

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS**



TESIS

INTERFERÓMETRO DE SAGNAC CON FIBRA DE ALTA BIRREFRINGENCIA EN EL LAZO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL DE TEMPERATURA PID

POR

MARIA JOSE VILLARREAL AGUIRRE

**EN OPCIÓN AL GRADO DE
MAESTRÍA EN INGENIERÍA FÍSICA INDUSTRIAL**

MAYO, 2019

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS



TESIS

INTERFERÓMETRO DE SAGNAC CON FIBRA DE ALTA BIRREFRINGENCIA EN EL LAZO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL DE TEMPERATURA PID

POR

MARIA JOSE VILLARREAL AGUIRRE

**EN OPCIÓN AL GRADO DE
MAESTRÍA EN INGENIERÍA FÍSICA INDUSTRIAL**

ASESORES

**DR. ARTURO ALBERTO CASTILLO GUZMÁN
DR. RICARDO IVÁN ÁLVAREZ TAMAYO**

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN, MÉXICO

MAYO 2019

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS
CENTRO DE INVESTIGACIONES EN CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis “INTERFERÓMETRO DE SAGNAC CON FIBRA DE ALTA BIRREFRINGENCIA EN EL LAZO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL DE TEMPERATURA PID”, realizada por la alumna Maria Jose Villarreal Aguirre, con número de matrícula 1878697, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestría en Ingeniería Física Industrial.

El Comité de Tesis

Dr. Arturo Alberto Castillo Guzmán
Presidente
(Director de Tesis)

Dr. Ricardo Iván Álvarez Tamayo
Secretario
(Co – director de Tesis)

Dr. Romeo de Jesús Selvas Aguilar
Vocal

Dr. Romeo de Jesús Selvas Aguilar
Subdirector de Estudios de Posgrado
Centro de Investigaciones en Ciencias Físico Matemáticas
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, 2019

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mis padres, esta tesis está dedicada a ellos. Gracias por su apoyo y cariño.

Agradezco al Dr. Arturo Catillo Guzmán por su confianza y apoyo brindados a lo largo de este trabajo de maestría.

Mi más grande agradecimiento al Dr. Ricardo Iván Álvarez Tamayo, por haberme permitido realizar este trabajo de tesis bajo su tutela, por el apoyo incondicional que recibí de su parte, por la confianza que deposito en mí y sobre todo por compartirme sus conocimientos.

A los catedráticos y personal tanto de la Universidad como del CICFIM que de alguna u otra manera han contribuido a la culminación de este proyecto y que han aportado su profesionalismo y dedicación.

Finalmente agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por su apoyo económico que fue fundamental para lograr esta maestría.

RESUMEN

El interferómetro de Sagnac de fibra óptica ha sido utilizado ampliamente desde su aparición en muchas aplicaciones tales como el diseño de multiplexores por división de longitud de onda, sensores, como filtro seleccionador y recientemente para la sintonización de láseres de fibra, debido a sus características como bajo costo, baja inserción de pérdidas y fácil construcción e independencia de la polarización.

Se presenta el modelo teórico, así como resultados experimentales, del interferómetro de Sagnac con fibra de alta birrefringencia en el lazo. El interferómetro de Sagnac con lazo de alta birrefringencia permite hacer un ajuste fino en el desplazamiento en longitud de onda del espectro de transmitancia del mismo a través de la variación de la temperatura sobre la fibra de alta birrefringencia del lazo. La alta sensibilidad a variaciones de temperatura que presentan las fibras de alta birrefringencia, permite la construcción y estudio de un sensor de temperatura construido completamente de fibra óptica, basando su funcionamiento en el efecto Sagnac.

Uno de los objetivos principales de esta tesis es la construcción del sensor, por su gran importancia en diferentes sistemas. Por ejemplo, en equipos controlados automáticamente, los sensores proporcionan señales para el control de las operaciones; en el campo de la salud, se usan para detectar y transmitir información bioquímica; en la ingeniería industrial y civil, los sensores indican características como la tensión, presión, vibración o los cambios de temperatura. Existe un amplio campo de aplicaciones donde los sensores juegan un rol importante para la investigación.

Por otra parte, en este trabajo, otro objetivo fue el de implementar parte de la automatización del control de procesos, el cual ha evolucionado y ha permitido la optimización al aumentar la producción y el mejoramiento de la calidad en el área industrial, al igual que la reducción de costos y de personal. Por lo que al construir nuestro interferómetro de Sagnac, lo complementamos al agregar un control PID y así lograr la estabilización del sistema a una temperatura deseada aplicada a la fibra de alta birrefringencia. Los resultados de esta tesis demuestran el diseño y la operación estable de un interferómetro de Sagnac sintonizable por variaciones de temperatura controladas en el lazo de fibra de alta birrefringencia.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1	9
INTRODUCCIÓN GENERAL.....	9
1.1 Introducción	9
1.2 Motivación y Objetivos	11
1.3 Organización de la Tesis	11
CAPÍTULO 2	13
INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA DEL INTERFERÓMETRO DE SAGNAC	13
2.1 Antecedentes del interferómetro de Sagnac.....	13
2.2 Efecto de birrefringencia.....	15
2.2.1 Fibra de alta Birrefringencia (Hi-Bi).....	17
2.2.2 Ajuste del interferómetro de Sagnac	18
2.3 Interferómetro de Sagnac	20
2.4 Interferómetro de Sagnac en forma matricial.	23
CAPÍTULO 3	27
ANÁLISIS DEL INTERFERÓMETRO DE SAGNAC CON FIBRA DE ALTA BIRREFRINGENCIA.....	27
3.1 Arreglo propuesto y resultados experimentales.....	27
CAPÍTULO 4	32
SISTEMAS DE CONTROL.....	32
4.1 Sistemas de control.....	33
4.1.1 Sistema de control realimentado.....	33
4.1.2 Sistema de control en lazo cerrado.....	34
4.1.3 Sistema de control en lazo abierto.	34
4.2 Control proporcional integral derivativo	43
4.3 Control de una celda Peltier.....	44
CAPÍTULO 5	48
ANÁLISIS DE UN CONTROLADOR DE TEMPERATURA PID PARA APLICACIÓN EN UN INTERFERÓMETRO DE SAGNAC CON FIBRA DE ALTA BIRREFRINGENCIA EN EL LAZO.....	48
5.1 Descripción del sistema a controlar	49
5.2 Obtención de los valores del controlador PID.	51

5.3 Resultados experimentales IS con control de temperatura	53
CONCLUSIONES	62
Anexo 1	64
Bibliografía	65

Índice de figuras

Capítulo 2	Investigación bibliográfica del interferómetro de Sagnac	
Figura 2.1	Arreglo del interferómetro de Sagnac propuesto por Bergh.	14
Figura 2.2	Sección transversal de las fibras Hi-Bi: (a)Fibra IEC, (b)Fibra PANDA y (c) Fibra BowTie	18
Figura 2.3	Esquema de un interferómetro de Sagnac formado completamente de fibra óptica	20
Figura 2.4	Arreglo experimental del interferómetro de Sagnac con fibra Hi-Bi	24
Capítulo 3	Análisis del interferómetro de Sagnac con fibra de alta birrefringencia	
Figura 3.1	Diagrama esquemático del interferómetro de Sagnac propuesto	27
Figura 3.2	Transmitancia del interferómetro de Sagnac a diferentes temperaturas	28
Figura 3.3	Desplazamiento de la longitud de onda en función de la temperatura inducida en el lazo	29
Figura 3.4	Espectro de transmitancia del espejo de lazo como función del ángulo θ_1 y con θ_2 fijo.	29
Figura 3.5	Espectro de transmitancia del espejo de lazo como función del ángulo θ_2 y con θ_1 fijo. Rotación de θ_2 a 0° , 20° , 40° , 60° , 80° y 100°	30
Figura 3.6	Rotación de θ_2 a 10° , 30° , 50° , 70° , 90° y 110° .	31
Capítulo 4	Sistemas de control	
Figura 4.1	Modo de control de dos posiciones	35
Figura 4.2	Control proporcional	36
Figura 4.3	Control integral	37
Figura 4.4	Control integral proporcional	38

Figura 4.5	Efectos de las acciones proporcional e integral	39
Figura 4.6	Control derivativo	41
Figura 4.7	Control proporcional integral derivativo	43
Figura 4.8	Estructura de control PID	44
Figura 4.9	Esquema de la celda Peltier	46
Capítulo 5	Análisis de un controlador de temperatura PID para aplicación en un interferómetro de Sagnac con fibra de alta birrefringencia en el lazo.	
Figura 5.1	Diagrama de bloques del sistema a controlar	50
Figura 5.2	Diagrama esquemático del controlador de temperatura	51
Figura 5.3	Respuesta al escalón del sistema sin compensar	52
Figura 5.4	Diagrama de bloques del sistema en lazo cerrado	52
Figura 5.5	Respuesta al sistema compensado	53
Figura 5.6	Estabilización del control a 32°C	54
Figura 5.7	Resultados de las mediciones con temperatura controlada a 32°C	55
Figura 5.8	Variaciones de la longitud de onda durante los 40 min. de mediciones	56
Figura 5.9	Control de temperatura a 36°C	57
Figura 5.10	Estabilidad del IS con control de temperatura a 36°C	57
Figura 5.11	Variaciones de la longitud de onda durante los 40 min. de mediciones con 36°C	58
Figura 5.12	Control de temperatura a 40°C	59
Figura 5.13	Estabilidad del IS con una temperatura controlada a 40°C	59
Figura 5.14	Variaciones de la longitud de onda durante los 40 min. de mediciones con 40°C.	60

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1 Introducción

El espejo de lazo de fibra óptica (FOLM, fiber optical loop mirror) con fibra de alta birrefringencia (Hi-Bi, high-birefringence) en el lazo, también conocido como interferómetro de Sagnac (SI, Sagnac interferometer), ha sido ampliamente utilizado desde su implementación en dispositivos ópticos debido a la fuerte demanda que ha traído consigo el rápido crecimiento de los sistemas de comunicación por fibra óptica.

La investigación de estos dispositivos tales como fuentes de luz, dispositivos multiplexores por división en longitudes de onda (WDM, wavelength division multiplexers), para la sintonización de láseres de fibra óptica, también como un filtro espectral para un láser de fibra de longitud de onda múltiple y como filtro para eliminar la mayor contribución del ruido producido por amplificación de emisión espontánea (ASE, amplified spontaneous emission) en una fibra dopada con erbio. Estos dispositivos todo-fibra son muy atractivos por sus propiedades de bajas pérdidas, menor tamaño, bajo costo, fácil construcción y una independencia en la polarización de entrada, comparados con los filtros ópticos convencionales.

En la actualidad existen diferentes técnicas que han sido estudiadas para realizar dispositivos ópticos como son los filtros todo-fibra, estos hacen uso de elementos tales como filtros sintonizables acusto-ópticos [1-2], filtros Mach-Zehnder [3], filtros Fabry-Perot [4-5], rejillas de Bragg [6] y rejillas de periodo largo [7].

A pesar de que los filtros convencionales con propiedades birrefringentes pueden ser usados como filtros pasa banda, requieren de elementos polarizadores, ocasionando pérdidas en el sistema y serían dependientes a la polarización de entrada. Esta dependencia de la polarización de entrada puede generar ruido, ya que la polarización de entrada en fibra suele

ser aleatoria. Así se propone como filtro, un interferómetro de Sagnac para reemplazar los polarizadores en los filtros convencionales birrefringentes [8].

El SI proporciona una transmitancia periódica que depende de la longitud de onda, la cual es empleada como filtro pasa banda si se selecciona adecuadamente la longitud de la fibra de Hi-Bi en el lazo, además, debido a su alta sensibilidad a variaciones de temperatura, es posible ajustar la transmitancia del SI y emplearlo como filtro térmicamente sintonizable. Este dispositivo óptico consiste de un acoplador direccional con puertos de salida conectados a una fibra birrefringente. La selectividad espectral del interferómetro es causada por la birrefringencia que es introducida al lazo.

Se han realizado trabajos que estudian diferentes diseños de espejo de lazo de fibra óptica. Ma et al. [9] demostró la independencia de polarización de un espejo con fibra en alta birrefringencia en el lazo. Mirza y Stewart [10] presentaron un análisis de un espejo de lazo de fibra óptica con un retardador de onda que rota la fibra, utilizándolo para aplicaciones en láseres con múltiple longitud de onda. Liu et al. [11] reportó el estudio de un filtro óptico que consiste de dos espejos con fibra de alta birrefringencia en el lazo conectados uno con otro. Lim et al. [12] analizaron el comportamiento de un espejo de lazo de fibra óptica donde este lazo consiste de dos fibras de alta birrefringencia empalmadas en serie.

El sistema que se propone en esta tesis pretende automatizar el experimento de un interferómetro de Sagnac con fibra birrefringente en el lazo, la cual debido a su alta sensibilidad a variaciones de temperatura, nos permite ajustar su transmitancia empleándolo como un filtro térmicamente sintonizable. Dentro del análisis obtenemos la caracterización del interferómetro por variación de temperatura y por rotación de los empalmes. Al aplicar esta torsión en los empalmes se producen cambios en la profundidad de modulación al conseguir que los ejes ortogonales de polarización coincidan para una máxima transferencia de energía, generando un ajuste en el interferómetro.

Posteriormente utilizando un software de ingeniería diseñado para aplicaciones que requieren pruebas, medidas y control con acceso rápido a información de datos y hardware optaremos por buscar la automatización y control de estos ajustes como el cambio de temperatura que se le harán al interferómetro y las torsiones de los empalmes, generando los ajustes deseados al interferómetro.

1.2 Motivación y Objetivos

Como se mencionó anteriormente los interferómetros de Sagnac han atraído interés recientemente, debido a sus potenciales aplicaciones. En el presente trabajo de tesis se propone la aplicación de un interferómetro de Sagnac y un controlador PID, para desarrollar un sensor de temperatura con longitud de onda y temperatura seleccionable y sintonizable.

El objetivo general del presente trabajo de tesis es diseñar y construir, un sensor de temperatura automatizado y controlado, basando su funcionamiento en el efecto Sagnac. Siendo los objetivos específicos:

- Caracterizar los dispositivos y equipo de medición.
- Instrumentar y caracterizar el interferómetro con fibra de alta birrefringencia para analizar su efecto en la implementación del arreglo experimental.
- Realizar la caracterización del interferómetro de Sagnac con fibra de alta birrefringencia en el lazo, por variaciones de temperatura y por torsión aplicada a la fibra del lazo, para analizar su comportamiento y mostrar los resultados obtenidos.
- Construir esquemas para la implementación de un controlador proporcional, integral y derivativo (PID) en el arreglo experimental.
- Diseñar el código y la construcción del controlador PID, implementándolo en la celda Peltier, la cual es la que variará la temperatura en el lazo del interferómetro.
- Demostrar el funcionamiento estable del arreglo experimental a través de mediciones y pruebas con variación de parámetros.
- Caracterizar el comportamiento del arreglo experimental a través de la información numérica obtenida con las mediciones de los ensayos experimentales.

1.3 Organización de la Tesis

Este trabajo de tesis está organizado de la siguiente manera: En el capítulo 1 se expone una investigación del estado del arte actual del desarrollo de interferómetros de fibra óptica, así como la innovación en la utilización de nuevas técnicas y dispositivos para la obtención de filtros interferométricos estables y controlables. Esta investigación es presentada en base a

una clasificación que nos permite conocer donde está situada la investigación del actual trabajo de tesis y cuáles son las tendencias que podría tomar en investigaciones futuras. En el capítulo 2 se presenta la documentación teórica que sustenta la realización de los arreglos experimentales propuestos, así como los conceptos importantes que requieren de una exposición amplia para su entendimiento y aplicación a lo largo de este trabajo de tesis. En el capítulo 3 se muestra el desarrollo de un análisis teórico, numérico y práctico del interferómetro de Sagnac de fibra óptica con lazo birrefringente para la aplicación de este dispositivo como principal herramienta en el arreglo experimental de este trabajo de tesis. En el capítulo 4 se presenta una investigación y revisión de principios básicos, sobre el equipo básico de un sistema de control, así como los conceptos importantes de controladores y de componentes fundamentales en la realización del arreglo experimental, para su aplicación en este trabajo de tesis. Los resultados obtenidos y presentados en el capítulo 5 permiten conocer más a fondo el comportamiento de los sensores sintonizables y los parámetros que lo determinan, de manera que el análisis de los resultados experimentales nos permiten justificar la utilización del interferómetro de Sagnac como herramienta en la aplicación de un sensor de temperatura automatizado y controlado.

CAPÍTULO 2

INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA DEL INTERFERÓMETRO DE SAGNAC

2.1 Antecedentes del interferómetro de Sagnac

Las investigaciones sobre fibra óptica se han desarrollado con gran rapidez en aplicaciones en líneas como las comunicaciones ópticas, el procesamiento de señales y en sensado. Además del uso de la fibra óptica como medio de transmisión, se desarrollaron dispositivos basados en fibra que permiten generar láseres, también acopladores, multiplexores, espejos selectivos para transmisión, amplificadores de señales y sensores.

Uno de estos dispositivos es el interferómetro de Sagnac el cual ha sido propuesto como giroscopio [13], sensores [14-15], filtros [16], espejos en régimen lineal [17] y no lineal [18] y como multiplexores [19].

El interferómetro de Sagnac presenta una configuración compacta formado en su totalidad con fibra óptica, presenta una respuesta rápida, no es afectado por perturbaciones externas a frecuencias eléctricas, tiene pérdidas bajas y este dispositivo se puede utilizar como apoyo a configuraciones más complejas.

Los sensores más exitosos primeramente desarrollados fueron los giroscopios de fibra óptica basados en el efecto Sagnac y los hidrófonos de fibra óptica basados en interferómetros Mach-Zehnder. Los giroscopios formados con un lazo de fibra óptica son uno de los antecedentes más cercanos al interferómetro de Sagnac compuesto completamente de fibra óptica, se utilizaban sólo como sensores de rotación y basaban su funcionamiento en el efecto Sagnac [20]. El primer trabajo que propuso el empleo de fibra óptica para guiar la luz y formar un interferómetro de Sagnac con este elemento fue reportado en 1976, por V. Vali y R.W. Shorthill [13]. En este trabajo se analizó un interferómetro de Sagnac utilizando un lazo de fibra óptica y se propuso además el uso de estos como anillos interferométricos y anillos láser.

En 1979, R. Ulrich y M. Johonson [21] realizaron un análisis de los cambios de polarización del interferómetro. Con este trabajo se observa que la fibra que forma el lazo del interferómetro presenta dos modos de polarización ortogonal, cada uno con diferentes velocidades, lo cual origina que en el interferómetro existan inestabilidades, causadas por las variaciones en la birrefringencia de la fibra.

A partir de la aparición del acoplador direccional de fibra óptica [22] y del controlador de polarización [23] surge el primer interferómetro de Sagnac todo fibra en 1981 propuesto por R.A. Bergh et al. [24]. En este arreglo que se muestra en la figura 2.1 se utiliza un acoplador de cuatro puertos como divisor del haz de entrada, el cual entra por el puerto A, y es dividido en dos haces por los puertos (C y D) cuales se propagarán en direcciones opuestas dentro del lazo de fibra.

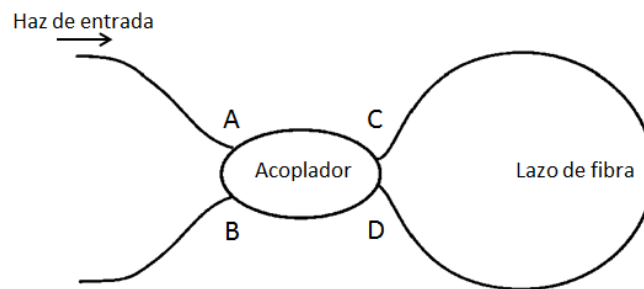


Figura 2. 1 Arreglo del interferómetro de Sagnac propuesto por Bergh

Posteriormente, los haces nuevamente pasan por el acoplador e interfieren debido a la diferencia de fase entre los dos haces contra propagándose.

En el trabajo de Bergh se menciona que con el interferómetro todo fibra se simplifica y estabiliza el sistema, se eliminan los problemas de alineamiento en el arreglo, con lo que se logra una alta sensibilidad en la detección de rotación.

En 1988, D.B. Mortimore [25] describe las ecuaciones generales en términos matriciales que gobiernan el comportamiento del interferómetro de Sagnac y en su análisis considera que la fibra tiene dos modos de propagación.

Posterior a este análisis se realizaron trabajos sobre aplicaciones sensoriales e instrumentación de este interferómetro. E. Udd [26] realiza investigaciones sobre sensores de rotación, detección de variaciones temporales, detección de efectos ambientales con variación lenta, sensores distribuidos y mediciones espectrales. En 1995, R.T. de Carvalho [27] propone el arreglo interferométrico de Sagnac como un sensor de dos parámetros, campo magnético y campo eléctrico, los cuales pueden monitorearse independientemente o simultáneamente.

En este mismo año se propone por X. Fang y R.O. Claus [8] el interferómetro de Sagnac como un multiplexor basado en la no reciprocidad de la birrefringencia y con este trabajo mencionan que tanto el ancho de banda como la máxima longitud de onda del multiplexor puede variarse cambiando la birrefringencia de la fibra.

En 1997, E.A. Kuzin et al. [28] muestra un interferómetro de lazo de fibra birrefringente que puede ajustarse torciendo sus brazos, el cual puede usarse como sensor polarimétrico. En este trabajo menciona la independencia de la polarización de la fuente luz. Pero es en 1999, cuando se consolida por el mismo autor la propuesta de ajuste por torsión de un interferómetro de Sagnac formado con fibra óptica de alta birrefringencia [29].

2.2 Efecto de birrefringencia

Existen materiales que son llamados isotrópicos, esto es porque dentro de su estructura cristalina presentan una homogeneidad perfecta, es decir, sus propiedades ópticas son las mismas en todas sus direcciones dentro del material, así, dichos materiales que presentan solo un índice de refracción. Por otro lado, están los materiales que presentan dos índices de refracción, ya que sus propiedades ópticas cambian en cualquier dirección dentro del material, estos materiales son llamados anisotrópicos y son conocidos como birrefringentes [30].

Para las fibras ópticas, la birrefringencia es el grado natural de la conservación de los modos de polarización ortogonal, esto es sólo para una fibra con un núcleo cilíndrico perfecto, por

tanto, si hacemos incidir un haz de luz con polarización lineal, este estado de polarización no es modificado y se mantiene hasta la salida de la fibra. Por el contrario en la práctica es imposible tener una estructura simétrica de la fibra ya que existen inhomogeneidades producidas por dobleces, torsiones o tensiones. Al descomponer la luz que viaja dentro de una fibra monomodo en sus componentes ortogonales, pudiera considerarse que dentro de ella se propagan dos modos linealmente en forma ortogonal, de tal manera que el término monomodo se aplica a la propagación de la luz de una polarización particular. Para una fibra con simetría circular perfecta, es decir en el caso ideal, los dos modos son degenerados con la misma constante de propagación (k_x, k_y) , de donde podemos decir que los modos se propagan a la misma velocidad, en tal caso se dice que la fibra no tiene birrefringencia y por tanto se podría propagar cualquier estado de polarización sin que sufra un cambio. En realidad el núcleo de la fibra tiene una forma elíptica y los modos viajan a diferentes velocidades de propagación y entonces tenemos una fibra con birrefringencia modal. La birrefringencia está dada por la diferencia de los índices de refracción efectivos (n_x, n_y) .

El índice efectivo de un modo se sitúa entre el índice de refracción del núcleo y el índice de refracción del revestimiento, acercándose más uno u otro dependiendo de cuál sea el porcentaje de la potencia que se propaga por ellos (si la mayor parte de la potencia está contenida en el núcleo, el índice efectivo estará más cerca del índice de refracción del núcleo).

$$B = |n_x - n_y| \quad (2.1)$$

Cuando la luz se propaga dentro de la fibra, ambos modos son excitados, por lo tanto uno de ellos puede tener un retardo en fase. Los modos se designan según las direcciones que los campos eléctricos y magnéticos de la onda electromagnética asumen respecto de la dirección de propagación. Por consiguiente cuando se tiene una diferencia de fase y esta es un múltiplo entero de 2π , los dos modos pueden coincidir en este punto y el estado de polarización se repite, entonces la longitud a la cual se repite dicha polarización se define como la longitud de repetición de la fibra se expresa como:

$$L_b = \frac{\lambda}{B} \quad (2.2)$$

Donde λ es la longitud de onda de la luz incidente en el medio.

2.2.1 Fibra de alta Birrefringencia (Hi-Bi)

Dentro de los avances reportados en las técnicas de fabricación de las fibras ópticas, está el de modificar las propiedades del medio cercano al núcleo de éstas, lo que ha permitido desarrollar nuevos tipos de fibras especiales se encuentran las fibras que mantienen la polarización (PM) dentro de las que se resaltan las fibras de alta-birrefringencia o Hi-Bi, las cuales presentan una birrefringencia intrínseca generada por regiones que aplican un esfuerzo (Stress Applying Parts, SAP) que son las encargadas de generar anisotropía en la fibra [31].

Si bien el fenómeno de birrefringencia no es muy deseado en fibras ópticas estándar empleadas en telecomunicaciones, en especial en el desempeño de canales de comunicación de altas tasas de transmisión debido a la presencia de dispersión por modos de polarización [32], en otras aplicaciones este fenómeno es aprovechado para el desarrollo de láseres [33] y retardadores completamente de fibra óptica [34].

Una aplicación más, que constituye uno de los aportes más importantes de esta tesis de maestría, consiste de utilizar fibra Hi-Bi mantenedora de la polarización en nuestro interferómetro de Sagnac, debido a que una de las condiciones para generar interferencia es que los estados de polarización de los haces que se contra propagarán por el lazo sean no ortogonales, entre ellos mismos.

Comercialmente se pueden mencionar tres tipos de fibras Hi-Bi: La IEC (Internal Elliptical Cladding), la PANDA (Polarization maintaining and low Absorbing) y la Bow Tie, cuya diferencia principal se basa, específicamente, en el estado de esfuerzos que generan los SAP debido a su geometría, ya que son hechos de un borosilicato de coeficiente de expansión térmico mayor al de la sílice, que se ubica alrededor del núcleo de la fibra [35]. La figura 2.2 muestra la sección transversal de la fibra IEC, PANDA y la Bow Tie con sus respectivos ejes de polarización.

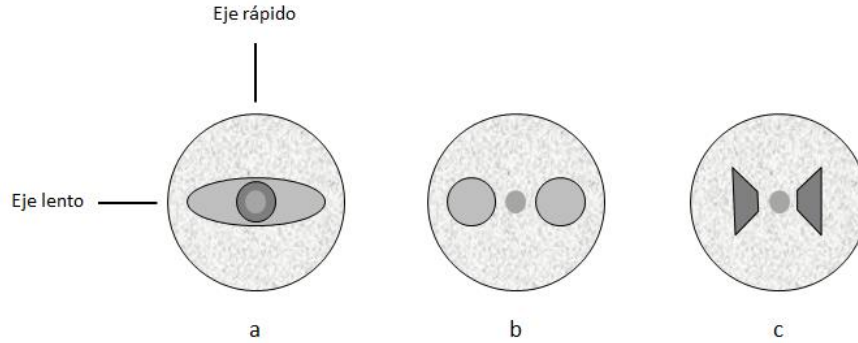


Figura 2.2 Sección transversal de las fibras Hi-Bi: (a) Fibra IEC, (b) Fibra PANDA y (c) Fibra Bow Tie.

El proceso de fabricación de una fibra Hi-Bi, se basa inicialmente en la fabricación de una preforma, la cual es, básicamente, obtenida por un proceso de deposición axial de vapores (VAD), a la que posteriormente se le realizan unos agujeros, en los cuales se insertan unas barras de boro silicatos ($B_2O_3 + SiO_2$), los cuales son elementos que poseen mayor coeficiente de expansión térmica que el SiO_2 [35].

Posteriormente, la preforma es compactada en el horno de una torre de estiramiento y llevada a una temperatura a la cual se realiza el estiramiento de ésta. Durante el enfriado de la fibra, los elementos de mayor coeficiente de expansión térmica, presentan una mayor contracción, generando un estado de esfuerzos de tracción internos en la dirección en la que se encuentran alineados, induciendo de esta manera, una birrefringencia propia del tipo de la fibra diseñada.

2.2.2 Ajuste del interferómetro de Sagnac

Para estudiar el funcionamiento básico del interferómetro de Sagnac, se debe empezar por considerar que para que exista interferencia en un interferómetro de Sagnac, como en cualquier otro de los interferómetros, se requiere que dos haces posean idénticos estados de polarización al momento en el que estos haces se superponen en el detector [36]. Únicamente bajo esta condición se puede obtener un gran contraste de interferencia o también conocido como profundidad de modulación (PM) [37]. Cuando la polarización entre

ambos no es completamente paralela, el contraste de interferencia se reduce, y cuando la polarización es ortogonal no existe interferencia. Por lo tanto, para obtener señales estables y reproducibles será esencial controlar el estado de polarización de la luz que se propaga en los brazos de un interferómetro de Sagnac formado por fibra óptica.

La operación óptima del interferómetro está limitada por el ajuste de los ejes de polarización de la fibra de alta birrefringencia, debido al cambio de fase entre los haces polarizados ortogonalmente que se propagan por el lazo. Por lo que, la torsión en los empalmes del lazo (Fig. 2.1) nos permite alinear los ejes de polarización y producir cambios en la profundidad de modulación PM, definida por la siguiente ecuación:

$$PM = \frac{I_{m\acute{a}x} - I_{m\acute{i}n}}{I_{m\acute{a}x} + I_{m\acute{i}n}} \quad (2.3)$$

Donde $I_{m\acute{a}x}$ e $I_{m\acute{i}n}$ son las intensidades máxima y mínima transmitidas por el interferómetro respectivamente.

Para el análisis, la profundidad de modulación en el haz transmitido del interferómetro de Sagnac esta expresada por la ecuación:

$$PM = \frac{2\alpha(1 - \alpha)}{1 - 2\alpha(1 - \alpha)} \quad (2.4)$$

El procedimiento de ajuste consiste en torcer ambos brazos del interferómetro con la finalidad de alinear la orientación de la polarización de la luz con los ejes de la birrefringencia de la fibra del lazo. Para realizar este alineamiento, a pesar de que los puertos de salida del acoplador están empalmados por fusión a las terminales de la fibra de alta birrefringencia, al aplicar una torsión en la región del empalme existe una rotación de los ejes ortogonales de polarización, por lo que se puede conseguir que los ejes coincidan para una máxima transferencia de energía. La torsión en los empalmes provee un simple y practico procedimiento de ajuste del interferómetro [29].

Además de los cambios de polarización, se presentan otros cambios que afectan de manera secundaria a cualquier interferómetro de Sagnac debido a la topología del anillo del lazo que lo forma. Estos cambios están relacionados con la diferencia de camino óptico y causan

modificaciones en el contraste y se observan como una diferencia de fase entre los haces contra propagándose dentro del lazo.

2.3 Interferómetro de Sagnac

Un interferómetro de Sagnac formado con fibra óptica está compuesto por: *a)* una fuente emisora (no necesariamente de alta coherencia), la cual se utiliza para monitorear el comportamiento del interferómetro; *b)* un acoplador direccional de fibra monomodal, el cual divide (en amplitud) el haz que entra al interferómetro, en dos haces que viajarán en sentidos opuestos y que posteriormente interferirán en uno de los puertos de salida; *c)* el lazo del interferómetro, formado completamente con fibra óptica monomodal y por el cual se contrapropagan los haces divididos por el acoplador; y *d)* un elemento de detección de la interferencia de los haces, colocado a la salida del arreglo.

Para analizar el comportamiento del dispositivo, que se muestra esquemáticamente en la figura 2.3. El cual consiste de un acoplador direccional de fibra monomodo de cuatro puertos, con razón de acoplamiento $\alpha/1 - \alpha$, donde α es la constante de acoplamiento.

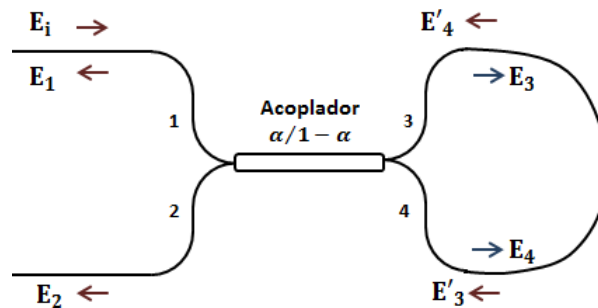


Figura 2.3 Esquema de un interferómetro de Sagnac formado completamente de fibra óptica.

Si hacemos incidir una señal con un campo eléctrico E_i a través del puerto 1 del acoplador, representado por la siguiente ecuación:

$$E_i = \hat{e}_x E_x + \hat{e}_y E_y \quad (2.5)$$

donde \hat{e}_x y \hat{e}_y son los vectores unitarios correspondientes a los ejes de referencia x y y de la fibra de alta birrefringencia, respectivamente, E_x y E_y son las componentes ortogonales de polarización del campo incidente expresadas por:

$$E_x = E_i \cos \phi \quad (2.6)$$

$$E_y = E_i \sin \phi \quad (2.7)$$

donde ϕ es el ángulo entre el eje de polarización del campo incidente y el eje x . El haz incidente se desviará en dos haces que se propagarán por las terminales 3 y 4 con una razón de acoplamiento $\alpha/1 - \alpha$ respectivamente, como se presenta a continuación:

$$E_3 = \sqrt{\alpha}(\hat{e}_x E_x + \hat{e}_y E_y) \quad (2.8)$$

$$E_4 = i\sqrt{1 - \alpha}(\hat{e}_x E_x + \hat{e}_y E_y) \quad (2.9)$$

el término i que aparece en la Ec. 2.9 representa un cambio de fase de $\pi/2$ que experimenta el haz transmitido por el acoplador (de la terminal 1 a la 4). Estos haces se contra propagarán dentro del lazo del interferómetro y serán descompuestos en dos componentes de polarización correspondientes a la alineación de los ejes lento y rápido (ejes x y y) de la fibra de alta birrefringencia para dirigirse nuevamente al acoplador.

Se considera que los ejes en los extremos de la fibra de alta birrefringencia, están rotados $\pi/2$ uno con respecto a otro, y renombrando a los campos de salida E_3 y E_4 como E'_3 y E'_4 después de propagarse en la fibra del lazo, por lo que las expresiones para estos campos quedan como:

$$E'_3 = \sqrt{\alpha}[\hat{e}_x E_x \exp(i\Phi L_x) + \hat{e}_y E_y \exp(i\Phi L_y)] \quad (2.10)$$

$$E'_4 = \sqrt{1 - \alpha}[\hat{e}_x E_x \exp(i\Phi L_x) + \hat{e}_y E_y \exp(i\Phi L_y)] \quad (2.11)$$

donde Φ es la fase que adquieren los campos al propagarse en el lazo del interferómetro, la cual está definida por:

$$\Phi_{Lj} = \frac{2\pi n_j L}{\lambda} \quad (2.12)$$

donde L es la longitud de la fibra birrefringente, λ es la longitud de onda del campo incidente y $j=x,y$.

Los campos E_3 y E_4 ingresan al acoplador por los puertos 4 y 3, respectivamente, y como resultados los campos de salida (campos E_1 y E_2) salen del interferómetro de Sagnac con fibra birrefringente en el lazo, definidos por:

$$E_1 = \sqrt{\alpha} E'_4 + i\sqrt{1-\alpha} E'_3 \quad (2.13)$$

$$E_2 = \sqrt{\alpha} E'_3 + i\sqrt{1-\alpha} E'_4 \quad (2.14)$$

Al sustituir las ecuaciones 2.10 y 2.11 en nuestra ecuación 1.10, obtenemos una expresión para la transmitancia del interferómetro de Sagnac con fibra de alta birrefringencia en el lazo,

$$T = \frac{|E_2|^2}{|E_i|^2} = 1 - 2\alpha(1-\alpha) \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} L B\right) \right] \quad (2.15)$$

Donde B es la birrefringencia y está dada por la diferencia de los índices de refracción efectivos (n_x, n_y) .

Se puede decir por el análisis de la ecuación 2.15 que la transmitancia es una función periódica que depende fuertemente de λ y de los corrimientos de fase que experimentan los haces al contrapropagarse en el lazo del interferómetro de Sagnac. Analizando el argumento del término cosenoidal de esta misma ecuación, el periodo de la transmitancia $\Delta\lambda$, puede obtenerse por medio de la siguiente expresión [30]:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{B \cdot L} \quad (2.16)$$

Por otro lado, es conocido que nuestro dispositivo es altamente sensible a los cambios de temperatura, los cuales ocasionan un desplazamiento en la transmitancia del interferómetro [31]. Al considerar una dependencia de la temperatura t en el índice de refracción del argumento del término del coseno en la ecuación 2.15, podemos analizar este efecto de desplazamientos en la transmitancia del interferómetro. Trabajando con series de Taylor alrededor de la temperatura t obtenemos la siguiente expresión

$$t = 1 - 2\alpha(1 - \alpha) \times \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} L \left(\Delta n(t) + \frac{d\Delta n}{dt}(t - t_0)\right)\right) \right] \quad (2.17)$$

donde la posición de la transmitancia dependerá linealmente del segundo término del argumento de la ecuación (2.17), donde el desplazamiento de un ciclo completo de la transmitancia ocurre cuando

$$\frac{2\pi}{\lambda} L \left(\Delta n(t) + \frac{d\Delta n}{dt}(t - t_0)\right) = 2\pi \quad (2.18)$$

Por lo que, podemos ver que variando la temperatura en la fibra del lazo podemos desplazar la transmitancia del interferómetro, esto nos permitirá ajustar la transmitancia a la longitud de onda deseada.

2.4 Interferómetro de Sagnac en forma matricial.

El interferómetro de Sagnac mostrado en la figura 2.4 con fibra de alta birrefringencia en el lazo, consiste de un acoplador direccional de fibra óptica con una razón de división de amplitud $\alpha/1 - \alpha$, y se asume al acoplador independiente a la longitud de onda. Un haz de luz con campo eléctrico E_i es introducido a través de la terminal 1 del acoplador, este campo de entrada es dividido en dos campos de salida E_3 y E_4 por las terminales 3 y 4 respectivamente.

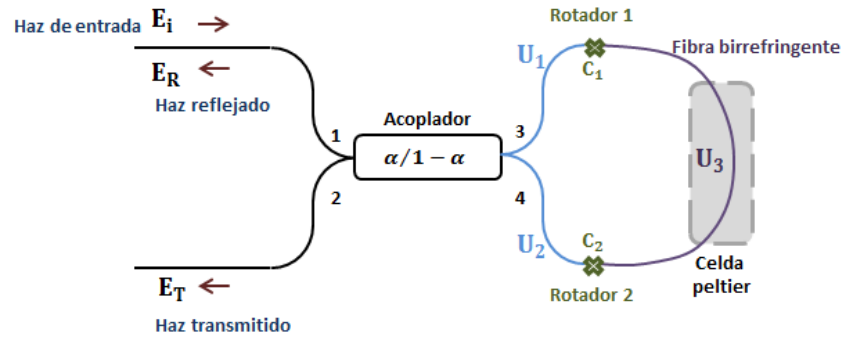


Figura 2.4 Arreglo experimental del interferómetro de Sagnac con fibra Hi-Bi.

Los puertos de salida (3 y 4) están empalmados con una fibra de alta birrefringencia con ángulos arbitrarios entre los ejes de la fibra de alta birrefringencia y los ejes de la fibra de las terminales del acoplador. Los segmentos donde la fibra de alta birrefringencia es empalmada por fusión a las terminales del acoplador se encuentran montados en conectores mecánicos. Los conectores se pueden rotar en ambos sentidos para poder torcer la fibra del lazo. Se puede fijar un conector y el otro se puede girar para ir torciendo la fibra gradualmente.

La fibra de alta birrefringencia está colocada sobre un dispositivo termoeléctrico (Peltier) para desplazar en longitud de onda el espectro de transmitancia del espejo de lazo de fibra óptica a través de variaciones de temperatura aplicadas en la fibra de alta birrefringencia del lazo. El interferómetro de Sagnac puede estar formado por fibra óptica de alta o baja birrefringencia. El interés en estudiar un interferómetro de Sagnac formado con fibra óptica de alta o baja birrefringencia, radica en las características que presenta la señal transmitida y los propósitos de aplicación que se requieran.

Dentro del lazo de fibra del interferómetro los haces con un campo E_3 y E_4 viajan en sentidos opuestos y al volver al acoplador se produce la interferencia. De este modo por el puerto 1 tendremos un haz reflejado con un campo E_R y el haz transmitido con un campo E_T sale por el puerto 2.

Para calcular el campo de salida transmitido del interferómetro, usamos el desarrollo de Mortimore [17]. Si el haz de entrada tiene un campo eléctrico dado por E_i , el campo transmitido está dado por

$$E_T = \begin{pmatrix} E_{Tx} \\ E_{Ty} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (2\alpha - 1)J_{xx} & (1 - \alpha)J_{xy} + \alpha J_{yx} \\ -\alpha J_{xy} - (1 - \alpha)J_{yx} & (1 - 2\alpha)J_{xx} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{ix} \\ E_{iy} \end{pmatrix} \quad (2.19)$$

La matriz J es la matriz de Jones del lazo del interferómetro, y se compone de la multiplicación matricial de cada uno de los elementos involucrados en el lazo del interferómetro:

$$J = U_1 \cdot C_1 \cdot U_2 \cdot C_2 \cdot U_3 \quad (2.20)$$

U_1 y U_2 son matrices que representan la sección de fibra de los brazos del acoplador, los cuales se unen por medio de conectores a la fibra de alta birrefringencia que forma el lazo. Estas matrices toman la siguiente forma [40]:

$$U_k = \begin{pmatrix} P_k & -Q_k^* \\ Q_k & P_k^* \end{pmatrix} \quad (2.21)$$

donde el subíndice k denota el número de matriz de cada elemento, siendo 1 y 2 para las matrices de los segmentos de fibra de los puertos de salida del acoplador U_1 y U_2 ; y 3 para la matriz que representa el segmento de fibra de Hi-Bi, U_3 . Estas matrices son de la siguiente forma [40]:

$$P_k = \cos \eta_k - i \left(\frac{\delta_k}{2} \right) \frac{\sin \eta_k}{\eta_k} \quad (2.22)$$

$$Q_k = \left(\psi_k + \frac{\gamma_k}{2} \right) \frac{\sin \eta_k}{\eta_k} \quad (2.23)$$

donde

$$\eta_k = \sqrt{\left(\frac{\delta_k}{2} \right)^2 + \left(\psi_k + \frac{\gamma_k}{2} \right)^2} \quad (2.24)$$

La retardancia lineal δ_k y la retardancia circular γ_k se define como:

$$\delta_k = \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) \frac{L_k}{L_{bk}} \cdot \lambda_0 \quad (2.25)$$

$$\gamma_k = g \cdot \psi_k \quad (2.26)$$

donde L_b es la longitud de repetición (beath length) de la fibra, L_k es la longitud del brazo de la fibra, y ψ_k es el ángulo de torsión de la fibra. El coeficiente g es igual a -0.16 [41] para fibras de silicio y es el mismo para todas las matrices.

El torcimiento de la fibra es provocado por los conectores C_1 y C_2 que rotan la fibra un ángulo θ_1 y θ_2 respectivamente.

Las matrices de los conectores C_1 y C_2 transforman los vectores de Jones de un sistema cartesiano relacionado con los ejes del puerto a un sistema relacionado con los ejes de la fibra de alta birrefringencia. Estas matrices están dadas como [40]:

$$C_n = \begin{pmatrix} \cos \theta_n & -\sin \theta_n \\ \sin \theta_n & \cos \theta_n \end{pmatrix} \quad (2.27)$$

El subíndice n identifica la matriz a calcular de cada conector, siendo 1 y 2 para las matrices C_1 y C_2 respectivamente.

El espectro de transmitancia está dado por la razón entre las intensidades de salida y de entrada, la cual es expresada como:

$$T = \frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{|E_T|^2}{|E_i|^2} \quad (2.28)$$

El espectro de transmitancia del espejo de lazo con fibra de alta birrefringencia se comporta como una función periódica en la cual el periodo está dado por:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{B \cdot L} \quad (2.29)$$

donde B es la birrefringencia de la fibra de lazo, L es la longitud de la fibra de lazo y λ es la longitud de onda.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DEL INTERFERÓMETRO DE SAGNAC CON FIBRA DE ALTA BIRREFRINGENCIA

3.1 Arreglo propuesto y resultados experimentales.

En la investigación experimental del interferómetro de Sagnac con fibra de alta birrefringencia en el lazo, el cual se muestra en la figura 3.1 consiste de un acoplador 50/50 con los puertos de salida empalmados a 43-cm de fibra con una birrefringencia alta de $B = 4.22 \times 10^{-4}$ lo que en los cálculos a través de la ecuación (2.29) nos proporciona un periodo del espectro de reflectancia del espejo de lazo de fibra óptica de aproximadamente 13 nm. Los empalmes están dispuestos en rotadores mecánicos para ajustar la transmitancia del lazo.

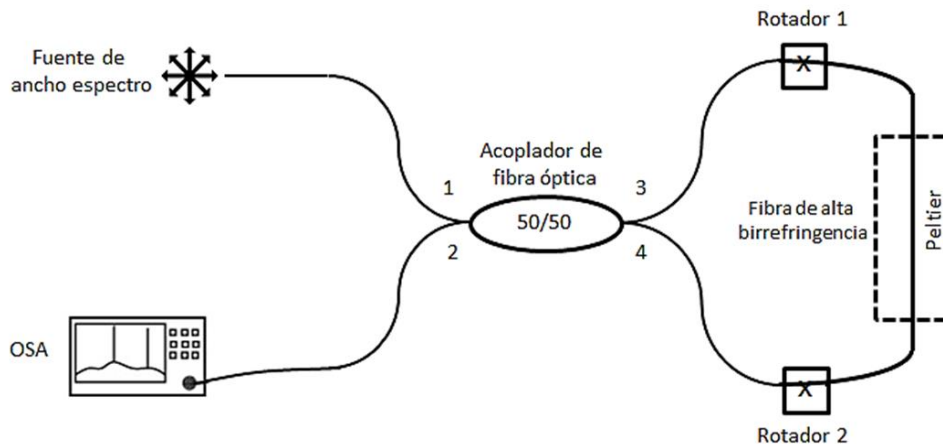


Figura 3.1. Diagrama esquemático del Interferómetro de Sagnac propuesto.

La temperatura de la fibra de alta birrefringencia del lazo está controlada por un controlador de temperatura electrónico con una precisión de 0.1 °C con el propósito de desplazar en longitud de onda el espectro de transmitancia del lazo. Para el bombeo empleamos una fuente de ancho espectro con un rango de 1400 – 1600 nm, la cual hacemos incidir mediante un aislador de fibra óptica monomodo, hacia el puerto de entrada del acoplador (puerto1).

Las fuentes de ancho espectro son indispensables en muchos sistemas de sensado en fibra, por ejemplo en interferometría de baja coherencia [41], en los sistemas de interrogación de sensores de redes de Bragg en fibra [42] o en giroscopios de fibra óptica [43]. Diodos superluminiscentes de alta potencia (SLEED) [44] y fuentes superfluorescentes [45] son las fuentes principales de banda ancha usadas en sensado óptico [46].

El acoplador tiene una constante de acoplamiento $\alpha = 0.5$ y los haces transmitidos hacia los puertos 3 y 4 se contrapropagarán en el lazo de fibra para posteriormente incidir en el acoplador y obtener la transmitancia en el puerto de salida 2. Los cambios de temperatura los inducimos al lazo mediante un dispositivo Peltier, colocando la fibra de alta birrefringencia sobre él.

Para obtener la transmitancia del interferómetro, descrita por la ecuación (2.15), hacemos incidir el haz de salida del puerto 2 en un analizador de espectro óptico.

Los resultados del corrimiento de la transmitancia en función de la temperatura se muestran en la figura 3.2.

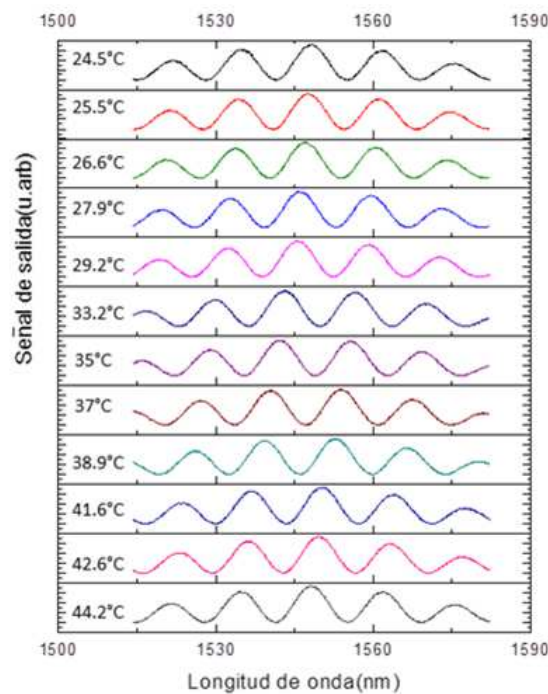


Figura 3. 2 Transmitancia del interferómetro de Sagnac a diferentes temperaturas

Estos resultados se obtuvieron variando la temperatura en la fibra de alta birrefringencia en el lazo al aplicarle corriente eléctrica a nuestro dispositivo Peltier (Fig. 3.1), la cual se varió de temperatura ambiente hasta los 44 °C. Como se aprecia en la figura 3.3, el desplazamiento es lineal en función de la temperatura con una razón de $0.68 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$.

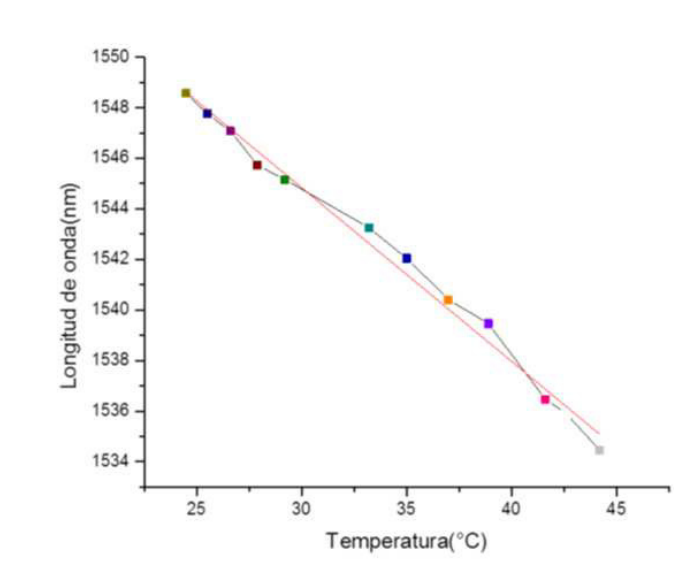


Figura 3. 3 Desplazamiento de la longitud de onda en función de la temperatura inducida en el lazo.

La figura 3.4 es una representación tridimensional que muestra el espectro de transmitancia para diferentes ángulos de torcimiento.

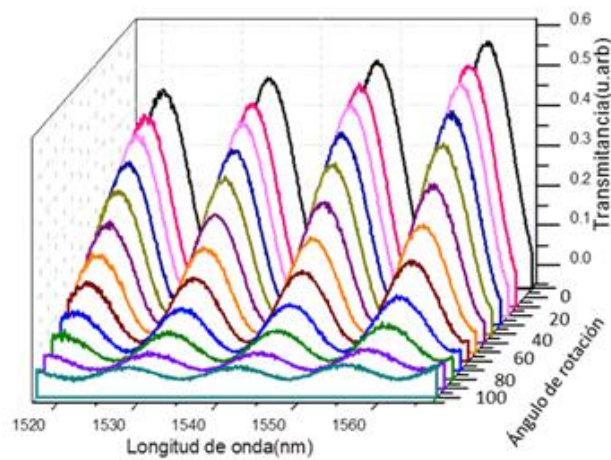


Figura 3. 4 Espectro de transmitancia del espejo de lazo como función del ángulo θ_1 y con θ_2 fijo.

Al torcer la fibra se producen cambios en la profundidad de modulación [47]. Donde el máximo y el mínimo valor que se puede observar en los cambios de modulación, se logra torciendo ambos empalmes mecánicamente. La figura 3.5 y figura 3.6 demuestran la secuencia del máximo y el mínimo de los valores para la profundidad de modulación con el torcimiento de la fibra en el caso de mejor alineamiento. En este caso, uno de los conectores mecánicos se queda fijo en la mejor posición y el otro es torcido. El máximo correspondiente es cercano a 0.6 y el mínimo es menor a 0.04.

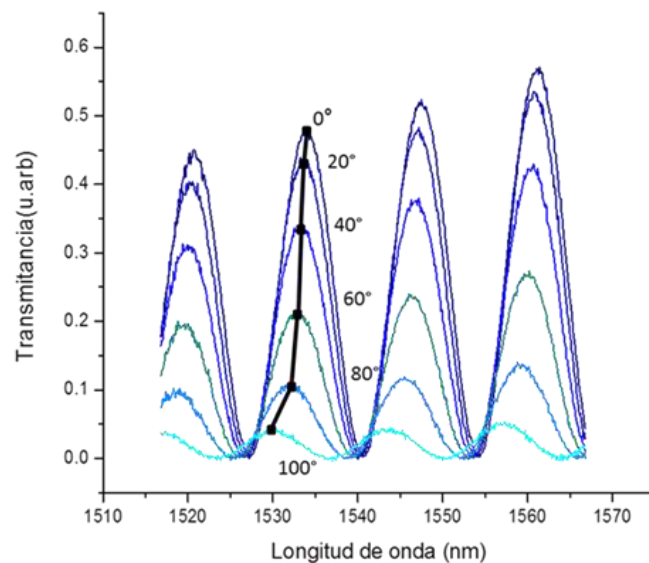


Figura 3. 5 Espectro de transmitancia del espejo de lazo como función del ángulo θ_2 y con θ_1 fijo. Rotación de θ_2 a 0° , 20° , 40° , 60° , 80° y 100° .

Al aplicar un cambio en la rotación de los ejes principales de la fibra del lazo del interferómetro manteniendo constante la razón de la longitud del lazo / la longitud de repetición (L_b), así como también la birrefringencia de los brazos, se encuentra una dependencia de la transmitancia contra el grado de torsión de la fibra. Como se muestra en la figura 3.5 y 3.6.

El acoplamiento óptico a la fibra se realizó mediante empalmes de fusión. Durante la ejecución de la prueba la eficiencia del acoplamiento debe ser constante para evitar ambigüedades en las mediciones. La potencia de salida de la fuente también debe permanecer constante.

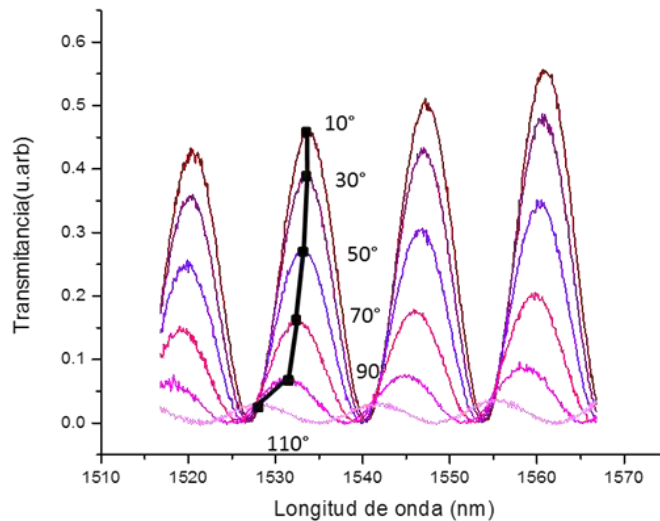


Figura 3. 6 Rotación de θ_2 a 10°, 30°, 50°, 70°, 90° y 110°.

Con estas imágenes (3.5 y 3.6) mostramos que el interferómetro de Sagnac construido por un acoplador direccional de fibra monomodo de cuatro puertos, el cual dos de sus puertos están conectados entre sí por medio de la fibra de alta birrefringencia formando un lazo de fibra, puede ser idealmente ajustado torciendo el punto del empalme de los puertos de salida del acoplador con la fibra de alta birrefringencia. Esto provee uno de los procedimientos de fabricación más fáciles y de bajo costo para el ajuste en multiplexores por división de longitud de onda y para sensores, basados en el interferómetro de Sagnac [29].

A través de investigaciones se ha encontrado que la birrefringencia residual causa un desplazamiento en longitud de onda del máximo al mínimo del espectro de transmiancia así como en la reflectancia del espejo de lazo cuando el contraste es ajustado. Sin embargo, la elección apropiada de los ángulos de torcimiento en ambos empalmes de la fibra del lazo permite variaciones de contraste en un amplio rango en el cual el desplazamiento en

longitud de onda del espectro del espejo de lazo con fibra de alta birrefringencia no es substancial [48].

CAPÍTULO 4

SISTEMAS DE CONTROL

Los sistemas controlados desempeñan una función vital en el avance de la ingeniería y la ciencia, ya que el control automático se ha vuelto una parte importante e integral de los procesos modernos de manufactura y en cualquier operación industrial que requiera el control de temperatura, presión, humedad, flujo, etc.

Como desarrollo histórico de la teoría y práctica del control, se encuentran [49]:

- ⇒ **Siglo XVIII.** Primer trabajo significativo en control automático por James Watt para el control de la velocidad de una máquina, fue el regulador de velocidad centrífugo.
- ⇒ **1922** Minorsky trabajo en controladores automáticos para el guiado de embarcaciones, y mostró que la estabilidad puede determinarse a partir de las ecuaciones diferenciales del sistema.
- ⇒ **1932** Nyquist diseñó un procedimiento para determinar la estabilidad de sistemas en lazo cerrado, a partir de la respuesta en lazo abierto a entradas sinusoidales en estado estacionario.
- ⇒ **1934** Hazen introdujo el término servomecanismos para los sistemas de control de posición, analizó el diseño de los servomecanismos con relé, capaces de seguir con precisión una entrada cambiante.
- ⇒ **1940** Durante esta década, los métodos de la respuesta en frecuencia hicieron posible el diseño de sistemas de control lineales en lazo cerrado que cumplieran los requisitos de comportamiento. Los métodos de respuesta en frecuencia, que forman el núcleo de la teoría de control clásica, conducen a sistemas estables que satisfacen un conjunto más o menos arbitrario de requisitos de comportamiento.

⇒ **1960-1980** Investigaciones en control óptimo como sistemas determinísticos tanto estocásticos, también en control adaptativo y con sistemas complejos.

La teoría de control moderna se basa en el análisis del dominio temporal de los sistemas de ecuaciones diferenciales.

La teoría de control moderna se basa en un modelo del sistema real que se quiere controlar. Sin embargo, la estabilidad del sistema depende del error entre el sistema real y su modelo. Es decir que cuando el controlador diseñado basado en un modelo se aplica al sistema real, éste puede no ser estable.

4.1 Sistemas de control

Estudiando un sistema de control en el cual la salida del sistema se pueda controlar para tener un valor específico o poder cambiarlo, según se determine por la entrada al sistema. De este modo, un sistema de control de temperatura, por ejemplo, una celda Peltier, puede tener como entrada un sensor de temperatura o un panel de control en el que se fija la temperatura deseada y su salida es la temperatura real producida. Esta temperatura se ajusta mediante un sistema de control, de modo que se obtenga el valor fijado por la entrada al sistema.

Existen distintas formas básicas de sistemas de control, como el control realimentado, control en lazo cerrado y control en lazo abierto.

4.1.1 Sistema de control realimentado

El control realimentado se refiere a una operación que, en presencia de perturbaciones, tiende a reducir la diferencia entre la salida de un sistema y alguna entrada de referencia, y lo realiza tomando en cuenta esta diferencia. Es un sistema que mantiene una relación determinada entre la salida y la entrada de referencia, comparándolas y usando la diferencia como medio de control. Un ejemplo sencillo sería un controlador de temperatura en una habitación, el termostato activa o desactiva el equipo de calefacción o de enfriamiento para

asegurar que la temperatura sea la deseada independientemente de las condiciones externas.

4.1.2 Sistema de control en lazo cerrado.

Con un sistema en lazo cerrado se tiene una señal de realimentación hacia la entrada desde la salida, la cual se utiliza para modificar la entrada de modo que la salida se mantenga constante a pesar de los cambios en las condiciones de operación. Para tener una estrategia de control, necesitamos establecer un elemento de control el cual tenga como entrada la señal de error y como salida una señal que se convierta en la entrada a la unidad de corrección de modo que se pueda iniciar la acción para eliminar el error [49].

En un sistema de control en lazo cerrado, se alimenta al controlador la señal de error de actuación, que es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación, esta puede ser la propia señal de salida o una función de la señal de salida y sus derivadas o integrales, con el fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor deseado.

4.1.3 Sistema de control en lazo abierto.

Con un sistema en lazo abierto la entrada se elige con base en la experiencia que se tiene con dichos sistemas para producir el valor de salida requerido, en el que no existe información que alimente de regreso a la entrada y así ajustarlo y mantener al sistema constante. En un sistema de control en lazo abierto los tipos de control más comunes son el de secuencias, el de dos posiciones como se muestra en la figura 4.1 (encendido-apagado o mejor conocido como on-off) o acciones intercambiadas por tiempo [50].

Si hacemos la comparación de un sistema en lazo cerrado con un sistema en lazo abierto, se encuentran ventajas y desventajas de ambos sistemas. Una ventaja del sistema de control en lazo cerrado es que el uso de la realimentación vuelve la respuesta del sistema relativamente insensible a las perturbaciones externas y a las variaciones internas en los parámetros del sistema, señalando que, para los sistemas en los que se conocen con anticipación las entradas y en los cuales no hay perturbaciones, es aconsejable el lazo abierto. Es decir, que

los sistemas de control en lazo cerrado sólo tienen ventajas cuando se presentan perturbaciones o variaciones impredecibles en el sistema. Como desventaja para un sistema de control de lazo cerrado, el número de componentes usados es mayor que para un sistema en lazo abierto. Por tanto puede ser más costoso y ocupar mayor potencia.

Desde el punto de vista de estabilidad, el sistema de control en lazo abierto es más fácil de desarrollar, porque la estabilidad del sistema no es un problema. Por otra parte, la estabilidad es un gran problema en el sistema de control en lazo cerrado, que puede conducir a corregir errores que producen oscilaciones de amplitud constante o cambiante.

En el modo de control de dos posiciones, la señal de salida error de entrada al elemento de control es una salida de encendido o de apagado, que se utiliza para encender o apagar el elemento de corrección.

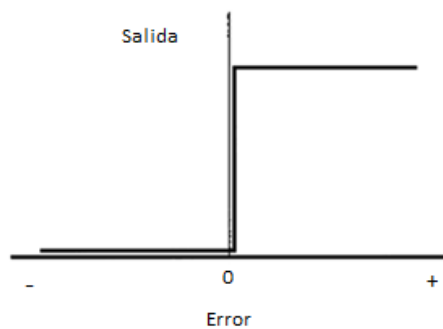


Figura 4. 1 Modo de control de dos posiciones.

Con el control proporcional (figura 4.2) la salida del elemento de control es una señal, la cual es proporcional al error: cuanto mayor sea el error mayor será la salida. Esto significa que el elemento de corrección recibirá una señal que depende de la magnitud de la corrección que se necesite. Para un controlador con acción de control proporcional, la relación entre la salida del controlador $u(t)$ y la señal de error $e(t)$ es [50]:

$$u(t) = K_p e(t) \quad (4. 1)$$

donde K_p es una constante llamada *ganancia proporcional*.

Ya que la salida es proporcional a la entrada, si la entrada al controlador es un error en la forma de un escalón, entonces la salida es también un escalón, y es exactamente una versión a escala de la entrada.

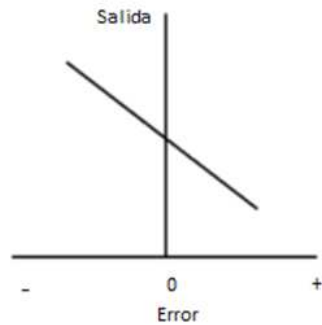


Figura 4. 2 Control proporcional

Control integral.

La acción de control integral se denomina control de reajuste (reset). En un controlador integral la relación entre la salida del controlador $u(t)$ y la señal de error $e(t)$ es:

$$\frac{d u(t)}{dt} = K_i e(t) \quad (4. 2)$$

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) \quad (4. 3)$$

donde K_i es la constante denominada *ganancia integral*.

La función de transferencia se obtiene tomando la transformada de Laplace.

$$U(s) = \frac{K_i}{s} E(s) \quad (4. 4)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \quad (4.5)$$

La figura 4.3 muestra la acción de un controlador integral cuando hay una señal de error constante como entrada al sistema. Estas gráficas se pueden observar de dos maneras, cuando la salida del controlador es constante, el error es cero; cuando la salida del controlador varía de una manera constante, el error tiene un valor constante. También se puede interpretar en términos del área bajo la curva del error entre $t=0$ y $t = \int_0^t e(t)dt$. Por lo tanto, el área bajo la curva aumenta cuando se incrementa el tiempo. Dado que el área aumenta de manera constante, la salida del controlador también aumenta de forma constante.

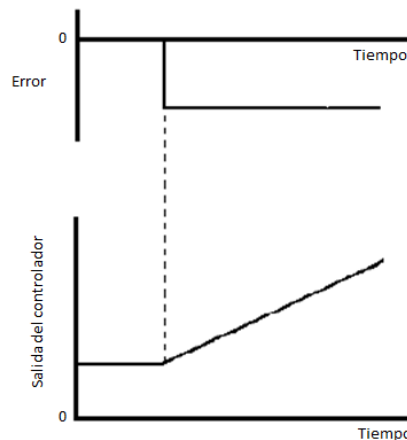


Figura 4. 3 Control integral.

Control proporcional integral

El modo de control integral por lo normal no se utiliza solo, sino junto con el modo proporcional (figura 4.4). Cuando una acción integral se suma a un sistema de control proporcional, la salida del controlador $u(t)$ está dada por [50]:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (4.6)$$

donde K_p es la ganancia proporcional y T_i se denomina tiempo integral.

El tiempo integral ajusta la acción del control, mientras que un cambio en el valor de K_p afecta las partes integral y proporcional de la acción de control. El inverso del tiempo integral T_i se denomina velocidad de reajuste. La velocidad de reajuste es la cantidad de veces por minuto que se duplica la parte proporcional de la acción de control. La velocidad de reajuste se mide en términos de las repeticiones por minuto.

Si se aplica la transformada de Laplace se obtiene la función de transferencia [50].

$$U(s) = K_p E(s) + \frac{1}{T_i s} E(s) \quad (4.7)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{sT_i} \right) \quad (4.8)$$

El control proporcional integral decrementa el tiempo de subida, incrementa el sobre impulso y el tiempo de estabilización, y tiene el efecto de eliminar el error de estado estable pero empeorará la respuesta transiente.

En la figura 4.4 se muestra cómo reacciona el sistema ante un cambio abrupto con un error constante. El error da lugar a una señal de salida del controlador proporcional, la cual permanece constante ya que el error no cambia, a esta acción se sobrepone una señal de salida del controlador que aumenta de manera constante y que se produce por la acción integral.

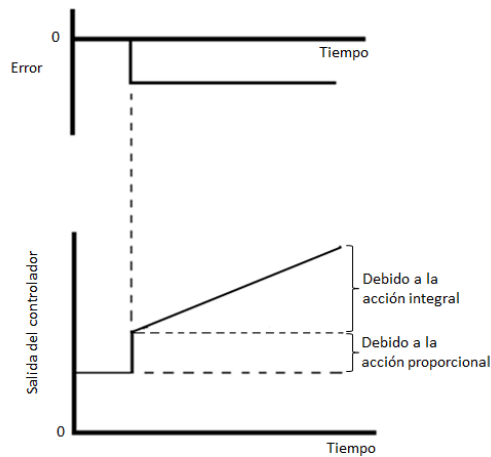


Figura 4. 4 Control integral proporcional.

Sí suponemos que se modifica el valor de referencia del controlador y sólo hubiera un control proporcional, ese cambio sólo sería posible teniendo una desviación en el error, es decir, un valor de referencia que no sea cero. Sin embargo, con la combinación del control integral y del control proporcional, se obtiene que la parte de integración del controlador modifica la salida del controlador sin desviar el error, se puede decir que el controlador reposiciona su propio valor de referencia.

La figura 4.5 muestra los efectos de las acciones proporcional e integral cuando se crea una señal de error que aumenta desde un valor de cero y luego disminuye otra vez hasta llegar a cero.

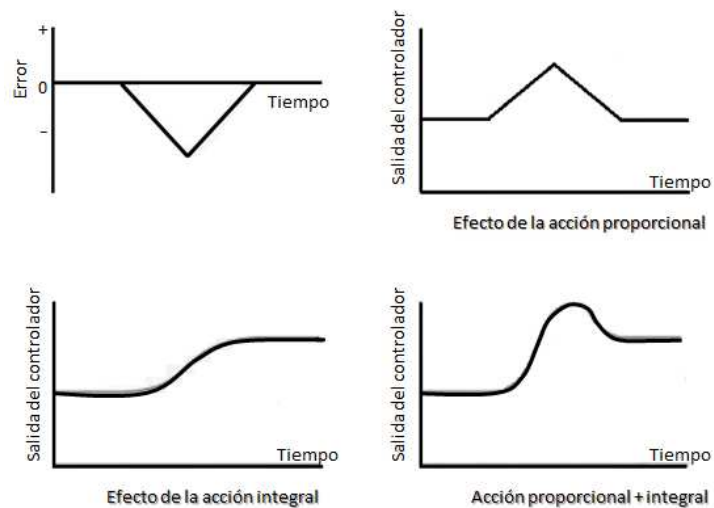


Figura 4. 5 Efectos de las acciones proporcional e integral.

Con la acción proporcional por sí sola, el controlador lo único que hace es reflejar ese cambio para al final llegar de nuevo a su valor de referencia original y por otro lado la acción integral del controlador aumenta en proporción con el aumento del área bajo la curva error-tiempo y como aun cuando el error regresa a cero, todavía queda un valor del área por lo que también existe un cambio en la salida del controlador que persiste después de que el error desaparece.

El efecto de combinar las acciones proporcional e integral, es decir, de sumar dos gráficas, provoca un cambio en la salida del controlador sin desviación en el error. Entonces, al aplicar una señal de entrada tipo escalón al sistema de control se producirá un valor de estado estable en el que no hay error, debido a que no tiene error de desviación este tipo de controlador se utiliza cuando la variable del proceso experimenta grandes cambios. Sin embargo, como la parte integral del control toma tiempo en llevarse a cabo, los cambios deben ser más o menos lentos para evitar oscilaciones.

Una desventaja de esta forma de control es que cuando el error es tan grande que el controlador produce una salida de 100%, la acción integral produce un sobrepaso considerable del error antes de lograr finalmente su estabilidad.

Control derivativo.

En el control derivativo, el cambio de la salida del controlador respecto al valor de referencia es proporcional a la rapidez de cambio en el tiempo de la señal de error.

$$u(t) = K_d \frac{d e(t)}{dt} \quad (4.9)$$

donde $u(t)$ es la *salida del controlador*, K_d es la *ganancia derivativa* y $e(t)$ la *señal de error*.

En el control derivativo, en cuanto la señal de error empieza a cambiar existe la posibilidad de que el controlador produzca una salida de gran magnitud, ya que es proporcional a la rapidez en que cambia la señal de error, y no a su valor. Por lo tanto, se producen respuestas iniciales rápidas.

La figura 4.6 muestra la salida que produce el controlador cuando la rapidez con que cambia la señal de error en el tiempo es constante, la salida del controlador es constante porque la tasa de cambio también es constante y se produce en cuanto se presenta la desviación.

Sin embargo, si el error es constante, entonces no hay acción correctiva, aun si el error es grande. Así, el control derivativo es insensible a señales de error constantes o que varían con lentitud y en consecuencia, no se aplica solo, sino combinado con otras formas de controlador.

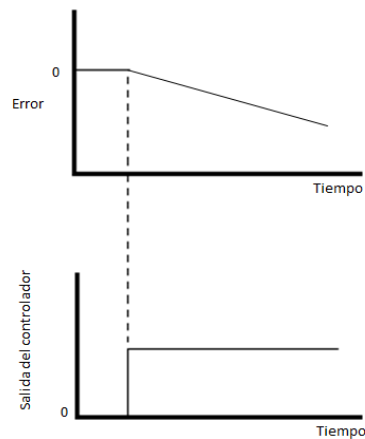


Figura 4. 6 Control derivativo.

La función de transferencia, para el control derivativo, se obtiene tomando transformadas de Laplace.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_d s \quad (4. 10)$$

Aunque la acción de control derivativo tiene la ventaja de ser de previsión, tiene las desventajas de que amplifica las señales de ruido y puede provocar un efecto saturable en el actuador, el cual produce la entrada a la planta [49-51].

Control proporcional derivativo.

El control derivativo no se utiliza solo ya que no es capaz de producir una salida cuando hay una señal de error constante, por lo que no se puede corregir el sistema, por ello se utiliza junto con el control proporcional. Cuando se utiliza el control proporcional derivativo, la parte proporcional responde a todas las señales de error, incluso señales estables, en tanto que la parte derivativa responde a la tasa de cambio.

El cambio en la salida del controlador respecto al valor de referencia está dado por

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{d e(t)}{dt} \quad (4.11)$$

En donde K_p es la ganancia proporcional y T_d es una constante denominada tiempo derivativo.

$$T_d = \frac{K_p}{K_d} \quad (4.12)$$

El tiempo derivativo T_d es el intervalo de tiempo durante el cual la acción de la velocidad hace avanzar el efecto de la acción proporcional.

Si se aplica la transformada de Laplace para así obtener la función de transferencia, se obtiene:

$$U(s) = K_p E(s) + K_p T_d s E(s) \quad (4.13)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p (1 + s T_d) \quad (4.14)$$

El control proporcional derivativo reduce el sobre impulso y el tiempo de estabilización, por lo que tendrá el efecto de incrementar la estabilidad del sistema mejorando su respuesta. De este modo, la combinación del control proporcional derivativo toma en cuenta más rápido estos cambios y los corrige.

4.2 Control proporcional integral derivativo

El control automático se ha convertido en una parte importante e integral de los procesos modernos industriales y de fabricación. Es esencial en las operaciones industriales como el control de presión, temperatura, humedad, viscosidad y flujo en las industrias de proceso.

El control proporcional integral derivativo es ampliamente utilizado en aplicaciones industriales ofreciendo una buena alternativa para controlar procesos dinámicos, ofreciendo tiempos de respuesta rápidos y un proceso de ajuste simple.

Como su nombre lo indica, el algoritmo del control PID consiste de tres modos básicos, el proporcional, el integral y el derivativo. Un control PID (figura 4.7) lee un valor de entrada o del sensor de entrada, aplica los algoritmos de control, definidos y produce una salida específica como señal actuante o como entrada a un acoplador. La salida del sistema es medida por un sensor de entrada y el proceso se repite indefinidamente [50].

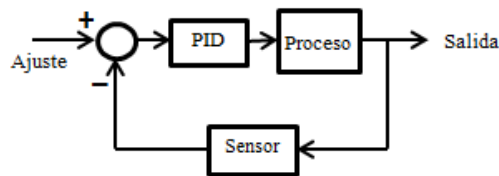


Figura 4. 7 Control proporcional integral derivativo.

Al combinar los tres modos (proporcional, integral y derivativo) se obtiene un controlador que no tiene desviación en el error y disminuye la tendencia a producir oscilaciones. Este tipo de controlador se conoce como controlador de tres modos o controlador PID. La ecuación que describe su comportamiento es:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{d e(t)}{dt} \quad (4.15)$$

Donde $u(t)$ es la salida del controlador cuando existe un error e , el cual varía con el tiempo t , K_p es la constante de proporcionalidad, K_i es la constante integral y K_d la constante derivativa.

Este controlador ofrece rápida respuesta proporcional al error mientras que tiene un reajuste automático, desde la parte integral que elimina el error en estado estable. La acción derivativa permite que el controlador responda rápidamente a cambios en el error.

En la figura 4.8 se muestra la estructura clásica de este sistema.

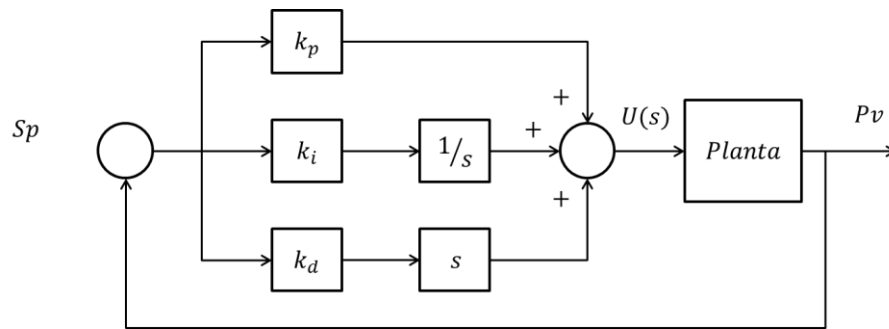


Figura 4. 8 Estructura del control PID.

La función de transferencia de un controlador PID básico es la siguiente [54]:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s \quad (4. 16)$$

4.3 Control de una celda Peltier

Las celdas Peltier son unos dispositivos termoelectrónicos que se caracterizan por la aparición de una diferencia de temperatura entre las dos caras de un semiconductor cuando por el circula una corriente. Estos sistemas son capaces de transformar la energía eléctrica en energía térmica y son capaces de extraer calor de la cara fría y bombearlo a la cara caliente mediante una batería eléctrica.

La interacción entre un fenómeno eléctrico y térmico se conoce desde el siglo XIX, cuando Joule observó que la materia ofrece cierta resistencia al movimiento de las electrones, los cuales ceden energía cinética al entorno en los sucesivos choques (efecto Joule). Esta energía proporcionada por los electrones se disipa en forma de calor.

El efecto Peltier fue descubierto en el año 1834 por el físico francés Peltier J.C.A. Surgió sobre la base del descubrimiento del físico alemán Seebeck T.J. en 1821, quien observó que en un circuito formado por dos conductores distintos, cuyas uniones soldadas se encuentran en medios con temperaturas distintas, aparece entre ambos una diferencia de potencial. Esta diferencia de potencial es función de la naturaleza de los conductores y de la diferencia de temperatura. Este dispositivo se conoce como termopar. La esencia del efecto Peltier, consiste en hacer pasar una corriente procedente de una fuente de energía, a través de un circuito formado por dos conductores de distinta naturaleza, obteniéndose que una de sus uniones absorbe calor y la otra lo cede. El calor que cede el foco caliente será la suma de la energía eléctrica aportada al termo elemento y el calor que absorbe al foco frío.

El efecto Thompson, descubierto en 1857 por Thompson W. consiste en la absorción o liberación de calor por parte de un conductor eléctrico, con un gradiente de temperaturas, por el cual circula una corriente eléctrica [52].

Teniendo en cuenta los fenómenos que ocurren dentro de una celda Peltier, al aplicar una diferencia de potencial sobre la celda se producirá una cesión de calor por unidad de tiempo en la cara caliente igual a [53]:

$$Q_{PC} = \alpha T_C I \quad (4.17)$$

Donde T_C es la temperatura de la cara caliente, α es el coeficiente Seebeck e I la corriente que atraviesa al circuito. Por el mismo efecto, la absorción de calor por unidad de tiempo en la cara fría será:

$$Q_{PF} = \alpha T_F I \quad (4.18)$$

Siendo T_F la temperatura de la cara fría. De otro lado, si se consideran las pérdidas por unidad de tiempo por efecto Joule, las cuales se supone que se reparten mitad para cada cara, éstas quedarán expresadas por:

$$Q_J = \frac{1}{2} I^2 R \quad (4.19)$$

Donde R es la resistencia eléctrica de la celda Peltier. La diferencia de temperaturas entre ambas caras producirá un efecto de conducción térmica entre la cara caliente y la cara fría,

$$Q_{CT} = \frac{T_C - T_F}{R_{TH}} \quad (4.20)$$

En donde R_{TH} representa la resistencia térmica entre la cara caliente y la fría. El flujo neto calorífico absorbido por la cara fría, será haciendo el balance energético a

$$Q_F = Q_{PF} - Q_J - Q_{CJ} \quad (4.21)$$

$$Q_F = \alpha T_F I - \frac{1}{2} I^2 R - \frac{T_C - T_F}{R_{TH}} \quad (4.22)$$

Consecuentemente el calor cedido y que debe ser disipado a través de la cara caliente será igual a:

$$Q_C = Q_{PC} + Q_J - Q_{CT} \quad (4.23)$$

$$Q_C = \alpha T_C I + \frac{1}{2} I^2 R - \frac{T_C - T_F}{R_{TH}} \quad (4.24)$$

En la figura 4.9 se muestra el esquema de las ecuaciones (4.21) y (4.23), reflejando los efectos Peltier y Joule junto con los de la transmisión de calor [54].

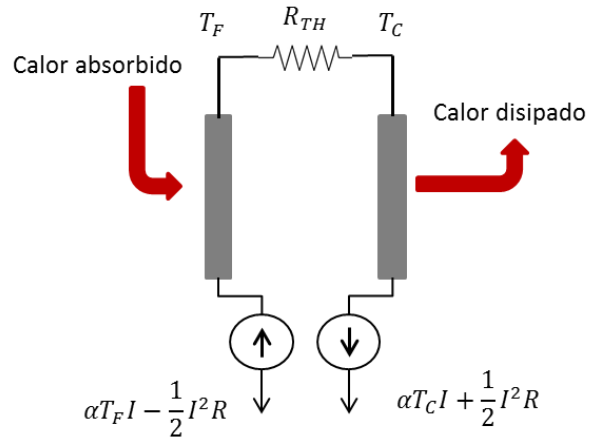


Figura 4. 9 Esquema de la celda Peltier

Aplicando el primer principio de la termodinámica, resultará que la potencia eléctrica suministrada será la diferencia entre los flujos caloríficos de disipación y de absorción,

$$P_e = Q_C - Q_F \quad (4. 25)$$

$$P_e = \alpha(T_C - T_F)I + I^2R \quad (4. 26)$$

$$P_e = \alpha \Delta T I + I^2R \quad (4. 27)$$

La potencia eléctrica es igual a la variación de temperaturas entre las caras más el efecto Joule.

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE UN CONTROLADOR DE TEMPERATURA PID PARA APLICACIÓN EN UN INTERFERÓMETRO DE SAGNAC CON FIBRA DE ALTA BIRREFRINGENCIA EN EL LAZO

En este capítulo presentamos los esquemas y configuraciones construidas, demostrando experimentalmente un controlador de temperatura utilizando un interferómetro de Sagnac, como sensor de temperatura gracias a las características que presenta la fibra del lazo de alta birrefringencia, la cual lo hace altamente sensible a cambios de temperatura. Además de su fácil diseño, la configuración de Sagnac, donde los dos haces que se propagan por el mismo camino óptico, es más robusta a cambios ambientales que otros esquemas interferométricos. Una ventaja de este dispositivo es que no depende de la polarización de entrada [8], que lo hace compatible con la luz polarizada aleatoriamente proveniente de sistemas de transmisión por fibra óptica.

En la práctica es bien conocida la alta sensibilidad a los cambios de temperatura de la fibra birrefringente que hace parte del interferómetro de Sagnac. Los cambios de temperatura afectan tanto a la birrefringencia como a la longitud expuesta al cambio de temperatura [15]. La longitud de onda en el máximo de transmisión cambia al modificar la birrefringencia y así la sensibilidad se puede expresar teniendo en cuenta los desplazamientos del pico de onda con la temperatura.

El estudio de la sensibilidad térmica del interferómetro demuestra que es posible cambiar el espectro de transmisión hacia una longitud de onda determinada, variando la temperatura [15].

El objetivo de este trabajo es diseñar un prototipo didáctico de bajo costo y de fácil implementación para el control y la automatización de un sensor de temperatura basado en el interferómetro de Sagnac con fibra de alta birrefringencia en el lazo. Se presenta la metodología para la implementación práctica de un controlador Proporcional Integral y

Derivativo (PID) en este sistema de tipo térmico. Donde se regula la temperatura de un dispositivo Peltier como disipador de calor, que está conectado directamente a una fuente de corriente eléctrica. El sistema de enfriamiento se logra por convección forzada, mediante un ventilador.

El algoritmo de control fue implementado en la Tarjeta de Adquisición de Datos Arduino UNO® manipulada mediante Arduino Web Editor. Los resultados obtenidos muestran que el controlador responde de manera adecuada a las variaciones de la señal de referencia. Esta tarjeta es muy versátil y se puede aplicar en diversos campos de la ingeniería, para el desarrollo de trabajos, competencia y habilidades. El software es Open-Source (Libre) y permite trabajar en ambiente UNIX, MAC OS o Windows.

Por otra parte, la razón de utilizar este software, es que tiene un lenguaje de programación de alto nivel. Esto quiere decir que las instrucciones son bloques y líneas de conexión, lo cual facilita la programación y el entendimiento del algoritmo PID. Se ha elegido el controlador tipo PID porque es el más utilizado en el ambiente industrial, dada su simplicidad y robustez.

5.1 Descripción del sistema a controlar

La figura 5.1 muestra un diagrama de bloques del sistema, puede observarse de abajo hacia arriba que el sistema será controlado desde una computadora lap-top, está a su vez estará conectada a la tarjeta Arduino UNO mediante un cable USB. En la tarjeta se utilizó una terminal analógica (entrada) y una terminal digital (salida). La terminal analógica leerá el valor del sensor LM35 que está en contacto con la cara caliente del dispositivo Peltier. La terminal digital enviará la modulación de anchura de pulsos (PWM).

El sensor LM35, es un sensor de temperatura integrado de precisión cuyos rangos de operación oscilan desde los $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta los $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, con una precisión calibrada de $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. La salida es lineal y cada grado centígrado equivale a $10\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ [55]. Su voltaje de salida es proporcional a la temperatura que detecta.

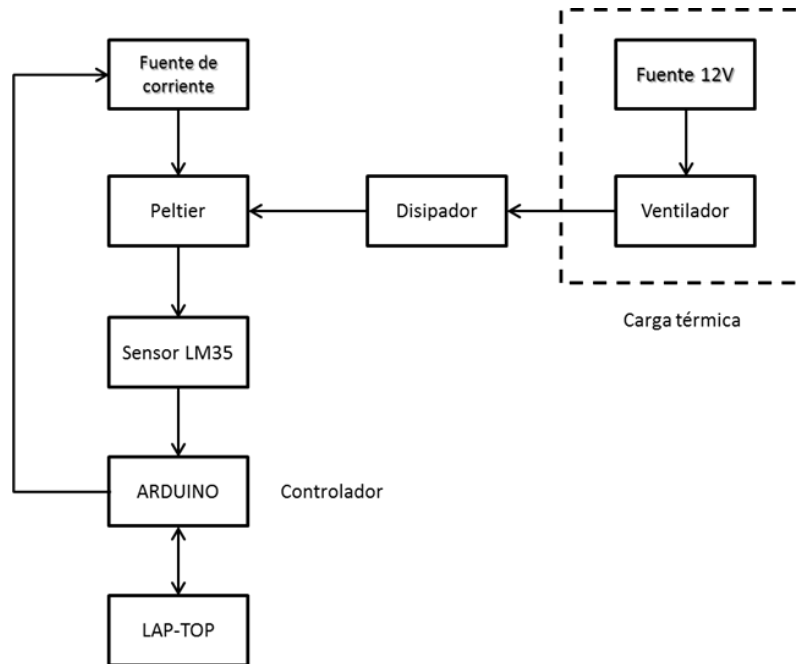


Figura 5. 1 Diagrama de bloques del sistema a controlar.

Se ha colocado un sensor de temperatura en contacto directo con el dispositivo Peltier. El sistema de encuentra, parcialmente, aislado de la temperatura en el exterior. El sensor de temperatura es el sensor LM35, este sensor entrega un voltaje de 10 mV/°C. Se utiliza este sensor porque es de fácil adquisición y es ideal para fines didácticos.

La figura 5.2 muestra el diagrama esquemático, a partir de la tarjeta Arduino. La terminal analógica será la A2 y la terminal digital será la D3. La terminal digital debe ser de tipo PWM para permitir la modulación de anchura de pulso, esta a su vez se envía al Transistor NPN 2n222 mediante una resistencia R1. El transistor es utilizado para “encender” (ON) y para “apagar” (OFF) al Mofset. Está configuración descarga la capacitancia parásita del Mofset, lo que permite que este se apague correctamente. El Mofset se conecta en serie con la terminal negativa del Peltier.

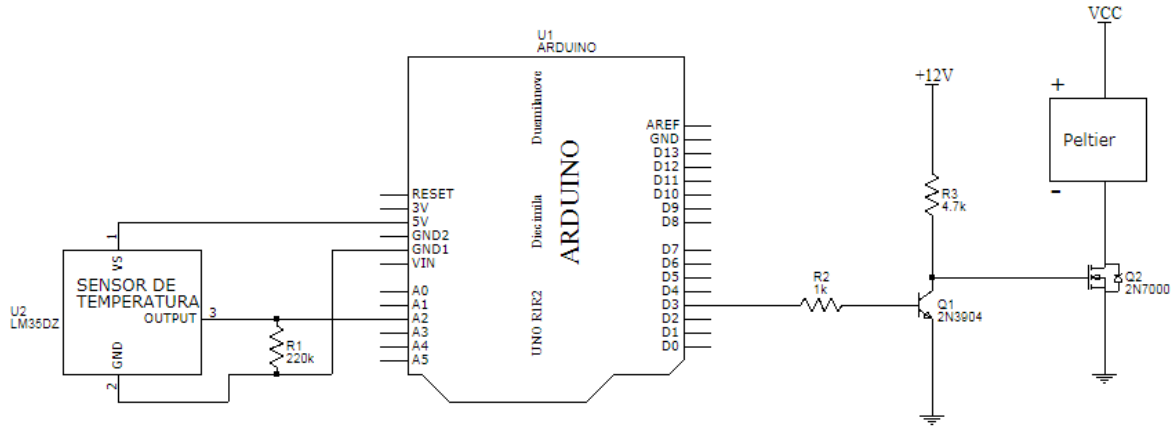


Figura 5. 2 Diagrama esquemático del controlador de temperatura.

5.2 Obtención de los valores del controlador PID.

El primer paso para obtener el modelo térmico del sistema consiste en aplicar una señal escalón y medir la variable de interés, en este caso es la temperatura.

La planta utilizada es una ecuación que describe la mayoría de los sistemas en general como una planta sobre-amortiguada ante una entrada en escalón [56]. Según Ziegler-Nichols, se puede modelar la respuesta mediante un sistema de primer orden como un retardo puro [57].

La expresión matemática de este modelo es de la forma siguiente:

$$G(s) = \frac{k \cdot e^{-s\tau}}{\gamma s + 1} \quad (5.1)$$

Donde k es la ganancia del proceso en estado estacionario, γ es la diferencia del tiempo en el que la señal es estable y la señal de inicio, τ es el tiempo que transcurre de la señal del tiempo de retardo hasta el inicio. Con excepción de τ las demás variables son adimensionales. El signo negativo representa el retardo.

En la figura 5.3 se presenta la respuesta al escalón del sistema sin compensar.

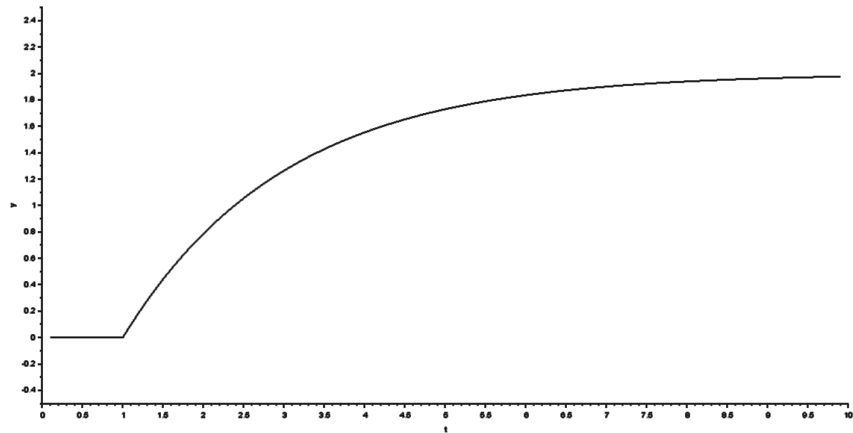


Figura 5. 3 Respuesta al escalón del sistema sin compensar.

En la figura 5.4 se presenta el diagrama de bloques del sistema de control con retroalimentación

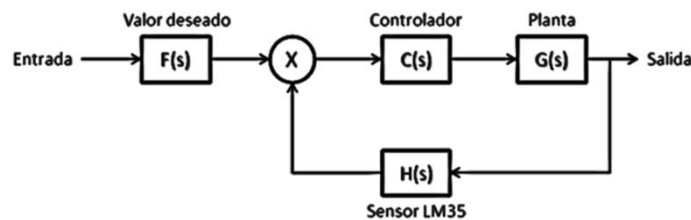


Figura 5. 4 Diagrama de bloques del sistema en lazo cerrado.

La función de transferencia del controlador es $C(s)$ y se muestra en la ecuación 5.2.

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (5.2)$$

Los valores de la función de transferencia (4.2) se obtienen mediante la herramienta SCILAB. La planta utilizada en dicha herramienta es la expresión matemática (5.2). Los parámetros son la constante proporcional $K_p = 40$, la constante de sumatoria $K_i = 0.00005$ y la constante derivativa del sistema $K_d = 0.7$.

En la figura 5.5 se muestra la respuesta al escalón con el sistema compensado y con retroalimentación unitaria.

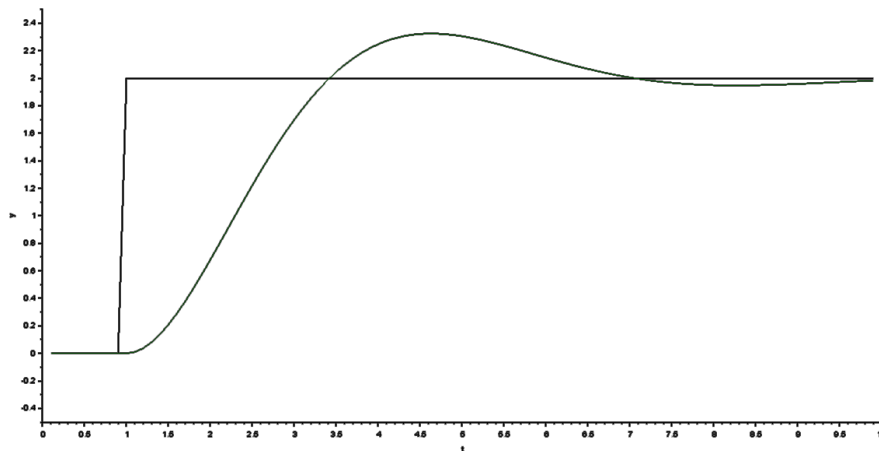


Figura 5.5 Respuesta al sistema compensado.

Cuando a un sistema de control se aplica un comando de entrada, en general, se espera que después de que se desvanecen todos los efectos transitorios, la salida del sistema se asentará al valor del comando. El error entre este valor y el comando de entrada se denomina error en estado estable. El error es una medida de la exactitud de un sistema de control a seguir una entrada de comando y es el error después de que decaen todas las respuestas transitorias a la entrada [50].

Aunque se puede lograr que un error sea cero en la preparación o calibración del sistema, es inevitable que se presenten errores en estado estable debido a que las funciones de transferencia cambian como consecuencia de cambios en el medio ambiente.

5.3 Resultados experimentales IS con control de temperatura

Los sistemas proporcional, integral y derivativo, son sistemas muy empleados para el control de procesos de variables físicas en sensores.

De nuestro esquema del interferómetro de Sagnac ya caracterizado, el cual se muestra en la figura 3.1 y su caracterización en el capítulo 3. Ahora mostraremos lo resultados que

logramos al utilizar el control PID, en nuestro sistema controlando la temperatura del dispositivo Peltier. Estos resultados se obtuvieron variando la temperatura en la fibra de alta birrefringencia en el lazo al aplicarle corriente eléctrica a nuestro dispositivo Peltier.

Existen tres objetivos en el control de temperatura de la celda Peltier presentes en esta Tesis. El más fácil de identificar es el de regulación, es decir, la temperatura debe tender a un valor deseado y mantenerse constante en él, sin tener un error en estado permanente. Otro objetivo es el de seguimiento, que significa que la temperatura real tienda a seguir la trayectoria ideal propuesta para la variable a controlar. El último objetivo de control es el desempeño. Debe procurarse un control sobre amortiguado con un tiempo de levantamiento y asentamiento deseado.

La figura 5.6 muestra como el controlador corrige los cambios al momento de tener que enfriar o de tener que subir la temperatura de nuevo. El experimento consiste en cambiar gradualmente la temperatura ambiente $\approx 23^{\circ}\text{C}$ a 32°C . El tiempo de respuesta en la primera secuencia es de aproximadamente 25 segundos.

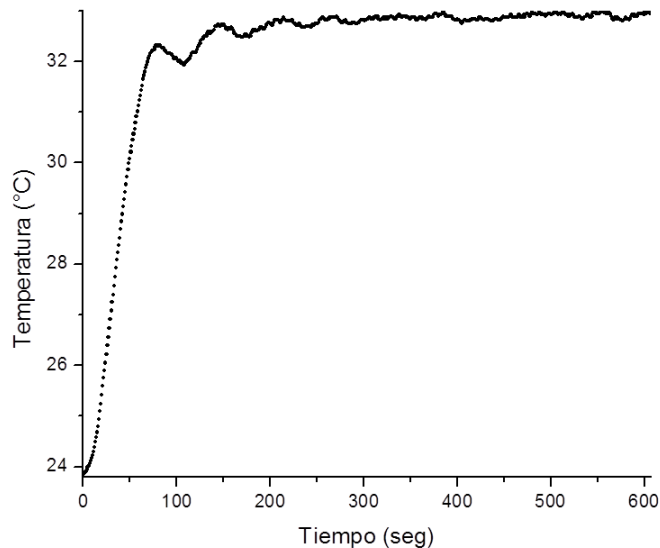


Figura 5. 6 Estabilización del control a 32°C.

En la figura 5.7 mostramos los resultados de estabilidad de la transmisión del interferómetro con una temperatura controlada de 32°C, durante un lapso de tiempo de 40 min.

Un requerimiento importante para un sistema de control es que debe ser estable. Esto significa que si al sistema se le aplica una entrada de magnitud finita, es decir, incrementarse dentro del límite.

Un sistema se puede definir como estable si toda entrada acotada, es decir, finita, produce una salida acotada. De esta manera, para la entrada escalón aplicada al sistema la salida debe ser finita.

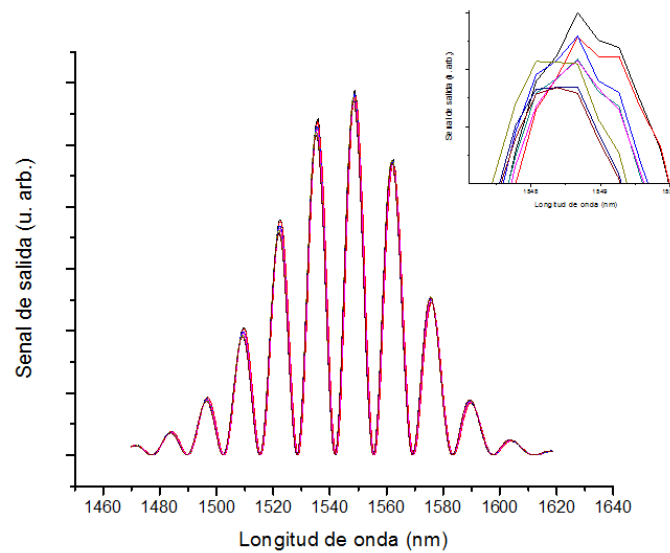


Figura 5. 7 Resultados de las mediciones con temperatura controlada a 32°C.

Una alternativa para el análisis de la estabilidad es considerar la estabilidad en términos de cómo cambia la salida con el tiempo después de una entrada escalón.

En la figura 5.8 se muestran los puntos con la longitud de onda que se encuentra a la mitad del ancho total a la mitad del máximo, para representar de una manera más precisa las variaciones que presentaron las muestras tomadas cada 5 min por un lapso de 40 minutos, con una temperatura controlada a 32°C. El promedio de estas mediciones es 1548.6468 nm, con una desviación estándar de 0.19608.

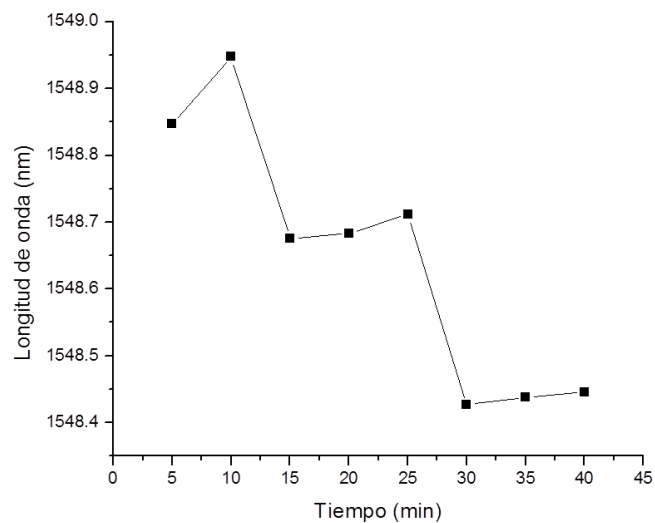


Figura 5. 8 Variaciones de la longitud de onda durante los 40 min. de mediciones.

La figura 5.9 muestra los resultados de una prueba que consistió en llevar al sistema de una temperatura ambiente $\approx 23^{\circ}\text{C}$ y posteriormente cambiarla a 36°C . Se muestra como el controlador corrige los cambios al calentar en un tiempo de 50 segundos para estabilizarse en los 36°C . Los resultados graficados se tomaban cada 0.5 segundos durante 5 minutos, para mostrar el trabajo del controlador PID.

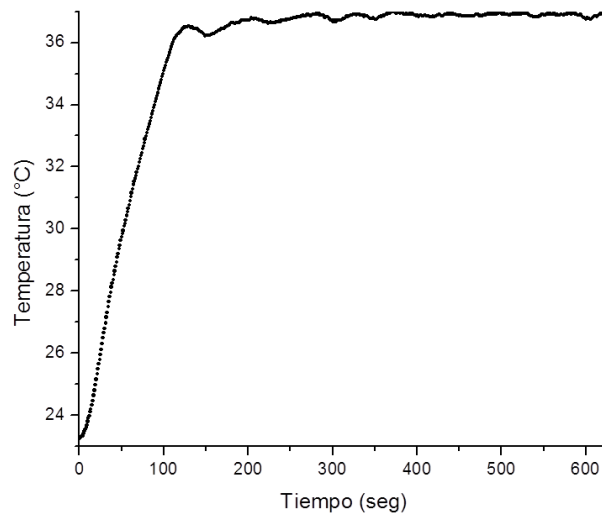


Figura 5. 9 Control de temperatura 36°C.

En la siguiente figura (5.10) se muestra los resultados con una temperatura de 36°C aplicada en la fibra de alta birrefringencia en el lazo del interferómetro por la celda Peltier, la cual está a la vez conectada al controlador PID encargado de estabilizar dicha temperatura, durante un lapso de medición de 40 minutos.

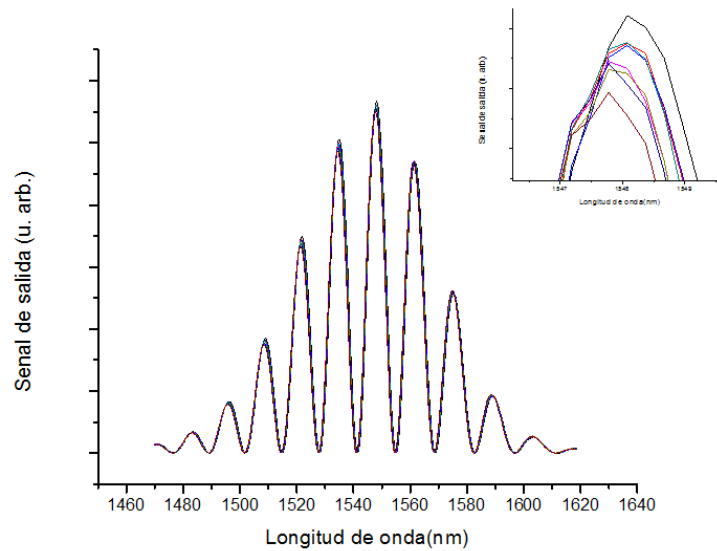


Figura 5. 10 Estabilidad del IS con control de temperatura a 36°C

En la figura 5.11 se muestran los puntos con la longitud de onda que se encuentra a la mitad del ancho total a la mitad del máximo, para representar de una manera más precisa las variaciones que presentaron las muestras tomadas cada 5 min por un lapso de 40 minutos, con una temperatura controlada a 36°C. El promedio de estas mediciones es 1547.96256 nm, con una desviación estándar de 0.15405.

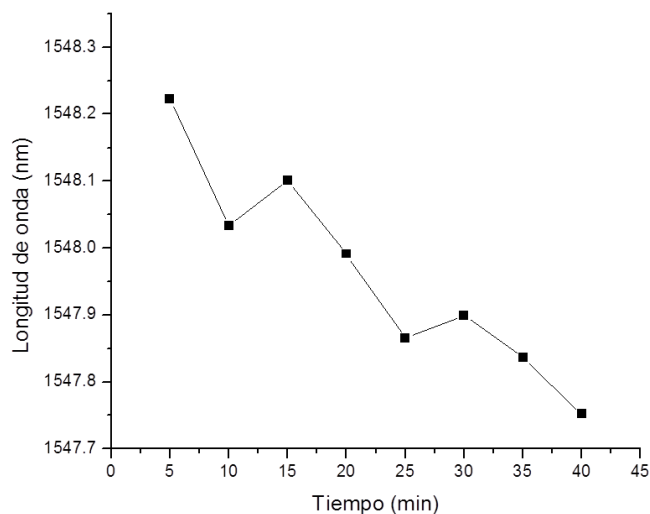


Figura 5. 11 Variaciones de la longitud de onda durante los 40 min. de mediciones con 36°C.

La figura 5.12 muestra el control obtenido del experimento que consistió en llevar la temperatura ambiente de $\approx 23^{\circ}\text{C}$ a 40°C . Se puede apreciar como el sistema corrige los cambios de enfriamiento y sobre calentamiento a partir de los 80 segundos.

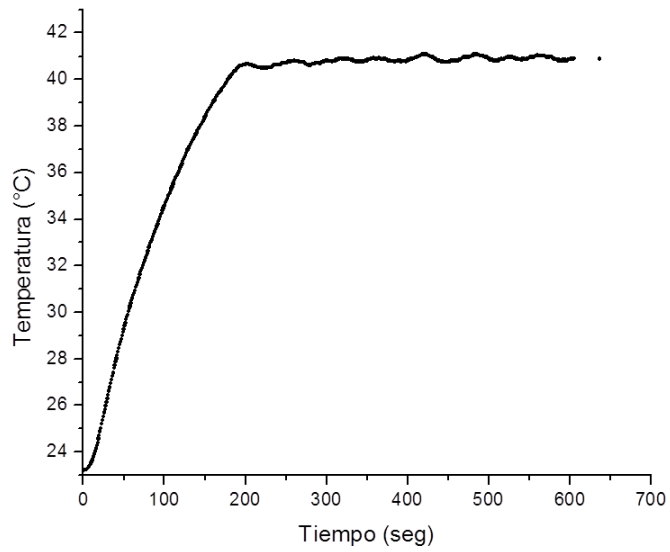


Figura 5. 12 Control de temperatura 40°C.

La figura 5.13 representa la estabilidad del interferómetro construido con fibra de alta birrefringencia en el lazo, a la cual se le aplicó una temperatura de 40°C mediante la celda Peltier y la cual se estabilizó con el controlador PID agregado al sistema. Las mediciones se grabaron durante un lapso de tiempo de 40 minutos, grabando cada medición en intervalos de 5 minutos.

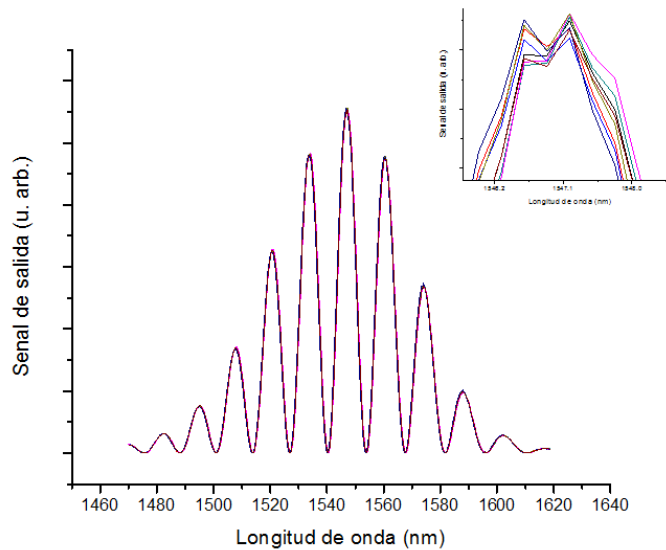


Figura 5. 13 Estabilidad del IS con una temperatura controlada a 40°C.

En la figura 5.14 se muestran los puntos con la longitud de onda que se encuentra a la mitad del ancho total a la mitad del máximo, para representar de una manera más precisa las variaciones que presentaron las muestras tomadas cada 5 min por un lapso de 40 minutos, con una temperatura controlada a 40°C. El promedio de estas mediciones es 1547.06018 nm, con una desviación estándar de 0.09813.

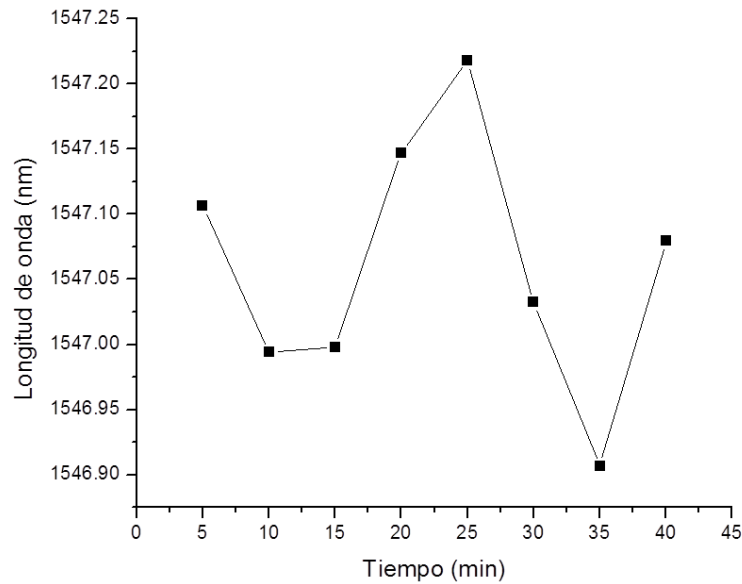


Figura 5. 14 Variaciones de la longitud de onda durante los 40 min. de mediciones con 40°C.

La idea de la aplicación del interferómetro de Sagnac para sensores fue reportada por primera vez en la Ref. [20]. En este experimento se muestra la utilidad del ajuste de los cambios de temperatura controlados y estabilizados.

La alta sensibilidad de este interferómetro a los cambios de temperatura puede aprovecharse y ayudar en la sintonización de la respuesta del dispositivo a una longitud de onda determinada o bien emplear el interferómetro mismo como un sensor de temperatura.

Los sensores de temperatura que emplean fibra óptica han sido de interés en muchas aplicaciones industriales. Esto debido a que tales sensores producen mínimas perturbaciones del entorno de medición, así como por su pasividad e inmunidad a la interferencia electromagnética y a que pueden actuar como canales telemétricos [58].

Particularmente, los interferómetros de fibra birrefringente así como los multicanalizadores por división de longitud de onda, en el cual dos modos de polarización exhiben diferentes respuestas a la temperatura, pueden ser empleados como sensores de temperatura [59]. Fundamentalmente, en este trabajo este sensor basado en un interferómetro de Sagnac despliega la propiedad deseable de ser insensible a la polarización debida, a la configuración del lazo birrefringente. El arreglo en este caso es implementado experimentalmente empleando un acoplador direccional independiente de la polarización y se empleó como fuente de iluminación una fuente de ancho espectro.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo de tesis de maestría se reporta el diseño y construcción de un interferómetro de Sagnac con fibra de alta birrefringencia en el lazo, así como su estudio experimental en el desarrollo del interferómetro para la optimización del diseño propuesto. Se presentó el modelo teórico, así como resultados experimentales del interferómetro de Sagnac con fibra de alta birrefringencia en el lazo. El interferómetro de Sagnac con lazo de alta birrefringencia permitió hacer un ajuste fino en el desplazamiento en longitud de onda del espectro de transmitancia del mismo a través de la variación de la temperatura sobre la fibra de alta birrefringencia del lazo. La alta sensibilidad a variaciones de temperatura que presentan las fibras de alta birrefringencia, permitió la construcción y estudio de un sensor de temperatura construido completamente de fibra óptica, basando su funcionamiento en el efecto Sagnac.

Se realizó una investigación del estado del arte acerca del interferómetro de Sagnac y sus componentes para conocer los trabajos actuales, avances y principales tendencias con respecto a esta línea de investigación y las aplicaciones potenciales que de esta se generen. Se propuso una clasificación de los trabajos reportados con respecto a las diferentes aplicaciones de un interferómetro de Sagnac de acuerdo a los elementos considerados en el diseño de arreglos experimentales.

Se expone también la caracterización del interferómetro por variación de temperatura en la fibra del lazo y por torsión en los empalmes de la fibra de alta birrefringencia con los puertos de salida de un acoplador 50/50.

- Se concluye con la caracterización que el desplazamiento en longitud de onda del espectro de reflectancia del lazo que forma parte del interferómetro se logra a través del cambio de temperatura sobre la fibra del lazo, donde el incremento en temperatura desplaza el espectro hacia longitudes de onda más cortas y el decremento en temperatura hacia longitudes de onda más largas.
- La caracterización del análisis experimental de la variación del espectro de transmitancia por torcimiento en la fibra del lazo constituye una manera simple para

cambiar la razón entre el máximo y el mínimo de reflectancia del espectro periódico, siendo un método útil para el ajuste del contraste del interferómetro.

Para este trabajo de tesis, otro de los objetivos principales era el de unir dos líneas de investigación siendo una la óptica aplicada y el control y automatización de sistemas, por lo que a nuestro sistema experimental del interferómetro de Sagnac con fibra de alta birrefringencia en el lazo, lo complementamos diseñando un código, el cual es presentado en el Anexo 1, implementando un controlador PID, para la celda Peltier la cual es la que varía la temperatura en el lazo del interferómetro.

Para esto se realizó una investigación y revisión de los principios básicos, sobre el equipo básico de un sistema de control, así como los conceptos importantes sobre controladores y sobre los componentes importantes en la realización de este sistema experimental, para su entendimiento y aplicación a lo largo de este trabajo de tesis.

Se demostró el funcionamiento estable del arreglo experimental a través de mediciones y pruebas con variación de parámetros.

Se exponen los resultados obtenidos, los cuales permitieron conocer más a fondo el comportamiento de los sensores sintonizables y los parámetros que lo determinan, de manera que el análisis que se realizó de los resultados experimentales nos permite justificar la utilidad del interferómetro de Sagnac como herramienta en la aplicación de un sensor de temperatura automatizado y controlado.

Anexo 1

```
//Variables del Smoothing
const int numReadings = 20;
int readings[numReadings];
int index = 0;
int total = 0;
float Tprom = 0;

float chalOTEM= A2; //Puerto analogico de lectura del sensor

float TempR; // Temperatura actual leida
int setpoint = 40; // Temperatura deseada "set point"
float error_actual = 0; // variables de ERROR
float error_anterior = 0;
float t_muestreo = 500; //Tiempo de muestreo [ms]

//====Constantes del control PID =====
float kpe = 40; // Constante Proporcional
float kie = 0.00005; //Constante de Sumatoria
float kde = 0.7; //Constante Derivativa del Sistema
float PID = 0; //Señal
//Recordar que las constantes deben ser halladas previamente según el comportamiento del sistema en lazo abierto

//====Variables de cálculo=====
float prop = 0;
float inte = 0;
float deri = 0;
float acum = 0;
float area = 0;
float Ts = 0; //Tiempo de Muestreo

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  pinMode(3, OUTPUT); // salida de la señal PWM
  for (int thisReading = 0; thisReading < numReadings; thisReading++)
    readings[thisReading] = 0; //For para cantidad de datos promedios del smooting
}
void loop()
{
  //Operación del smooting
  total= total - readings[index];
  // lectura del sensor
  readings[index] = analogRead(chalOTEM);
  // suma la lectura al total:
  total= total + readings[index];
  // avance a la siguiente posición en el conteo
  index = index + 1;

  // si estamos al final del conteo...
  if (index >= numReadings)
  // ...vuelva al principio
  index = 0;

  Tprom= ( 5.0 * total * 100.0) / (1023.0 * numReadings); //se pasa de voltaje a temperature y se divide en el numero de lecturas que se quiere promediar
  if (setpoint <= Tprom) //=====CELDA ON
  {
    //Serial.print(" celda ON ");
    //Tiempo de muestreo en segundos:

    Ts = t_muestreo/500;
    // Tomo la lectura del sensor
    TempR = Tprom; // Consigno el valor leído en esta variable
    // Conversión lineal de la señal de entrada a temperatura en grados centígrados :
    error_actual = Tprom - setpoint ; //cálculo de error = Tdeseada -Tactual
    //error -> proporcional
    prop = error_actual*kpe; // Error Proporcional=Kp*error
    //error -> integral
    area = error_actual+error_anterior; // error sumatoria
    area = area*Ts;
    area = area*0.5;
    acum = acum+area;

    inte = acum*kie;
    inte = constrain(inte, -110, 110); //filtro anti-windup, para evitar saturación del actuador
    //error -> derivada
    deri = error_actual-error_anterior;
    deri = deri*kde;
    //PID->>
    PID = prop + inte + deri;
    PID = constrain(PID, 0, 255); //restricción de la acción de control a rangos admisibles de PWM.
    //Almacenamiento del error actual
    error_anterior = error_actual;
    if(error_actual<1)
    {
      PID = PID;
      //condición primaria
    }

    analogWrite(3,PID);
    //imprimo los valores deseados
    Serial.print(Tprom);
    Serial.print(",");
    Serial.println(PID);
    Serial.print(" ERROR (+) = ");
    Serial.println(error_actual);
    Serial.println(" ");
  }
  else //==CELDA APAGADA
  {
    //Serial.print(" celda OFF ");

    PID = PID ;
    analogWrite(3,PID);
    Serial.print(Tprom);
    Serial.print(",");
    //Serial.print(" PID = ");
    Serial.println(PID);
    Serial.print(" ERROR (-) = ");
    Serial.println(error_actual);
    Serial.println(" ");
  }
  delay(t_muestreo);
}
}
```

Bibliografía

1. Yun, S. H., Lee, B. W., Kim, H. K., & Kim, B. Y. (1999). Dynamic erbium-doped fiber amplifier based on active gain flattening with fiber acoustooptic tunable filters. *IEEE photonics technology letters*, 11(10), 1229-1231.
2. Feced, R., Alegria, C., Zervas, M. N., & Laming, R. I. (1999). Acoustooptic attenuation filters based on tapered optical fibers. *IEEE Journal of selected topics in quantum electronics*, 5(5), 1278-1288.
3. Azami, N. (2006). Impact of 1530 nm-ASE filtering on the S-band gain using erbium-doped silica fiber amplifier. *Optics communications*, 263(1), 25-27.
4. Slavík, R., Doucet, S., & LaRochelle, S. (2003). High-performance all-fiber Fabry-Perot filters with superimposed chirped Bragg gratings. *Journal of lightwave technology*, 21(4), 1059.
5. Lawetz, C., & Cartledge, J. C. (1996). Performance of optically preamplified receivers with Fabry-Perot optical filters. *Journal of lightwave technology*, 14(11), 2467-2474.
6. Liaw, S. K., Ho, K. P., & Chi, S. (1999). Dynamic power-equalized EDFA module based on strain tunable fiber Bragg gratings. *IEEE Photonics Technology Letters*, 11(7), 797-799.
7. Wysocki, P. F., Judkins, J. B., Espindola, R. P., Andrejco, M., & Vengsarkar, A. M. (1997). Broad-band erbium-doped fiber amplifier flattened beyond 40 nm using long-period grating filter. *IEEE Photonics Technology Letters*, 9(10), 1343-1345.
8. Fang, X., & Claus, R. O. (1995). Polarization-independent all-fiber wavelength-division multiplexer based on a Sagnac interferometer. *Optics letters*, 20(20), 2146-2148.
9. Ma, X., Kai, G., Wu, Z., Guo, H., Liu, Y., Yuan, S., & Dong, X. (2005). Study of polarization independence for high birefringence fiber Sagnac interferometers. *Microwave and Optical Technology Letters*, 46(2), 183-185.
10. Mirza, M. A., & Stewart, G. (2008). Theory and design of a simple tunable Sagnac loop filter for multiwavelength fiber lasers. *Applied optics*, 47(29), 5242-5252.
11. Liu, L., Zhao, Q., Zhou, G., Zhang, H., Chen, S., Zhao, L., ... & Dong, X. (2004). Study on an optical filter constituted by concatenated Hi-Bi fiber loop mirrors. *Microwave and Optical Technology Letters*, 43(1), 23-26.

12. Lim, K. S., Pua, C. H., Awang, N. A., Harun, S. W., & Ahmad, H. (2009). Fiber loop mirror filter with two-stage high birefringence fibers. *Progress In Electromagnetics Research*, 9, 101-108.
13. Vali, V., & Shorthill, R. W. (1976, July). Fiber laser gyroscopes. In *Fibers and integrated optics* (Vol. 77, pp. 110-116). International Society for Optics and Photonics.
14. Dong, X., Tam, H. Y., & Shum, P. (2007). Temperature-insensitive strain sensor with polarization-maintaining photonic crystal fiber based Sagnac interferometer. *Applied physics letters*, 90(15), 151113.
15. Udd, E. (1992, January). Sagnac distributed sensor concepts. In *Distributed and Multiplexed Fiber Optic Sensors* (Vol. 1586, pp. 46-53). International Society for Optics and Photonics.
16. Álvarez-Tamayo, R. I., Durán-Sánchez, M., Pottiez, O., Kuzin, E. A., Ibarra-Escamilla, B., & Flores-Rosas, A. (2011). Theoretical and experimental analysis of tunable Sagnac high-birefringence loop filter for dual-wavelength laser application. *Applied optics*, 50(3), 253-260.
17. Mortimore, D. B. (1988). Fiber loop reflectors. *Journal of lightwave technology*, 6(7), 1217-1224.
18. Nayar, B. K., Blow, K. J., & Doran, N. J. (1991). All-optical switching in nonlinear fibre loop mirror devices. *Optical Computing & Processing*, 1(1), 81-89.
19. Fang, X., & Claus, R. O. (1995). Polarization-independent all-fiber wavelength-division multiplexer based on a Sagnac interferometer. *Optics letters*, 20(20), 2146-2148.
20. Ezekiel, S., & Arditty, H. J. (1982). Fiber-optic rotation sensors and related technologies. *Berlin, Springer-Verlag(Springer Series in Optical Sciences., 32.*
21. Ulrich, R., & Johnson, M. (1979). Fiber-ring interferometer: polarization analysis. *Optics letters*, 4(5), 152-154.
22. Bergh, R. A., Kotler, G., & Shaw, H. J. (1980). Single-mode fibre optic directional coupler. *Electronics Letters*, 16(7), 260-261.
23. Lefevre, H. C. (1980). Single-mode fibre fractional wave devices and polarisation controllers. *Electronics Letters*, 16(20), 778-780.
24. Bergh, R. A., Lefevre, H. C., & Shaw, H. J. (1981). All-single-mode fiber-optic gyroscope. *Optics letters*, 6(4), 198-200.

25. Mortimore, D. B. (1988). Fiber loop reflectors. *Journal of lightwave technology*, 6(7), 1217-1224.
26. Udd, E. (1994, November). Sensing and instrumentation applications of the Sagnac fiber optic interferometer. In *Interferometry'94: Interferometric Fiber Sensing* (Vol. 2341, pp. 52-60). International Society for Optics and Photonics.
27. De Carvalho, R. T., & Blake, J. (1995). The Sagnac interferometer as a two-parameter sensor. *Journal of lightwave technology*, 13(7), 1250-1255.
28. Kuzin, E. A., Sánchez-Mondragón, J., Basurto-Pensado, M. A., Ibarra-Escamilla, B., Ramirez-Renero, M., & Cerecedo-Nuñez, H. (1997). Fiber optic polarimetric type sensors based on the loop interferometer. *Optik*, 106(4), 172-174.
29. Kuzin, E. A., Nunez, H. C., & Korneev, N. (1999). Alignment of a birefringent fiber Sagnac interferometer by fiber twist. *Optics communications*, 160(1-3), 37-41.
30. Cheo, P. K., Liu, A., & King, G. G. (2001). A high-brightness laser beam from a phase-locked multicore Yb-doped fiber laser array. *IEEE Photonics Technology Letters*, 13(5), 439-441.
31. Jiménez Herrera, J. P. *Interrogación de sensores ópticos basados en redes de Bragg usando las propiedades foto-elásticas de fibra Hi-Bi* (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia).
32. J. M. Cabrera, F. A. Lopez y F. J. López "Óptica electromagnética Vol. II: Materiales y aplicaciones." (Madrid. Addison – Wesley/Universidad Autónoma de Madrid, 2000).
33. Liu, C. H., Galvanauskas, A., Khitrov, V., Samson, B., Manyam, U., Tankala, K., ... & Heinemann, S. (2006). High-power single-polarization and single-transverse-mode fiber laser with an all-fiber cavity and fiber-grating stabilized spectrum. *Optics letters*, 31(1), 17-19.
34. Yen, Y., & Ulrich, R. (1981). Birefringence measurement of fiber-optic devices. *Applied optics*, 20(15), 2721-2725.
35. Varnham, M., Payne, D., Barlow, A., & Birch, R. A. B. R. (1983). Analytic solution for the birefringence produced by thermal stress in polarization-maintaining optical fibers. *Journal of lightwave technology*, 1(2), 332-339.
36. Burns, W. K., Liao, P. F., & Kelley, P. (Eds.). (2012). *Optical fiber rotation sensing*. Academic Press.

37. Kuzin, E., Renero, M. R., Escamilla, B. I., SanchezMondragon, J. S., & Nunez, H. C. (1997). Sagnac's interferometer with loop twisted birefringent fiber. *REVISTA MEXICANA DE FISICA*, 43(3), 374-380.
38. Starodumov, A. N., Zenteno, L. A., Monzon, D., Boyain, A. R. (1997). All-fiber polarization-independent narrow band wavelength-division multiplexer. *Optics communications*, 138 (1-3), 31-34.
39. Zhao, C. L., Yang, X., Lu, C., Jin, W., Demokan, M. S. (2004). Temperature-insensitive interferometer using a highly birefringent photonic crystal fiber loop mirror. *IEEE Photonics Technology Letters*, 16(11), 2535-2537.
40. Tsao, C. (1992). *Optical Fiber Waveguide Analysis*. Oxford University Press.
41. Lefevre, H. C. (1990, December). White light interferometry in optical fiber sensors. In *Proceedings of the Seventh Optical Fiber Sensors Conference* (pp. 345-351).
42. Kersey, A. D., Davis, M. A., Patrick, H. J., LeBlanc, M., Koo, K. P., Askins, C. G., ... & Friebele, E. J. (1997). Fiber grating sensors. *Journal of lightwave technology*, 15(8), 1442-1463.
43. Bergh, R., Lefevre, H., & Shaw, H. (1984). An overview of fiber-optic gyroscopes. *Journal of Lightwave Technology*, 2(2), 91-107.
44. Alphonse, G. A., Morris, N., Harvey, M. G., Gilbert, D. B., & Connolly, J. C. (1996, June). New high-power single-mode superluminescent diode with low spectral modulation. In *Lasers and Electro-Optics, 1996. CLEO'96., Summaries of papers presented at the Conference on* (pp. 107-108). IEEE.
45. Hall, D. C., Burns, W. K., & Moeller, R. P. (1995). High-stability Er/sup 3+/-doped superfluorescent fiber sources. *Journal of lightwave technology*, 13(7), 1452-1460.
46. Martín López, S., González Herráez, M., Corredera, P., Carrasco Sanz, A., Hernanz, M. L., & Abrardi, L. (2006). Fuente supercontinua en fibra óptica (basada en bombeo continuo).
47. McIntyre, P., Snyder, A. W. (1978). Light propagation in twisted anisotropic media: Application to photoreceptors. *JOSA*, 68 (2), 149-157.
48. R. I. Álvarez-Tamayo (2012). Láser de fibra óptica con longitud de onda dual sintonizable basado en rejillas de Bragg de fibra óptica y un interferómetro de Sagnac. (Tesis doctoral). Benemérita Universidad Autónoma de Puebla Facultad de Ciencias Fisico-Matematicas,PUEBLA, PUE.

49. Ogata, K. (2003). *Ingeniería de control moderna*. Pearson Educación.
50. Bolton, W., & Ramírez, F. J. R. (2001). *Ingeniería de control*. Marcombo.
51. Kuo, B. C. (1996). *Sistemas de control automático*. Pearson Educación.
52. Patterson, G., Sobral, M. (2007). Efecto Peltier. *Departamento de Física FCEyN, Universidad de Buenos Aires. Dic.*
53. Prácticas de Regulación Automática. *Control de una célula de Peltier*. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Madrid.
54. Barrera Navarro, A. Controlador de Temperatura PID, Neuronal y Fuzzy para condensar agua en una celda Peltier.
55. Ramirez Leyva F.H. (2012). "Sensores y Transductores". Recuperado de <http://www.utm.mx>.
56. Mata, A. J. M., Martínez, R. S., Camilo, J. A. S., Malvez, J. A., & Sánchez, R. O. (2012). Desarrollo de un equipo didáctico de bajo costo para el control de temperatura. *RMDI*, 1.
57. Platero, C., & Ferre, M. (2003). Prácticas de Regulación Automática. *Servicio de Publicaciones EUITI-Universidad Politécnica de Madrid*.
58. Kamshilin, A. A., Jaaskelainen, T., Khomenko, A. V., & Garcia-Weidner, A. (1995). Multimode fiber-optic sensor using photorefractive double phase conjugator. *Applied physics letters*, 67(18), 2585-2587.
59. Eickhoff, W. (1981). Temperature sensing by mode-mode interference in birefringent optical fibers. *Optics letters*, 6(4), 204-206.