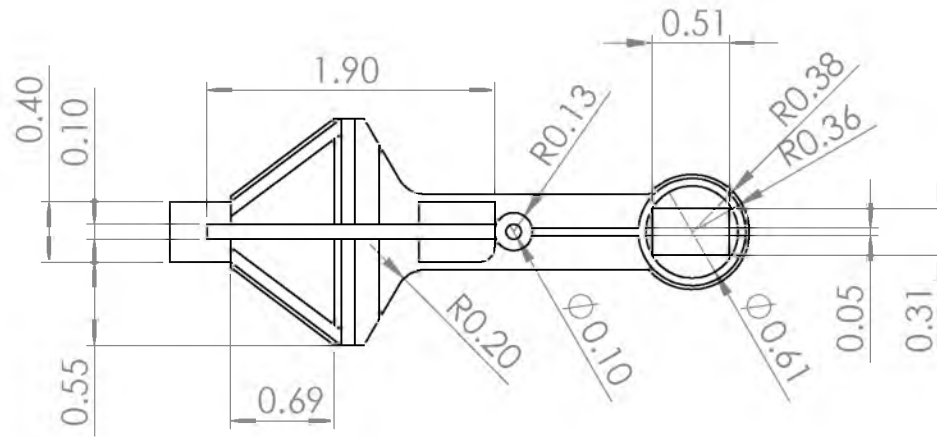
NO. DIBUJO: 7		COPE DEL RODAMIENTO	
TIPO DE DIBUJO: VISTA SUPERIOR, FRONTAL E ISOMÉTRICO DEL COPE		ESCALA: 2:1	UNIDADES: cm
COPE DEL RODAMIENTO DEL SISTEMA PÉNDULO-HÉLICE			
AUTOR: ITZAMARY ROMERO SOSA		FECHA: MARZO/2018	
SISTEMA PÉNDULO-HÉLICE		Vo. Bo.	
INGENIERÍA EN MECATRÓNICA			
UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN			



NO. DIBUJO: 8	ABRAZADERA DE LA VARILLA		
TIPO DE DIBUJO: VISTA SUPERIOR, FRONTAL E ISOMÉTRICO DE LA ABRAZADERA	ESCALA: 2:1	UNIDADES: cm	
ABRAZADERA DE LA VARILLA DEL SISTEMA PÉNDULO-HÉLICE			
AUTOR: ITZAMARY ROMERO SOSA	FECHA: MARZO/2018		Vo. Bo.
SISTEMA PÉNDULO-HÉLICE			
INGENIERÍA EN MECATRÓNICA			
UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN			



NO. DIBUJO: 9	VARILLA DEL PÉNDULO		
TIPO DE DIBUJO: VISTA SUPERIOR, FRONTAL E ISOMÉTRICO DE LA VARILLA	ESCALA: 1:2	UNIDADES: cm	
VARILLA DEL SISTEMA PÉNDULO-HÉLICE			
AUTOR: ITZAMARY ROMERO SOSA	FECHA: MARZO/2018		Vo. Bo.
SISTEMA PÉNDULO-HÉLICE			
INGENIERÍA EN MECATRÓNICA			
UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN			



NO. DIBUJO: 10	CHASIS DE LA HÉLICE		
TIPO DE DIBUJO:	VISTA SUPERIOR, FRONTAL E ISOMÉTRICO DEL CHASIS	ESCALA: 2:1	UNIDADES: cm
CHASIS DE LA HÉLICE			
AUTOR:	ITZAMARY ROMERO SOSA	FECHA:	MARZO/2018
SISTEMA PÉNDULO-HÉLICE		Vo. Bo.	
INGENIERÍA EN MECATRÓNICA			
UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN			