



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE
MEXICO
PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN
INGENIERIA**

FACULTAD DE INGENIERIA

**SENSOR OPTICO DE MOVIMIENTOS
ANGULARES**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERIA

MAESTRIA EN INGENIERIA ELECTRICA - INSTRUMENTACION

PRESENTA:

ING. SALVADOR PALMA VARGAS

TUTOR:

DR. GABRIEL EDUARDO SANDOVAL ROMERO

2008





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. AUGUSTO GARCIA VALENZUELA

Secretario: DR. RAMON GUTIERREZ CASTREJON

Vocal: DR. GABRIEL EDUARDO SANDOVAL ROMERO

1er. Suplente: DRA. CELIA ANGELINA SANCHEZ PEREZ

2do. Suplente: DRA. GRACIELA VELASCO HERRERA

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

CENTRO DE CIENCIAS APLICADAS Y DESARROLLO TECNOLOGICO

TUTOR DE TESIS:

DR. GABRIEL EDUARDO SANDOVAL ROMERO

FIRMA

(Segunda hoja)

La ciencia nunca ha visto un fantasma, ni trata de verlo, pero en todas partes ve las huellas de una inteligencia superior universal.

Henry David Thoreau

La ciencia puede divertirnos y fascinarnos, pero es la ingeniería la que cambia al mundo

Isaac Asimov

La presión hace diamantes, entonces porque le huimos a los problemas?

George S Patton

La única posibilidad de descubrir los límites de lo posible, es aventurarse un poco en el terreno de lo imposible.

Arthur Clarke

Las ciencias aplicadas no existen, solo las aplicaciones de la ciencia.

Louis Pasteur

Las personas más insostenibles son los hombres que se creen geniales y las mujeres que se creen irresistibles.

Anónimo

Lo que un genio tiene es que se parece a todo mundo, pero nadie se le parece.

Entrevista de Guillermo Ochoa a Salvador Palma

Ni una inteligencia sublime, ni una gran imaginación, ni las dos cosas juntas forman un genio; es su ingenio el alma del genio.

Wolfgang Amadeus Mozart

Todavía no se ha levantado la barrera que le diga a un genio: De aquí no pasarás

Ludwig Van Beethoven

Aprender sin pensar es tiempo perdido; pensar sin aprender es peligroso

Confucio

Entre menos piensa el hombre, más habla y lo peor es cuando quiere aconsejar.

Charles Louis de Secondat

El que lee mucho y viaja mucho, sabe mucho y ve mucho.

Miguel de Cervantes Saavedra

El inteligente no dice todo lo que sabe y sabe lo que dice, el tonto dice todo lo que sabe y no sabe lo que dice.

Aristóteles

Hay dos tipos de hombres: los que viven hablando de virtudes y los que se limitan a tenerlas.

Antonio Machado

La constancia es la virtud por la que todas las demás virtudes dan su fruto

Arturo Graf

Lo que puedas hacer o sueñas poder hacer, hazlo. La audacia contiene genio, poder y magia.

Goethe

Se puede predicar un mejor consejo con tu vida que con tus labios.

Oliver Goldsmith

Si te atreves a fracasar miserablemente, puedes triunfar gloriosamente.

Robert F. Kennedy

Los obstáculos parecerán grandes o pequeños, según te consideres, grande o pequeño.

Orison Swett Marden

Nunca, nunca, nunca, nunca, te rindas.

William Congreve

Tu actitud más que tu aptitud es lo que determina tu altitud.

Zig Ziglar

Agradecimientos institucionales:

Agradecemos el apoyo otorgado para la realización de esta tesis a CONACYT a través del proyecto J50494 “Limite de detección en un dispositivo sensor de movimiento basado en un interferómetro de Sagnac de fibra óptica”

Agradecemos el apoyo otorgado para la realización de esta tesis a la dirección general de asuntos del personal académico PAPIT, a través del proyecto IN 115906-3 “Sensado de gases utilizando un dispositivo híbrido de fibra óptica y películas delgadas semiconductoras”

Alumno de la UNAM, uno de los mejores del mundo

Salvador Palma Vargas, de Ingeniería, fue seleccionado por el gobierno de EU al 2007 International Achievement Summit

y un gran logro tanto para mí como para la Universidad", recaló.

Salvador Palma tiene 30 años de edad y después de titularse de la maestría, desea ingresar al doctorado en la UNAM, para lo cual presentó un proyecto que ya le fue aceptado.

Enriquecedora experiencia

Indicó que el viaje se realizó del 16 al 23 de junio, donde los cien seleccionados que asistieron pu-

Salvador Palma Vargas, alumno de maestría de la Facultad de Ingeniería de esta casa de estudios, fue seleccionado por el gobierno de Estados Unidos para acudir al 2007 International Achievement Summit, realizado en Washington, DC, al ser considerado uno de los mejores estudiantes del mundo.

ISABEL PÉREZ

Indicó que acudió a ese país en representación de la UNAM y de México, donde tuvo la oportunidad de convivir con los cien personajes más importantes del orbe, como Laura Bush, Bill y Hillary Clinton, Bono, del grupo U2, destacados científicos ganadores del Premio Nobel y gobernadores estatales estadounidenses, entre muchos otros.

Con un promedio de 10 y en reconocimiento a su buen desempeño académico, Salvador Palma precisó que ahora es miembro del Academy of Achievement of USA Government por haber sido invitado a ese importante encuentro.

El sobresaliente alumno, quien actualmente elabora su tesis de maestría, explicó que las fundaciones UNAM, Televisa y Telmex –esta última fungió como su patrocinadora– fueron las encargadas de comunicarle que, después de un riguroso análisis, había sido elegido para viajar a Washington por invitación del gobierno de la Unión Americana.

Informó además que, por parte de México, acudieron también dos estudiantes, uno de Querétaro y otro del Distrito Federal.



El destacado universitario, en la reunión en Washington. Foto: cortesía Salvador Palma.

El encuentro es organizado por el gobierno estadounidense cada cinco años y convoca a alumnos de alto rendimiento egresados de licenciatura, que estudian una especialidad o realizan trabajos de investigación.

"Me siento afortunado de pertenecer a la UNAM y de haber acudido a este evento representándola, lo que significó una gran experiencia

dieron visitar el Capitolio, la Secretaría del Tesoro, el Senado y otras instituciones importantes de Washington, DC.

Uno de los objetivos del viaje y de reunir a los mejores estudiantes del mundo con cien grandes personajes, es intercambiar ideas y conceptos desde diversas perspectivas y escenarios, concluyó. *g*



RECONOCIMIENTO Salvador Palma Vargas es miembro de la Academy of Achievement of USA Government, por su excelente promedio en la maestría que cursa en la Facultad de Ingeniería de la UNAM

Alumno de UNAM entre los mejores 100 del mundo

Rechaza estudiar en el extranjero; cree que México también puede ser bueno

Nurit Martínez

A sus 30 años, Salvador Palma Vargas se convirtió en el primer estudiante mexicano en integrarse al selecto grupo de los mejores 100 estudiantes del mundo. Ahora también es miembro de la Academy of Achievement of USA Government, por su promedio de 10 como alumno de maestría en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Por ese motivo, fue invitado al encuentro de los cien mejores estudiantes del mundo con los cien personajes más destacados de los Estados Unidos: "Hacia donde volteara sólo había gente destacada: premios nobel, científicos, funcionarios, políticos y artistas. ¡Eran tantos! que no sabía exactamente quién estaba frente a mí".

Sin embargo, en ese primer encuentro en Washington D.C., el joven mexicano sí logró ubicar a su in-

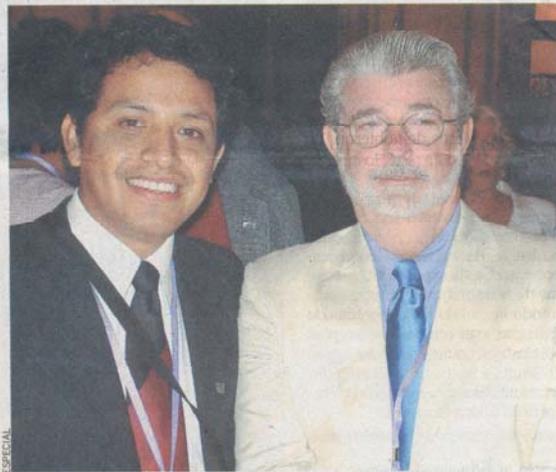
terlocutor objetivo: George Lucas, director de cine.

"Desde que lo vi pensé: primero él, pero ya cuando me acerque a él me dijo que no quería saber nada sobre Star Wars (la serie de películas)", recuerda Palma en entrevista con EL UNIVERSAL.

Luego, se vio rodeado de personalidades como la esposa del presidente George Bush, Laura Bush; del matrimonio Clinton, Bill y Hillary; del otro lado estaba Bono, del grupo U2, y destacados científicos ganadores de Premio Nobel y gobernadores de EU, entre muchos otros.

Durante dos semanas los jóvenes invitados pudieron visitar el Capitolio, la Secretaría del Tesoro, el Senado y otras instituciones importantes de Washington, DC.

En ese período Salvador, quien además se confiesa pianista y fanático del equipo de fútbol de los Pumas, dice que pudo constatar el conocimiento que se tiene de la



ENCUENTRO Salvador Palma Vargas se reunió con las 100 personas más importantes de EU, entre ellos, el cineasta George Lucas

UNAM y de la educación superior de México en el mundo.

"Sin embargo creo que no es en todos los niveles. Se tiene que reestructurar la educación para que un mayor número de personas alcancen un nivel competitivo. El sistema debe estar orientado a enseñar a cómo estudiar y no perder el entusiasmo, buscar trascender."

En su corta carrera, es un múltiple participante en los Europosgrados y en esos contactos internacionales le han ofrecido becas para estudiar en Irlanda y Holanda.

"Sólo que yo digo que México es mi casa y creo que aquí podemos llegar a ser buenos estudiantes y buenos científicos. He peleado para ser buen alumno y ahora lo haré para ser buen investigador. No acepto que aquí no se pueda", indicó.

Entre sus aspiraciones no está ser Nobel.

"En unos años me veo como científico especializado en sensores ópticos y de movimiento angular. Trabajando en la UNAM e infundiendo ánimo a quienes están a mi alrededor", expresó.

Es de los mejores del mundo

Estudiante de la UNAM reconocido en EU

ALUMNO de maestría de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, Salvador Palma Vargas fue considerado por el Gobierno de Estados Unidos como uno de los mejores estudiantes del mundo e invitado a ese país para convivir con algunas de las personalidades más importantes del orbe.

En el encuentro de la *International Achievement Summit 2007* estubo con Laura Bush, Hillary Clinton, Bono y algunos científicos ganadores del Premio Nobel, además de gobernadores estadounidenses.

"Al principio me sentía un poco abrumado por convivir con estudiantes de las mejores universidades del mundo, pero después te das cuenta de que en la Universidad y en el país tenemos un buen nivel en cuanto a la investigación", comenta en entre-

Fue invitado a Washington



CORTESÍA UNAM

"Me encontraba desayunando y me llamaron por teléfono para decirme que estaba nominado y no lo creía; después me hablaron de la Fundación Telmex para decirme que ellos pagaban el viaje".

Salvador Palma

bierno invierta más en educación, ciencia y tecnología. "Sin educación no podemos salir adelante".

¿Y qué le dirías al rector?

—Le comentaría que su trabajo en apoyo a la investigación es muy bueno, pero que se necesita más para todos los investigadores o alumnos que entramos sin ninguna beca.

vista con *Publimetro*.

¿Qué se siente ser considerado uno de los mejores estudiantes del mundo?

—Para mí es un gran orgullo, no esperaba que fuera considerado así.

He trabajado mucho estudiando mi licenciatura y mi maestría, haciendo un poco de investigación y otras acti-

vidades para poder trascender, pero no me lo esperaba.

Salvador tiene 30 años, y como a la mayoría de los jóvenes de su edad, le gusta el cine, salir a algunas fiestas y es aficionado al fútbol. "Por supuesto que le voy a los Pumas", dice.

El universitario lleva a cabo proyectos de investiga-

ción relacionados con sensores para la navegación en el Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico de la UNAM.

Como uno de los estudiantes más sobresalientes del mundo e integrante de la *Academy of Achievement of USA Government*, comenta que es necesario que el Go-

ALBERTO GONZÁLEZ
alberto.gonzalez@publimetro.com.mx



■ Asegura que nunca ha sido un “ratón de biblioteca”; siempre estudió en centros públicos

Me siento orgulloso de ser de la UNAM, dice uno de los mejores alumnos del orbe

■ Laura Poy Solano

Uno de los mejores estudiantes del mundo es mexicano. Ha cursado toda su enseñanza en escuelas públicas. Desde su formación básica, en la delegación Iztapalapa, hasta una maestría en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), su trayectoria académica ha sido de éxito, aunque, insiste, “nunca fui el alumno del 10 perfecto ni tampoco me siento un ratón de biblioteca”.

Con apenas 30 años, y varios artículos publicados en revistas de prestigio internacional, Salvador Palma Vargas, alumno de maestría de la Facultad de Ingeniería de la UNAM y especialista en el campo de los sensores ópticos, fue seleccionado en junio pasado por el gobierno de Estados Unidos para acudir al 2007 International Achievement Summit en representación de México y de la máxima casa de estudios. El encuentro se realiza cada cinco años y que reúne a los 100 alumnos más destacados del mundo.

En entrevista con *La Jornada*, aseguró que aún con “altibajos familiares y económicos, que a veces pueden influir un poco en el desempeño”, desde que cursó la primaria en la escuela pública José Ortega y Gasset, de la delegación Iztapalapa, “siempre tuve interés por seguir estudiando”.

Hijo de una ama de casa y de un trabajador del sector de telecomunicaciones, Salvador, quien también acudió a una secundaria en esa demarcación, considerada una de las de mayor inseguridad y marginación del Distrito Federal, afirmó que aún con el divorcio de sus padres, que “siempre te afecta, seguí adelante, porque no puedes perder de vista tu objetivo; además siempre me apoyaron, así que continué mis estudios en el Colegio de Ciencias y Humanidades Oriente”.

Su primera vocación, confiesa, fue en el aspecto artístico. Por eso se inscribió en la Escuela Libre de Música tras concluir su bachillerato; ahí aprendió a tocar el piano. Sin embargo, recuerda, “mi herma-

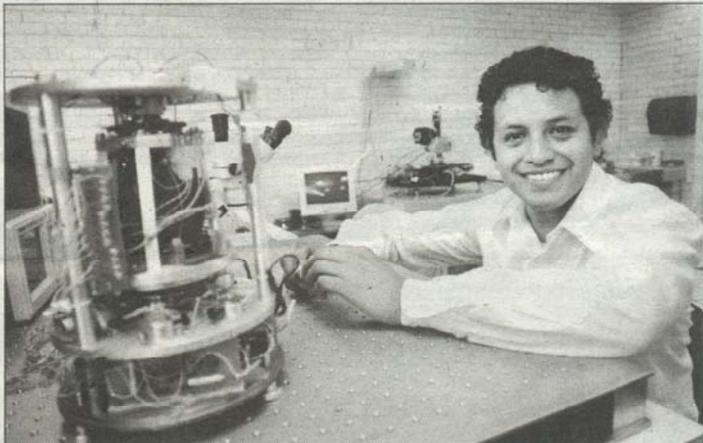
no, un año menor que yo, estaba estudiando ingeniería en la UNAM, y me gustaba mucho lo que hacía, las matemáticas, la ingeniería, y pensé ‘yo quiero estudiar ingeniería también. La música me gusta mucho’, y es una carrera que nunca voy a olvidar, pero de algo tenía que vivir, y aunque era bueno como músico, no tanto como para vivir de eso”.

Agrega que en una ocasión acudió a Ciudad Universitaria (CU) para acompañar a un primo que se iba a inscribir, “nos perdimos, y no sé cómo llegamos hasta la rectoría. Era época de clases y vi que los muchachos estaban jugando en las islas, otros leían, había otros que tomaban clases con su profesor, y dije, ‘yo tengo que estar aquí, no sé cómo, pero lo voy a hacer’. Fue un propósito que me marqué, y aunque ya había terminado el CCH, rechacé el pase reglamentario para poder elegir la Facultad de Ingeniería en CU, le estudié mucho, y pasé, así que el sueño se hizo realidad”.

Tras concluir sus estudios de maestría con promedio de 10, y luego de integrarse al equipo de investigadores del labora-

torio de sensores ópticos del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico de la UNAM, Salvador, el mayor de cinco hermanos, asegura que “nunca dejaré de ser un chavo normal, y aunque me siento muy orgulloso de ser estudiante de la UNAM y haberla representado, creo que lo más importante es regresar una parte de lo que me ha dado y fortalecer su prestigio, porque una de las cosas más gratas del encuentro en Estados Unidos es que me preguntaban de dónde era, y luego de decirles que de México, todos me preguntaban si estudiaba en la UNAM, porque es una de las mejores universidades del mundo”.

Asegura que en su trayectoria académica todos sus profesores han sido importantes. No obstante, rechaza que se concedan las plazas y el salario a quienes “no les interesa la clase ni mucho menos sus alumnos, por eso, cuando me aburría un maestro me volaba la clase, porque a veces también se debe ser un poco rebelde y decir, en esto no estoy de acuerdo, pero también tenemos que asumir la responsabilidad, porque eso sí, me podía



Salvador Palma Vargas durante la entrevista con *La Jornada* ■ Carlos Ramos Mamahua

sa
pa
fir
el
en
fo
pr
y
ve
en

INTRODUCCIÓN

CONCEPTOS BÁSICOS DE FIBRA ÓPTICA, LÁSER Y FOTODETECTORES

Fundamentos de fibra óptica

Tipos de fibras ópticas (monomodales, multimodales y de índice escalonado)

Propiedades de las fibras ópticas como sensores

Fundamentos del funcionamiento del láser y diodos láser

Fundamentos teóricos del funcionamiento de los fotodetectores

Bibliografía

SENSORES ÓPTICOS Y FIBRA ÓPTICA

Sensores

Sensores ópticos

Sensores de fibra óptica

Sensores de fibra óptica modulados

Sensores de fibra óptica puntuales

Bibliografía

EL INTERFERÓMETRO DE SAGNAC COMO SENSOR DE MOVIMIENTO ANGULAR

El interferómetro de Sagnac, principios físicos

Modificaciones al interferómetro de Sagnac en óptica de volumen

Modificaciones al interferómetro de Sagnac en fibra óptica

Instrumentación desarrollada para el interferómetro de Sagnac

Bibliografía

APLICACIONES DEL INTERFERÓMETRO DE SAGNAC EN SENSORES, RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Sensores basados en el interferómetro de Sagnac

Resultados obtenidos con el interferómetro de Sagnac en óptica de volumen y fibra óptica

Conclusiones

Bibliografía

Bibliografía complementaria consultada

PUBLICACIONES DESPRENDIDAS DE ESTE TRABAJO

Angular movement optical sensor

Sensor de movimientos angulares

Detection limit of sagnac's interferometer

Single Sagnac's Interferometers Instrumentation, based in the Best Detection Limit.

INTRODUCCION

Una de las necesidades principales que ha tenido el ser humano desde tiempos remotos, ha sido la de poder cuantificar o medir, ésta necesidad ha ido evolucionando pasando de simples cuantificaciones de objetos a cuantificar fenómenos en el entorno, como es la temperatura. Para poder realizar éste tipo de mediciones primeramente se realizaron mediciones directas y muy sencillas como son distancias o conteos de cantidades cuantificables. Sin embargo la necesidad de conocer mas nuestro entorno, llevo al ser humano a generar sistemas de medición más complicados. Para alcanzar éste propósito fue necesario comenzar a conocer la naturaleza de los fenómenos existentes por lo que el desarrollo de las ciencias ha sido el pilar principal en el desarrollo de los sistemas de medición. La comprensión de los fenómenos existentes en la naturaleza y la aplicación de técnicas dirigidas a la cuantificación de estos fenómenos generaron un área en la tecnología, la de los sistemas de medición y sensado.

La gran cantidad de sensores y sistemas de medición que se han desarrollado a lo largo de la historia es muy basta, sin embargo, muchos de éstos no prosperan en sus desarrollos o aplicaciones debido a su poca eficiencia o sensibilidad, no obstante hay algunos otros que han permanecido o se han mejorado notablemente debido al desarrollo de la tecnología, por ejemplo es el caso de algunos termómetros. Por ejemplo un termómetro termopar es simplemente un par de metales unidos a través de los cuales circula una pequeña corriente, pero al existir un cambio en la temperatura en el punto de unión de los dos metales, se genera una deflexión mecánica y por lo tanto el área de contacto entre los metales se modifica, lo que produce un cambio en la resistencia eléctrica del circuito, esto se traduce en un cambio en la corriente eléctrica que circula por los dos metales y que puede cuantificarse. Con los sistemas electrónicos modernos, como amplificadores, filtros, etc. Este sistema de medición permanece con el mismo principio pero ahora es posible realizar sensados con mayor resolución.

La gran cantidad de métodos para realizar mediciones y sensados es muy grande, existen métodos mecánicos, eléctricos, químicos, atómicos, entre otros, cada uno de ellos con clasificaciones propias de acuerdo al fenómeno empleado en el sensado o medición. Muchos de estos métodos están enfocados a realizar mediciones de un mismo parámetro a través de diferente método, por lo que algún método puede ser mejor que otro para realizar el sensado. A últimas fechas con el desarrollo tecnológico en los sistemas optoelectrónicos y a las características propias de la luz, los sistemas de sensado óptico han tenido un gran auge. Debido a la resolución, sensibilidad y exactitud proporcionada por estos sistemas de sensado, ha sido posible cambiar de métodos y/o tecnologías aplicadas a la medición o sensado. Muchos de estos sistemas han reemplazado a los sistemas de sensado o medición existentes por sistemas de sensado óptico.

Pero aun cuando los sistemas de sensado óptico ofrecen una gran ventaja sobre algunos otros tipos de sensores, también tiene algunas limitantes como son la dispersión de la luz en el aire o la absorción de la misma en presencia de algún material. Una solución que apareció a mediados de los años 70 fue la fibra óptica. La fibra óptica nos ofrece la posibilidad de transmitir la luz a través de cables de fibra de vidrio, evitando tener perdidas por absorción en el medio de transmisión como en el aire; aunque las fibras ópticas presentan una perdida, esta es muy pequeña comparada con la existente en un medio como el aire. Debido a ésta característica de la

fibra óptica y algunas otras características muy importantes, los investigadores y tecnólogos de sensores comenzaron a desarrollar trabajos en ésta área, de aquí el surgimiento de un área todavía nueva en sensores, conocidos como sensores de fibra óptica. Este tipo de sensores ofrecen una ventaja especial en su rama, ya que presentan características superiores a los sensores existentes basados en métodos diferentes a los ópticos, por ejemplo inmunidad electromagnética, alta sensibilidad, posibilidad de sensado remoto, bajo costo, etc.

Existen muchos sistemas de sensado basados en fibra óptica para diversas aplicaciones, uno de los sistemas más avanzados es el giroscopio en fibra óptica, el cual está basado en el interferómetro de Sagnac. Este dispositivo alcanza sensibilidades hasta de cientos de veces mejor que los giroscopios mecánicos o eléctricos, con un tamaño pequeño y muy alta exactitud. Debido a las características que proporcionan el efecto Sagnac en el cual se basa su funcionamiento, sumado a las características propias de la fibra óptica, éste instrumento es aplicado como sistema de sensado en todo tipo de sistemas de navegación, incluso espacial.

El punto clave del giroscopio en fibra óptica es su funcionamiento, el cual está sustentado en el interferómetro de Sagnac. Este dispositivo emplea a la fibra óptica como un medio de propagación de la luz para generar la interferencia óptica. La sensibilidad de éste instrumento es tan alta que muchos investigadores han comenzado a basar sus diseños en éste dispositivo, ya que no solo es posible hacer mediciones de movimiento angular, sino que es posible emplearlo como parte de sensores de parámetros diferentes a los movimientos angulares. Empleando al interferómetro de Sagnac en su configuración básica en óptica de volumen y en fibra óptica, es posible hacer sensado de otros parámetros físicos como lo han demostrado muchas investigaciones, al haber desarrollado sistemas de sensado de campos eléctricos y magnéticos, temperatura, vibraciones acústicas, mecánicas, etc. basados en este interferómetro. Estos diseños al emplear dicho interferómetro, como parte de su sistema de sensado, tienen la posibilidad de obtener una alta sensibilidad y un diseño muy sencillo. Sin embargo en los dos esquemas principales de estos interferómetros, encontramos todavía la oportunidad para mejorarlos y poder emplearlos como parte de otros sistemas de sensado.

El propósito principal de ésta tesis se basa en el punto mencionado anteriormente, la necesidad de los diseñadores que emplean al interferómetro de Sagnac como parte de los sistemas de sensado de parámetros físicos diferentes a los movimientos angulares. El objetivo fundamental de este trabajo de investigación es simplificar el diseño de los interferómetros de Sagnac, el implementado en fibra óptica y el de óptica de volumen; para poder ser empleados, principalmente como sensores de movimientos angulares con una sensibilidad superior a los diseños básicos de cada esquema, reduciendo la complejidad en la implementación-usar menos componentes electrónicas y dispositivos, con la finalidad de una fácil utilización como parte de otros sistemas de sensado y un bajo costo, comparado con los sistemas interferométricos existentes en el mercado como los giroscopios en fibra óptica.

En ésta tesis, la investigación se centra en la simplificación de los dos sistemas interferométricos de Sagnac, el de en óptica de volumen y en fibra óptica. Para ello en el primer capítulo se hace un estudio de los conceptos importantes de optoelectrónica, como son las fibras ópticas, el funcionamiento básico del láser y los fotodetectores, siendo estos tres dispositivos parte importante en los sistemas interferométricos. En el segundo capítulo se hace un estudio de los

sensores ópticos y de los sensores de fibra óptica, para comprender el funcionamiento básico de estos, además de ubicar los dos interferómetros dentro de la clasificación y comprender a grandes rasgos las características de éste tipo de sensores. En el capítulo tres se abordan los temas referentes al interferómetro de Sagnac, como sus principios básicos en ambos esquemas, además de un estudio detallado de las mejoras propuestas en sensibilidad y simplicidad del diseño para ambos interferómetros. Finalmente en el capítulo cuatro se hace una descripción detallada de los resultados obtenidos y las conclusiones, entre las que destacan los resultados numéricos y los esquemas generados, mostrando las bases teóricas en las que se sustentó cada propuesta de diseño. En las conclusiones generales se tratan los temas relevantes de la tesis y los logros obtenidos, además de las posibles mejoras a los diseños que se plantean y un posible trabajo a futuro.

CAPITULO 1.- CONCEPTOS BÁSICOS DE FIBRA ÓPTICA, LÁSER Y FOTODETECTORES

En los sistemas de sensado óptico, muchos de estos emplean una señal de referencia óptica a la cual posteriormente le miden, sensan o detectan la variación en algún parámetro como fase, amplitud, ruido y/o cambio en longitud de onda principalmente. Para emplear una señal de referencia es necesario tener una fuente generadora de ésta señal y un sistema de transducción para la detección de la misma. Estos sistemas han ido evolucionando con el tiempo, anteriormente se empleaban fuentes de luz incoherente y transductores opto-químicos o resistivos para medir un cambio debido a la incidencia óptica. Sin embargo estos sistemas no ofrecían buena sensibilidad en la detección de los cambios en la señal óptica de referencia como se deseaba. Ahora se cuentan con fuentes de luz láser las cuales ofrecen una amplia gamma de frecuencias y potencias de acuerdo a la necesidad del sistema de sensado óptico. De la misma forma, los transductores opto-electrónicos han evolucionado ampliamente, los sistemas semiconductores ofrecen una gran ventaja en sensibilidad y confiabilidad respecto a sus predecesores.

Otro elemento muy importante respecto a los sensores que emplean señales de referencia, es el medio de transmisión. En muchos casos el medio es el aire, no obstante para las señales ópticas este medio ofrece una desventaja al existir varios fenómenos que afectan a la señal de referencia como la dispersión, absorción, entre otros. Sin embargo el empleo de las fibras ópticas como medio de propagación de la luz ofrece muchas ventajas sobre otros medios y con características propias de éste medio.

En éste primer capítulo se hace un estudio de las bases teóricas de los dispositivos optoelectrónicos empleados en ésta tesis. Este estudio se realiza de manera muy general, para tener un panorama de las bases teóricas en que se sustentan los elementos empleados para la construcción del interferómetro de Sagnac.

1.- FUNDAMENTOS DE FIBRA ÓPTICA

El concepto de conducir la luz dentro de un dieléctrico estrecho y largo mediante la reflexión total interna se conoce desde hace bastante tiempo. John Tyndall demostró que una fina corriente de agua podía contener y guiar luz. Poco después se recurrió a tubos luminosos de vidrio, y sucesivamente a hilos de cuarzo fundido para demostrar dicho efecto, sin embargo solo a inicios de los años cincuenta se llevaron a cabo estudios serios para transportar luz en el interior de fibra de vidrio cortas.

Después de la invención del láser en 1960, se valoraron enseguida los beneficios potenciales proporcionados por la transmisión de información de un lugar a otro recurriendo a la luz, como con las corrientes eléctricas o incluso las microondas. A frecuencias ópticas tan elevadas del orden de 10^{15} Hz, se puede transportar cien mil veces más información con respecto a las microondas lo cual equivaldría, en teoría, al envío de decenas de millones de programas de televisión simultáneamente en un rayo de luz; no fue necesario esperar mucho tiempo ya que en 1966 se pudo acoplar láseres con las fibras ópticas para comunicar a larga distancia. Así empezó la revolución tecnológica en el área de las comunicaciones hasta llegar a los avances existentes hoy en día.

Debido a su transmisión de bajas pérdidas, su capacidad para transportar una gran cantidad de información, su pequeño tamaño, su poco peso, bajo costo, su inmunidad a la interferencia electromagnética, su inigualable seguridad en la transmisión de las señales así como la abundante disponibilidad de las materias primas necesarias para su creación, las fibras ópticas se han convertido en los medios principales de comunicación. En la figura 1.1, se muestra un esquema de la fibra óptica la cual está formada por un núcleo de vidrio de índice de refracción mayor, rodeado de un revestimiento de un material de índice de refracción menor y protegido por una cubierta plástica.

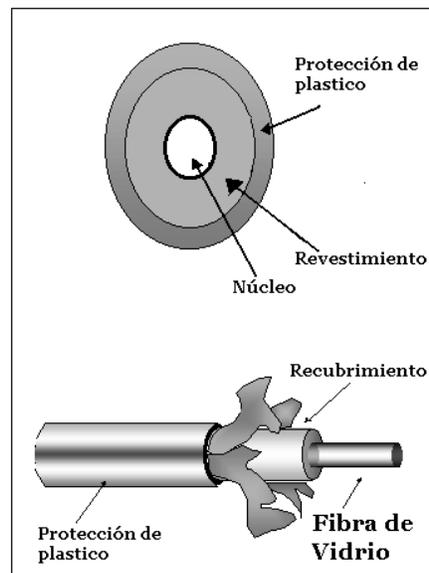


Fig. 1.1 La fibra óptica.

Ley de Snell

Para comprender la propagación de la luz en una fibra es necesario hacer un estudio sobre la ley de Snell y la reflexión total interna, ya que estas herramientas de la óptica geométrica nos permiten entender de forma muy sencilla el comportamiento de la luz al existir un cambio de medio para su propagación.

La ley de Snell es conocida así en honor al científico que la propuso y verificó, Willebrord Snell Van Royen [1], haciendo una representación de la luz como rayos, realizó un estudio del comportamiento de la luz al viajar del medio en el que se propaga de índice de refracción (n_i) a otro de mayor índice de refracción (n_t). En la representación de la luz como rayos, es conveniente trazar la normal al plano de incidencia, ya que con respecto a ésta se miden los ángulos tanto de incidencia (θ_i), el ángulo refractado o transmitido (θ_t) y el ángulo reflejado (θ_r).

Cuando $n_i < n_t$, es decir, cuando la luz está viajando inicialmente dentro del medio de menor índice de refracción, la ley de Snell establece que $\text{sen}\theta_i > \text{sen}\theta_t$, y dado que en todos los puntos la misma ecuación es positiva entre 0° y 90° , entonces $\theta_i > \theta_t$. Esto significa que el rayo de luz al cambiar de medio de transmisión de un índice de refracción menor a uno mayor se flexiona hacia la normal. También éste fenómeno es aplicable en sentido contrario, esto es, cuando el rayo de luz viaja de un medio con índice de refracción mayor a uno menor, el rayo de luz se flexiona alejándose de la normal. Por lo tanto la trayectoria del rayo de luz es la misma cuando entra que cuando sale de un medio a otro. Una representación de la ley de Snell se muestra en la figura 1.2.

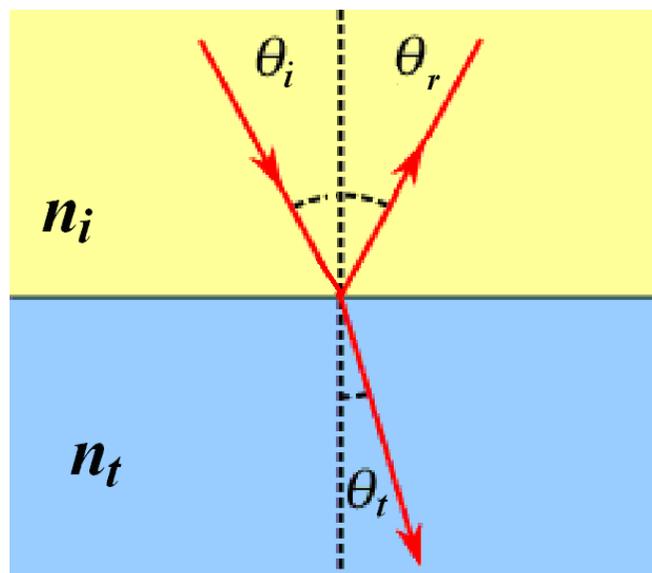


Fig. 1.2. Ley de Snell

La ley de Snell está denotada por la siguiente ecuación:

$$\frac{\text{Sen}\theta_i}{\text{Sen}\theta_t} = n_{ii}, \quad (1)$$

donde $n_{ii} \equiv n_t/n_i$ y es el índice de refracción relativo de los dos medios. Por lo tanto la ecuación finalmente está denotada como:

$$n_i \text{sen}\theta_i = n_t \text{sen}\theta_t. \quad (2)$$

La ley de Snell también puede ser explicada desde el punto de estudio de la óptica ondulatoria, esto es, tomando a la luz como una onda electromagnética en vez de la interpretación de la luz como rayos.

La representación de una onda armónica tiene la forma:

$$e^{i(\vec{k}\cdot\vec{r}-\omega t)} \quad (3)$$

Donde \vec{k}  la dirección a lo largo del camino óptico de propagación del haz de luz; \vec{r} representa al vector director en el sistema de coordenadas de interés, ω es la frecuencia angular y t es el tiempo. Si se hace la derivada del tiempo y espacio en la expresión anterior (3), podemos encontrar que:

$$\frac{\partial}{\partial t} e^{i(\vec{k}\cdot\vec{r}-\omega t)} = -i\omega e^{i(\vec{k}\cdot\vec{r}-\omega t)} \quad (4)$$

y

$$\nabla e^{i(\vec{k}\cdot\vec{r}-\omega t)} = i\vec{k} e^{i(\vec{k}\cdot\vec{r}-\omega t)} \quad (5)$$

Las ecuaciones anteriores (4) y (5) muestran que tomando la derivada del tiempo, d/dt , de la ecuación (3) es equivalente a multiplicar por $-i\omega$, mientras que obteniendo la derivada espacial, ∇ , de la ecuación (3) es equivalente a multiplicar por $i\vec{k}$.

Con las ecuaciones de Maxwell para el caso donde no hay cargas libres tenemos:

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \rightarrow \vec{K} \times \vec{E} = \mu\omega \vec{H} \quad (6)$$

$$\nabla \times \vec{H} = -\varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \rightarrow \vec{K} \times \vec{H} = -\varepsilon\omega \vec{E} \quad (7)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \rightarrow \vec{K} \cdot \vec{E} = 0 \quad (8)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \rightarrow \vec{K} \cdot \vec{H} = 0 \quad (9)$$

donde: \vec{E} es el vector de campo eléctrico, \vec{H} es el vector de campo magnético, \vec{K} es el vector de dirección de propagación, μ es la permeabilidad magnética, ϵ es la permitividad eléctrica y ω es la frecuencia angular. De la ecuación (8), es fácil observar que \vec{K} es perpendicular a \vec{E} , mientras que de la ecuación (9), observamos que \vec{K} es perpendicular a \vec{H} . También de la ecuación (6) vemos que \vec{H} es perpendicular a \vec{K} y a \vec{E} y de la ecuación (7) que \vec{E} es perpendicular a \vec{H} y a \vec{K} , para que estas condiciones puedan ser satisfechas, los vectores del campo eléctrico (\vec{E}) y el magnético (\vec{H}), junto con el vector de la dirección de propagación (\vec{K}), forman una triada ordenada, esto se observa en la figura 1.3.

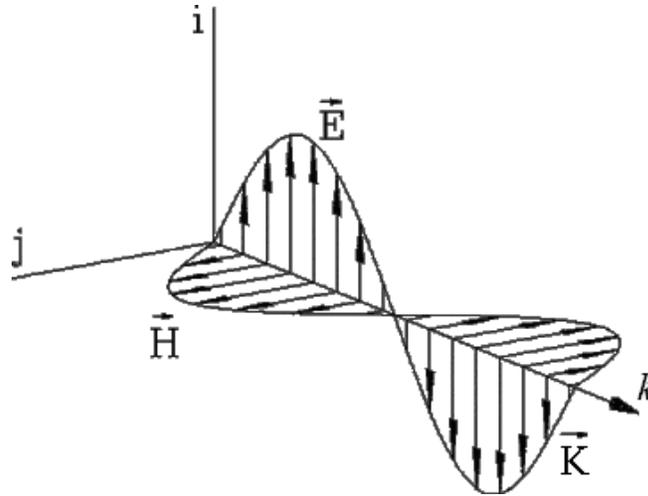


Fig. 1.3 Triada ordenada, Campo Eléctrico \vec{E} , Campo Magnético \vec{H} y Dirección de Propagación \vec{K}

Considerando el caso para demostrar la Ley de Snell en el que una onda plana incidente representada por $e^{i(\vec{k}_i \cdot \vec{r} - \omega t)}$; una onda reflejada $e^{i(\vec{k}_r \cdot \vec{r} - \omega t)}$; y una onda transmitida $e^{i(\vec{k}_t \cdot \vec{r} - \omega t)}$. La reflexión y refracción de estas ondas ocurren en la frontera de ambos materiales los cuales tiene índice de refracción n_1 y n_2 respectivamente. Para que éstas tres ondas puedan ser idénticas en la interfase para todo el dominio del tiempo es necesario que se cumpla la siguiente condición:

$$\vec{K}_i \cdot \vec{r} = \vec{K}_r \cdot \vec{r} = \vec{K}_t \cdot \vec{r} \quad (10)$$

Refiriéndonos al eje j con respecto a la figura 1.3 tenemos que:

$$K_i \sin \theta = K_r \sin \theta' = K_t \sin \phi \quad (11)$$

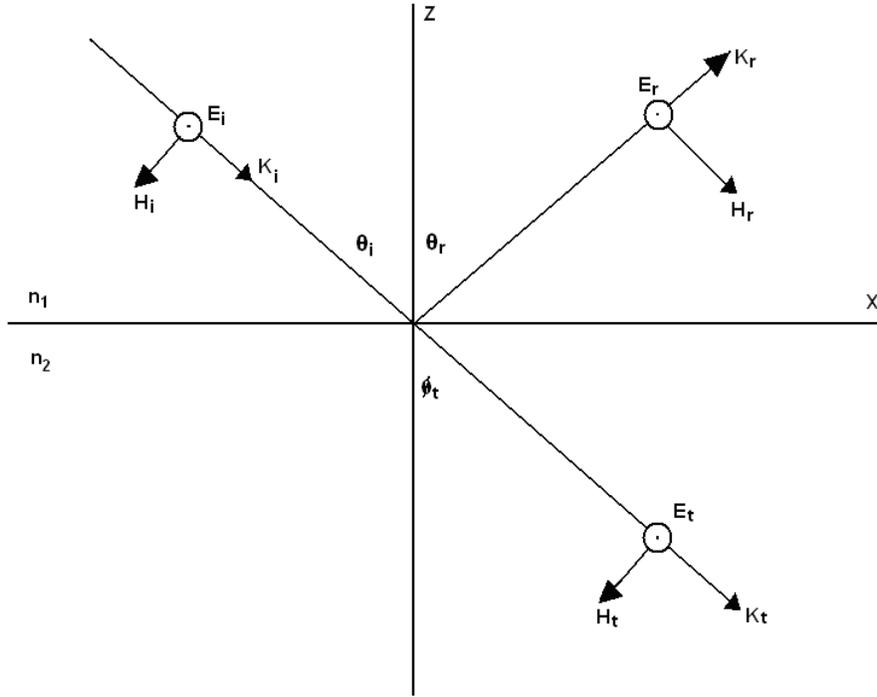


Fig. 1.4 Reflexión y refracción en una interfase de índices n_1 y n_2

En la región de índice n_1 , $K'_i = K'_r$, esto implica que: $\theta = \theta'$, lo cual es la ley de reflexión, por lo tanto la ley de Snell puede observarse que la onda refractada está en el plano de incidencia y puede ser modelada con la ecuación (12) [2]:

$$\frac{\text{sen}\theta}{\text{sen}\phi} = \frac{K'_t}{K'_i} = \frac{n_2}{n_1} \quad (12)$$

Reflexión total interna

En el caso en que n_2 es mayor que n_1 , como cuando la luz pasa desde el aire con índice de refracción (n_1) al vidrio o al agua con índice mayor (n_2), el rayo refractado se curva y se acerca a la normal tal como indica la figura 1.4. En caso contrario, es decir, si el rayo de luz pasara del medio 2 al medio 1, se alejaría de la normal. En éste caso, cuando el rayo de luz pasa de un medio de mayor índice de refracción a uno de menor índice de refracción, el haz de luz se aleja de la normal, para éste caso puede existir un determinado ángulo de incidencia al que le corresponde uno de refracción de 90° y entonces el rayo refractado saldrá a través de la superficie de separación de ambos medios. Este ángulo de incidencia es el llamado ángulo crítico. Para ángulos de incidencia mayores al ángulo crítico, el ángulo de refracción será mayor de 90° y el rayo no será refractado sino reflejado, puesto que no pasara de un medio a otro, y se produce una reflexión total interna. En la figura 1.5 se muestra éste fenómeno.

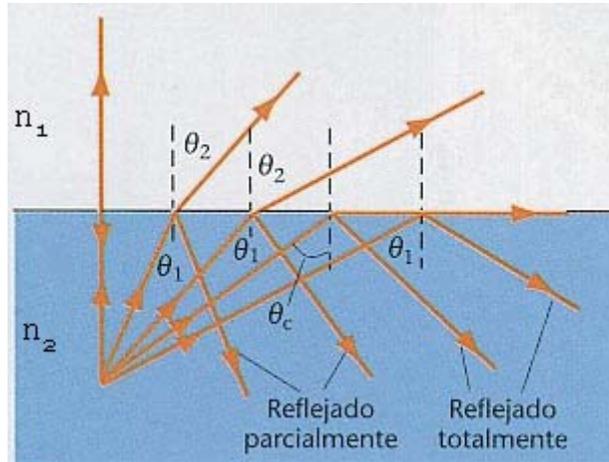


Fig 1.5. Reflexión total interna. Al cambiar el ángulo de incidencia del haz de un índice mayor a uno menor, existe un ángulo crítico θ_c en el que el haz no se transmitirá y será reflejado totalmente.

Empleando el fenómeno de reflexión total interna es como se explica el comportamiento de la transmisión de luz a través de una fibra óptica. Consideremos un cilindro de vidrio el cual está rodeado de un medio cuyo índice es n_i , sea aire, $n_i=n_a$, desde el cual incide un haz de luz. El haz de luz transmitido del medio (n_a) al cilindro de vidrio, llega a las paredes del cilindro desde adentro y se reflejará total e internamente siempre que el ángulo de incidencia sea mayor que:

$$\theta_c = \text{Sen}^{-1} \frac{n_a}{n_f}, \quad (13)$$

donde n_f es el índice del cilindro o fibra. Un rayo de luz puede ser sometido a varios miles de reflexiones por centímetro cuando se refleja en las paredes a lo largo del cilindro de vidrio hasta que salga en el otro extremo del mismo. Si el diámetro y la longitud del cilindro de vidrio son D y L respectivamente, la longitud l de la trayectoria recorrida por el rayo será:

$$l = \frac{L}{\text{Cos} \phi_t}, \quad (14)$$

o empleando la ley de Snell, tenemos:

$$l = n_f L (n_f^2 - \text{Sen}^2 \theta_i)^{-1/2}, \quad (15)$$

el número N de reflexiones está dado entonces por:

$$N = \frac{l}{D / \text{Sen} \phi_t} \pm 1, \quad (16)$$

ó

$$N = \frac{L \text{Sen} \theta_i}{D(n_f^2 - \text{Sen}^2 \theta_i)^{1/2}} \pm 1. \quad (17)$$

El resultado se redondea al número entero más cercano ya que solo existen reflexiones enteras. El ± 1 , que depende de donde choque el rayo en la cara final del cilindro, no tiene importancia cuando N es grande, como lo es en la práctica.

La fibra óptica como ya se había visto se trata de un cilindro de vidrio o algún plástico al cual se le conoce como núcleo. Este núcleo está rodeado de otro medio como otro plástico de índice de refracción menor el cual es conocido como revestimiento. Esta capa necesita ser suficientemente gruesa para proporcionar un aislamiento. Aunque en la literatura existan referencias a los tubos luminosos que se remontan a un siglo atrás, la era moderna de la fibra óptica empezó con la introducción de las fibras con recubrimiento en 1953. [3]

El índice de refracción típico del núcleo de una fibra n_f puede ser de 1.5 aproximadamente, aunque existen otros valores de diseño de fibras.

En la figura 1.6, se muestra una fibra con revestimiento, observamos que hay un valor máximo θ_{max} de θ_i para el cual el rayo interno (R_1) incidirá con un ángulo crítico θ_c .

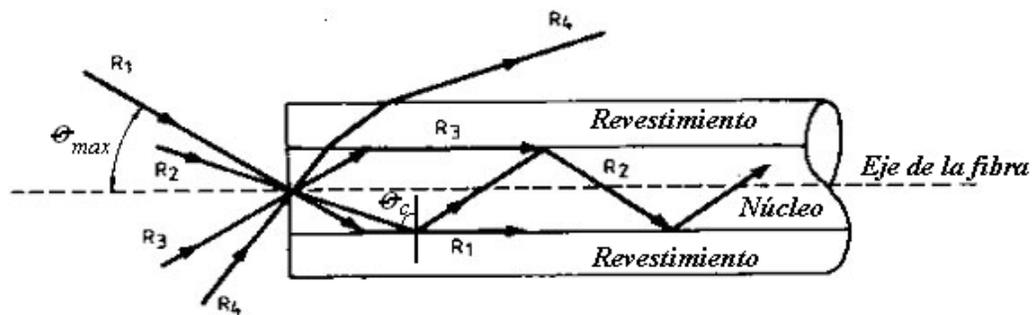


Fig. 1.6 Vista transversal de la fibra óptica.

Los rayos incidentes con ángulos mayores a θ_{max} incidirán con la pared interna del núcleo con ángulo menor que θ_c , reflejándose solo parcialmente en cada incidencia con la pared interna del núcleo y abandonará rápidamente la fibra después de algunas reflexiones, en la figura 1.6 se observa éste fenómeno con el rayo R_4 . Por lo tanto, θ_{max} , denominada el ángulo de aceptación, define el semiángulo del cono de aceptación de la fibra. Para determinarlo tenemos:

$$\text{Sen}\theta_c = \frac{n_c}{n_f} = \text{Sen}(90^\circ - \theta_t), \quad (18)$$

y sabemos :

$$\text{Cos}\phi = \text{Sen}(90 - \phi), \quad (19)$$

de donde

$$\frac{n_c}{n_f} = \text{Cos}\theta_t, \quad (20)$$

Sustituyendo (20) en (21) se obtiene que:

$$\frac{n_c}{n_f} = \left(1 - \text{Sen}^2\theta_t\right)^{1/2}, \quad (21)$$

empleando la ley de Snell y reacomodando términos tenemos:

$$\text{Sen}\theta_{max} = \frac{1}{n_i} \left(n_f^2 - n_c^2\right)^{1/2}. \quad (22)$$

La cantidad $n_i \text{Sen}\theta_{max}$ se define como la apertura numérica NA (por sus siglas en inglés).

Por lo tanto para una fibra su apertura numérica está dada por:

$$NA = \left(n_f^2 - n_c^2\right)^{1/2} \quad (23)$$

En la ecuación (22), observamos que el valor máximo que puede tener es igual a uno, esto significa que el valor más grande que puede tener la apertura numérica de una fibra óptica es uno. En el mercado se pueden encontrar una gran variedad de fibras cuyas aperturas numéricas van desde 0.2 hasta casi 1. [3]

1.1.-TIPOS DE FIBRAS ÓPTICAS (MONOMODALES, MULTIMODALES Y DE ÍNDICE ESCALONADO)

En la actualidad existen un gran número de tipos de fibra, cada una obedece a una aplicación específica y a los métodos de fabricación de las mismas, sin embargo hay tres tipos de configuraciones típicas que se emplean comúnmente en las comunicaciones.

Fibra óptica de índice escalonado multimodal

Cuando una fibra está construida de forma que el radio del núcleo es relativamente grande comparado con la longitud de onda que transporta, y además tanto el índice de refracción del núcleo como del revestimiento son constantes, éste tipo de fibra es el denominado fibra de salto de índice o fibra de índice escalonado multimodo. El núcleo de éstas fibras es homogéneo de entre 50 y 150 μm y con un revestimiento cuyo diámetro oscila aproximadamente entre 100 y 125 μm . Este es el más antiguo de los tres tipos más comunes de fibra y se utilizó ampliamente en los primeros sistemas de comunicaciones ópticas (1975-1980).

Es evidente que muchos ángulos diferentes puedan ser guiados con entrada menor al valor del ángulo crítico. Sin embargo la solución rigurosa de las ecuaciones de Maxwell muestra que, de hecho, sólo ciertos modos permitidos podrán ser propagados para ángulos menores del crítico. Observando ésta situación desde la perspectiva puramente geométrica de la óptica, los rayos de luz que entran en la fibra con ángulos cercanos al ángulo crítico, viajan una distancia mayor en la fibra por múltiples reflexiones que los ángulos que entran con un ángulo mucho menor al crítico. Esto se observa en la figura 1.7.

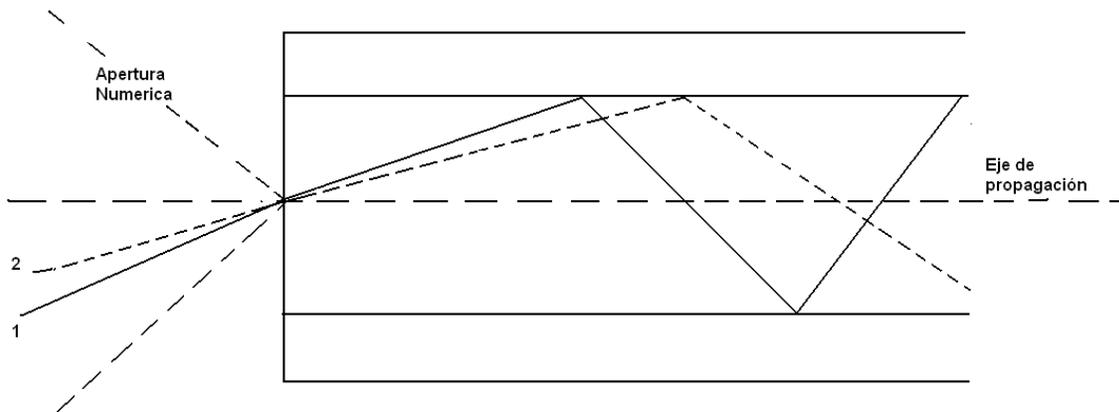


Fig. 1.7 La longitud recorrida de un haz a través de una fibra óptica multimodo, depende del ángulo de incidencia. Los haces 1 y 2 muestran diferentes ángulos de incidencia y por lo tanto diferentes caminos ópticos de propagación.

La diferencia del camino óptico entre estos haces de luz, provoca una diferencia también en el tiempo de arribo de cada uno de ellos a la salida de la fibra. Este tipo de fenómeno limita el uso de éste tipo de fibras en su uso en los sistemas de comunicación que requieren un ancho de banda muy grande.

De forma alternativa, la propagación de la luz en fibras ópticas puede ser interpretada desde el punto de vista del análisis de la propagación de la luz como onda, el cual provee una herramienta más conveniente para comprender las propiedades modales de las fibras.

Los campos electromagnéticos en una fibra se distribuyen por si mismos en concordancia con las ecuaciones de Maxwell, y como tal pueden ser expresados matemáticamente como soluciones de la ecuación de onda. La ecuación de onda puede ser derivada directamente de las ecuaciones de Maxwell, ecuaciones (6) y (9). Reescribiendo la ecuación (7) tenemos:

$$\nabla \times \vec{H} = \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (24)$$

derivamos espacialmente (Rotacional) ambos lados de la ecuación (24) y obtenemos:

$$\nabla \times \nabla \times \vec{H} = \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \nabla \times \vec{E}, \quad (25)$$

sustituimos la ecuación 6 en la ecuación (25) y tenemos:

$$\nabla \times \nabla \times \vec{H} = -\varepsilon \frac{\partial \mu}{\partial t} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}. \quad (26)$$

Empleando las propiedades del operador rotacional:

$$\nabla \times \nabla \times \vec{H} = \nabla \nabla \cdot \vec{H} - \nabla \cdot \nabla \vec{H}, \quad (27)$$

en el caso libre de cargas, $\nabla \cdot \vec{H} = 0$, el termino del lado derecho de la ecuación (27) está dado por:

$$\nabla \cdot \nabla \vec{H} = \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \quad (28)$$

Una ecuación similar puede ser derivada para el campo eléctrico.

La ecuación de onda para componentes del campo eléctrico y magnético pueden ser separados en coordenadas cilíndricas y expresados como:

$$\left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} r \frac{d}{dr} - \frac{v^2}{r^2} + k^2 n^2(r=0) - \beta^2 - \left(\frac{V}{a} \right)^2 f \left[\left(\frac{r}{a} \right)^\alpha \right] \right] \psi = \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \quad (29)$$

Donde v es operador azimutal y $f[(r/a)^\alpha]$ describe la variación del índice de refracción con el radio. En la ecuación (29) a es el radio del núcleo, β es la constante de propagación y V es conocido como el volumen modal.

$$V = \frac{2\pi a n_1}{\lambda} \sqrt{2\Delta} \quad (30)$$

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \quad (31)$$

El número de modos (M) o grupos modales dentro de una fibra óptica está determinado por un número finito de soluciones de la ecuación (29). Para una fibra de índice escalonado, $\alpha=\infty$ y el número de modos es aproximadamente igual a V para un número igual a V . Para una fibra de perfil parabólico, $\alpha=2$ y $M=V/2$. Un grupo modal consiste de un número degenerado de modos. La degeneración, m , está determinada por el operador azimutal (ν), y el número radial (μ) [2].

$$m = 2\mu + \nu + 1 \quad (32)$$

Fibra óptica de índice escalonado monomodal

Si el núcleo de una fibra llega a tener un diámetro tan pequeño, tal que las dimensiones se aproximen a la longitud de onda de la luz que se propaga en la fibra, entonces sucede que los efectos de difracción dominan, así que la luz solo puede propagarse a lo largo del eje de propagación de la fibra. Esta condición es conocida como la condición de corte (*Cutoff condition*), donde solo un modo puede propagarse a través de la fibra y esta dado por:

$$V < 2.405 \quad (33)$$

Si el número V es incrementado, otros modos de orden superior pueden propagarse a través de la fibra.

Soluciones exactas para la ecuación (29) para fibras de índice escalonado ($\alpha=\infty$). En éste caso las componentes de los campos eléctricos y magnéticos pueden ser expresadas en términos de las funciones de Bessel.

La ventaja de las fibras ópticas monomodales para las comunicaciones y sensores de fibra es que la luz está espacialmente limitada a lo largo de la fibra. Para propósitos de comunicación, esto significa que el ancho de banda se incrementa enormemente ya que al propagar un pulso éste no tendrá diferentes caminos ópticos a través de la fibra para diferentes ángulos de incidencia. Para los sensores de fibra óptica, esto significa que el ruido en el sistema por los efectos provocados por múltiples modos se reduce. La dispersión de un pulso es una medida importante para el ancho de banda de una fibra óptica monomodal. [2].

Fibra óptica de índice gradual

Para reducir el número de modos y dispersión temporal de los modos propagándose a través de una fibra, es posible variar el índice de refracción a través de la región del núcleo. De ésta manera el núcleo de la fibra actúa como una serie de lentes que enfocan la luz periódicamente a través de la fibra. Además ésta técnica reduce el alto número de modos individuales propagándose a través de una típica fibra multimodo de índice escalonado (cerca de 10,000) a cerca de 300 modos. De éste modo se logra que los modos de orden superior experimenten el mismo camino óptico que los modos de índice inferior, ya que la disminución del índice de refracción a lo largo de la zona radial del núcleo y con mayor índice en la zona central del núcleo logran que los modos obtengan un balance espacial a lo largo de la fibra. Problemas como el ruido modal, alta sensibilidad a microcurvaturas y disminución del ancho de banda debido a una gran cantidad de modos han hecho que la industria de las comunicaciones emplee las fibras monomodales para el transporte de información. Estas mismas consideraciones son las que se toman en los sensores basados en fibras ópticas. [2, 4]

1.2.- PROPIEDADES DE LAS FIBRAS ÓPTICAS COMO SENSORES

En la actualidad han crecido las necesidades en la fabricación de los sensores basados en fibra óptica, por lo mismo se han desarrollado más las técnicas de fabricación de fibras ópticas. Más aun, muchos de los diseñadores de fibra óptica ponen mayor interés en aplicaciones de la fibra óptica para comunicaciones que en sensores de fibra óptica, ya que los proyectos comerciales en comunicaciones son de mayor rentabilidad.

La aplicación de las fibras ópticas en las comunicaciones han sido estudiadas desde principios de los años 70's sin embargo, éste empleo como medio de transporte de información es el que más tiene ventaja sobre algunos otros empleos de la fibra óptica. Debido a las propiedades de la fibra óptica con respecto a otros medios de transporte de información, es el motivo principal de la fibra en las comunicaciones. El tipo de comunicaciones es muy amplio, sin embargo a últimas fechas el modo de caracterizar la información a través de sistemas de comunicaciones, es conocido como triple play (por su significado en inglés) . Este modo de caracterizar la información está basado en los tres principales tipos de información que se emplean comúnmente y que abarcan a otros tipos de información. Estos tipos de información son el Audio, Video y Datos, algunos de ellos combinados o codificados para cambiar de uno de los tres tipos de información a otra. Un claro ejemplo de los tipos de cambio de información es la codificación de audio o video para tener una información de datos y posteriormente decodificarla y obtener nuevamente la información original.

Aun cuando este tipo de empleo de la fibra óptica en el transporte de información es el más importante y socorrido debido a su alta confiabilidad, es posible emplear éste tipo de características propias de la fibra en otros tipos de labores. El estudio de éste tema está concentrado en el sensado de los fenómenos ópticos, utilizando a las fibras ópticas como sensores. A principios de éste capítulo se habló de las características propias de las fibras

ópticas y en el capítulo 2 se amplía más éste tema con respecto a los tipos de sensores de fibra óptica.

Entre las principales características generales de la fibra óptica se encuentran la inmunidad a la interferencia electromagnética, inmunidad a cortos eléctricos, bajas pérdidas de potencia, grandes distancias entre repetidores de la señal, amplio ancho de banda, transporte de la información a velocidades cercanas a la de la luz, entre muchas otras. Gracias a todas éstas características ha sido posible realizar instrumentos y desarrollo de tecnologías para su empleo como sensores de varios tipos de magnitudes físicas. Lo mismo ocurrió en el siglo XIX con la electricidad, al ser empleada primeramente como transporte de energía eléctrica, posteriormente en transporte de información (telégrafo, teléfono) y finalmente aprovechando las características de los fenómenos eléctricos se desarrollaron tecnologías y estudios científicos para el desarrollo de una infinidad de sistemas de sensores eléctricos como los magnéticos, térmicos, de sensado de partículas de altas energías (nucleares), químicos, etc. Sin embargo las limitaciones de la electricidad y los medios de transporte eléctrico mantienen una desventaja muy clara con respecto a la fibra óptica debido a las características antes mencionadas.

La principal ventaja de las fibras ópticas para ser empleadas como sensores es la inmunidad al ruido electromagnético, lo que genera a tener señales de sensado con niveles de señal a ruido muy grandes, esto es, señal de sensado con poco ruido o incluso sin ruido. Esta ventaja nos permite realizar procesamiento de señales de magnitudes muy pequeñas, que no habían podido ser detectadas con sensores basados en otros tipos de fenómenos distintos a los ópticos. Esta propiedad ha permitido tomar ventaja en las tecnologías de sensado basado en fenómenos ópticos con respecto a sensados en otros tipos de métodos o fenómenos físicos, lo que ha permitido realizar una mayor cantidad de investigaciones y desarrollos en sensores de fibra óptica, logrando sustituir a muchos sensores existentes basados en fenómenos físicos diferentes a los ópticos. Un ejemplo muy claro son las tarjetas de lectura óptica, como son los códigos de barras a diferencia de las tarjetas de bobinas que empleaban fenómenos electro-magnéticos para leer la información de la tarjeta, los sensores en los estacionamientos para detectar el movimiento de un auto, ahora se hacen a través de sensores ópticos, lo que antes se hacía a través de sensores magnéticos, entre muchos otros ejemplos [6].  ésta tesis se habla de un ejemplo muy claro de la sustitución de un tipo de tecnología existente en el sensado de movimientos angulares, el cual empleaba un fenómeno mecánico y ahora sustituido por un fenómeno óptico y con métodos de sensado-detección distintos para el mismo tipo de parámetro físico. La diferencia entre ambos métodos de sensado es muy clara al observar los intervalos logrados por ambos sensores para el mismo parámetro físico.

Las propiedades de la fibra óptica como sensores están directamente vinculadas con las tecnologías de fabricación de fibras ópticas, ya que muchas de éstas características son logradas debido a los materiales y métodos de fabricación de las fibras, como por ejemplo, los índices de refracción de las fibra varían debido a los distintos materiales para su fabricación y dependiendo del tipo de sensado de la fibra, la selección del tipo de índice de refracción se basa en la magnitud física a sensar, fenómeno físico empleado en el sensado, intervalo de sensado en magnitud y longitud de onda, entre algunas otras características del sensado para la selección del tipo de fibra. Sin embargo muchas veces al

ir desarrollando prototipos de sensores es posible cambiar de algún tipo de fibra óptica a otro para mejorar el sensado, algún parámetro o para investigar en otro tipo de método de sensado.

En la actualidad, existe una gran variedad de fibras ópticas en el mercado y algunas otras en desarrollo, es por ello que la definición del parámetro físico a sensar y el fenómeno óptico de detección, están relacionados con las características de la fibra óptica, siendo uno de los puntos necesarios en el desarrollo de sensores basados en las fibras ópticas.

Existen tres aspectos importantes en la composición de la fibra óptica que son importantes en el desarrollo de los sensores de fibra.

El primero es la geometría de la fibra, éste es un aspecto especialmente importante en relación con los dispositivos de sensado de cambio de fase, por ejemplo los interferométricos y los polimétricos. Considerables progresos han sido hechos en años pasados en este punto con fibras ópticas de baja birrefringencia, alta birrefringencia lineal, alta birrefringencia circular y fibras polarizadas, por lo que en éste punto ya existen varios diseños disponibles para adaptarse a ellos. Tales tipos de fibras son analizadas por los diseñadores de sensores en fibra óptica, ya que los sensores de fibra óptica modulados en fase son los más empleados y los que mejores soluciones ofrecen. [7]

Otro problema relacionado con la geometría en la fibra óptica, está dado por el núcleo de la fibra, el cual está posicionado dentro del recubrimiento. Con ésta estructura en la fibra es necesario realizar un estiramiento de la fibra para poder interaccionar con el núcleo de la fibra y de ésta forma con la luz guiada a través de ella para poder trabajar en sensores modulados en intensidad debido a absorción o cambio en el campo evanescente del modo guiado. Para poder trabajar con el núcleo de la fibra existen varios métodos para poder hacer ésta interacción con los modos propagados.

El segundo aspecto también muy importante en la fabricación de fibras es la composición dopante de las mismas. Claramente la inclusión de dopantes puede cambiar las propiedades físicas en la fibra óptica y por lo tanto de los modos propagados en ella, en especial las propiedades sensitivas en una medición en particular, por lo que debe ser muy bien considerada la cantidad de dopaje en la fibra dependiendo la necesidad o diseño como sensor. Algunos progresos también han sido hechos en ésta área, particularmente en el sensado de temperatura. Varios tipos de elementos de tierras raras han sido probados como: Nd, Er, Yb, Tb, Ho, Pr. Algunas otras propiedades de estos tipos de fibras están bajo investigación, esto incluye propiedades no lineales como en efectos electro-ópticos, cambio en ancho espectral, dispersión Raman, etc. Estos últimos desarrollos en fibra óptica son improbables de tener algún impacto directo en las mediciones o sensados a través de la propia fibra óptica. Sin embargo si podrán llegar a dar resultados si existen cambios con los componentes de éste tipo de fibras, con los cuales se pueda lograr cambios en fase, frecuencia, modulación, polarización, amplificación, “swicheo”, etc. Lo cual proveería un invaluable avance en el procesamiento de las señales en la fibra óptica para una óptima medición o transporte de información. Hay todavía mucho más que hacer en éste segundo punto sobre los dopantes en las fibras ópticas.

En el tercer y último punto, observamos los problemas con los revestimientos en las fibras ópticas. Muy poca atención ha sido puesta en éste problema el cual es manifestado en las necesidades de los sensores en fibra óptica.

Este problema tiene tres aspectos, los cuales han y siguen siendo mencionados en muchos trabajos referentes a sensores en fibra óptica. Primero es la necesidad de asegurar que el recubrimiento pueda resistir a ataques mecánicos y químicos principalmente en los cuales están sujetos a mediciones bajo éste tipo de ambientes; segundo, el recubrimiento, debe permitir una optima interacción del medidor con la propiedad de la fibra la cual está siendo modulada en la acción de medición; y tercero, ésta interacción debe permanecer constante sobre largos periodos de tiempo, aun cuando exista una recalibración del sistema. El problema con los diferentes tipos de recubrimientos en fibras ópticas no es del todo un solo problema son varios en uno solo, de hecho se considera todo un intervalo de problemas para los diseñadores de sensores en fibra óptica, en los cuales se considera principalmente una correspondencia entre el problema y las propiedades necesarias para cada aplicación en los sensores diseñados.

En éste último punto y en el de los dopantes en fibras ópticas, hay una necesidad de mejoras en las fibras ópticas para poder emplearlas principalmente en mediciones en las cuales existe un ataque directo por materiales a la fibra por los diseñadores de sensores en fibra óptica.

Una vez unificados los problemas existentes en la fabricación de fibras ópticas y las necesidades requeridas, aun así es posible trabajar con los diferentes tipos de fibras existentes para el diseño de sensores de fibra óptica con óptimos resultados. En algunos casos existen propuestas o métodos para evitar los problemas existentes en las fibras ópticas existentes, aunque sin duda esto requiere algunas modificaciones en los esquemas básicos de los sensores diseñados. Sin embargo el área dedicada al diseño de sensores en fibra óptica ha progresado ampliamente hasta su estado actual empleando fibras ópticas diseñadas para sistemas de comunicaciones. Aunque en muchas aplicaciones industriales ya se están comenzando a emplear los sensores en fibra óptica para atacar diversos problemas, lo que llevara pronto a realizar un mayor avance en el diseño de las fibras ópticas con fines de sentido.

En sensores de fibra óptica, se habla principalmente de ella como el componente principal de los diseños, sin embargo otros componentes en los esquemas de los sensores son muy importantes o hasta más que las propias fibras. Entre estos componentes encontramos las fuentes de luz, fotodetectores o arreglos de fotodetectores, moduladores, demoduladores, filtros, acopladores, polarizadores, conmutadores, etc. Al parecer ninguno de estos elementos representan un problema real en los diseños que existen en la actualidad; sin embargo fue necesario esperar a que todos estos elementos tuvieran un desempeño óptimo para poder diseñar sensores en fibra óptica. El avance fue muy lento, tuvieron que pasar décadas para mejorar varios de estos elementos, como las fuentes, fotodetectores, acopladores, moduladores, etc. y ser empleados en los diseños de sensores en fibra óptica.

Para los diseñadores de sensores en fibra óptica ha sido muy satisfactorio encontrar un área de desarrollo en sensores en la cual se logren avances muy notables sobre otras áreas de sensado, principalmente en reducción de tamaño, costo y un incremento notable en la sensibilidad de los sensores diseñados.

Es claro que los sensores en fibra óptica tienen mucho que ofrecer en cuanto a las funciones de medición, tanto en aplicaciones industriales como investigación. Sus principales ventajas son su inmunidad electromagnética, bajo peso, bajo costo, alta sensibilidad, fácil instalación, seguridad, etc. lo que los hace superiores a otro tipo de sensores. Sin embargo también es cierto que los sensores en fibra óptica son sensores universales capaces de realizar cualquier tipo de medición en cualquier tipo de ambiente o de aplicación, pero en muchas áreas de medición están tomando ventaja sobre sus predecesores, además de proporcionar una ventaja única sobre otros sensores como lo es la red de sensores distribuidos .

Los componentes o elementos empleados en sensores de fibra óptica han avanzado en sus tecnologías de fabricación y de desempeño notablemente ofreciendo grandes resultados en sus propósitos, sin embargo encontramos que el único elemento que necesita un desarrollo aun mayor dirigido a los sensores es la propia fibra óptica, este desarrollo se está dando y en años posteriores se contará con fibras que ofrezcan las propiedades necesarias para emplearlas como sensores de mayor desempeño.

1.3.- FUNDAMENTOS DEL FUNCIONAMIENTO DEL LÁSER Y DIODOS LÁSER

Durante la década de los cincuenta, se desarrolló un dispositivo extraordinario denominado máser, gracias a los estudios de numerosos hombres de ciencia entre los cuales destacan Charles Hard Townes de Estados Unidos, Nikolai Gennadievich Basov y Aleksander Mikhailovich Prokhorov, ambos de la Ex-uni6n Sovi6tica, quienes compartieron el premio Nobel de F6sica en 1964 por sus trabajos. El M6ser es la abreviatura de <<Microwave Amplification by Stimulated Emission Radiation>> esto es, amplificaci6n de microondas por emisi6n estimulada de radiaci6n, en s6, 6ste dispositivo se trataba de un amplificador de microondas de muy bajo ruido. Su funcionamiento era muy poco convencional para ese entonces, empleando directamente la interacci6n mec6nico-cu6ntica de la materia con energ6a radiante. Poco despu6s de su desarrollo hubo especulaciones sobre la posibilidad de aplicar la misma teor6a y t6cnica de dise1o en la regi6n 6ptica del espectro electromagn6tico. En 1958, Townes y Arthur L. Schawlow establecieron prof6ticamente las condiciones f6sicas generales necesarias para conseguir la amplificaci6n de la luz a trav6s de la emisi6n estimulada de la radiaci6n. Posteriormente en julio de 1960, Theodore H. Maiman dio a conocer la primera operaci6n exitosa llevada a cabo con un m6ser 6ptico, es decir el l6ser. Este ha sido uno de los grandes logros de la ciencia, ingenier6a, 6ptica y tecnolog6a en la historia. [1].

El láser es un dispositivo mecánico-cuántico que consiste en producir luz aprovechando las interacciones de los átomos con la radiación electromagnética. Para tener una idea más clara del funcionamiento del láser es necesario realizar un estudio de los mecanismos de interacción de los átomos con la radiación electromagnética, además de los principios físicos aplicados en el diseño del mismo para obtener las características propias de la luz láser. Posteriormente se hace un estudio en éste mismo tema sobre las nuevas tecnologías del láser a través de semiconductores.

El principio fundamental del láser, se basa en tres procesos de la interacción fotón-átomo, los cuáles son necesarios para comprender plenamente su operación: el primero, es el proceso de absorción, el cuál es la relación entre un fotón (cuanto de radiación electromagnética) y un átomo, que inicialmente se encuentra en su estado base (sin excitación), el resultado de la interacción es que el átomo “absorbe” al fotón y usa su energía para pasar a su siguiente estado de excitación.

La segunda interacción del fotón-átomo es el proceso de emisión espontánea, ésta sucede cuando al tener un átomo ya excitado inicialmente, éste de forma espontánea y en un tiempo breve (10^{-8} segundos alrededor de 100 nano-segundos) pasa a su estado base, emitiendo en el proceso un fotón con energía igual a la diferencia de energía existente entre los 2 estados. El fotón se emite en una dirección totalmente aleatoria.

Finalmente, el tercer proceso importante de interacción átomo-fotón, es el proceso de emisión estimulada, su existencia fue propuesta por Albert Einstein en 1917 y como ya se había mencionado es el proceso fundamental para el principio del láser. En éste proceso se tiene la interacción entre un fotón y un átomo que inicialmente se encuentra en su estado excitado; como resultado de la interacción del fotón con el átomo, el átomo pasa a su estado base emitiendo en el proceso un fotón que adquiere las mismas características de dirección y de fase que el fotón con el que se interactúa inicialmente, debido a esto decimos que la radiación electromagnética que resulta es coherente.

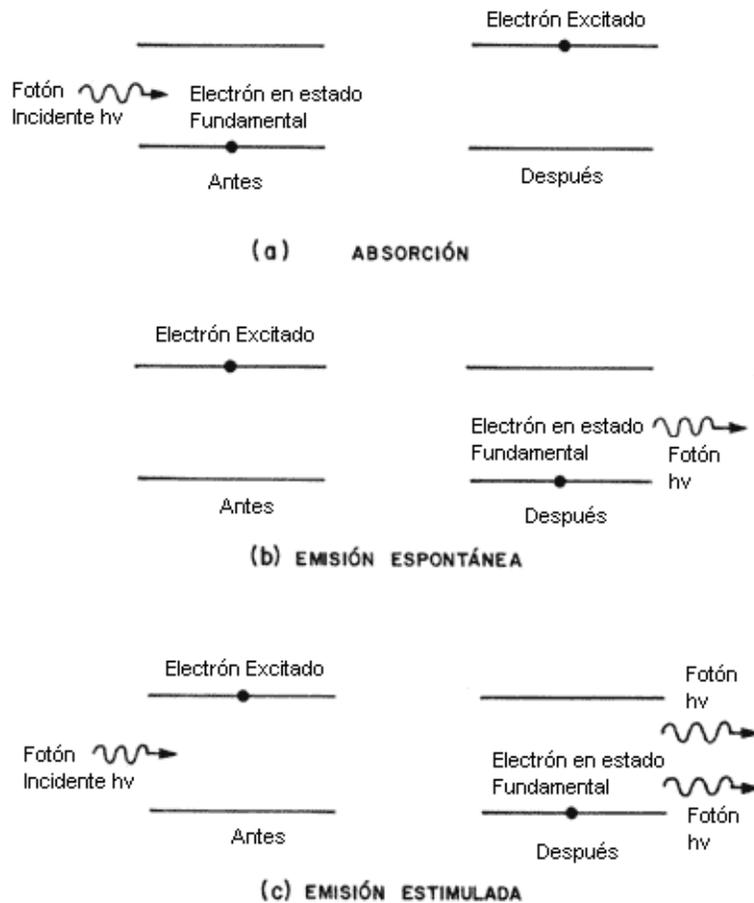


Fig. 1.8 Procesos Láser. a) Absorción, b) Emisión Espontánea y c) Emisión Estimulada

Para el análisis del funcionamiento del láser real, se deben considerar simultáneamente los tres procesos anteriores, el de absorción, el de emisión espontánea y el de emisión estimulada. Tenemos que el proceso de emisión estimulada tiende a amplificar el flujo incidente, dependiendo de la cantidad de átomos que se encuentren en el nivel superior, llamémosle N_2 , mientras que el proceso de absorción tiende a disminuir el flujo incidente dependiendo de la cantidad de átomos que se encuentren en el nivel base inferior N_1 , al considerar simultáneamente los dos procesos el resultados final dependerá de la cantidad de átomos que se encuentren en el estado excitado y en el base. Si éstas cantidades son iguales, tendremos entonces, que en promedio la amplificación y la absorción que sufre el pulso inicial son iguales y el flujo final no será ni mayor ni menor que el flujo de fotones inicialmente incidente. Es decir que el cambio neto del flujo de fotones por unidad de longitud es cero:

$$N_2 = N_1 \tag{34}$$

Recordemos que la condición necesaria para tener amplificación de flujo inicial de fotones, es que el número de átomos excitados N_2 que se encuentran en la cavidad, sea mayor que el número de átomos que se encuentran en su estado base N_1 . El problema que se presenta al realizar la inversión de población, es conseguir que la mayoría de los átomos que se encuentran en la cavidad amplificadora cambien, de su estado base (estado normal de los átomos sin excitación) a su estado de excitación, éste proceso de cambio de estado es llamado inversión de población.

El principio fundamental para lograr la amplificación coherente de la luz es la amplificación de la luz por emisión estimulada de radiación (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation por sus siglas en inglés*) conocida más cotidianamente como proceso LASER. La emisión estimulada permite a un fotón de algún modo inducir un átomo a un nivel más alto de energía, para experimentar una transición hacia un nivel de energía más bajo y en éste proceso emitir un fotón con las mismas características del primero (misma frecuencia, dirección y polarización).

Estos dos fotones (el generado y el que interactúa) pueden servir para estimular la emisión de dos fotones adicionales, de ésta manera sucesivamente, se preservarán éstas propiedades del flujo de fotones. El resultado es la amplificación de luz coherente, debido a que la emisión estimulada ocurre cuando la energía del fotón es casi igual a la diferencia de energía de transición atómica, éste proceso está restringido por la banda de frecuencias determinadas por el ancho de las líneas atómicas.

Para que exista el cambio de estado de los átomos (estado base y estado excitado), es necesario algún tipo de dispositivo que proporcione la energía que los átomos de la cavidad amplificadora requieren, para lograr el cambio hacia su estado de excitación. Este dispositivo recibe el nombre de *sistema de bombeo*, de los cuales existen varios tipos de sistemas de excitación como el óptico (con un lámpara flash o un láser), eléctrico (con una descarga de gas, un electrón o un rayo iónico, o por medio de electrones y huecos), químico (mediante una flama), o incluso a través de explosiones nucleares para lograr acción láser de rayos X.

Aunque hay varios tipos de estos bombeos ópticos, el más empleado de estos sistemas es el de tipo eléctrico y es el que analizaremos por disponibilidad. En éste se produce una intensa descarga eléctrica a través de los átomos que se encuentran en la cavidad amplificadora, de éste modo los electrones energéticos de la descarga transfieren por colisiones electrón-átomo parte de su energía a los átomos contenidos en la cavidad, logrando que éstos pasen de su estado base a su estado excitado, además consideramos una cavidad amplificadora con un sistema de bombeo a la cuál se le colocan en sus extremos un par de espejos planos o ligeramente cóncavos; éste par de espejos paralelos reciben el nombre de *resonador óptico*, uno de los espejos del resonador es casi 100% reflejante y el otro tiene una reflectancia de alrededor del 90%.

La presencia del resonador óptico, nos permite extraer en forma eficiente la energía que el sistema de bombeo ha depositado en los átomos contenidos en la cavidad amplificadora; a raíz de que uno de los espejos del resonador presenta una reflectancia alrededor del 90%,

esto permite que el 10% de los fotones sean transmitidos fuera del resonador óptico, formando un haz de luz monocromático muy intenso (constituido por fotones de idéntica energía) y coherente (todos sus fotones están en fase ya que se produjeron en el proceso de emisión estimulada), además es altamente direccional; éstas son propiedades fundamentales de la luz láser que es generada por el oscilador láser. [2, 9]

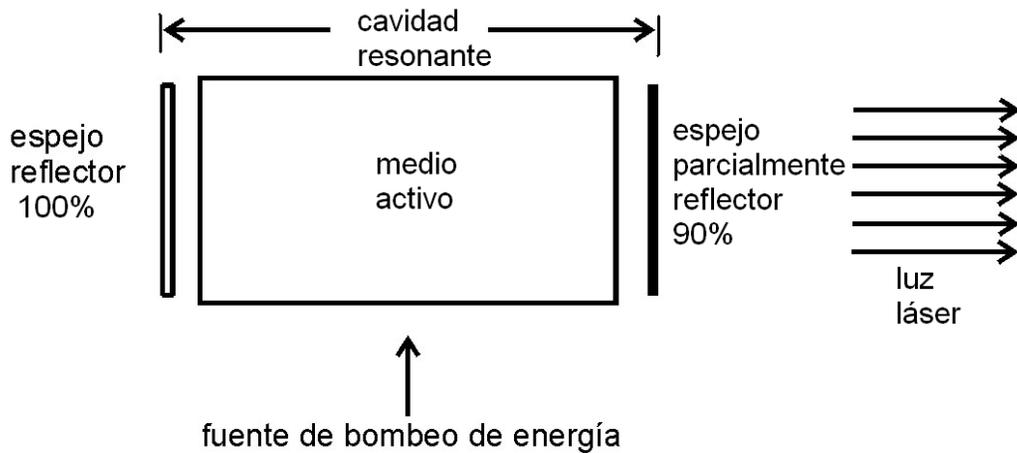


Fig. 1.9. Esquema del proceso láser.

Diodo láser

Los LEDs son dispositivos emisores de luz semiconductores, es decir son diodos emisores de luz debido al resultado de la recombinación de electrones y agujeros en la región activa, donde se forma la unión entre materiales semiconductores de tipo p y de tipo n.

El láser semiconductor también conocido como diodo láser (*LD por sus siglas en ingles*), se inventó en 1962 justo después del desarrollo del led (*diodo emisor de luz*). Hoy desempeña un papel central en la optoelectrónica, sobretodo por su pureza espectral, alta eficiencia, capacidad de alta modulación, larga vida y potencia moderada (hasta 500mW) a pesar de su pequeño tamaño.[4]

Los diodos láser trabajan de una manera similar, con la restricción del empleo de una cavidad óptica para la generación, y por supuesto, conforme al criterio para la emisión estimulada y ganancia láser (un diodo del láser no es simplemente un LED con cavidad).

Considere una simple unión *p-n* manufacturada de un material dopado que tenga exceso de huecos y un material dopado con un exceso de electrones. Cuando una unión es formada con éstos dos materiales en equilibrio, un voltaje generado detiene a los electrones en la banda de conducción del material tipo n de cruzar la barrera y combinarse con los huecos del material tipo *p*. Cuando un voltaje igual a éste potencial se aplica al dispositivo, el flujo de electrones se combina con los huecos, generando fotones en el proceso.

En la mayoría de los diodos láser, se usan materiales semiconductores degeneradamente dopados. Degeneradamente dopados significa que el nivel Fermi (el punto estadístico donde el 50% de los electrones se encontrará) realmente está dentro de la banda de valencia (para el material de tipo p) y banda de conducción (para el material de tipo n). Aplicando un voltaje a través de la unión, genera que los niveles Fermi para cada tipo de material en equilibrio se divida en dos distintos niveles separadamente por la aplicación del voltaje. Los electrones en la banda de conducción del material tipo n ahora permanecen apenas por debajo del nivel Fermi del material, y los huecos en la banda de valencia del material tipo p , permanece apenas por arriba del nivel Fermi del material.

Por lo tanto una inversión se genera ya que hay más electrones en el estado energético superior que en la banda energética inferior.

Por supuesto, los electrones y agujeros involucrados en el proceso de recombinación pueden quedar en cualquiera de éstas bandas, de ésta manera un intervalo amplio de longitudes de onda es posible, con las longitudes de onda más largas.

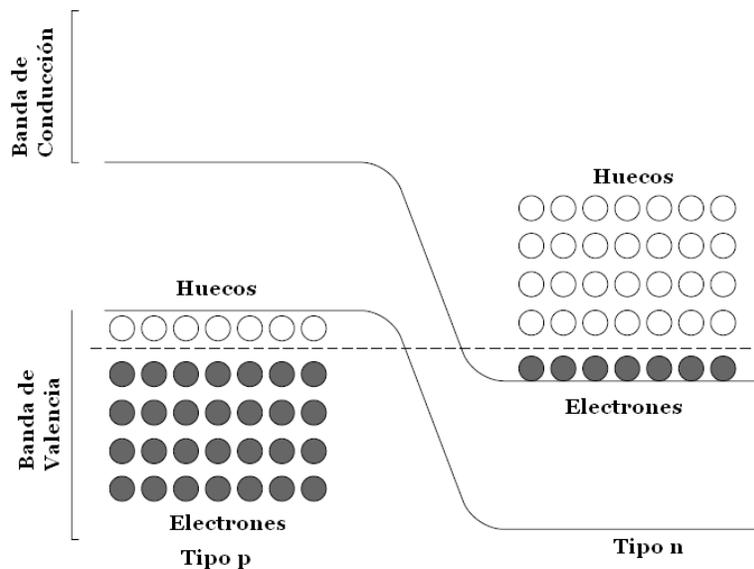


Fig. 1.10. Bandas de Conducción y Valencia en una unión de semiconductores con materiales tipo p y tipo n

La estructura simple en un diodo láser es conocida como homounión del diodo láser, la cual es una simple unión de semiconductores. Esta unión está formada por dos materiales del mismo tipo de banda directa, uno del tipo p y el otro del tipo n , a ésta unión se le conoce como homounión ya que los materiales son del mismo tipo de banda directa. La luz es emitida por la recombinación de pares electrón-hueco en la delgada región formada por la unión de los dos materiales, ésta región se le conoce como región de deflexión. Generalmente los materiales empleados para generar la homounión son Galio y arsénico (GaAs), con cada uno de ellos dopado diferentemente, uno de ellos dopado con una cantidad de material que acepte electrones. Los espejos de la cavidad son fabricados simplemente clivando el cristal en ángulos rectos con el eje del láser. Teniendo un índice de

refracción de 3.7, la reflectividad de cada espejo puede ser calculada a un 33% empleando las ecuaciones de Fresnel. Esto representa una gran pérdida en la cavidad, sin embargo la mayoría de los láseres semiconductores tienen una gran ganancia, que permite una simple configuración. Para mejorar el desempeño puede emplearse un espejo dieléctrico, compuesto por capas delgadas de un cuarto de longitud de onda de materiales de alto y bajo índice de refracción, éste tipo de espejos son empleados en casi todos los diodos láser. Un diagrama de la homounión láser se muestra en la siguiente figura 1.11.

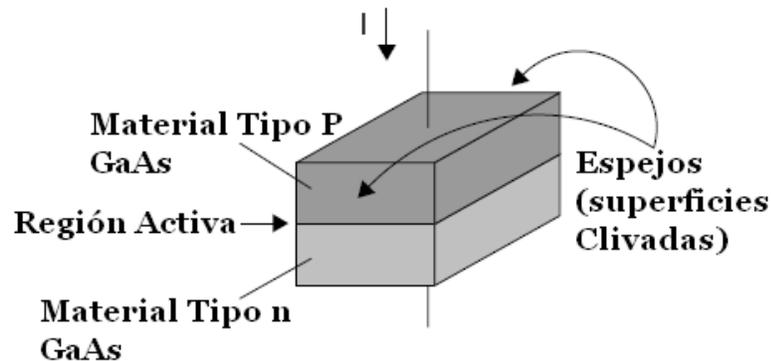


Fig. 1.11. Diagrama de homounión láser de semiconductores con espejos en superficies

Para mejorar la estructura del láser puede ser al confinar la cavidad láser en una guía de onda dieléctrica formada por el propio semiconductor. Tal estructura requiere dos interfaces de diferentes índices de refracción, uno en la parte superior y uno en la parte inferior de la región activa, de esta manera dos uniones son formadas lo que es conocido como heteroestructura del diodo láser, o también conocida como doble heteroestructura, ya que se tienen dos interfaces confinadas. Para obtener diferentes índices de refracción es necesario emplear dos diferentes materiales. El GaAs es generalmente empleado como un material de alto índice de refracción y el aluminio-Galio-Arsénico (AlGaAs) es empleado como un material de bajo índice de refracción. Entre éstas dos capas de materiales está la región activa de GaAs de donde la luz láser es emitida. Las diferencias entre los índices de refracción que ocurren entre cada interfase que confina la luz dentro de la capa de GaAs, la cual drásticamente mejora su eficiencia y más aun, una corriente baja de disparo es necesaria para lograr el incremento en ganancia. La región activa (GaAs) es generalmente de solo 0.1 μm .

Habitualmente una línea de contacto es empleada en la parte superior de la estructura para hacer una conexión eléctrica en el dispositivo. Esto limita el área de la región activa (ya que la corriente no se distribuye sobre toda la superficie de la estructura) lo cual sirve para incrementar la densidad de corriente y emplear menor corriente de disparo. En un diodo real de éste tipo, mas de tres capas son generalmente necesarias y una capa que sirve como una interfase eléctrica entre los contactos metálicos y cada capa de AlGaAs es generalmente empleada. Así una doble heterounión de diodo láser generalmente opera a temperatura ambiente con corrientes de disparo muy bajas de algunas decenas de miliamperes.

El arreglo de doble heteroestructura confina en su intercavidad la luz en solo una dirección (abajo y arriba) de la capa de GaAs, pero una mejora en su desempeño puede ser realizada al hacer que el dispositivo contenga el dieléctrico que forma la cavidad en los cuatro lados de la región activa. En tal arreglo apilando tres capas de una típica heterounión láser está confinado en cada lado de un material tipo n una capa de AlGaAs. La interfase entre el material GaAs en la región activa y el material de bajo índice de refracción en el lado de la capa activa, sirve para confinar la luz en la cavidad láser. Estos láseres son conocidos como de índice guiado, ya que la luz dentro de la cavidad guiada se comporta de manera similar a como en una fibra óptica de índice gradual.

Una nueva estructura en láseres semiconductores es el láser de superficie emisora de cavidad vertical (*VCSEL por sus siglas en ingles*). En un láser de éste tipo, la luz no es emitida del filo del dispositivo sino a través de la superficie completa de la capa superior del cristal semiconductor. Mientras en un diodo láser de emisión de filo se produce un haz de luz de forma elíptica, el cual tiene una alta divergencia, es necesario emplear lentes externos para colimar éste haz, en un VCSEL se produce una haz de luz de mejor calidad en éste sentido.

El VCSEL emplea una capa activa de entre 10 a 100nm como en cualquier diodo láser convencional.

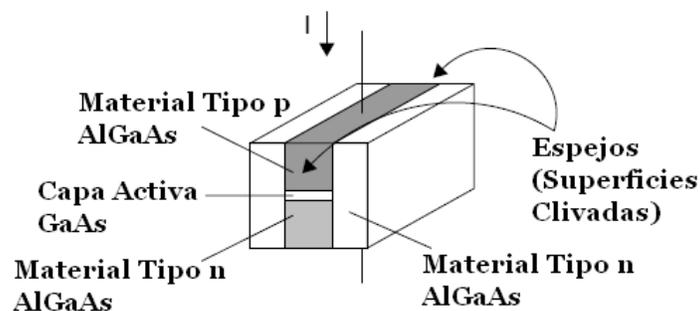


Fig.1.12 Diagrama de homounión láser VCSEL con espejos en las superficies

El resonador óptico es fabricado por debajo y arriba del cristal semiconductor con una pequeña capa activa de baja ganancia, la cavidad óptica puede ser fabricada de múltiples capas de dieléctricos para obtener una alta reflectividad. La corriente en el dispositivo fluye a lo largo del eje óptico a través de electrodos en la parte superior e inferior del dispositivo. La estructura típica del VCSEL se muestra en la figura 1.13

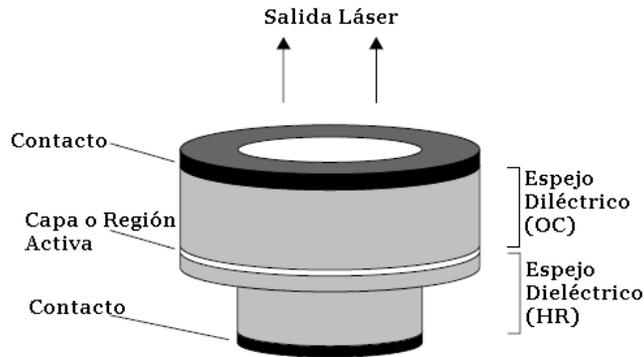


Fig.1.13 Estructura típica del láser semiconductor VCSEL

La salida láser de un VCSEL es de fácil acoplamiento a una fibra óptica, ya que la emisión ocurre en forma de un haz circular el cual es fácil de enfocar, opuestamente a la salida del haz elíptico de un láser de tipo filo.

En los VCSEL generalmente trabajan con corrientes de disparo menores a 1 mA ya que éste dispositivo no necesita de espejos clivados para formar la cavidad ni de depósitos de múltiples capas dieléctricas para formar capas de cristal que funcionen como cavidades por lo que éstos láseres pueden ser fabricados de manera similar a como se realizan los microchips. Dado a su alta calidad de haz de salida así como de su baja corriente de disparo, éste tipo de láser es de los más empleados en los sistemas ópticos de sensado.

También es posible un bombeo óptico de los VCSEL como los LD en algunos materiales de estado sólido. Los diseños de un láser VCSEL generan longitudes de onda a 808nm, a 946 nm y 488 nm. Este tipo de láser permite la inclusión de cristales no lineales dentro de la cavidad para lograr longitudes de onda a la mitad de las generadas. Este tipo de láser es en general igual en principios físicos a los diodos láser por lo que se considera dentro de ésta clasificación. [8]

1.4.- FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS FOTODETECTORES

El concepto de conversión electromagnética en potencia eléctrica puede ser explicado de forma sencilla sin recurrir a los complicados mecanismos de mecánica cuántica en la teoría de funcionamiento de los semiconductores. Se conocen algunos efectos empleados en la conversión de la energía electromagnética en energía eléctrica, los primeros detectores empleaban el efecto fotoeléctrico externo, algunos otros la termoelectricidad. En el efecto fotoeléctrico externo se convierten los fotones en electrones libres empleando un tubo al vacío en el cual existen dos placas paralelas dentro de él, las cuales forman un campo eléctrico formado por un diferencial de potencial. Al incidir sobre una de las placas un fotón, éste desprende un electrón de ella lo que genera que éste electrón viaje de una placa a la otra generando una corriente eléctrica. En el efecto termoelectrico se emplea una resistencia la cual al estar sometida a un cambio de temperatura cambiará su resistividad. [10]

Las fotoceldas que emplean el efecto fotoeléctrico externo ya no son empleadas como sensores o detectores sin embargo aun es el concepto principal empleado en cámaras de televisión, intensificadores de imágenes y conversores de imágenes.

En los sensores modernos se emplea el concepto de fotoemisión, éste efecto es similar al concepto del fotoefecto externo por lo que también al efecto de fotoemisión se le conoce como fotoefecto interno. El principio básico de éste efecto es similar al externo, esto es, excitar electrones para generar una corriente eléctrica. En el efecto fotoeléctrico interno se emplean semiconductores en los cuales al estar excitados sus electrones en la banda de conducción generan que a través del semiconductor pueda fluir una corriente eléctrica.

El efecto de conversión fotoeléctrica a través de la fotoemisión es debido a la propiedad que poseen algunos materiales sólidos para conducir corriente eléctrica. Esta conducción puede ser alterada o empleada para generar portadores libres en los semiconductores para poder conducir.

La radiación electromagnética puede dar la energía que es necesaria para elevar a los electrones de la banda de valencia a la banda de conducción en un semiconductor. Tal energía que se transfiere está cuantizada y ésta energía cuantica está dada por:

$$\omega = \hbar \cdot \nu, \quad (35)$$

donde ω es la velocidad angular, $\hbar = 6.63 \times 10^{-34}$ [Js] y la frecuencia de la radiación es ν . Estas frecuencias son muy altas generalmente se emplea la longitud de onda λ , de ésta forma tenemos:

$$\omega = \frac{\hbar c}{\lambda}, \quad (36)$$

donde c es la velocidad de la luz en el vacío ($c=3 \times 10^8$ [m/s])

Cuando un fotón es absorbido, dos cargas quedan libres y se mueven en sentidos contrarios generando un flujo que puede ser detectado.

La radiación absorbida dependerá de la longitud de onda de la radiación electromagnética.

La interacción entre los fotones incidentes y los portadores de carga dentro del material de estado sólido es el efecto fundamental para el sensado de radiación electromagnética en el intervalo de la luz visible, por lo que la interacción en este sentido significa absorción de la radiación. Sin embargo en la realidad solo parte de ésta radiación será absorbida dentro del material y resultará en una señal eléctrica que puede ser medida. Las propiedades de absorción del material están dadas por las bandas de conducción y valencia en la estructura del material. Para longitudes de onda alrededor del espectro visible (200-2000nm) los semiconductores de germanio, galio, arsénico y silicio son los ideales para la detección de la radiación óptica. Los semiconductores como el galio y el arsénico absorben longitudes de onda alrededor de los 900nm, el silicio arriba de los 110nm y para longitudes de ondas

cercanas o superiores a $1.8 \mu\text{m}$ el mejor es el germanio. Sin embargo, el galio, indio y arsénico son preferentes para el empleo en aplicaciones con fibra óptica. En la figura 1.14 se muestra la eficiencia cuántica de los detectores ópticos típicos de diferentes materiales. [11]

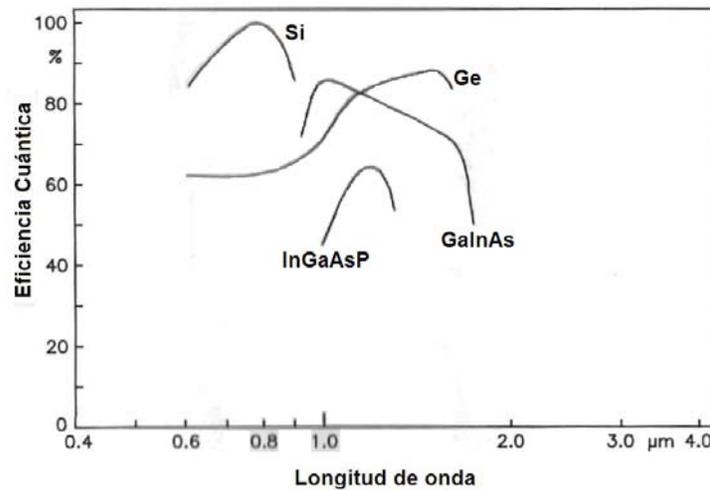


Fig. 1.14. Eficiencia cuántica de los detectores ópticos típicos de diferentes materiales

Existen otros materiales como el sulfuro de cadmio, telurio de cadmio y el sulfato de cadmio o de materiales de tipo ternario o cuaternario con componentes basados en GaAsP o GaInAsP los cuales son muy buenos en la detección del espectro óptico. Con estos materiales son diseñados los fotoresistores o los fotodiodos basados en uniones p-n.

BIBLIOGRAFÍA

- 1.- Edgard L. Safford, “Introducción a la fibra optica y el laser”, Paraninfo, 1988.
- 2.- Eric Udd, “Fiber Optic Sensors, An introduction for engineers ans scientists”, John Wiley & Sons, 1990.
- 3.- Mark Csele, “Fundamentals of Light Sources and Lasers”, John Wiley and Sons Inc. 2004
- 4.- Hech Eugene, “Optica”, Tercera Edicion, Addison Wesley, 1998.
- 5- Jose Martin Sanz, “Comunicaciones Opticas”, Editorial paraninfo, 1996.
- 6.- S.M. Bennet, R. Dyott, “Fiber Rate Gyros as replacements for mechanical gyros”, American Institute of aeronautics and astronautics, AIAA-98-4401, 1998.
- 7.- Malacara, “El laser”, colección la ciencia para todos, Fondo de cultura economica, 2001.
- 8.- W. Goepl, J.Hesse, “Optical Sensors”, Vol. 6. Weinheim, 1992.
- 9.- “El laser”, la ciencia para todos, fondo de cultura economica.
- 10.- Daniel Malacara, “Optica Tradicional y moderna”, Colección la ciencia para todos, Fondo de Cultura economica, 1989.
- 11.- Bahaa E. A. Saleh, Malvin Carl Teich, “Fundamentals of Photonics”, Wiley-Interscience publications.

CAPITULO 2.- SENSORES ÓPTICOS Y FIBRA ÓPTICA

Los sistemas de medición emplean sensores encaminados a magnitudes físicas que se desean detectar y medir, es por ello que en el desarrollo de éstos sistemas de medición es imprescindible contar con sensores que nos ayudaran a realizar la medición adecuada del parámetro físico que deseamos.

En los sensores ópticos existen algunas clasificaciones, dentro de las cuales están los sensores en fibra óptica, éstos sensores tienen poco tiempo de desarrollo comparado con otro tipo de sensores existentes, como los magnéticos, eléctricos, electromagnéticos, químicos, etc., sin embargo debido a las características que ofrecen los sensores en fibra óptica, es posible generar sensores de diversos parámetros físicos con un alto grado de sensibilidad; En muchos casos éstos sensores en fibra óptica superan a sus predecesores basados en otro tipo de fenómeno físico para la detección del mismo parámetro físico.

En este capítulo se hace una revisión de los tipos de sensores en fibra óptica existentes, para después hacer una clasificación de los mismos de acuerdo a los parámetros físicos que se van a sensor.

Los dos principales tipos de sensores en fibra óptica existentes son tanto continuos como puntuales, además de existir una subclasificación en los sensores en fibra óptica continuos los cuales se pueden clasificar de diversas formas, esto puede ser por el tipo de fenómeno aplicado en el sensado, tipo de tecnología, tipo de fibra óptica empleada, el parámetro físico a sensor entre algunos otros, la clasificación más empleada relaciona el parámetro físico a sensor con el tipo de fenómeno o efecto óptico para realizar la detección en la fibra.

El estudio de los sensores en fibra óptica continuos obedece a que el interferómetro de Sagnac en fibra óptica está clasificado dentro de este tipo de sensores.

2.1.- SENSORES

Un sensor, es un dispositivo diseñado para recibir información de una magnitud física y transformarla en otra magnitud, normalmente eléctrica, que seamos capaces de cuantificar y manipular.

Regularmente éstos dispositivos se encuentran realizados mediante la utilización de componentes pasivos para el sensado de la magnitud física. Sin embargo algunos emplean componentes activos como los fotodetectores, fotoceldas, reactivos químicos, entre otros..

La productividad, calidad y rentabilidad para la industria y la sociedad en el siglo XXI han traído una gran demanda en nuevos desarrollos tecnológicos. Conociendo tanto las necesidades presentes como las pasadas, es posible emplear métodos de desarrollo tecnológico para mejorar los métodos ya existentes o proponiendo otros, así es posible reconocer que éstos métodos pueden estar basados en técnicas poderosas empleando información asistida de los sistemas y métodos de producción. Para ser efectivas las mediciones, los componentes electrónicos y de control, así como los subsistemas, en particular los sensores o sistemas de sensado, deben de ser desarrollados paralelamente como parte de un sistema de control. Los nuevos sistemas de sensado y control los cuales son completamente compatibles con los computarizados ofrecen ventajas sobre sus predecesores. Un mayor análisis del conocimiento de las necesidades futuras en sensores, obliga a una gran inversión en desarrollo e investigación en sensores con fácil adaptabilidad a los sistemas de control computarizados.

Intensos esfuerzos por desarrollar sensores con compatibilidad con sistemas de control computarizados comenzaron a mediados de los años 70's; relativamente tarde comparado con el desarrollo de las computadoras y mediciones electrónicas a través de periféricos. El desarrollo de los sensores en años recientes ha sido importante pero su dinamismo es influenciado por el rápido cambio en las tecnologías. El aspecto positivo del avance tecnológico en los sensores, es que el campo está avanzando con rapidez debido a la gran inversión que se realiza en otros campos que influyen en ésta área, como son, las telecomunicaciones, seguridad, medicina, etc. En el aspecto contrario las investigaciones en sensores son distribuidas sobre un campo muy amplio de la tecnología de medición consistente de muchas áreas y un amplio intervalo de dispositivos con un corto periodo de desarrollo. Como consecuencia, no es de sorprender que el área de los sensores y sus tecnologías carezcan de una clara clasificación. Por éstas razones no solo el usuario tiene problemas en la clasificación de los sensores, así como en los tipos de tecnologías, sino también los propios desarrolladores como científicos e ingenieros.

El estado del arte en los sensores es muy amplio para ello es necesario conocer todo el avance en la tecnología, sin embargo éste avance va preparando el terreno para los futuros diseños en sensores y métodos de medición. Una clasificación es dividirlos por el tipo de parámetro físico que emplean para realizar el sensado, aunque no es el único modo de clasificarlo es uno de los más convenientes. En ésta clasificación encontramos principalmente sensores químicos, bioquímicos, térmicos, magnéticos, eléctricos, mecánicos y ópticos. Todos éstos sensores realizan sensado de otro tipo de variables físicas, como por ejemplo los sensores magnéticos que hacen sensados de propiedades físico-

químicas de materiales como conductividad, permeabilidad, etc; los sensores mecánicos hacen mediciones de temperatura, cambios en la estructura química, etc. y en los ópticos se pueden hacer sensado de propiedades químicas, físicas, movimientos, campos eléctricos, magnéticos, etc, para ello es necesario conocer a cada tipo de sensor por sus fundamentos físicos, tipo de tecnología y principalmente en sus aplicaciones.

En muchas aplicaciones un sensor ideal debe tener propiedades muy claras como poco peso, pequeñas dimensiones, bajo consumo de energía, inmunidad electromagnética, soporte al medio ambiente, buen desempeño y principalmente una alta sensibilidad al parámetro de sensado. Conforme la tecnología a avanzado, la necesidad de estos sensores ha ido incrementándose también, en áreas como defensa, investigación, exploración aeroespacial, manufactureras, medicina, construcción, etc. [1]

2.2- SENSORES ÓPTICOS

Los sensores ópticos son empleados ampliamente en aplicaciones técnicas y científicas. El reciente incremento en el uso de sensores ópticos en la investigación, automatización y todo los tipos de sistemas de medición justifican el gran desarrollo e interés de éste, debido a sus propiedades y características de sensado por encima de los otros tipos, es obvio que al tener mejores características de sensado que otro tipo de sensores, la variedad de sensores ópticos es muy amplia y va creciendo de manera muy grande en muchas aplicaciones que solo pertenecían a otros.

Muchos de los sensores desarrollados a últimas fechas poseen un alto grado de complejidad tanto tecnológica y en algunos casos de fundamentos teóricos, sin embargo en el desarrollo de sensores ópticos ha sido necesario ir a la par con el desarrollo de dispositivos ópticos y optoelectrónicos que son necesarios en su implementación. Muchos de estos dispositivos optoelectrónicos no poseían las características necesarias para poder emplearse en los sensores ópticos o algunos de ellos poseían tecnologías muy complicadas y de muy alto costo como los láseres. Sin embargo al existir un avance en éste tipo de dispositivos como las fuentes y en los detectores principalmente ha sido posible avanzar en los sensores ópticos.

Las áreas de oportunidad son muchas y en muchos casos incluye el potencial de reemplazar la mayoría de los sensores ambientales mecánicos, químicos, eléctricos, etc. por sensores ópticos o en fibra óptica, dado a los bajos costos y gran confiabilidad de estos sensores.

Los sensores ópticos han ido gradualmente progresando y logrando sensados y detecciones en muchas áreas las cuales pertenecían a sensores basados en principios físicos diferentes a los ópticos. Los sensores ópticos han logrado sensar magnitudes muy pequeñas de diversos parámetros físicos que otros sensores no fueron capaces de lograr, es por ello que muchos de estos sensores están siendo reemplazados por los sensores ópticos. Otra de las grandes ventajas que ofrecen los sensores ópticos con respecto a otro tipo de sensores, es el bajo costo de estos, ya que en los últimos años debido al gran avance en los dispositivos

optoelectrónicos como fotodetectores, láseres, acopladores ópticos, fibras ópticas, etc. ha sido posible construir los sensores ópticos con alta eficiencia y muy bajo costo.

Una de las ventajas más notables de los sensores ópticos con respecto a otros como los magnéticos, y eléctricos, es la inmunidad electromagnética que poseen. Esto añadido a que a través de fibras ópticas es posible realizar una detección o sensado remoto, y debido a la inmunidad electromagnética que poseen las fibras ópticas, a través del camino entre la cabeza de sensado y el display u observación de la señal no hay una interferencia electromagnética que afecte a la señal con ruido.

Añadido a estas ventajas, los sensores ópticos son de no contacto, lo que nos indica que se pueden realizar mediciones no destructivas de alta precisión.

En muchos dispositivos con sensores ópticos, el medio de detección es el aire, lo que es lo mismo, se emplea como medio de sensado el aire. Con la tecnología desarrollada alrededor de la fibra óptica ha sido posible emplearla como medio de sensado al variar algún parámetro que pueda ser medido a través de ella, de ésta forma una de las ramas de los sensores ópticos son los de fibra óptica.

Algunos sensores ópticos trabajan con un detector como cabeza de sensado en donde se emplea la fibra óptica como medio de comunicación entre la cabeza de sensado y el punto de lectura de información o de procesamiento de la misma. Gracias a que no es necesaria una conversión de la señal de sensado óptica a otro tipo de señal es posible guiar ésta señal a través de la fibra óptica sin tener algún tipo de interferencia y después hacer la conversión, evitando el cambio de la señal de sensado de luz a algún tipo de señal eléctrica con dispositivos eléctricos o electrónicos cercanos a la cabeza de sensado que puedan afectar a la medición. De ésta forma tenemos una ventaja muy superior a algunos tipos de sensores, principalmente los eléctricos o magnéticos los que pueden originar interferencia electromagnética al estar cerca de la cabeza de sensado o en algunos casos no poder realizar la medición deseada. [2]

2.3.- SENSORES DE FIBRA ÓPTICA

La fibra óptica ha revolucionado la tecnología de las telecomunicaciones desde su aparición, esto comenzó con un limitado sistema, en el que su empleo era de poco desempeño debido a baja la calidad y/o características de las fibras ópticas existentes en ese tiempo. El cambio inició con la producción en masa junto con las mejoras técnicas, lo cual resultó en un desempeño superior a bajo costo. Simultáneamente las mejoras y reducción de costos en componentes optoelectrónicos en combinación con la producción en masa para fines comerciales, llevaron un avance similar y a una nueva y emergente evolución en otras áreas, incluyendo el almacenamiento óptico a través de discos compactos, impresoras láser, lectores ópticos, etc. La última faceta fue la combinación de las fibras ópticas para telecomunicaciones con los dispositivos optoelectrónicos para crear una nueva área, los sensores de fibra óptica.

Ventajas de los sensores de fibra óptica
<p style="text-align: center;">Pasivos (Dieléctricos) Transporte de luz Tamaño muy reducido Inmunidad a interferencia electromagnética Buen desempeño a muy altas temperaturas Amplio ancho de banda Resistente al ambiente por vibraciones o transportación Multiplexación eléctrica y óptica Bajo costo Amplia producción comercial para diversas necesidades Acoplamiento con dispositivos optoelectrónicos Pruebas no destructivas</p>

Los sensores en fibra óptica están clasificados en dos tipos: como transductores continuos en los cuales la luz es modulada a través de la longitud de la fibra y en transductores puntuales los cuales son sensibles a un parámetro físico externo en un solo punto.

Los efectos ópticos en fibras son considerados en seis tipos de perturbaciones físicas, éstos son: mecánicos, eléctricos, magnéticos, térmicos, de radiación de partículas de altas energías y perturbaciones químicas. Los sistemas de instrumentación para sensores de fibras ópticas pueden ser categorizados de acuerdo a la forma en la cual la luz es modulada ya sea en fase, amplitud, frecuencia, polarización, tiempo de arribo o tiempo de variación de la modulación. En algunos casos se trata de modulaciones combinadas para lograr un esquema de instrumentación de alta sensibilidad y desempeño.

Los sensores en fibra óptica y su instrumentación representan una gran ventaja debido a su bajo costo debido a la nueva y poderosa tecnología para largas distancias y las telecomunicaciones con lo que es posible realizar sensados remotos. Los primeros trabajos en ésta área comenzaron por aplicar la alta sensibilidad de las fibras a las perturbaciones externas (sensibilidad al cambio de fase, sensado de microcurvaturas en el cableado, sensado del ruido modal) y encontrar formas de minimizar éstos problemas. De ésta forma fue como se comienza a trabajar en los sensores de fibra óptica y ha explorar en nuevas aplicaciones. El crecimiento en ésta área ha sido tal que existen una gran cantidad de nuevos tipos de sensores basados en fibra óptica para muchas y variadas aplicaciones.

La alta sensibilidad de las fibras ópticas para medición y sensado se debe a la posibilidad de la interacción de la longitud de onda de la luz con la variable física a sensar. En el caso de los sensores puntuales, las ventajas de la fibra óptica para instrumentación viene de su insensibilidad a la interferencia y ruido electromagnético, su alto aislamiento eléctrico es otra gran ventaja previniendo riesgos de explosiones por cortos eléctricos en sensores químicos además de la accesibilidad de sensado en lugares de difícil acceso al realizar sensados remotos y sin perturbaciones en las señales de sensado. Con los nuevos y sofisticados sistemas de instrumentación y del empleo de microprocesadores para el empleo de sensores de alto aislamiento en señales de transmisión, es cada vez más necesario mejores técnicas de sensado. [3]

Los sensores en fibra óptica pueden ser clasificados en dos tipos:

- Sensores Continuos
- Sensores Puntuales

En un sensor de fibra óptica continuo o modulado, la luz es modulada a través de la longitud de la fibra por interacción con la variable física. La intensidad de la señal depende de la interacción entre la fibra y el parámetro físico de sensado siendo un ejemplo clásico de un sensor modulado en intensidad, por lo que la intensidad de la luz dependerá directamente de la intensidad del parámetro físico que se está sensando. Para sensores continuos de fibra óptica, la interferometría es una técnica de detección muy empleada debido a su alta sensibilidad y confiabilidad. En muchos casos, los transductores que han sido realizados, emplean fibras dopadas de bajo costo como transductores.

Un gran número de fenómenos ópticos pueden ser empleados para realizar mediciones de otro tipo de parámetros físicos, en la tabla siguiente, se muestran algunos de éstos tipos de parámetros y el efecto óptico empleado en fibra óptica para su medición, lo cual resulta en un cambio en el índice de refracción.

Parámetro físico a ser sensado	Efecto de modulación en fibras ópticas	
F Fuerza mecánica	Tensión birrefringente	n, a
P Presión	Efecto piezo-óptico	n
Δl Deformación	Piezoabsorción	a
Δd Cambio de densidad	Triboluminiscencia	e
E Campo eléctrico	Efecto electro-óptico	n
D Polarización dieléctrica	Electrocromismo	a
i Corriente Eléctrica	Electroluminiscencia	e
H Campo magnético	Efecto magneto-óptico	n
M Polarización magnética	Efecto Faraday	n
	Magneto-absorción	a
T Temperatura	Efectos térmicos	$n, a,$
	Termoluminiscencia	e
		e
Flujo fotónico	Defecto de producción	a, n
Rayos X	Radiación inducida	e
Flujo nuclear	Luminiscencia	
Cambios en composición química	Cambio y absorción del índice	a, n
Transición de fase	Quimiluminiscencia	e

Tabla 1.- Fenómenos ópticos por modulación de la luz en una fibra óptica (n : cambio del índice de refracción, a : cambio de absorción, e : cambio de fluorescencia)

Es claro que hay una gran cantidad de fenómenos ópticos existentes para realizar el sensado de parámetros físicos diferentes. La sensibilidad de cada dispositivo depende de las características de sensado así como en éste caso el tipo de fibra empleada, del material de ésta y de la instrumentación y configuración empleadas.

2.4- SENSORES DE FIBRA ÓPTICA MODULADOS

Para los sensores de fibra óptica continuos o sensores de fibra óptica modulados, existe una división propia dependiendo de la modulación de la luz en la fibra para el sensado, ésta división se muestra en la siguiente tabla [4].

Tipo de modulación	Mecanismo físico	Detección	Principales limitaciones	Ejemplos típicos
1.- Fase (coherencia)	Interferencia entre la señal de referencia y la señal de sensado o entre los diferentes modos de propagación en fibras multimodo	Detección de cambio de fase	-Ruido e inestabilidad láser -Medición de muy pequeños cambios de fase - Eliminación de otros efectos indeseados	-Giroscopio de fibra óptica e hidrófono -Calibración multimodo
2.- Amplitud	Modulación de la luz transmitida por absorción, emisión o cambio en el índice de refracción	Transductores analógicos o digitales de detección en intensidad óptica	Normalización de las variación en la intensidad de la fuente y perdidas por conexiones	-Perdidas por microcurvaturas -codificación óptica
3.- Longitud de onda	Dependencia en la variación espectral por absorción, emisión y cambio en el índice de refracción	Comparación de longitudes de onda, análisis espectral	Dispositivos de análisis espectral de alta sensibilidad. Perdidas de longitud de onda en el material	- Mediciones de temperatura
4.- Tiempo de resolución o modulados en el dominio del tiempo	Tiempo de transito en un lazo cerrado de fibra óptica por	Tiempo de retardo a través de pulsaciones	Dispersión modal en las fibras.	- Mediciones de tiempo de decaimiento de materiales pesados

	reacción al parámetro exterior.			- Medición de radiación nuclear
5.- Polarización	Cambio en el vector de polarización óptico.	Análisis de polarización y comparación de amplitud	Birrefringencia espontánea e inherente en las fibras.	- Medición de campos eléctricos y magnéticos - Medición de corrientes y voltajes eléctricos

Sensores de fibra óptica modulados en fase.

Algunos de los sensores en fibra óptica con mayor sensibilidad son los sensores modulados en fase, éstos sensores están principalmente construidos con arreglos interferométricos, en los cuales, el cambio de fase óptico es producido en uno de los brazos del arreglo interferométrico por interacciones con la variable física de sensado y posteriormente comparada con el brazo de referencia.

El cambio de fase $\Delta\Phi$, inducida por una fuerza externa en la fibra, es la suma en el cambio de longitud L de la misma así el cambio en la constante de propagación $\Delta\beta$:

$$\Delta\Phi = \beta\Delta L + L\Delta\beta, \quad (37)$$

y el cambio en la constante de propagación es:

$$\Delta\beta = \frac{d\beta}{dn} \Delta n + \frac{d\beta}{da} \Delta a. \quad (38)$$

Este cambio en la constante de propagación está relacionado con el cambio en el índice de refracción Δn y del radio del núcleo de la fibra Δa . El cambio de fase es la suma de tres términos, pero en general el cambio en el índice de refracción y del radio de la fibra son muy pequeños por lo que tienden a ser cero, de ésta forma el efecto predominante es el cambio de longitud en la fibra óptica $\beta\Delta L$. [5]

Sensores de fibra óptica modulados en amplitud.

Los sensores de fibra óptica modulados en amplitud (intensidad), son empleados frecuentemente para el sensado y medición de desplazamientos, esfuerzos y presión. Dependiendo de las características del sensor y del esquema empleado, es posible realizar sensados de otras variables físicas. Existen dos técnicas de sensado a través de sensores de fibra óptica modulados en amplitud. En la primera técnica la luz existente en una o más fibras, sale de ésta y es modulada en el medio fuera de la fibra, para ser nuevamente colectada por la misma u otra fibra. El medio en el cual se realiza la modulación puede

absorber la luz en intensidad uniformemente o en un específico ancho espectral debido al cambio del índice de refracción de éste medio. Cuando la reflexión de la luz es empleada para coleccionarla por la misma fibra de donde salió, el mecanismo de transducción puede incluir movimiento de la superficie tal que la luz capturada por la fibra de colección es modulada proporcionalmente a la variación del espacio entre la fibra y la superficie reflejante, pero no es completamente necesario que la luz salga de la fibra para ser modulada, ya que si se cambia el índice de refracción del recubrimiento en una parte del núcleo de la fibra, la luz se modula dependiendo del cambio del índice de refracción en el recubrimiento y de las características de éste, sin embargo éste tipo de sensor también es conocido como sensor de fibra óptica puntual modulado en amplitud.

La segunda técnica de sensores de fibra óptica modulados en amplitud emplea la modulación por microcurvaturas. Las deformaciones mecánicas en la fibra óptica perpendiculares a su eje, causan un reordenamiento en el orden de los modos ópticos y pérdidas proporcionales a ella. La intensidad de la luz en el núcleo es por lo tanto proporcional a la deformación de la fibra y la porción de luz transmitida dentro del recubrimiento tiende a ser radiada o absorbida. [5]

Sensores de fibra óptica modulados en longitud de onda.

Pocos sensores de fibra óptica modulados en longitud de onda han sido desarrollados. Algunos sistemas de haces duales han sido realizados en donde una longitud de onda es empleada para la medición y otra es empleada para normalizar.

Un práctico sensor de vibraciones para un rotor de un generador ha sido desarrollado empleando dos filtros colorantes en un arreglo de obturadores, con dos parejas de fuentes LED.[6]

Otros sensores basados en sensores de fibra óptica modulados en longitud de onda han sido probados para sensado de temperatura empleando la banda de valencia de los semiconductores. La banda de valencia de los semiconductores (Ga, As, Cd, S, Se), está situada a una longitud de onda conveniente para el uso de las fuentes LED, pero son limitadas a temperaturas moderadas.[4]

Sensores de fibra óptica modulados en polarización.

El conocido efecto de polarización, dado por los campos eléctricos y magnéticos de la luz es una de las características principales de la luz; empleado para el desarrollo de sensores de fibra óptica de ambos tipos, tanto modulados como puntuales.

El sensado de campos magnéticos para el monitoreo de flujo de corriente de una línea de alto voltaje puede ser determinado con un núcleo de fibra óptica monomodal enrollado en el cable donde circula la corriente. Esto es posible debido a la rotación del plano de polarización de la luz dentro de la fibra, empleando el efecto Faraday, éste es el producto de la integración del campo magnético en la longitud de la fibra. En algunos trabajos realizados en últimas fechas, se propone que la polarización óptica medida en el dominio

del tiempo, a través de métodos de reflectometría que son óptimos para el sensado del fenómeno de dependencia en polarización en fuentes de interferencia en las líneas de transmisión de energía eléctrica, en vibraciones y cambios de temperatura.[4]

Los sensores de fibra óptica modulados en polarización están limitados por las características propias que poseen las fibras, como fatiga, birrefringencia, no circularidad del núcleo, etc.

Con el desarrollo de nuevas técnicas de fabricación en fibras y con un mejor conocimiento del comportamiento de la polarización de la luz en las fibras y los posibles efectos, es posible mejorar algunos de los dispositivos existentes basados en ese efecto.

Sensores de fibra óptica modulados en tiempo.

Algunos ejemplos interesantes de sensores en fibra óptica modulados en tiempo son de decaimiento o fluorescencia incorporado en una pequeña gota en un extremo de la fibra, entonces el material es excitado por la longitud de onda correspondiente para activar el efecto correspondiente y realizar la medición. El sistema es independiente de las pérdidas de las fibras y el sensor es absolutamente calibrado dependiendo de la fluorescencia o tiempo de decaimiento del material.

Algunos dispositivos han sido diseñados empleando un pulso circulatorio en una fibra óptica con una reacción electrónica. Un pulso de luz es bombeado en la fibra y el regreso del pulso es detectado amplificándolo y rebombeándolo, así la fibra forma parte de un sensor electro-óptico de fase, similar a una línea de retardo. Los dispositivos diseñados a través de ésta técnica son mucho menos sensibles que un sistema interferométrico de fibra óptica, pero con una instrumentación menos sofisticada y complicada.

La investigación y desarrollo de nuevos sensores en fibra óptica, obedecen a necesidades reales y precisas, aunque el estudio de los fenómenos ópticos ha tenido un gran avance, mucho de éste trabajo permanece sin ser terminado en transductores, sensores o dispositivos de instrumentación con alto desempeño, sensibilidad y bajo costo, más aun, el diseño y desarrollo de nuevos sistemas ópticos y sistemas de medición, deben de mejorar a los existentes en varias magnitudes de sensibilidad, además de eliminar errores de sensado y ruido inherente a la señal de sensado. Con los nuevos sistemas de instrumentación con gran estabilidad y con el incremento de la disponibilidad de nuevas y mejores fibras y fuentes, el campo en los sensores basados en fibras ópticas crecerá, así como su instrumentación. [4]

2.5.- SENSORES DE FIBRA ÓPTICA PUNTUALES

Un sensor de fibra óptica puntual sensa la interacción de un parámetro físico externo en un punto discreto. Este tipo de sensor puede ser construido de un material distinto a la fibra o la fibra puede ser tratada especialmente para lograr la sensibilidad del parámetro deseado en el punto deseado.

BIBLIOGRAFÍA

- 1.- W. Goepl, J.Hesse, “Optical Sensors”, Vol. 6. Weinheim, 1992.
- 2.- S.M. Bennet, R Dyott, “Fiber Optic Rate Gyros as replacement for mechanical gyros”, American institute of aeronautics and astronautics, AIAA-98-4401.
- 3.- Eric Udd, “Fiber Optic Sensors, An introduction for engineers ans scientists”, John Wiley & Sons, 1990.
- 4.- A.L. Harper, “ Principles of optical fibre sensors and instrumentation”, Mesurement and control, Vol. 15, pp. 143-151.
- 5.- Charles M. Davis, “ Fiber optic sensors: an overview”, Optical engineering, vol. 24 (2), 1995.
- 6.- Optical measurement system, 1979, UK. Patent 2 016 684 A.

CAPITULO 3.- EL INTERFERÓMETRO DE SAGNAC COMO SENSOR DE MOVIMIENTO ANGULAR

Los sensores existentes están basados en fenómenos físicos para realizar la detección del parámetro físico a sensar. En el caso de los sistemas de sensado óptico estos fenómenos están orientados a variaciones en algún parámetro de la luz. Por ejemplo cambios en la polarización, amplitud o intensidad, longitud de onda, cambios en fase, entre otros. Para ello existen estudios muy orientados a conocer como se relacionan éstas variaciones en la luz relacionadas con fenómenos físicos y como son aplicados eficientemente en los sensores que aplican éstos fenómenos en la detección que originó éste cambio. Existen una gran cantidad de fenómenos asociados a la luz como son el efecto Faraday, dispersión, interferencia, absorción, difracción, etc. Así mismo existen áreas muy especializadas en el estudio de cada uno de éstos fenómenos y sus aplicaciones en sensores.

Un área con un gran desarrollo en dispositivos de sensado aplicando un fenómeno ondulatorio es la interferencia óptica. Bajo éste estudio se encuentran un gran número de sistemas de sensado y procesamiento de señales ópticas que ayudan en el desarrollo de sistemas de sensado y medición. Estos sistemas conocidos como interferómetros aplican la interferencia de la luz como fenómeno físico.

En ésta tesis se trabajó con el fenómeno de interferencia óptica, por lo que a lo largo de éste capítulo se hace un estudio de los interferómetros, cuyo propósito básico es la de aplicar el fenómeno de interferencia y poder hacer mediciones debido al cambio de fase generado por alguna variación en la luz.

Primeramente se hace un estudio del interferómetro de Sagnac en sus bases teóricas, posteriormente tenemos un estudio más orientado al interferómetro de Sagnac en óptica de volumen y las modificaciones realizadas a éste diseño para alcanzar el objetivo de mejorar la sensibilidad de éste dispositivo de sensado de movimientos angulares. De la misma forma se hace un estudio del interferómetro de Sagnac en fibra óptica y como es que éste dispositivo es empleado como un sensor de movimientos angulares de muy alta sensibilidad. Igualmente se hace un estudio de la propuesta de mejora en sensibilidad de éste diseño en fibra óptica del interferómetro de Sagnac, siguiendo el propósito de generar un instrumento de alta sensibilidad con una adecuada instrumentación que nos permite prescindir de un elemento en el interferómetro, con la finalidad de disminuir su complejidad y costo, con aplicaciones a otro tipo de sensores de los cuales se discute en el capítulo final.

Finalmente al término del estudio de las mejoras hechas a éstos interferómetros de Sagnac en fibra óptica y en óptica de volumen, se hace un estudio de la instrumentación desarrollada para hacer la detección de señales entregadas por cada sistema interferométrico, mostrando cada una de las etapas generadas con el propósito de obtener una señal con el menor ruido posible.

3.1- EL INTERFERÓMETRO DE SAGNAC, PRINCIPIOS FÍSICOS

El interferómetro de Sagnac es un sensor electromagnético de rotación absoluta, que muestra las posibilidades de emplearlo como un sensor del movimiento absoluto angular, la descripción de su funcionamiento es muy sencilla; supongamos un observador ubicado en una “caja negra”, el cual no tiene forma de decir si existe un movimiento uniforme de traslación. Un estado de movimiento de traslación puede ser establecido sólo a través de una observación de un cambio de posición de la caja con respecto a otros objetos; esto requiere que el observador extienda su observación fuera de la caja negra. Definimos como caja negra a un punto encerrado donde no hay observación fuera de sí mismo. Las observaciones realizadas dentro de ésta caja negra son conocidas como observaciones intrínsecas.

La equivalencia física de todos los movimientos uniformes de traslación establece un marco referencial de espacio y tiempo conocido como referencia inercial. Cualquier marco de referencia que no es inercial es de alguna manera un marco referencial de aceleración. La aceleración es observable dentro de la caja negra como una fuerza mecánica. La presencia y naturaleza de una fuerza mecánica dentro de la caja negra nos lleva a establecer que el marco de espacio tiempo de la caja deriva de un marco inercial, sin la observación de objetos externos.

La fuerza mecánica en la caja puede ser de origen gravitatorio o cinemática. En principio el tipo de fuerza que se ejerce sobre la caja negra puede ser determinada por medios intrínsecos. Una caja en reposo en la superficie de la tierra, está sujeta puramente a un campo gravitacional, las líneas de fuerza de gravedad convergen en el centro de la tierra. Una caja situada en algún punto en la periferia de un disco en rotación, también exhibe una fuerza interna y las líneas divergen del eje de rotación. Un observador en movimiento dentro de la caja en el disco en rotación, está sujeto a una fuerza de Coriolis. La fuerza de coriolis está ausente en el caso de una fuerza puramente gravitacional. Un movimiento de aceleración lineal no genera una fuerza de Coriolis y sus líneas de fuerza convergen en un punto en el infinito a diferencia de las líneas de fuerza de un campo gravitacional, de ésta manera la naturaleza de la aceleración en un punto dentro de la caja negra, puede ser establecido explorando la vecindad de ese punto. Un estado de aceleración cinemática está asociado con un estado de movimiento absoluto con respecto a todos los marcos de referencia.

Dispositivos de alta sensibilidad han sido desarrollados para la medición de aceleración mecánica. El péndulo es empleado para medir la gravedad de la tierra; el péndulo de Foucault, puede ser empleado para medir la velocidad de rotación de la tierra. Las aceleraciones lineales pueden ser medidas a través del cambio diferencial de la frecuencia. El giroscopio es uno de los dispositivos más sensibles que responden a cambios en su marco de referencia con respecto de un marco inercial. El giroscopio es ampliamente usado en sistemas de navegación.

Los métodos mecánicos para medir aceleraciones comparados con los métodos ópticos o electromagnéticos han quedado muy alejados de su desempeño.

La teoría sobre el funcionamiento del efecto Sagnac y su experimentación, han sido establecidas por Laue (1920), Metz (1952) y por Zernike (1947). La naturaleza de la óptica geométrica del efecto permite un simple análisis cinemático el cual fue tratado por Zernike. 

El principio básico del interferómetro de Sagnac se muestra en la figura 3.1. El haz de luz proveniente de la fuente A es dividida por C en un haz que circula en el lazo en sentido horario formado por los segmentos C-D3-D2-D1-C y un haz que circula en el lazo en sentido antihorario formado por los segmentos C-D1-D2-D3-C. Los dos haces de luz son recombinados en C así la interferencia es observada en B. Cuando el sistema interferométrico completo incluyendo fuente de luz y detección de la interferencia es sometido a una rotación con un movimiento angular, la interferencia de éstos puede ser sensada por el detector.

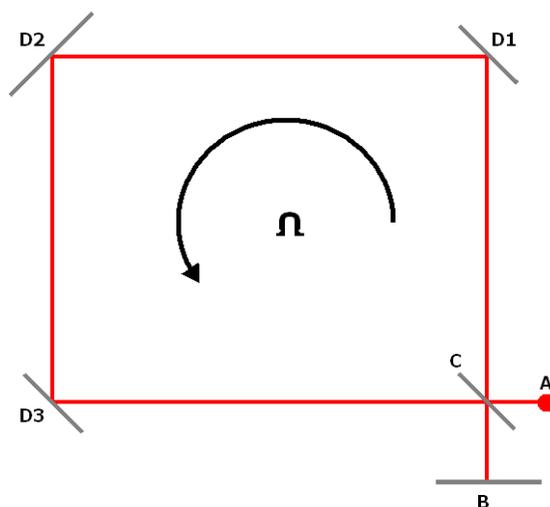


Figura 3.1 Esquema del interferómetro de Sagnac

El movimiento angular al que se somete el sistema interferométrico completo se encuentra en el mismo plano que el que forman los haces de luz en el lazo interferométrico. Al existir el movimiento angular en el sistema completo el punto donde se vuelven a recombinar ya no se encuentra en el mismo lugar en donde fueron divididos. Esto implica que el haz de luz que viaja en el mismo sentido de giro al que se le aplicó al sistema, tendrá una distancia mayor que recorrer para llegar al punto de recombinación, y por el contrario, el haz que viaja en sentido contrario al sentido de giro que se aplicó al sistema, viajará una distancia menor para llegar al punto de recombinación. La diferencia de distancias que viajan ambos haces al existir un movimiento angular, provoca un desfase angular entre ambos al llegar al punto de recombinación, esto debido a que el camino óptico recorrido por ambos tiene diferente distancia y por lo tanto se realiza el recorrido en tiempos diferentes. [2]

El desfase angular que sufren los haces entre sí, está determinado por la ecuación:

$$\Delta\phi_R = \frac{4\omega}{C^2} A \cdot \Omega, \quad (39)$$

donde A es el área encerrada por el camino óptico, C es la velocidad de la luz en el vacío, ω es la frecuencia angular del haz de luz, Ω es la velocidad angular a la que fue sometido el sistema completo. En muchos casos el empleo de la frecuencia angular ω de la luz no es el más apropiado, por lo tanto la ecuación en términos de la longitud de onda de la luz es:

$$\Delta\phi_R = \frac{8\pi A}{c\lambda} \Omega \quad (40)$$

El tiempo de arribo de ambos haces de luz al punto donde vuelven a recombinarse es diferente, la diferencia de tiempo se puede obtener a través de la ecuación:

$$\Delta t_v = \frac{4A\Omega}{c^2}. \quad (41)$$

3.2- MODIFICACIONES AL INTERFERÓMETRO DE SAGNAC EN ÓPTICA DE VOLUMEN.

El efecto Sagnac fue demostrado en 1913 por el francés George Sagnac, el nombre del efecto se le atribuye debido a que demostró físicamente su funcionamiento muy a pesar de las carencias tecnológicas de su época. El propósito del diseño era demostrar la existencia de un centro en el universo y el movimiento de la tierra con respecto de ese supuesto centro, sin embargo nunca se pudo realizar una demostración de tales objetivos. Este hecho llevo a que el interferómetro de Sagnac fuera una simple curiosidad en la física, hasta la invención del láser en los primeros años de la década de los 60's. Los primeros interferómetros de Sagnac eran de tamaños muy grandes para poder observar claramente el efecto. En 1925 Michelson y Gale realizaron un interferómetro de Sagnac gigantesco de mas de 2 km de perímetro para incrementar su sensibilidad, con éste gigantesco diseño fueron capaces de medir la velocidad angular a la que gira la tierra, de ésta forma el empleo del efecto Sagnac como un dispositivo razonablemente compacto no era factible. [3]

El esquema básico del interferómetro de Sagnac emplea elementos ópticos de volumen, esto es, espejos, prismas (divisor de haz), fuente coherente y pantalla. En la figura 3.2 se muestra el esquema básico del interferómetro de Sagnac con los elementos que lo componen.

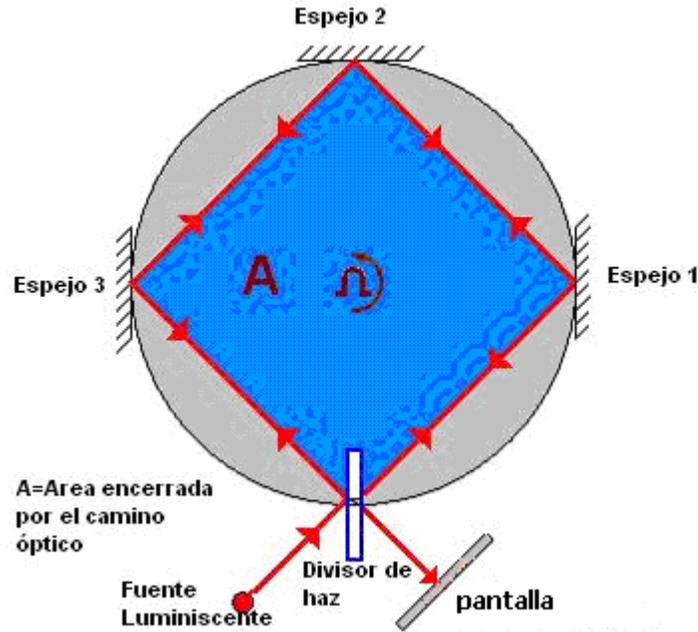


Figura 3.2. Esquema clásico del interferómetro de Sagnac.

Este interferómetro empleaba una fuente de luz coherente, para esa época el láser todavía no existía ni los fotodetectores, por lo tanto se empleaba una pantalla para determinar la interferencia que sufrían los haces al recombinarse debido a movimientos angulares, también el divisor de haz no tenía la calidad de los que ahora existen por lo tanto éstas eran limitantes muy grandes para poder emplear a éste interferómetro como un sensor de movimientos angulares.

Conforme se fueron desarrollando nuevos dispositivos ópticos, fue posible retomar la idea del interferómetro de Sagnac en un sensor de movimientos angulares. Este dispositivo dio un salto muy grande debido a la invención de las fibras ópticas, láseres y fotodetectores para ser desarrollado ampliamente con éstas nuevas tecnologías; esto llevó a que el interferómetro en óptica de volumen no fuera estudiado ampliamente y sí el interferómetro en fibra óptica. Sin embargo las bases teóricas de ambos interferómetros de Sagnac son las mismas y pueden ser explicados de la misma forma y con las mismas ecuaciones. [4]

En varios trabajos sobre sensores de diversas magnitudes físicas es empleado el interferómetro de Sagnac en óptica de volumen, debido a la interacción directa con los haces en contrapropagación que se requieren para la detección del parámetro deseado.

Gracias al gran avance de los dispositivos optoelectrónicos como láseres y fotosensores principalmente, ha sido posible alcanzar sensibilidades que antes eran imposibles sin estos dispositivos en el interferómetro de Sagnac en óptica de volumen. [5]

Debido a la necesidad de emplear el interferómetro de Sagnac en óptica de volumen en otro tipo de sensores, es necesario alcanzar sensibilidades todavía mayores a las que el esquema básico propuesto por Sagnac puede entregar.

En este trabajo de tesis se muestra como ha sido posible alcanzar sensibilidades mayores a las que se pueden lograr con el esquema propuesto por Sagnac para el interferómetro en óptica de volumen, modificando el esquema básico y proponiendo un método de detección de la interferencia entre los haces, formando un patrón interferométrico para el sensado y no con el cambio en intensidad que se emplea en el esquema básico.

El efecto Sagnac es aplicable para cualquier área cerrada, por lo que no necesariamente se debe de tener una forma regular. Por ejemplo el haz puede ser dividido en dos y viajar formando un camino óptico con forma de cuadrado, o puede ser totalmente irregular, es por ello que podemos afirmar que el efecto es independiente del camino óptico formado por los haces, pero si dependiente del área contenida por ellos. Esto también puede ser observado de las ecuaciones que modelan el fenómeno ecuaciones (40) y (41), ya que en ellas observamos que sólo depende de la longitud de onda de la fuente de luz, del movimiento angular al que es sometido el sistema y del área que encierran los haces en contrapropagación y no de la trayectoria que éstos sigan. Es a partir de éste hecho que se puede realizar un sistema interferométrico en el cual, la forma del área encerrada por los haces puede tener cualquier forma geométrica, en la cual se puedan disminuir las dimensiones totales del sistema, esto es, ubicando algunos elementos dentro del área que encierran los haces en contrapropagación y no fuera como es en el esquema básico, éstos elementos pueden ser la fuente de luz, el divisor de haz y la etapa de detección.

En el sistema interferométrico propuesto en éste trabajo, los elementos del mismo están en una ubicación diferente a la configuración tradicional del interferómetro de Sagnac.

El esquema del sistema construido se muestra en la figura 3.3, éste esquema es similar al sistema interferométrico ideal propuesto por Sagnac, el cual consiste de una fuente luminiscente, un divisor de haz, y algunos espejos que forman el camino óptico.

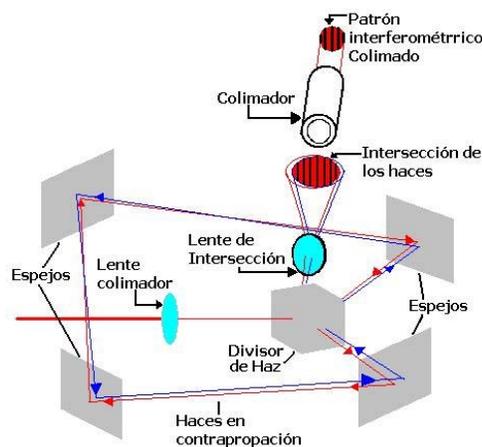


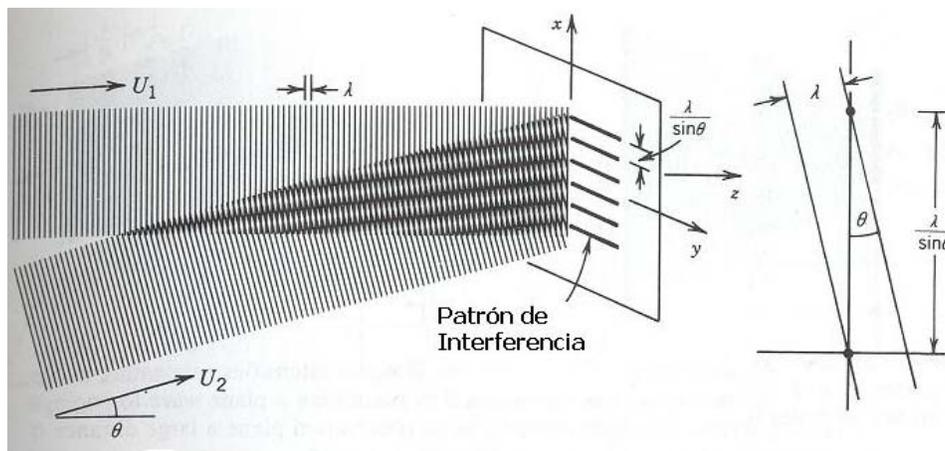
Fig. 3.3. el interferómetro de Sagnac modificado para la formación de un patrón interferométrico.

En la figura 3.3 podemos observar que el interferómetro consiste en una fuente de alta coherencia (láser a 670 nm), un divisor de haz (50-50), espejos (95% de reflexión), colimador. Posteriormente un fotodetector y la etapa de acondicionamiento de señal.

En éste esquema propuesto, se mantienen los mismos elementos del esquema original, basado en los principios básicos del interferómetro de Sagnac. Sin embargo en ésta primera implementación, se hace notar que ahora los haces en contrapropagación que viajan a través del lazo interferométrico, al llegar al lugar donde se recombinan, lo hacen con un ángulo diferente al que se propone en el esquema original.

En el esquema original de Sagnac los haces de luz al recombinarse tienen un ángulo muy cercano a 90° , esto ocasionaba que la medición del movimiento angular se realizara midiendo directamente el cambio en intensidad del haz de salida que se formaba por la interferencia de los haces en contrapropagación. Al cambiar la forma regular del esquema original, ahora los haces se recombinan con una ángulo diferente a 90° , éste ángulo es muy cercano a 1° en el sistema propuesto, ya que en éste caso no se pretende medir la intensidad de la interferencia de luz, sino generar un patrón interferométrico a través del cual se pueda medir el movimiento angular que sufre el sistema.

La formación del patrón interferométrico está basada en la interferencia de dos ondas planas con un ángulo entre ellas. El número de líneas de interferencia dependerá del ángulo entre las ondas planas y la longitud de onda. En la figura 3.4 siguiente se muestra como se forma el patrón interferométrico a partir de dos ondas planas oblicuas y como cambia el número de líneas de interferencia al cambiar el ángulo entre las ondas planas. [6]



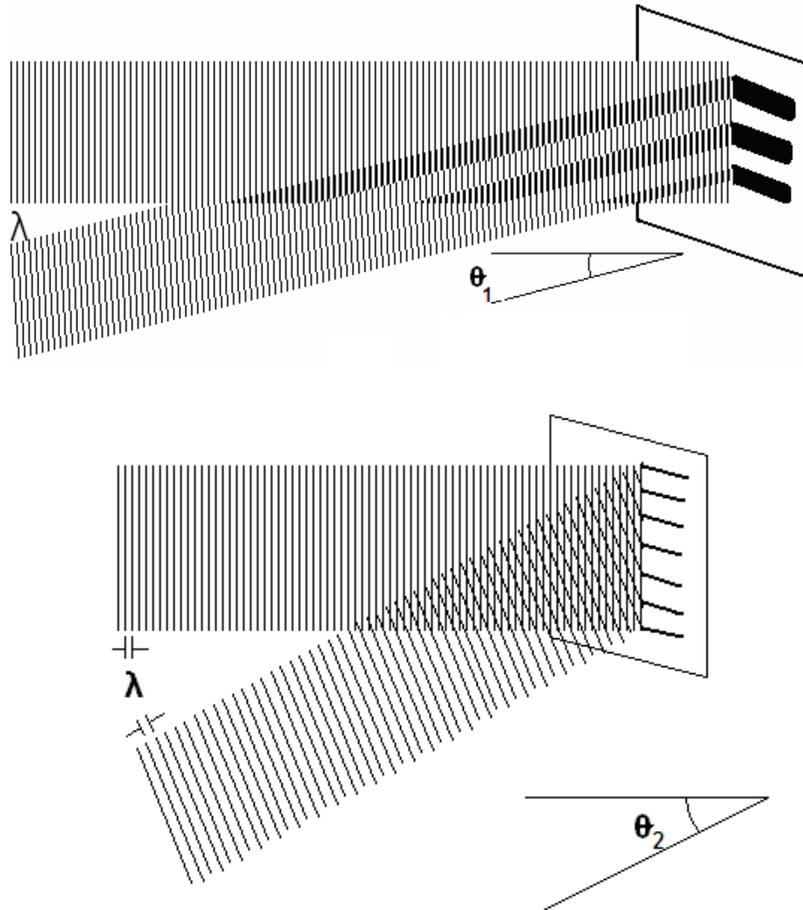


Fig. 3.4. a) Formación del patrón interferométrico con ondas planas. b) tres líneas de interferencia formadas, con un ángulo θ_1 entre los dos haces incidentes, c) 7 líneas de interferencia formadas, con un ángulo θ_2 entre los dos haces incidentes. Donde $\theta_1 < \theta_2$ y con igual longitud de onda (λ).

Con ésta modificación en el esquema original, ahora se propone realizar la medición de la señal a través de un método de transducción óptico-electrónico para incrementar la sensibilidad al sistema y así evitar una medición directa de la intensidad en la interferencia de los haces.

La propuesta de detección y transducción óptico-electrónica, está basada en el cambio del patrón interferométrico formado, esto es, cuando existe un movimiento angular, el patrón cambia de posición su alineación de interferencia, la posición del patrón varía según los movimientos angulares de lado a lado dependiendo de la dirección del movimiento angular, esto es, las líneas de interferencia constructiva se mueven hacia la derecha sí el movimiento angular que sufre el sistema es en sentido de las manecillas del reloj, y viceversa para el movimiento en sentido contrario a las manecillas del reloj, las líneas de interferencia se moverán al lado izquierdo. Este fenómeno físico está basado en la interferencia de los haces y el movimiento angular del sistema.

El aparente movimiento de las líneas de interferencia del patrón interferométrico formado por la recombinación de los haces en contrapropagación en el interferómetro, está basado en el ángulo de interferencia de los haces para formar el patrón. En un estado estable (sin movimiento) el sistema interferométrico formara el patrón interferométrico sin cambios, sin embargo al someter al sistema a un movimiento angular, los haces se desfasan lo que ocasiona que el patrón de interferencia tenga las mismas características, pero las líneas de interferencia no se localizarán en el mismo lugar a cuando el sistema está en estado estable. Este fenómeno se muestra en la figura 3.5.

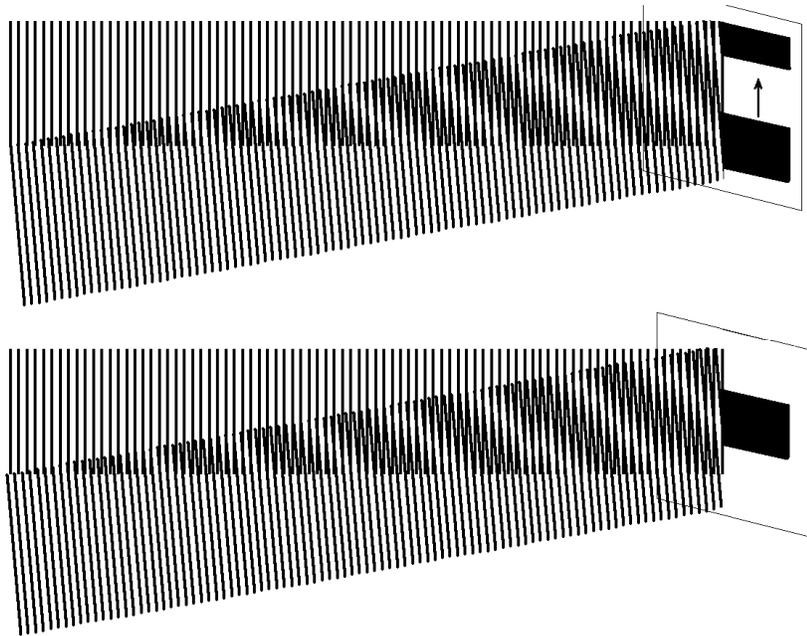


Fig. 3.5. Formación del patrón interferométrico sin movimiento y con movimiento para las líneas de interferencia.

Usando ésta idea del movimiento de las líneas de interferencia del patrón interferométrico, se emplea un método para la detección de movimientos angulares con el interferómetro de Sagnac. Usando el efecto navaja, empleamos un colimador en el patrón interferométrico, así solo tomamos una parte del patrón interferométrico, posteriormente con éste efecto, dividimos una de las líneas de interferencia constructiva  la mitad con una navaja y de la misma manera una línea de interferencia destructiva con otra; con este método es posible detectar un pequeño cambio en el patrón interferométrico debido a un movimiento angular, ya que al existir un movimiento, el patrón interferométrico sufre un aparente movimiento de sus líneas de interferencia. El uso del efecto navaja obedece a que al tomar la mitad de una línea clara y una oscura, estamos tomando sólo la mitad de la intensidad del patrón  De ésta manera al existir un movimiento en sentido antihorario, las líneas de interferencia se moverán hacia la derecha y la cantidad de luz que tengamos ahora será mayor, lo mismo para un giro en sentido horario, las líneas de interferencia se moverán hacia la izquierda, y la cantidad de luz será menor. Con ello podemos discriminar el sentido de giro y la intensidad del movimiento. En la figura 3.6 se muestra como se realiza ésta detección. [7, 8]

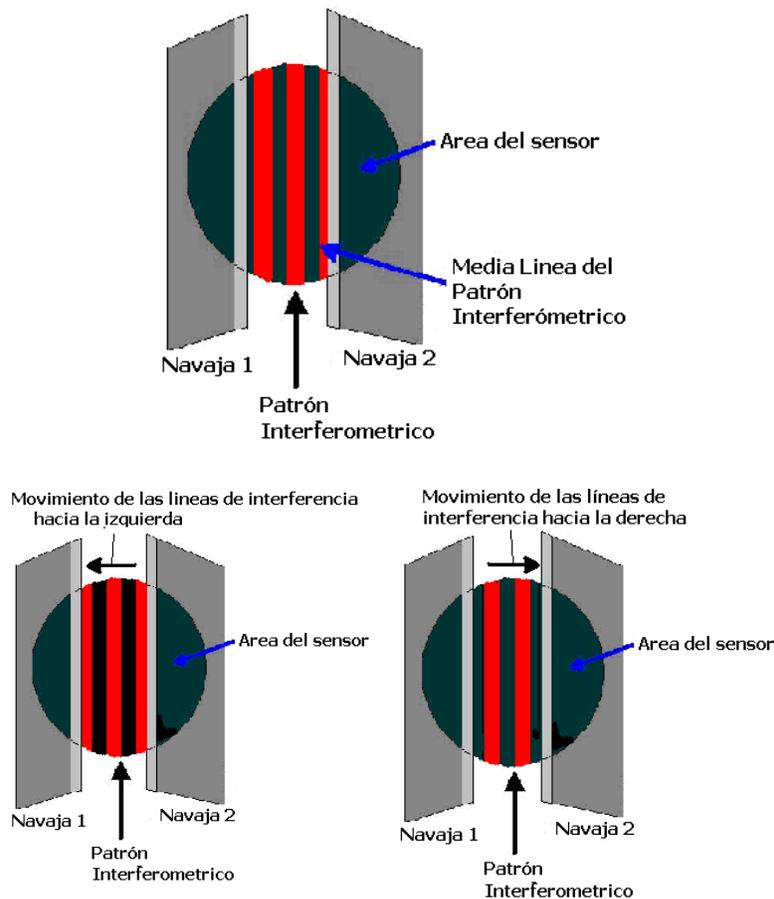


Fig. 3.6. Patrón interferométrico con las navajas, mostrando los movimientos

La magnitud del movimiento que se genere en las líneas de interferencia está relacionado directamente con el movimiento angular y con los parámetros de diseño del interferómetro (área, longitud de onda y ángulo entre de recombinación entre los haces). Estos parámetros de diseño del interferómetro pueden ser modificados fácilmente, pero en otros casos no, por ejemplo el incremento en el área nos ayuda, pero incrementa el tamaño del interferómetro. Al cambiar la fuente de luz por una de menor longitud de onda es una de las mejoras más sencillas que se pueden realizar a éste interferómetro, pero es muy costoso emplear láseres de longitudes de onda muy cortas. Finalmente el cambiar el ángulo de recombinación entre los haces nos formará un determinado número de líneas de interferencia que dependerá del ángulo mismo entre los haces y de la longitud de onda.

Para lograr una sensibilidad mayor, es necesario tener pocas líneas de interferencia en el patrón interferométrico, de ésta forma el tamaño de las líneas será mayor y abarcarán mayor área en el patrón interferométrico completo, a diferencia de tener muchas líneas que son muy pequeñas. Al obtener pocas líneas de interferencia el movimiento de éstas es mayor que el que se genera con pocas líneas. Para lograr tener pocas líneas de interferencia

es necesario tener un ángulo entre los haces al recombinarse muy pequeño mucho menor a 1° . En la práctica lograr éste ángulo es complicado y lograrlo incrementa el tamaño del interferómetro. Para ello se propone modificar el esquema de tal forma que se logre obtener un ángulo muy pequeño entre los haces al recombinarse, el patrón obtenido con éste esquema propuesto para esta tesis se muestra en la figura 3.7.

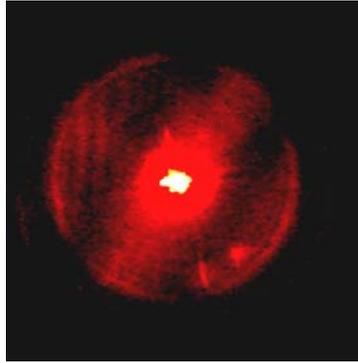


Fig. 3.7. Patrón interferométrico generado con el diseño propuesto con el ángulo menor a 1°

Al lograrse un ángulo muy pequeño obtenemos pocas líneas de interferencia y finalmente empleando una lente para ampliar éste patrón interferométrico podemos obtener líneas grandes, colimando el patrón y empleando el efecto navaja se realiza la medición del movimiento angular del sistema completo del interferómetro de Sagnac modificado. No obstante el tener pocas líneas de interferencia, es posible tener alteraciones por cambios en el ángulo de recombinación entre los haces, para ello es primordial que las posiciones de los espejos no cambien bajo la influencia de la fuerza centrífuga que sufren al estar el sistema en rotación.

Con éstas modificaciones realizadas al interferómetro de Sagnac en óptica de volumen se logra incrementar la sensibilidad de éste, además de emplear elementos muy sencillos y basándonos en principios físicos sencillos para lograrlo. Es fácil observar que en éste tenemos un límite de detección marcado por el número de líneas que se logren en el patrón interferométrico, esto es, llegar a obtener dos líneas, ya que con dos líneas garantizamos una mejor detección a través de éste método.

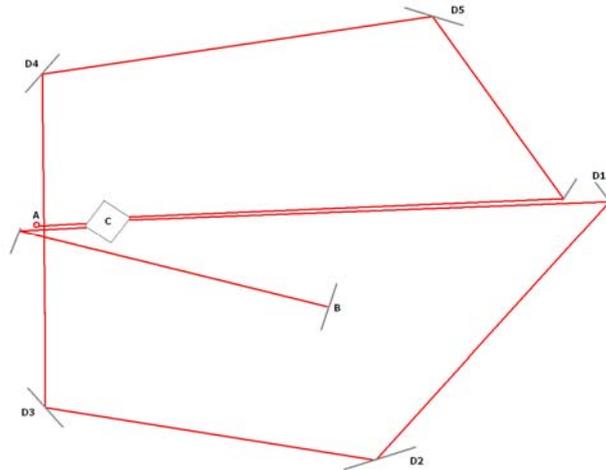


Fig. 3.8. Esquema del interferómetro de Sagnac en óptica de volumen empleado.

3.2.- MODIFICACIONES AL INTERFERÓMETRO DE SAGNAC EN FIBRA ÓPTICA.

Como se comentó anteriormente, el interferómetro de Sagnac en un principio fue de muy difícil empleo debido a los pocos avances existentes en la época para su desarrollo como sensor de movimientos angulares. Sin embargo para la década de los 60's en que se lograron los primeros láseres y mejoras en otros dispositivos optoelectrónicos, fue posible retomar éste efecto con fines de desarrollo tecnológico. Con la llegada de las primeras fibras ópticas fue posible realizar modificaciones al interferómetro de Sagnac, cambiando el medio de propagación de la luz del aire a las fibras. La principal mejora lograda en el interferómetro de Sagnac en fibra óptica fue el incremento en el área efectiva, ya que al tener un embobinado de fibra con N vueltas, es posible incrementar el área N veces también, con esto se logra un tamaño compacto en el sistema completo y un incremento de N veces de la sensibilidad.

El empleo de fibras ópticas en sistemas de medición nos ofrece ventajas por encima de otras tecnologías de medición, sensado y transducción. Entre éstas ventajas se incluye la inmunidad electromagnética debido a interferencia, alta sensibilidad, privación de partes mecánicas móviles y frecuentemente disminución del tamaño del dispositivo. De ésta forma el empleo de las fibras ópticas como medio de propagación de la luz en el interferómetro de Sagnac, da una ventaja mayor sobre sensores de movimientos angulares existentes basados en fenómenos mecánicos y eléctricos.

El principio físico del interferómetro de Sagnac en fibra óptica es el mismo principio propuesto por George Sagnac en 1913 para un sistema en óptica de volumen, el cual fue empleado por Michelson y Gale en 1925 para medir la velocidad angular de rotación de la tierra. Sin embargo el interferómetro en óptica de volumen necesita un tamaño de área muy grande y por lo tanto dimensiones muy grandes para lograr la sensibilidad necesaria para sensor magnitudes como la velocidad angular de la tierra: $15[^\circ/\text{Hr}]$, sin embargo con el

empleo de la fibra óptica, se pueden alcanzar esas magnitudes al tener un embobinado de fibra enrollado con muchas vueltas y así sumar el número de vueltas para alcanzar el área deseada. Un dispositivo de medición de movimientos angulares que alcanza magnitudes de sensibilidad menores a 2 revoluciones por segundo $2[s^{-1}]$ conocido como giroscopio [3], existen giroscopios mecánicos, electromecánicos, eléctricos y ópticos. De ésta forma al interferómetro de fibra óptica se le conoce como giroscopio de fibra óptica GFO [FOG por sus siglas en ingles]

El primer interferómetro de fibra óptica fue construido y demostrado en 1967. El giroscopio de fibra óptica fue demostrado por primera vez en 1976 por Vali y Schorthill [9] a partir de éste primer diseño, el giroscopio en fibra óptica fue modificado de un prototipo de laboratorio hasta alcanzar un desarrollo como dispositivo de sensado de movimiento angular. En 1980 fue empleado por primera vez como un dispositivo sensado de navegación inercial por Davis y Ezequiel con una desviación de $0.05 [^{\circ}/Hr]$

Desde ese primer giroscopio ha llegado toda una revolución en sistemas de sensado a través de fibra óptica para diversas magnitudes no sólo de movimientos angulares. La evolución del GFO se ha venido dando día con día llegando a alcanzar magnitudes de sensibilidad de hasta $0.001[^{\circ}/Hr]$, además de ser el interferómetro o giroscopio en fibra óptica la base para otro tipo de sensores de diversas magnitudes, como sensores de campos eléctricos, magnéticos, de flujos eléctricos, hidrófonos, temperatura, etc. [11, 12, 13].

Gracias a las grandes sensibilidades que se han alcanzado y a las grandes ventajas que ofrecen los métodos de detección en fibra óptica ha sido posible generar nuevos sistemas de sensado a través de éstas técnicas y tecnologías.

El principio físico del efecto Sagnac es aplicable en el interferómetro de Sagnac en óptica de volumen y en fibra óptica. Las ecuaciones que modelan al efecto Sagnac son las mismas, sin embargo en el interferómetro de fibra óptica se tiene un número N de vueltas en un embobinado de fibra a diferencia del interferómetro en óptica de volumen, por lo tanto, en la ecuación que modela al interferómetro de fibra óptica es necesario multiplicar las ecuaciones (40) y (41) por N , de ésta manera se considera al núcleo de la fibra dentro de las ecuaciones siendo N el número de vueltas del embobinado. Las ecuaciones para el interferómetro de Sagnac en fibra óptica son:

$$\Delta\phi_R = \frac{8\pi AN}{c\lambda} \Omega \quad (42)$$

$$\Delta t_v = \frac{4A\Omega N}{c^2} \quad (43)$$

El interferómetro en fibra óptica está basado en los principios físicos del efecto Sagnac por lo tanto la configuración mínima de éste es similar a la configuración mínima propuesta por Sagnac en el interferómetro de óptica de volumen, la diferencia es que el medio de

propagación de la luz es a través de la fibra óptica y por lo tanto no es necesario el empleo de espejos. Además el divisor de haz es sustituido por un acoplador 50-50 en fibra óptica. [3].

Este acoplador tiene la misma función que el divisor de haz en óptica de volumen, esto es, que divide el haz de luz proveniente de la fuente en dos haces de las mismas características, tanto en intensidad, longitud de onda y fase. Además el acoplador cumple con la función de recombinar los haces provenientes del núcleo de fibra. Finalmente en el interferómetro de fibra óptica se emplea una fuente de luz que bombea a través de la fibra óptica y un fotodetector que también capta la luz de salida del interferómetro. El interferómetro en fibra óptica mantiene la misma configuración mínima que el interferómetro en óptica de volumen, en la figura 3.9 se muestra la configuración mínima del interferómetro en fibra óptica.

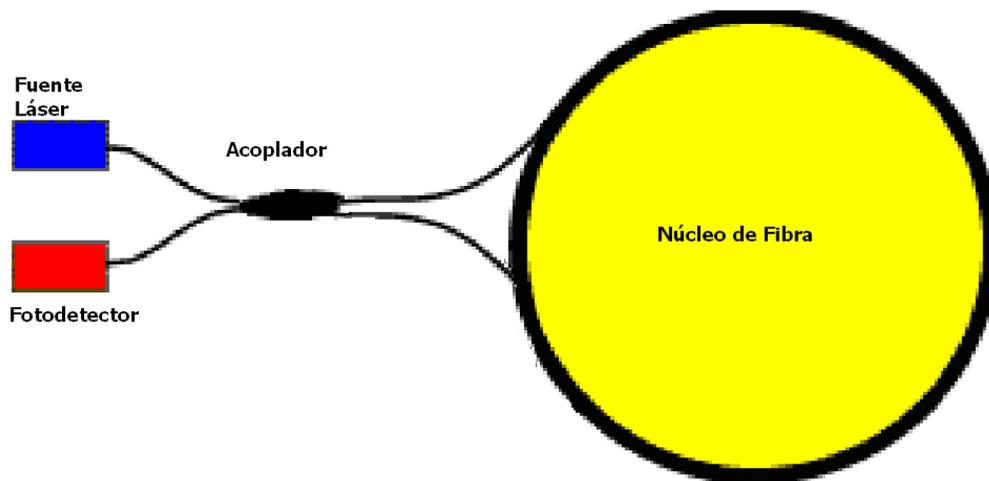


Fig. 3.9. Interferómetro de Sagnac en fibra óptica en configuración mínima.

Este interferómetro fue el primer diseño que se conoció en fibra óptica, sin embargo la sensibilidad que tiene éste diseño está limitada al tamaño del embobinado de fibra, aunque el incremento es muy superior al de óptica de volumen. Este interferómetro tiende a tener un límite de sensibilidad marcado por el área efectiva del núcleo, ruido del sistema (dispersión Rayleigh, efecto Keer, ruido de drift, etc.) [14] aun cuando su sensibilidad es muy superior a los giroscopios mecánicos, eléctricos y electromecánicos. En algunas aplicaciones éste interferómetro es muy bueno para los propósitos deseados, sin embargo existen aplicaciones en las que es necesario alcanzar sensibilidades muy por encima de las que el interferómetro de Sagnac en fibra óptica en configuración mínima pueda alcanzar, por ejemplo en la navegación marítima, aérea o espacial, en las que es necesario alcanzar sensibilidades de hasta algunos grados por hora.

Debido a limitantes en los primeros diseños del interferómetro en fibra óptica, ha sido necesario realizar estudios para alcanzar las sensibilidades deseadas. Uno de los primeros problemas encontrados es la estabilidad del láser que se emplea en éste interferómetro; para lograr grandes sensibilidades, es necesario contar con un láser muy estable en su potencia a

través del tiempo. Los láseres mas estables son los que emplean como bombeo los gases nobles como los de He-Ne o Nd-YAG pero para un diseño compacto éstos láseres no son los más convenientes y si los son los láseres semiconductores o de estado sólido; pero éstos láseres no tienen la misma estabilidad que los de gases nobles. [15]

Para contrarrestar éste problema de la estabilidad del láser e incrementar la sensibilidad del interferómetro de Sagnac en fibra óptica, fue necesario realizar una modificación al esquema original integrando un modulador de fase en uno de los brazos del núcleo de fibra; la finalidad de éste modulador es de uso múltiple, en primer lugar, al utilizarlo no se necesita tener un láser con una alta estabilidad en potencia a través del tiempo, ya que la sensibilidad del GFO no dependerá directamente de la estabilidad de la fuente; En segundo lugar, al utilizar éste modulador se incrementa la sensibilidad del dispositivo al crear una onda senoidal que viaja a través del embobinado de fibra y proporcionar con ello una curva de sensibilidad basada en una onda senoidal. Por último, al tener una onda senoidal que incrementa la sensibilidad, podemos ubicar a la medición en estado estable en un la parte media de la onda senoidal, esto es, entre una cresta y un valle; con esto podemos realizar una discriminación del sentido del movimiento de giro al que someta al interferómetro.

El esquema básico del interferómetro de Sagnac en fibra óptica, se trata de una configuración reciproca debido a que la señal de salida que entrega mantiene un perfecto contraste, ya que las fases como las amplitudes de ambos haces en contrapropagación son perfectamente iguales al estar el sistema en reposo. Por lo tanto la respuesta de la potencia óptica es entonces una función coseno, $P(\Delta\phi_R)=P_0[1+\text{Cos}(\Delta\phi_R)]$ de la diferencia de fase inducida por el movimiento angular $\Delta\phi_R$, el cual es máximo en cero. Para incrementar la sensibilidad, ésta señal debe de ser situada en otro punto de operación con una respuesta diferente de cero en estado de reposo.

$$P(\Delta\phi_R) = P_0[1 + \text{Cos}(\Delta\phi_R) + \phi_b], \quad (44)$$

donde Φ_b es el cambio de fase que se induce. De cualquier forma Φ_b debe de ser estable para mantener una sensibilidad estable, esto es, significativamente más estable que 1µrad, Por ejemplo al emplear un modulador basado en el efecto Faraday, el cual está controlado por una corriente eléctrica, requerirá de un control de la corriente eléctrica mucho mejor que en 1ppm.

El problema del ruido de ultrabaja frecuencia (Drift en inglés), se resuelve con el uso de un modulador de fase localizado al final del núcleo, así el modulador actúa como retardador de línea. En la figura 3.10 se muestra como se integra el modulador al interferómetro.

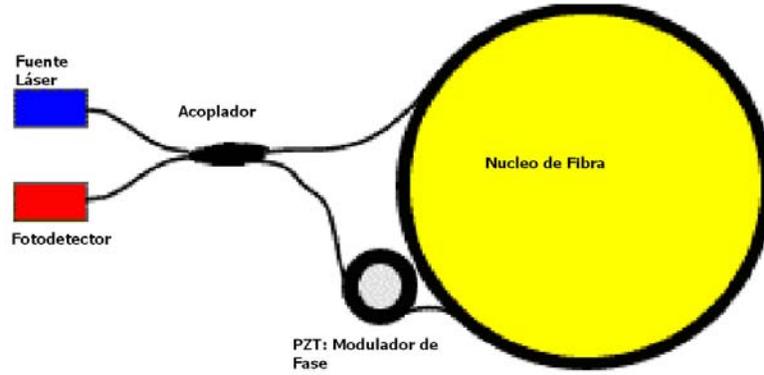


Fig. 3.10. Interferómetro de Sagnac en fibra óptica con el modulador de fase.

Debido a la reciprocidad, ambos haces en contrapropagación portan exactamente la misma modulación en fase $\Phi_m(t)$, pero con tiempos diferentes. El retardo es igual a la diferencia $\Delta\tau_g$ del tiempo de transito de grupo entre las distancias corta y larga en que se conecta el modulador y el acoplador de fibra. Esto produce una modulación $\Delta\Phi_m(t)$ de la diferencia de fase.

$$\Delta\phi_m(t) = \phi_m(t) - \phi_m(t - \Delta\tau_g) \quad (45)$$

Por lo tanto la señal de interferencia ahora es:

$$P(\Delta\phi_m) = P_0[1 + \text{Cos}[\Delta\phi_R + \Delta\phi_m(t)]] \quad (46)$$

Esta técnica puede ser implementada con una modulación de una onda cuadrada:

$$\phi_m = \pm\left(\frac{\phi_b}{2}\right), \quad (47)$$

donde la mitad del periodo es igual a $\Delta\tau_g$. Esto produce una modulación:

$$\Delta\phi_m = \pm\phi_b. \quad (48)$$

En reposo ambas modulaciones proporcionan la misma señal:

$$P(0, -\phi_b) = P(0, \phi_b) = P_0(1 + \text{Cos}\phi_b). \quad (49)$$

Pero al estar el sistema sometido a una rotación, se tiene:

$$P(\Delta\phi_R, \phi_b) = P_0[1 + \text{Cos}(\Delta\phi_R + \phi_b)] \quad (50)$$

$$P(\Delta\phi_R, -\phi_b) = P_0[1 + \text{Cos}(\Delta\phi_R - \phi_b)], \quad (51)$$

y la diferencia entre ambos es:

$$\Delta P(\Delta\phi_R, \phi_B) = P_0 [\cos(\Delta\phi_R - \phi_B) - \cos(\Delta\phi_R + \phi_B)] \quad (52)$$

$$\Delta P(\Delta\phi_R, \phi_B) = 2P_0 \sin(\phi_B) \sin(\Delta\phi_R) \quad (53)$$

Esta señal obtenida ΔP puede ser medida empleando un demodulador y con una amplificador lock-in con una sensibilidad para $\Phi_b = \pi/2$, donde $\sin \Phi_b = 1$.

Esta técnica de modulación-desmodulación es ampliamente aceptada como una técnica para el incremento en la sensibilidad, ya que produce una respuesta senoidal a partir de una cosenoidal con una buena estabilidad. En la figura 3.11 se muestra la curva obtenida al emplear un modulador de fase. [3]

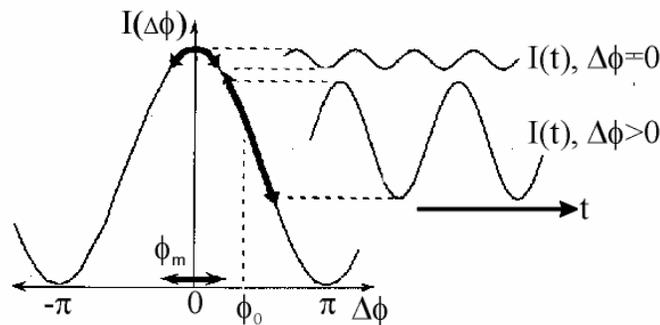


Fig. 3.11. Curva obtenida al emplear un modulador de fase.

Este esquema del interferómetro de Sagnac es el más conocido debido a las ventajas que ofrece sobre el modelo o esquema en mínima configuración, por lo tanto es el más empleado como giroscopio y como sensor de movimientos angulares, más aún, ha sido tal su desarrollo que existe toda una tecnología alrededor de él para realizar mediciones con la menor cantidad de ruido y con alta precisión, en la figura siguiente se muestra las propiedades de acuerdo a las sensibilidades alcanzadas de acuerdo a las tecnologías empleadas en estos dispositivos y sensores.

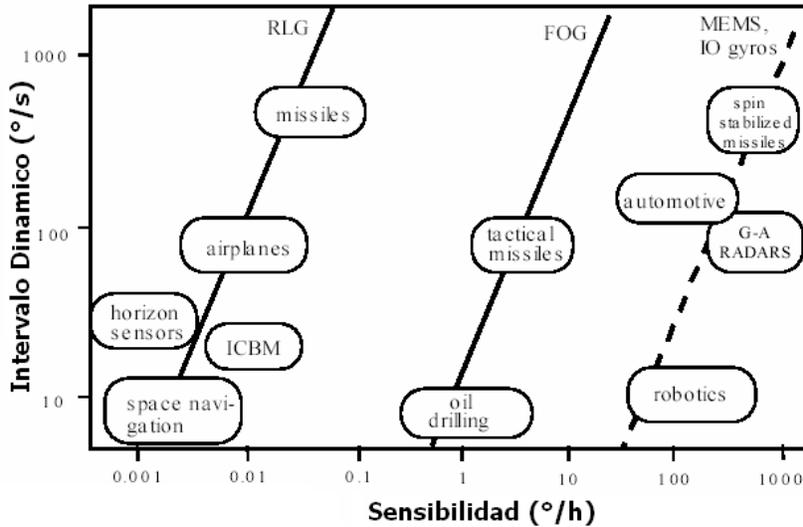


Fig. 3.12. Tabla comparativa de los FOG de acuerdo a su sensibilidad

El interferómetro en fibra óptica en su mínima configuración posee una alta sensibilidad debido a que su área efectiva es muy grande gracias al embobinado de fibra óptica en un espacio reducido, por lo tanto el efecto Sagnac en éste interferómetro es muy fácil de observarse. También, gracias a los avances en la fabricación y características de las fibras ópticas es posible tener pérdidas muy pequeñas a lo largo del lazo interferométrico, esto es a lo largo del embobinado de fibra. Algunos embobinados de fibra sencillos emplean 100[m] y existen algunos en la literatura que llegan hasta a ser de 1000[m] o más. Estas grandes longitudes de fibra, en la fabricación de un embobinado de tamaño reducido de diámetro, generan áreas hasta de cientos de metros con lo que se pueden alcanzar grandes sensibilidades en el interferómetro. [16]

Gracias a la gran sensibilidad que el interferómetro en fibra óptica tiene debido al incremento de su área efectiva empleando un núcleo de fibra, muchos dispositivos están siendo diseñados en base a éste interferómetro, empleándolo como cabeza de sensado o como amplificador de una señal defasada en algunos casos. Algunos de éstos dispositivos necesitan al interferómetro de Sagnac en fibra óptica en mínima configuración sin la necesidad del empleo del modulador de fase, o en algunos casos no se analiza lo suficiente el proceso para determinar el empleo en mínima configuración y se trabaja con el interferómetro con el modulador de fase. Esto se puede observar al emplear inevitablemente el demodulador de fase antes de realizar el procesamiento de la señal que se desea.

Muchos dispositivos no necesitan realmente una sensibilidad tan grande como la que puede entregar un FOG con modulador de fase para realizar sensado a través de él, por tal motivo, es necesario emplear el interferómetro de fibra óptica en mínima configuración, y evitar el empleo de un modulador y posteriormente el demodulador y un amplificador lock-in para demodular y corregir la señal, para poder emplear éste interferómetro en fibra óptica en mínima configuración es necesario hacer algunas correcciones sencillas para alcanzar una buena sensibilidad sin necesidad de cambios en el esquema de mínima configuración.

Uno de los principales parámetros a tomar en cuenta es que en un sensor de fibra óptica es necesario emplear fibra monomodal de acuerdo a la longitud de onda en que se va a trabajar, esto se explicó más a detalle en el apartado sobre sensores en fibra óptica. Es muy claro observar que en el interferómetro de Sagnac en fibra óptica es necesario emplear fibra monomodal ya que el empleo de fibra multimodo generará que existan varios modos propagados a través de la fibra los cuales recorrerán caminos ópticos distintos a través de la fibra y la señal de salida será una interferencia de todos los modos y de la interferencia propia del interferómetro lo que complica el sensado. El empleo de una fibra monomodal sólo nos genera la interferencia de los dos haces en contrapropagación.

La selección de una fuente de luz con una longitud de onda muy corta es la mejor opción para lograr una señal con mayor defasamiento, no obstante, debido a las propiedades de los materiales de los que está diseñada la fibra óptica, (silicio principalmente) su coeficiente de absorción en longitudes de onda cortas es mayor, esto es que la señal se atenuará más con longitudes cortas que con longitudes de onda mayores, es por ello que en telecomunicaciones se emplean fibras monomodo a longitudes de 1310 y 1550 [nm] para evitar la atenuación a distancias cortas y emplear repetidores o amplificadores. Existen varios trabajos relacionados con respecto a éste punto en los cuales se sugieren emplear longitudes de onda largas a partir de los 980 [nm] y generalmente a 1310 y 1550 [nm] que son las longitudes de onda en donde se encuentra una menor absorción del material a la luz [17]. En la figura 3.13 se observa la curva de absorción de la sílice a diferentes longitudes de onda.

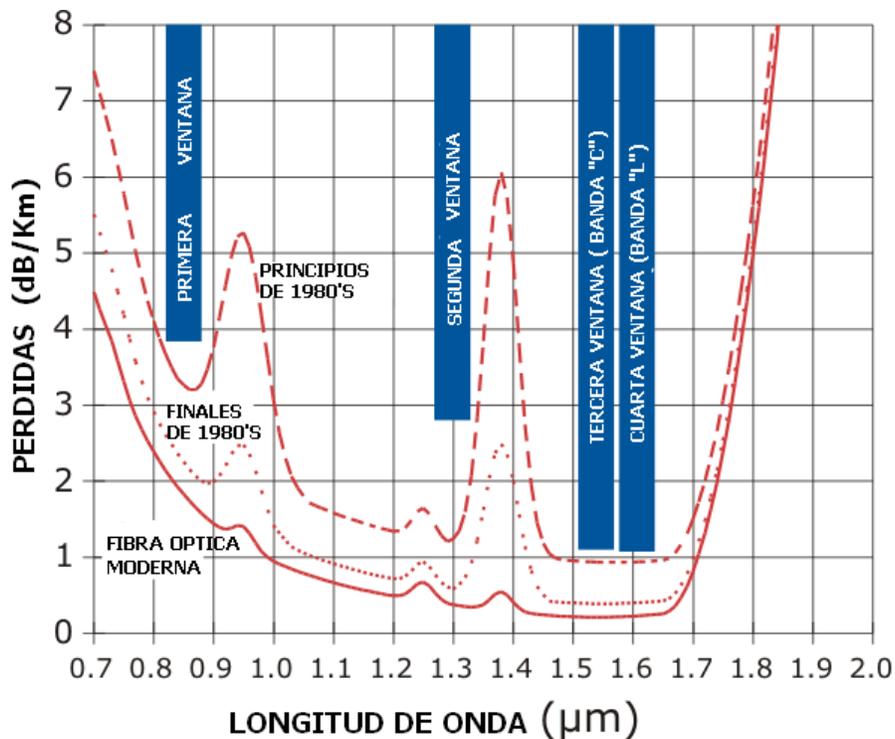


Fig. 3.13. Curva de absorción de las fibras a diferentes longitudes de onda.

Muchas veces se emplea fuentes de luz con las que se disponen, para evitar adquirir nuevas fuentes láser de altos costos, sin embargo hay que tomar en cuenta el punto anterior para obtener una mayor sensibilidad.

Como se mencionó anteriormente el modulador de fase nos ayuda a mejorar la sensibilidad del sistema interferométrico notablemente, sin embargo el empleo de un modular requiere también el empleo de un generador de ondas para generar la modulación y posteriormente la demodulación, así como un amplificador Lock-in. No obstante es posible emplear el interferómetro de Sagnac en fibra óptica sin la necesidad de emplear el modulador de fase con una buena sensibilidad apoyándonos en una adecuada instrumentación.

En el apartado en el que se trata al modulador de fase se muestra cual es la curva con la cual se logra tener una mayor sensibilidad en el interferómetro de Sagnac, sin embargo es posible obtener una buena sensibilidad en el interferómetro de Sagnac en fibra óptica en su configuración mínima, considerando primeramente que no debemos de saturar al fotodetector, esto es, si saturamos al fotodetector con el máximo de señal que nos pueda proporcionar la fuente, el fotodetector solo registrará cambios al existir una interferencia destructiva, ya que se tendrá una disminución en la intensidad que proporciona el interferómetro al estar sometido a un movimiento en sentido horario. Pero cuando existe un movimiento en sentido antihorario la intensidad se incrementa pero el fotodetector ya no verá éste incremento al estar saturado. Si éste es el caso en el que saturamos al fotodetector solo estaremos en posibilidades de detectar cambios en un sentido. Es por ello que también se emplea el modulador de fase para poder detectar ésta señal aun cuando el fotodetector está saturado.

Aunque existe otro caso, en la que el interferómetro no detectará ningún movimiento, esto se logra cuando el fotodetector está por encima de su saturación, en otras palabras dejamos “ciego al fotodetector con demasiada luz”, esto significa que la cantidad de luz que el fotodetector está recibiendo, está muy por encima de su límite de detección por lo que aun cuando exista una interferencia destructiva el fotodetector no registrará el cambio. En éste sentido la sensibilidad que entrega el interferómetro es nula.

Para evitar los casos anteriores de saturación del fotodetector, es necesario conocer las propiedades del fotodetector y su curva característica. La curva característica de los diodos es una exponencial, la cual es muy parecida a la curva de un fotodetector el cual tiene varias curvas dependiendo de la región de trabajo y de la intensidad fotónica a la que esté expuesto [18]. En la figura 3.14 se muestran las curvas de los fotodetectores.

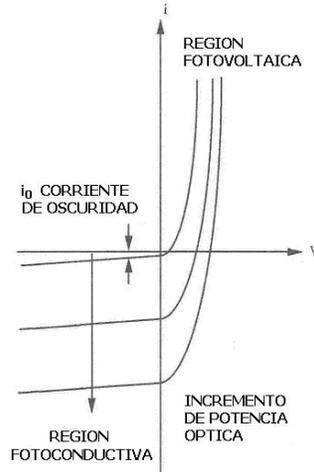


Fig. 3.14. Curva de los fotodetectores.

Como se observa en la figura anterior, tenemos las curvas de los fotodetectores dependiendo el tipo de configuración y región con la que se desee trabajar. Con cualquiera de estas configuraciones es posible trabajar para emplear el fotodetector en el interferómetro de Sagnac en fibra óptica. Sin embargo para poder trabajar con la mejor sensibilidad posible es necesario ubicarnos en una región en la cual no saturamos al fotodetector, además debemos tomar en cuenta al escoger la configuración que no nos encontremos en una región en la cual el comportamiento del fotodetector sea lineal y que su sensibilidad no sea muy baja porque estamos disminuyendo el desempeño del fotodetector y no estamos empleando su intervalo de detección correctamente.

Si observamos en la grafica anterior, la respuesta de circuito abierto puede ser analizada examinando las intersecciones entre las características de las curvas $i-v$ para varias condiciones de iluminación. Como se puede ver para el caso de circuito abierto ($i=0$), el voltaje cambiará de forma no lineal con el incremento de la incidencia de potencia óptica. De hecho ésta variación es logarítmica.

Para el caso de corto circuito ($v=0$), su respuesta puede ser encontrada al examinar la intersección de las curvas con el eje v . En éste caso la variación es lineal como se puede ver al incrementar la potencia óptica incidente y de acuerdo con la ecuación de la curva de corriente-voltaje de la respuesta de un fotodiodo.

$$i = i_0 \left(e^{eV/k_B T} - 1 \right) - i_s \quad (54)$$

Donde i_0 es la corriente de oscuridad debido a la generación térmica de pares electrón-hueco; i_s es la corriente de detección óptica. Al hacer éste pequeño análisis podemos determinar que la región óptima para trabajar con el fotodetector es la región fotoconductiva, ya que ésta región nos permite una detección lineal además de emplear todo el intervalo de detección del fotodetector. Cada una de las curvas está determinada por

el flujo de fotones ϕ en la superficie del fotodetector, por lo que para cada flujo diferente corresponderá una curva diferente, sin embargo ésta relación es lineal en la región fotoconductiva del fotodetector. Esto se muestra más claramente en las siguientes figuras 3.15

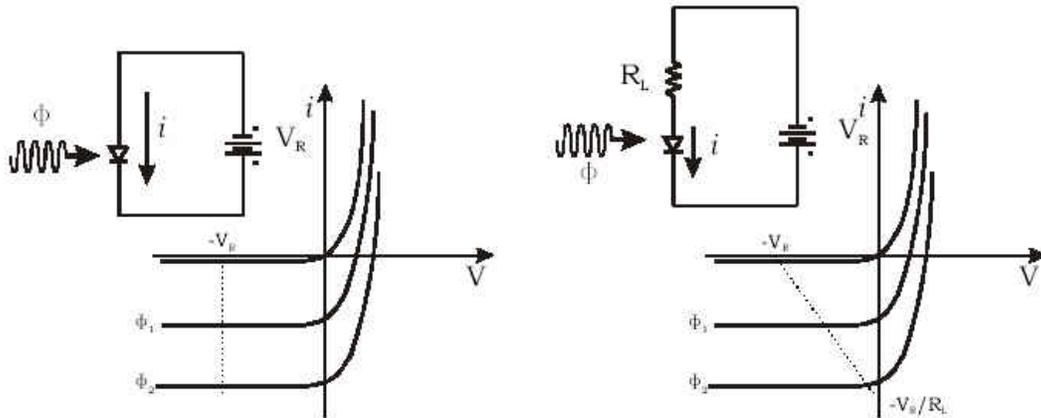


Fig. 3.15 Circuitos equivalentes de los fotodetectores

Como se observa en las graficas anteriores, en la región fotoconductiva al cambiar el flujo de fotones linealmente, la distribución de las curvas también lo es, por lo que el fotodetector está trabajando linealmente de acuerdo al flujo de fotones en ésta región. En la figura a) se observa cual es el comportamiento del circuito al estar en corto y en la figura b) se observa cual es el comportamiento del mismo circuito pero con una carga. La diferencia de ambas curvas es la pendiente que nos proporciona la carga en la curva. [6]

Con éste pequeño análisis estamos en posibilidades de poder realizar una detección de luz en forma lineal en el interferómetro de Sagnac de acuerdo a la interferencia que se registre. De esta misma manera también será posible determinar el tipo de sentido del giro en el interferómetro de acuerdo al tipo de interferencia que se registre, ya que el fotodetector será capaz de discernir entre el tipo de interferencia ya sea contractiva o destructiva con el cambio de intensidad trabajando linealmente.

Al decidir trabajar en la región lineal del fotodetector no solo se trata de hacerlo en la parte de detección del sistema, también hay que hacerlo en la fuente de luz que se va a emplear, aunque aquí no se trabaja en una región lineal si en un punto estable de la fuente, el cual coincida con la región lineal del fotodetector. Para ello es necesario establecer el intervalo de trabajo del fotodetector de acuerdo al flujo de fotones en la región fotoconductiva.

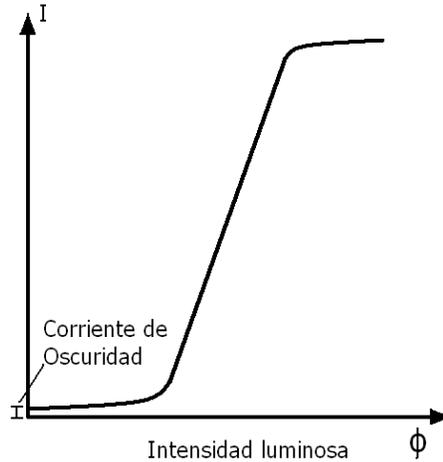


Fig. 3.16 Curva del fotodetector en la región fotoconductiva de acuerdo al flujo de fotones

En la figura anterior se observa que el fotodetector no es lineal en todo su intervalo de acuerdo al flujo de fotones. Podemos observar que hay un flujo mínimo de fotones con el cual el fotodetector comienza a trabajar y un flujo máximo con el cual el fotodetector se satura. Dentro de éste intervalo observamos un comportamiento lineal. Así es necesario ubicar la intensidad de la fuente dentro de éste intervalo de trabajo del fotodetector y que también sea estable en la fuente.

Para poder ubicar la potencia entregada por la fuente dentro del intervalo de detección del fotodetector, es necesario contar con una fuente que permita modular la intensidad, o en caso contrario emplear métodos para poder emplear solo la potencia necesaria y estar dentro del intervalo de sensado del fotodetector. Para el caso de diseño del interferómetro de Sagnac en fibra óptica de ésta tesis, se trabajó con un láser que cuenta con un controlador para la intensidad, sin embargo si no se contara con éste controlador, es posible crear un circuito sencillo que controle la intensidad del láser.

Cuando se está en posibilidad de controlar la potencia entregada por el láser es necesario realizar pruebas en las que se determine el intervalo de sensado del fotodetector con el láser que se va a trabajar, posteriormente al conocer el intervalo, se debe de determinar cual es el punto más estable de éste intervalo tratando que se encuentre muy cercano a la parte media de la curva de sensado del fotodetector.

En éste apartado se estudian las modificaciones al interferómetro de Sagnac en fibra óptica, sin embargo no hay modificaciones tal cuales, solo una instrumentación adecuada para comprender el comportamiento físico del interferómetro y aprovecharlo para su óptima detección.

3.4.- INSTRUMENTACIÓN DESARROLLADA PARA EL INTERFERÓMETRO DE SAGNAC

Uno de los principales objetivos en ésta tesis es emplear una adecuada instrumentación para diseñar y trabajar con el interferómetro de Sagnac en óptica de volumen y fibra óptica con la finalidad de sacar el mayor provecho de los diseños en configuración mínima.

Cuando se trabaja con el interferómetro de Sagnac es necesario tomar en cuenta el diseño físico pero también los métodos de detección. En los apartados anteriores de éste capítulo, se habló sobre el diseño físico de los interferómetros de Sagnac, tanto en óptica de volumen como en fibra óptica. En ambos diseños se proponen los diseños con la mínima configuración, tomando en cuenta la mejor sensibilidad que se puede lograr con ellos. Una vez logrados los diseños físicos una parte muy importante es la detección de la señal entregada por éstos interferómetros. En ambos casos se trata de una señal luminosa que variará en intensidad y que puede ser detectado éste cambio a través de un fotodetector.

Para llegar a éste punto en el que solo se está detectando la intensidad óptica fue necesario realizar un análisis de las bases teóricas de cada interferómetro al diseñarlo. En ambos interferómetros es posible realizar la misma instrumentación en la etapa de detección y acondicionamiento de señal, ya que las señales entregadas por ambos interferómetros son similares.

Uno de los puntos que se debe de tomar en cuenta primeramente en la transducción opto-electrónica es el intervalo de sensado del fotodetector. Este punto se trato para el interferómetro de fibra óptica, sin embargo también es aplicable para el interferómetro en óptica de volumen. Cuando estamos sensado el movimiento de las líneas de interferencia que proporciona el diseño del interferómetro en óptica de volumen propuesto en ésta tesis, se debe de tomar en cuenta cual es el punto de saturación del fotodetector para evitar estar trabajando en un punto de sensado cercano a la saturación o viceversa, estar en un punto cercano al mínimo de sensado del fotodetector. Aunque es más sencillo realizar en éste diseño un control de la cantidad de intensidad fotónica que recibe el fotodetector al cambiar el número de líneas de interferencia que recibe, aunque con ello estamos modificando la sensibilidad. Hay que recordar que al tener menor número de líneas de interferencia incrementamos la sensibilidad y por el contrario con mayor número de líneas disminuimos la sensibilidad. Para ello se propone emplear un láser controlado en intensidad o crear un circuito sencillo para realizar el control.

Otro punto que también se trató anteriormente es el empleo adecuado del fotodetector. Esto es elegir la región de trabajo del mismo. Como se demostró, la región de trabajo óptima para trabajar con el interferómetro de Sagnac en ambas configuraciones, es la región fotoconduktiva, ya que es la región que presenta una mejor linealidad.

Debido al cambio en la intensidad generado por el movimiento angular, es posible determinar el sentido de giro del interferómetro, de ésta forma es necesario emplear una región que nos garantice la linealidad para poder registrar tanto el sentido del movimiento como su intensidad. Aunque se posible emplear la región fotovoltaica del fotodetector, esto

requeriría una instrumentación diferente en las etapas posteriores como una amplificación no lineal y el filtrado de la misma forma.

Cuando superamos éste punto en el que podemos realizar un control de la intensidad que recibe el fotodetector, es necesario ubicar ésta intensidad en la parte central del intervalo de detección del fotodetector, además de saber que estamos trabajando en la región fotoconductiva del mismo. Para conocer el punto central del intervalo de sensado del fotodetector es necesario generar su curva.

En el interferómetro de fibra óptica tenemos una sensibilidad mayor por el área que genera el núcleo de fibra, por tal motivo es necesario ubicarnos lo más cercano al centro del intervalo de sensado del fotodetector. Para nuestro caso este punto se ubica en los 45.4mA de corriente suministrada al láser.

Al realizar éstos ajustes en la intensidad de los láseres de cada interferómetro, con la finalidad de emplear adecuadamente el intervalo de sensado en configuración fotoconductiva de los fotodetectores, es posible realizar un sensado de movimientos angulares con cada dispositivo para determinar los parámetros de diseño siguientes como: conversión de señal de corriente a voltaje, amplificación, filtrado.

Diseño electrónico de acondicionamiento de señal.

En la transducción opto-electrónica se emplea un fotodetector en configuración fotoconductiva, ésta configuración nos proporciona una corriente de salida que puede ser sensada, sin embargo para evitar la atenuación de ésta corriente se emplea un amplificador operacional el cual tendrá dos finalidades. La primera de ellas es realizar un acoplamiento entre el transductor y la electrónica para acondicionamiento y la segunda es hacer una conversión de corriente a voltaje [19]. Este sencillo diagrama se muestra en la figura siguiente.

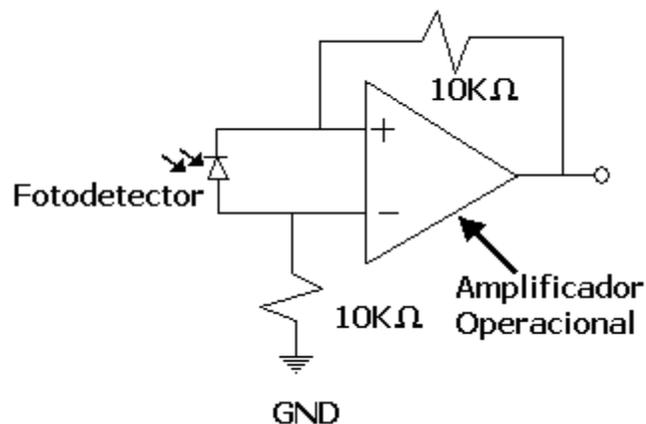


Fig. 3.17. Acoplamiento de impedancia entre fotodetector y amplificador operacional.

La conversión de corriente a voltaje está determinada directamente por la ley de Ohm, en la que el voltaje de salida del amplificador será directamente proporcional a la corriente generada por el fotodetector y multiplicada por la resistencia de realimentación del circuito. En el circuito diseñado se emplea una resistencia de $10K\Omega$ y otra del mismo valor para compensar el circuito y obligar a mantener al fotodetector en la región fotoconduktiva. Esta etapa nos permite trabajar posteriormente con la señal convertida en voltaje y hacer los acoplamientos en máxima transferencia de voltaje.

La corriente generada por el fotodetector es muy pequeña, la cual está determinada por la eficiencia, aun cuando el fabricante nos asegure una eficiencia muy alta, la corriente sigue siendo muy pequeña, es por eso que la resistencia de realimentación es muy grande por lo que estamos amplificando la señal a diez mil veces.

Las etapas posteriores se tratan de acondicionamiento de señal, esto es amplificación, filtrado activo y pasivo y corrección de offset. Estas etapas se muestran a continuación así como el cálculo de cada una de ellas.

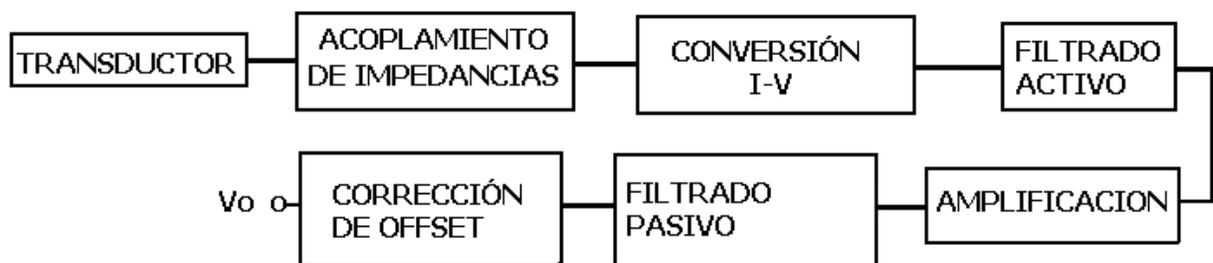


Fig. 3.18. Etapas del acondicionamiento electrónico.

El transductor por si solo se considera como una etapa por su función dentro del circuito. Las etapas de acoplamiento de impedancias y conversión de corriente a voltaje son realizadas con un amplificador operacional en configuración seguidor. Para la etapa de filtrado activo se emplea también un amplificador operacional.

Para determinar el intervalo de filtrado de la etapa electrónica de filtrado es necesario determinar el propósito de empleo del interferómetro y las sensibilidades que se pueden lograr con él. Sin embargo conociendo que en ambos interferómetros se presenta una sensibilidad en bajas frecuencias debido a que los movimientos son muy pequeños, por lo que es posible comenzar con el filtrado de las altas frecuencias, el tipo de filtro que se desea emplear es el llamado filtro pasa-bajo [19]. Una manera de ubicarnos en la sensibilidad que alcanzan los interferómetros es empleando la gráfica de sensibilidades de los interferómetros mostrados en la figura 3.12. Sin embargo en ésta etapa se recomienda emplear un filtro activo para evitar que la señal se atenúe por el propio filtro. En la figura siguiente se muestra el filtro empleado y su cálculo.

Utilizando un filtro pasa-bajos con frecuencia de corte 100 Hz y una ganancia de 20db . Empleando una resistencia $R1 = 1K\Omega$.

Si tenemos que: $f_c = 100$ [Hz] y $K = 20$ [db]

Por lo tanto:

$$K = 20 \log \left(\frac{R_2}{R_1} \right), \quad (55)$$

despejando R_2 tenemos:

$$R_2 = R_1 \cdot 10^{\left(\frac{K}{20}\right)}, \quad (56)$$

sustituyendo términos:

$$R_2 = 10 \text{ [k}\Omega\text{]}. \quad (57)$$

Ahora calculando el capacitor:

$$f = \frac{1}{2\pi R_2 C}, \quad (58)$$

despejando C , tenemos:

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot R_2}, \quad (59)$$

sustituyendo valores:

$$C = 159.15 \text{ [nf]}, \quad (60)$$

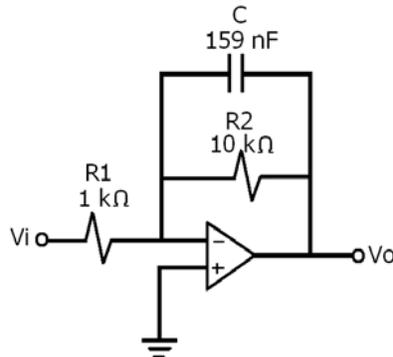


Fig. 3.19. Filtro Pasa Bajo Diseñado

Calculo del filtro

Este filtro no es muy bueno en realidad, es posible emplear filtro de mayor grado para lograr un filtrado mucho mejor, sin embargo si se desean detectar movimientos muy pequeños, el filtrado eliminará parte o completamente la señal de sensado. Por lo que se recomienda realizar un filtrado digital con el cual se pueda controlar el intervalo de filtrado.

Posteriormente al filtrado se realiza una amplificación de la señal debido a que parte de ésta pudiera ser atenuada en la etapa anterior. La configuración empleada es seguidor también realizada con un amplificador operacional [19]. En la figura siguiente se muestra ésta etapa y su cálculo.

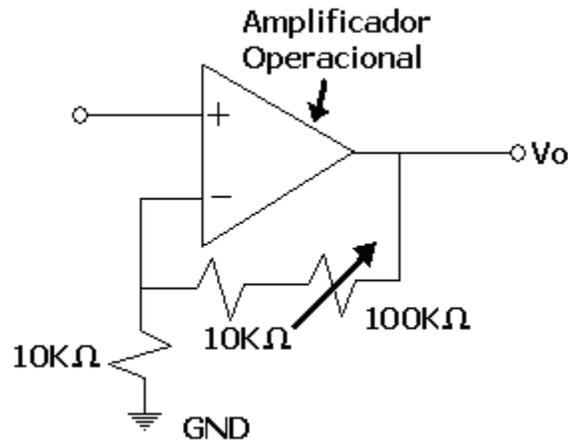


Fig. 3.20 Etapa de amplificación

Calculo de ganancia de la etapa de preamplificación:

$$\text{Ganancia} = (1 + RB/RA).$$

$$\text{Donde: } RA = 10K\Omega; \quad RB = 10K\Omega + 100K\Omega = 110K\Omega$$

Por lo tanto:

$$\text{Ganancia} = (1 + 110K\Omega/10K\Omega) = 12$$

La señal obtenida hasta éste punto del acondicionamiento electrónico de la señal es suficiente para emplearse en mediciones de movimientos angulares para cualquiera de los dos diseños de interferómetros. Sin embargo las etapas posteriores (filtrado pasivo y offset) se realizaron para obtener una señal con mayor nitidez, esto es, con la etapa de filtrado pasivo podemos eliminar el ruido de frecuencias mayores a 1 KHz que aparecen sumadas a la señal.

La corrección en offset obedece a que al realizar una medición, la señal que ha sido obtenida a través del procesamiento electrónico es una señal de DC. Al existir un movimiento angular en el sistema, obtenemos un cambio en la señal de DC de la salida del acondicionamiento electrónico [19]. Sin embargo al estar el sistema en estado estable (sin movimiento), la señal de salida es un valor diferente de cero, de hecho obtenemos un valor cercano a los 2.3 V para éste sistema por lo que hay que llevar a la señal de salida a cero para hacer congruentes las mediciones. Esto significa que al tener un movimiento en sentido horario tendremos un voltaje de salida negativo y al existir un movimiento en sentido antihorario tendremos un voltaje de salida positivo.

El cálculo del filtro pasivo se realiza a través de la ecuación:

$$F_c = \frac{1}{R \cdot C \cdot 2\pi} \quad (61)$$

Para éste diseño necesitamos un filtrado en el que se eliminen las frecuencias altas por lo que se diseña un filtro con paso bajas con una frecuencia de 500 Hz para lograr éste propósito. Por lo tanto de la ecuación anterior tenemos que si dejamos fijo el valor del capacitor debido a que es más fácil conseguir resistencias de diversos valores que capacitares, tenemos que la ecuación respecto a la resistencia es:

$$R = \frac{1}{F_c \cdot C \cdot 2\pi} \quad (62)$$

Empleando un capacitor de tipo cerámico de 1.82[mf] El resultado es:

$$R = \frac{1}{500 \cdot 1.82 \times 10^{-3} \cdot 2 \cdot 3.141592} \quad (63)$$

$$R = 0.1749 \Omega$$

Como se observa la resistencia es muy pequeña por lo tanto encontrar resistencia de ese valor no es muy factible, sin embargo en la realidad ese tamaño de resistencia ya lo tenemos ya que el cable de conexión tiene valores de resistencia alrededor de ese valor por lo que no es necesario emplear una resistencia para tener el filtro pasobajos. En muchos circuitos se emplean los capacitores solos sin la resistencia para emplearlos como filtros y eliminar frecuencias altas. Por lo tanto el circuito de filtrado pasivo es solo un capacitor.

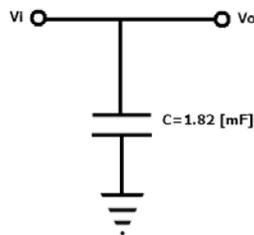


Fig. 3.21 Etapa de Filtrado Pasivo Pasa bajos

La eliminación del voltaje de DC es también conocido como eliminación de offset, ésta corrección es quitar el voltaje de directa que está en una señal y ajustar la señal a cero, esto se logra fácilmente empleando un capacitor, sin embargo éste capacitor puede actuar como un filtro pasoaltas por lo que es necesario emplear un capacitor que no elimine la señal que se desea.

Si deseamos solo eliminar el voltaje de DC es quitar lo que se conoce como frecuencia cero por lo que la frecuencia de corte debe de ser muy cercana a cero por lo tanto si calculamos un filtro pasivo paso altos con la frecuencia cercana a cero la ecuación es:

$$F_c = \frac{1}{R \cdot C \cdot 2\pi} \quad (64)$$

Es la misma ecuación que la de un filtro paso bajas [19] pero los componentes están invertidos en el circuito. Si empleamos nuevamente un capacitor ya definido, en éste caso de 224 [mF] podemos calcular la resistencia:

$$R = \frac{1}{F_c \cdot C \cdot 2\pi} \quad (65)$$

Por lo tanto si usamos una frecuencia muy baja cercana a cero tenemos que la resistencia tiene a ser muy grande por lo tanto si la frecuencia tiende a cero, la resistencia tiende a infinito.

$$R = \frac{1}{1 \times 10^{-8} \cdot 2.24 \times 10^{-3} \cdot 2 \cdot 3.141592} \quad (66)$$

$$R = \frac{1}{0.0000000001407433216} \Omega = 7105132866.2119$$

De ésta forma tenemos que la corrección de offset se puede realizar empleando un capacitor en paralelo a la salida del circuito total.

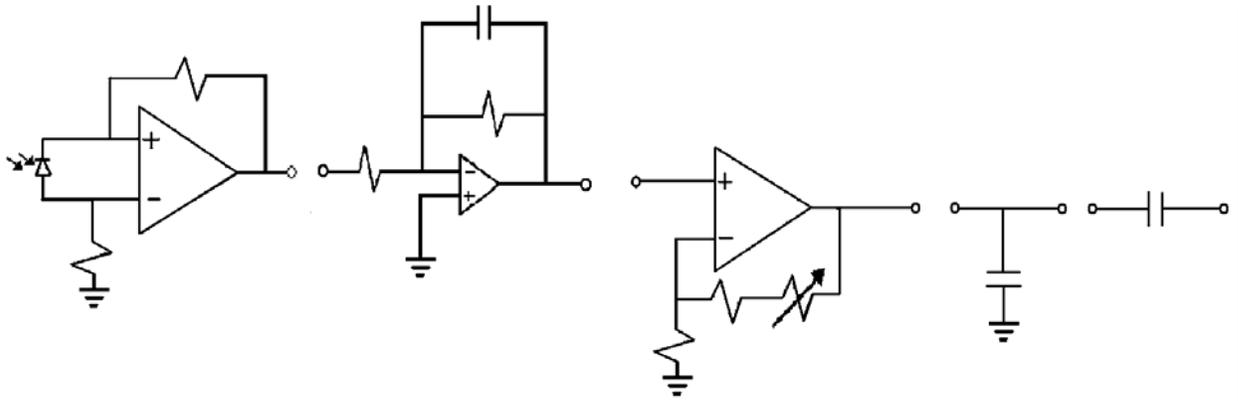


Fig. 3.22. Etapas de acondicionamiento de señal analógico completo

Con el procesamiento electrónico de la señal entregada por el fotodetector de cada interferómetro, es posible realizar mediciones de movimiento angular con gran eficiencia y sensibilidad, empleando las configuraciones mínimas de cada uno de los interferómetros.

BIBLIOGRAFÍA

- 1.- E.J. Post, “ Sagnac Effect”, Reviews of modern physics, vol. 19, num. 2.
- 2.- B. Culshaw, “The fiber optical fibre Sagnac interferometer: an overview of its principles and applications”, Measurements Science and Technology, 2006.
- 3.- Herve Lefevre, “The fiber optic gyroscope, photonetics”, Artech house, inc. 1993.
- 4.- B. Culshaw, I.P. Giles, “Fiber Optic Gyroscopes”, Journal of Physics, Scientific Instruments” Vol. 16, 1993.
- 5.- Shih-Chun –Lin, Thomas G., “Sensitivity analysis of the Sagnac-effect”, Optical Society of America-Apply Optics, 1979
- 6.- Bahaa E. A. Saleh, Malvin Carl Teich, “Fundamentals of Photonics”, Wiley-Interscience publications.
- 7.- Palma S., “Sensor Optico de movimientos angulares”, Memorias del V Congreso iberoamericano de sensores, Uruguay 2006.
- 8.- Palma S. “Detection limit of a Sagnac Interferometer”, VI simposium: La optica en la industria, Monterrey, Mexico, 2007.
- 9.- Ralph A. Bergh, H.C. Lefevre, “An Overview of iber optic gyroscope”, Journal of lightwave technology, 1994.

- 10.- Thomson. C, Herve C. Lefevre, “Comments about fiber optic gyroscopes”, Fiber optic and laser sensors, SPIE, 836, 86-97 1997.
- 11.- Masao Takahashi, Kinich Sasaki, “ Sagnac interferometer fiber optic current sensor using single mode fiber down leads”, Measurement science and technology, 15-2004
- 12.- Kjell Krakenes, Sagnac interferometer for underwater sound detection noise properties, optics letters / Vol. 14, No. 20 / October 15, 1989
- 13.- E. De la Rosa, L. A. Zenteno, A. N. Starodumov, and D. Monzon, All-fiber absolute temperature sensor using an unbalanced high-birefringence Sagnac loop , optics letters, 1996
- 14.- G. Schiffner, B. Nottebeck, “Fiber optic rotation sensor: analysis of effects limiting sensibility and accuracy”, Fiber Optic Rotation sensors and related technologies, 266 274, 1192.
- 15.- Eric Udd, “Fiber Optic Sensors, An introduction for engineers and scientists”, John Wiley & Sons, 1990.
- 16.- Francis T.S. Yu, Shizhuo Yin, “Fiber Optic Sensors”, Marcel Dekker, Inc., pp. 401, 2002.
- 17.- - Edward L. Safford, “Introducción a la fibra optica y el laser”, Paraninfo, 1988.
- 18.- W. Goepl, J.Hesse, “Optical Sensors”, Vol. 6. Weinheim, 1992.
- 19.- James W., William F., “Instrumentation for engineering measurements”, second edition, John Willey And Sons, Inc. 1993.

CAPITULO 4.- APLICACIONES DEL INTERFERÓMETRO DE SAGNAC EN SENSORES, RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En el capítulo anterior se planteó el estudio del interferómetro de Sagnac desde sus bases teóricas, posteriormente se abordó la historia del desarrollo de éste instrumento de medición como un sensor de movimientos angulares. Finalmente se hizo el estudio de la instrumentación empleada en ésta tesis para la mejora en el diseño en ambos interferómetros, el interferómetro básico en óptica de volumen y el interferómetro de Sagnac en fibra óptica.

El estudio de los dos tipos de interferómetros estudiados en ésta tesis comprendían algunos objetivos en común, uno de ellos fue realizar una mejora en cada uno de ellos en sus configuraciones básicas y posteriormente con una misma metodología de instrumentación electrónica, hacer el procesamiento de la señal entregada por cualquiera de los dos interferómetros. Los resultados esperados obviamente varían en el intervalo de sensado y magnitud debido a las características propias de cada interferómetro como se demostró en el capítulo anterior. La aplicación directa de éstas mejoras están fundamentadas en el área de sensores, cuando se emplea al interferómetro de Sagnac en cualquiera de sus configuraciones como parte de un sistema de sensado.

4.1.-SENSORES BASADOS EN EL INTERFERÓMETRO DE SAGNAC

El propósito final de realizar modificaciones de los interferómetros de Sagnac en ambas configuraciones, está fundamentado en las necesidades que otro tipo de sensores tienen de éste interferómetro. Debido a su alta sensibilidad no solo para sensar movimientos angulares, sino como lazo interferométrico, comparador de señales, modulador, entre otras. El interferómetro de Sagnac es empleado como cabeza de sensado en varios tipos de sensores de diversos parámetros físicos, como por ejemplo en los sensores hidroacústicos [1] y de ultrasonido [2, 3]. En los cuales emplean un interferómetro de Sagnac en fibra óptica como cabeza de sensado.

Sin embargo el problema en los sensores basados en un interferómetro de Sagnac en fibra óptica como cabeza de sensado, es la necesidad de una demodulación posterior de la señal, debido a que la señal deseada se modula con el modulador de fase del interferómetro de Sagnac. El propósito de éste modulador es mejorar la señal de los movimientos angulares a los que se somete el interferómetro con la finalidad de emplearlo como giroscopio, pero solo la señal de movimientos angulares es mejorada, por lo que para las señales de otro tipo, la señal se modulará y deberá ser demodulada posteriormente. Este tipo de problema, provoca que los diseñadores de sensores que basan sus prototipos en fenómenos ópticos con un interferómetro de Sagnac como cabeza de sensado, empleen equipo adicional en la demodulación y obtención de su señal de sensado. [4, 5, 6]

El problema puede ser tan complicado como sea el desarrollo del sensor que emplea al interferómetro de Sagnac, ya que si a la señal aparte de modularse, se le realizan otro tipo de procesamientos, finalmente el diseño será muy robusto en el sentido que tendrá un alto grado de complicación. Un ejemplo se da cuando se emplean dos o más interferómetros como cabeza de sensado y en los cuales hay que hacer demodulaciones separadas para realizar el procesamiento de las señales entregadas por cada cabeza de sensado. [6]

Existen casos en los cuales no es necesario realizar una demodulación ya que el interferómetro de Sagnac es parte del sistema de acondicionamiento de la señal, sin embargo éste caso en particular es muy raro, ya que siempre se desea la señal de sensado limpia de modulación de cualquier tipo.[7]

En el caso del empleo de interferómetro de Sagnac como parte del sistema de procesamiento de un sensor, éste es ampliamente empleado como comparador, ya que si señales diferentes entran en el interferómetro se puede hacer una comparación de la señal de salida con respecto a la de la entrada al observar los cambios que sufre dentro del interferómetro, o también comparar una señal que entra al interferómetro con otra fuera, como puede ser fase entre señales, eliminación de offset, entre otros parámetros [6, 7, 8]. Este tipo de empleo del interferómetro también es poco común, ya que otros tipos de interferómetros pueden realizar actividades similares.

En ésta tesis se desarrollo un diseño del interferómetro de Sagnac en fibra óptica eliminando el modulador, para ello fue necesario estudiar los principios básicos del interferómetro tanto en su esquema básico en óptica de volumen como en fibra óptica, es por ello que el resultado es un interferómetro de Sagnac sin el modulador de fase, lo que

lleva a que también se elimine el demodulador. Para lograrlo se estudió la forma en que puede ser alcanzado éste objetivo, proponiendo una homologación entre la fuente láser y el fotodetector; para ello se ajustó la luz láser generada por la fuente, de tal forma de ubicar la potencia en el punto más estable dentro de su rango y que ésta potencia llegara al fotodetector dentro del intervalo lineal en el que éste trabajara. De ésta forma se ajustan los parámetros de potencia óptica de la fuente y del intervalo del fotodetector. Este sistema mejora al esquema muy básico del interferómetro de Sagnac en fibra óptica, obviamente no sustituye ni pretende competir con los diseños existentes de interferómetros de Sagnac en fibra óptica con modulador de fase, los cuales tienen como propósito fundamental el sensado de movimientos angulares. El propósito de éste diseño es el de emplear el interferómetro de Sagnac como parte de un sistema de sensado sin la necesidad del uso de moduladores y demoduladores como se explicó anteriormente.

En el interferómetro de Sagnac en óptica de volumen tenemos un caso similar, ya que existen algunos sensores que también lo emplean como parte del sistema, uno de ellos es un sensor de campos eléctricos y magnéticos con un piezoeléctrico en el interferómetro [9]. Para éste sistema es menos complicado que los de fibra óptica, ya que en el esquema básico de éste interferómetro no es necesario el empleo de un modulador. Sin embargo es necesario lograr sensibilidades altas para que éste interferómetro sirva a su propósito como parte de otro sensor. En ésta tesis se realizó un esquema en el cual se alcanzan mayores sensibilidades del interferómetro de Sagnac en óptica de volumen. Este esquema alcanza un límite al lograr generar un patrón interferométrico de tres líneas. Este patrón interferométrico obedece a los principios básicos de interferometría, ya que es posible lograr un cambio en la formación del patrón debido a cambios o variaciones muy pequeñas en los haces que lo forman.[10]

Con éstas bases, es posible realizar sensados debido a los cambios en alguno o ambos haces que forman el patrón interferométrico, debido a algún parámetro externo que provoque ésta variación. Un claro ejemplo es el sensor de campos eléctricos y magnéticos antes mencionado, el cual emplea el fenómeno del efecto Faraday [11] para lograr cambios de fase y polarización en la luz, para ello se emplea un interferómetro de Sagnac en óptica de volumen para realizar éste propósito [9], Aunque también existe su contraparte en fibra óptica empleando el mismo efecto y bases teóricas [12]. Una vez que tenemos un interferómetro con alta sensibilidad a los cambios en sus haces, es posible desarrollar un sensor con una mejor señal a ruido, sensibilidad y capacidad de sensado como el de campos eléctricos y magnéticos.

Existen muchos otros sensores que emplean al interferómetro de Sagnac como parte del sistema, con los cuales es posible realizar sensado de diversos parámetros físicos distintos a los movimientos angulares. [2, 4, 9, 13]

Como se ha demostrado, muchos diseños de sensores se basan en el interferómetro de Sagnac para alcanzar sus propósitos. Aun cuando éste interferómetro es principalmente empleado como sensor de movimientos angulares, es posible emplear sus características propias para su uso con otros propósitos, como es el de ser parte de un sistema de sensado de parámetros diferentes a los movimientos angulares.

En las siguientes figuras se muestran algunos esquemas de sensores que emplean al interferómetro de Sagnac como parte del sistema sensor.

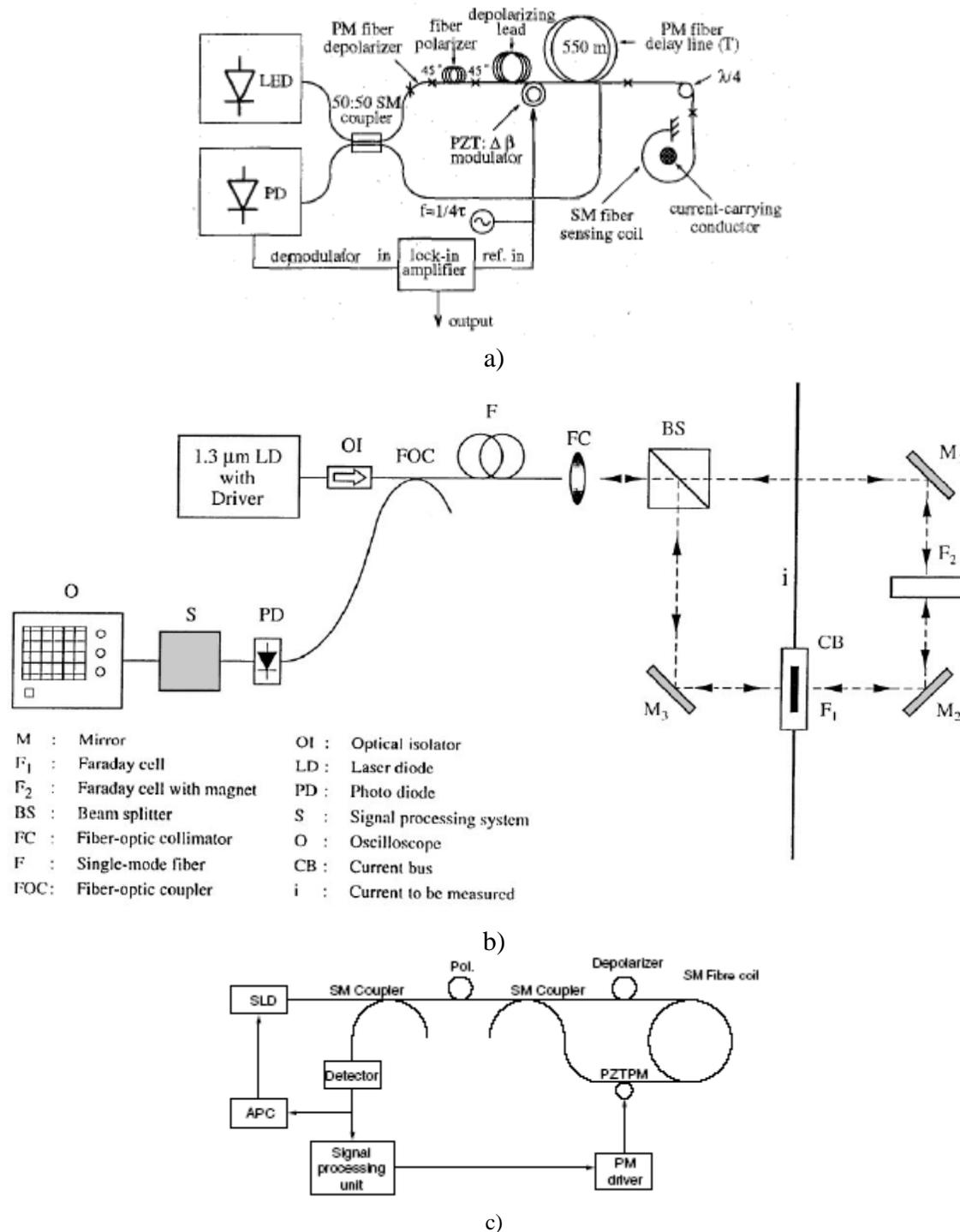


Fig. 4.1 Esquemas de sensores que emplean el interferómetro de Sagnac como parte del sistema de sensado.

4.2.-RESULTADOS OBTENIDOS CON EL INTERFEROMETRO DE SAGNAC EN OPTICA DE VOLUMEN Y FIBRA OPTICA.

Los resultados obtenidos los podemos agrupar tanto en resultado de propuestas de mejora en los diseños de los interferómetros, como los resultados numéricos arrojados por los mismos. Sin embargo también existen resultados de tipo metodológicos, ya que fue necesario emplear las hipótesis planteadas de forma que pudieran ser alcanzadas y demostradas.

Resultados metodológicos

Los resultados de tipo metodológicos fueron alcanzados gracias al empleo de un diagrama de bloques como herramienta fundamental. De ésta manera es más fácil dividir las tareas a llevar a cabo y manejarlas en diferentes niveles. Con el diagrama de bloque no olvidamos las interacciones entre los elementos en que fue dividida la tarea, además de proporcionarnos una forma de evaluar y mejorar cada pasó o bloque que lograba su objetivo. En todos los desarrollos de ingeniería la metodología basada en diagrama de bloques es usada.

En éste caso en particular el diagrama de bloques para el diseño que se siguió constó de cinco etapas la primera fue la definición del problema. Para la definición del problema fue necesario hacer un estudio del problema a atacar, desarrollar las hipótesis, el plan a seguir y conocer el estado del arte del problema que se deseaba atacar. El segundo paso que se siguió, fue la definición del esquema de diseño. En esta etapa fue necesario tener definidos los objetivos para aterrizarlos en un plan que fuera factible y con el que se alcanzara la meta de diseño. Sin embargo para éste punto es necesario tener las herramientas que se van a emplear, como son los conceptos del fenómeno físico bien definidos, tener un diseño del sistema interferométrico en mente y proponer los cambios que se desean alcanzar y que puedan variar durante el desarrollo del sistema interferométrico, además de tener en cuenta el equipo y material necesario para seguir a la siguiente etapa.

La tercera etapa y una de las mas complicadas, es la de realizar el desarrollo físico de un prototipo de interferómetro. Para este caso en particular se realizó un prototipo el cual fue modificado varias veces sobre el mismo diseño para mejorarlo tantas veces fuera posible. Para llegar a desarrollar la tercera etapa es necesario tener muy claros los objetivos y las bases teóricas para aplicarlas en el diseño. Esta etapa está ligada interactivamente con la cuarta y basada en las anteriores ya que en la cuarta etapa que es la de medición, se deben de estar haciendo mediciones para alcanzar los objetivos, sin embargo al no tener los resultados esperados, es necesario regresar a realizar los cambios necesario del diseño interferométrico para tener las mediciones deseadas de acuerdo a los objetivos planteados. La última etapa es la de nuevamente mejorar, obtener resultados de forma repetitiva y exacta. Durante ésta etapa fue posible tener una visión más clara de los alcances de los interferómetros que se trabajaron.



Fig. 4.2 Diagrama de bloques de la metodología empleada.

Estos son parte de los resultados que se obtuvieron de ésta tesis, muchas veces éste tipo de resultados son tomados como resultados secundarios y no con el valor que tienen, sin embargo debido a la metodología antes descrita en que se realizó el desarrollo físico de uno de los interferómetros, fue posible replicar la misma metodología para el otro, en éste caso se trabajó primero con el interferómetro de Sagnac en óptica de volumen aplicando ésta metodología y replicandola posteriormente en el interferómetro en fibra óptica, lo cual genera un ahorro de tiempo y material principalmente. Esta metodología puede ser aplicada en otros tipos de sistemas, no solo interferométricos o de sensado, sino de desarrollo tecnológico. El desarrollo satisfactorio de ambos interferómetros muestra la efectividad de ésta metodología ya que tenemos un resultado claro de replica con el mismo método al lograr los objetivos.

Resultados de diseño

Los diseños realizados de interferómetros de Sagnac en óptica de volumen y en fibra óptica, han sido realizados durante mucho tiempo por muchos investigadores alrededor del mundo, cada uno con un objetivo muy puntual, por ejemplo, mejorar el rango de sensibilidad, tipo de fuente que se emplea en el bombeo óptico [14] entre muchos otros objetivos. Este es el caso de los cambios realizados a los interferómetros diseñados para ésta tesis. Los cuales cumplen la función de mejorar su desempeño y reducir la complejidad como parte de otros sistemas de sensado o medición.

Este es el caso más concreto alcanzado con el interferómetro en fibra óptica, el cual disminuye la complejidad de los sistemas de sensado, al eliminar el modulador de fase empleado en éste interferómetro y por lo tanto una etapa posterior de demodulación para obtener la señal de sensado del dispositivo.

Esto se logró al estudiar las señales y su comportamiento en el interferómetro, así como un buen empleo de los elementos envueltos en el sistema interferométrico como son: una adecuada óptica entregada por el láser dentro del intervalo de sensado del detector, además de trabajar en la configuración lineal del fotodetector, coincidiendo la potencia óptica con el intervalo de detección y la región lineal de trabajo del detector.

El diseño logrado con éste interferómetro tiene otro tipo de aplicaciones además de la mostrada como objetivo principal, ya que es posible también aplicarlo como sensor de movimientos angulares, al alcanzar sensibilidades de hasta $3[^\circ/s]$, aunque éste resultado está muy alejado de las resoluciones alcanzadas por giroscopios comerciales, si está dentro de los intervalos de los sensores de movimientos de angulares de alta sensibilidad, éste dato se mostró en el capítulo anterior en la gráfica correspondiente a las magnitudes alcanzadas por los interferómetros existentes.

Entre las posibles aplicaciones que se pueden alcanzar con éste interferómetro tenemos la de detectar la torsión de la flecha en algún motor eléctrico. Esto es posible gracias a que la resolución del interferómetro permite detectar pequeñas variaciones de torsión en la flecha al existir un cambio durante el movimiento. Esto se puede observar al no generarse una gráfica con una señal puramente senoidal y contener armónicas en la señal, lo que se traduce en un movimiento no uniforme aun cuando hay un periodo constante. Esto ha sido realizado con anterioridad pero con sistemas eléctricos para detectar éstas variaciones en la flecha de motores, sin embargo debido al alto ruido electromagnético que generan los motores, la medición no puede ser tan pura como se desea y sensar muy pequeñas torsiones. Este punto nos lleva nuevamente a la gran ventaja de las fibras ópticas con respecto a la inmunidad electromagnética. Ya que es posible montar un interferómetro de fibra óptica en el motor, en especial en el rotor para detectar la torsión de la flecha sin ser alterada la señal de sensado debido al ruido electromagnético.

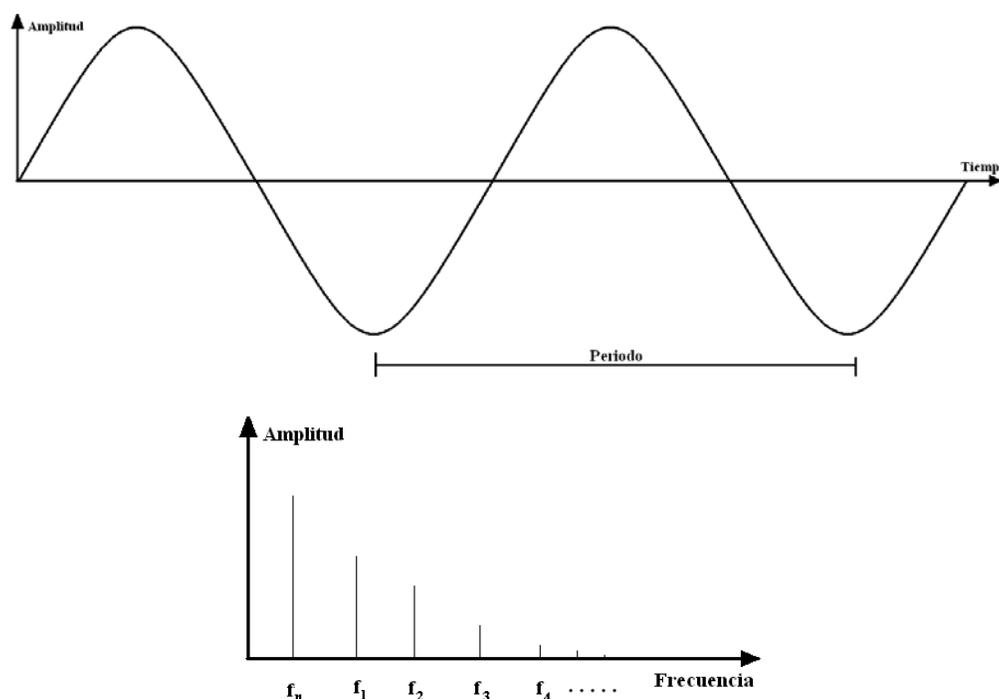


Fig. 4.3 señal generada por una flecha torcida obtenida con un interferómetro en fibra óptica, a) Señal en tiempo. b) Señal en frecuencia

En la figura 4.3a) observamos que la señal es periódica por lo que un tacómetro no sería capaz de detectar la torsión de la flecha ya que éste dispositivo mide las revoluciones de la flecha. La capacidad del interferómetro es superior al mostrar el comportamiento de la flecha durante su movimiento angular, con lo que se puede detectar la torsión que tiene debido al tipo de señal generada al obtener la señal en frecuencia y observar la cantidad de armónicas que contiene dicha señal.

Este ejemplo nos muestra la posibilidad de emplear al interferómetro de fibra óptica en aplicaciones con intervalos de movimientos angulares grandes y conocer el comportamiento del movimiento completamente, por lo que nuevamente es posible hablar de prescindir del modulador de fase. En la figura 4.4 Se muestra el diseño del interferómetro de Sagnac en fibra óptica construido para esta tesis.



Fig. 4.4 Fotografía del interferómetro de Sagnac en fibra óptica

Este diseño logra el objetivo de ser un diseño sencillo prescindiendo del modulador de fase a través de una instrumentación adecuada. En ésta tesis se describe el proceso que se siguió para lograr éste diseño, sumado con las bases teóricas para demostrarlo.

El interferómetro en óptica de volumen construido cumple con varios objetivos o tareas, el primero es que sigue basado en su configuración básica y que solo obedece a cambios en el esquema del camino óptico. La propuesta de diseño está sustentada en cambiar el modo de detección de la interferencia de los haces en contrapropagación. En el esquema clásico se realiza una detección a través del cambio en la intensidad debido a la interferencia de los haces. En éste diseño se realiza la detección al generar un patrón interferométrico y medir el cambio de posición de las líneas de interferencia debido a un defasamiento en los haces en contrapropagación ya sea por un movimiento angular o por un fenómeno físico externo que genere éste defasamiento.

El cambio del tipo de detección fue posible debido a la comprensión del fenómeno de interferencia de los haces, y a la variación de ésta interferencia debido a movimientos angulares en el sistema. Este cambio en la detección llevó a proponer un esquema del interferómetro de Sagnac diferente al conocido con respecto al camino óptico formado por los espejos, cambiándolo de un esquema con una forma geométrica regular a una irregular,

con el propósito de formar un patrón interferométrico. Posteriormente el estudio nos arroja que entre menor número de líneas de interferencia se logren es posible incrementar la sensibilidad del sistema debido a que las líneas de interferencia son más grandes y por lo tanto más fácil de ver la variación en la interferencia. Para lograr un patrón interferométrico es necesario tener un ángulo de interferencia entre los haces, además para conseguir un número pequeño de líneas de interferencia, éste ángulo debe tender a cero, sin embargo esto no es muy difícil de lograr debido a los tamaños de los elementos que forman el interferómetro, ya que para lograr obtener ángulos muy pequeños de incidencia entre los haces es necesario tener distancias muy grandes del punto de incidencia, a los espejos que forman el ángulo.

Aun con todas las limitaciones descritas fue posible generar un diseño que cumpliera con proporcionar un patrón interferométrico de pocas líneas de interferencia, en éste caso se obtuvieron 3 líneas y con un área formada por el lazo interferométrico de $0.23[m^2]$. Este esquema se muestra en la figura 4.5. La sensibilidad alcanzada fue de algunas decenas de alrededor de $20[^\circ/s]$. Sin embargo en éste dato no hay un punto de comparación en la literatura debido a que no se realizan estudios de movimientos angulares de interferómetros en óptica de volumen, pero al hacer una comparación con un interferómetro clásico formado previamente con ésta propuesta, observamos que la sensibilidad es aproximadamente de 3.5 veces mejor con la misma área.

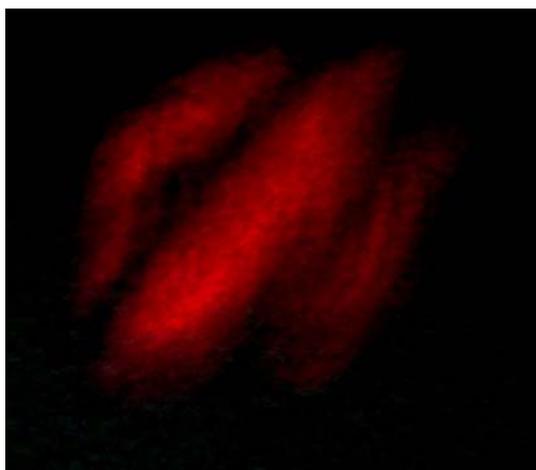


Fig. 4.5 Patrón interferométrico de 3 líneas.

Este diseño tiene la ventaja de poder alcanza un poco más de sensibilidad al emplear lentes para amplificar el tamaño de los líneas de interferencia, y detectar variaciones más pequeñas de la interferencia generada por los haces en contrapropagación. En la figura 4.6 se muestra el diseño realizado para ésta tesis del interferómetro en óptica de volumen.

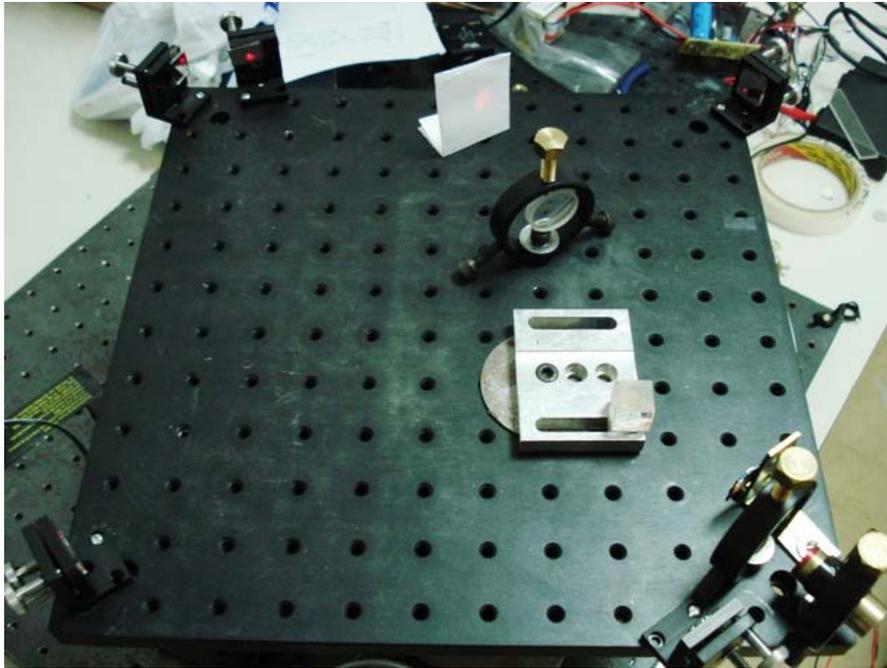


Fig. 4.6. Foto del interferómetro con los lentes y el esquema.

Las aplicaciones de éste interferómetro pueden ser pocas desde el punto de vista que el interferómetro de fibra óptica tiene una ventaja muy grande con respecto a éste interferómetro. No obstante las aplicaciones de éste interferómetro obedecen a diseños en óptica de volumen, por lo que en éste sentido es posible trabajar con él. La aplicación mencionada anteriormente acerca del sensor de campos eléctricos y magnéticos es un muy buen ejemplo de las posibilidades de éste interferómetro, aunque posiblemente existan más ideas que no han prosperado debido a la poca sensibilidad que éste interferómetro ofrece, es posible comenzar a trabajar con ellas aplicando éste diseño que incrementa la sensibilidad hasta 3 veces al diseño clásico.

Resultados de numéricos

La cantidad de resultados numéricos obtenidos en las mediciones realizadas con ambos interferómetros fueron muchos, con el propósito de verificar la repetibilidad y exactitud de los dos instrumentos, sin embargo debido al espacio destinado en mostrar los resultados en éste trabajo de tesis, solo se presentan algunos de ellos. No obstante los resultados mostrados obedecen a una gran cantidad de mediciones y experimentos de los cuales se tiene el registro y muestran la repetibilidad de cada medición. Además de la factibilidad de realizar una replica de cada diseño y medición obtenida.

Resultados de la estabilidad y variación del láser para el interferómetro en óptica de volumen.

Para conocer el comportamiento de la intensidad de la luz láser debido a la variación en la interferencia de los haces en contrapropagación en el interferómetro en óptica de volumen, se estudió la estabilidad del láser empleado. Este láser se trata de un semiconductor sin modulo de control de potencia por lo que su potencia no puede ser variada. La prueba de estabilidad fue hecha con el fotodetector con el que se trabajó para el diseño del interferómetro de Sagnac en óptica de volumen. El resultado de éste láser fue que tenía una variación de algunas decenas de milivolts por lo que es un resultado bueno en la estabilidad, sin embargo tiene una pequeña caída de potencia en el tiempo de algunos milivolts lo que podría generar problemas en mediciones de largo tiempo. Esta variación comienza a darse después de la primera hora de trabajo con él. En las siguientes figuras se muestra la estabilidad del láser empleado.

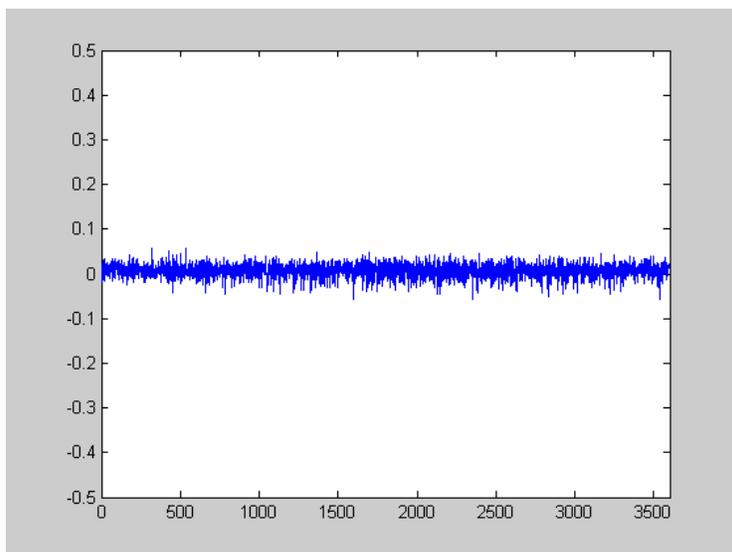


Fig. 4.7 estabilidad del láser a 1 hora

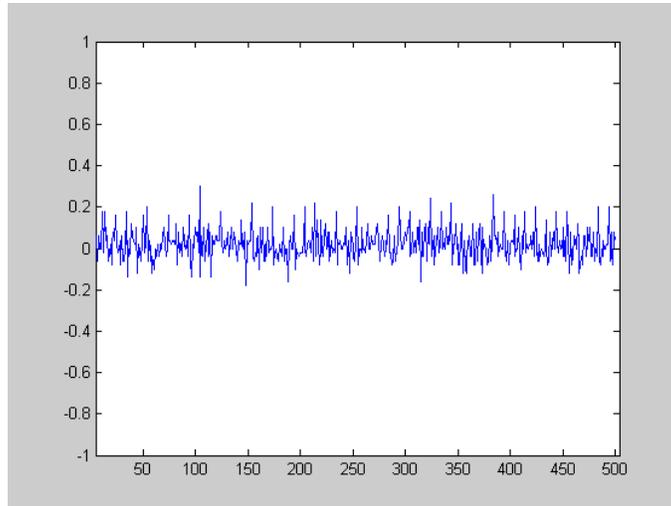


Fig. 4.8 estabilidad del láser en 5 segundos

Resultados de la estabilidad y variación del láser para el interferómetro en fibra óptica

Dentro de los objetivos de mejora del interferómetro en fibra óptica, fue trabajar con un láser que tuviera una alta estabilidad. Para ello se trabajaron con 3 láseres distintos, dos de He-Ne (uno polarizado y otro sin polarizar) y un semiconductor. Sin embargo los dos primeros no poseen un modulo de control de la potencia óptica generada, por lo que los resultados fueron los siguientes.

El láser de He-Ne con polarización, saturaba el fotodetector, disminuyendo la sensibilidad, además por éste motivo de saturación es solo sensible en un sentido de giro del interferómetro, lo que se traduce en que solo es posible detectar la variación de interferencia óptica destructiva, ya que la constructiva nos genera un incremento en la intensidad y por lo tanto, si el fotodetector está saturado, no percibe un incremento en potencia como se desea. Otro problema con éste láser fue que no poseía la estabilidad deseada con variaciones de milésimas de volt.

Con el segundo láser, el láser de He-Ne sin polarización, la estabilidad mejoró, no como se deseada pero mucho mejor a la del primer láser de He-Ne. Sin embargo la potencia entregada por éste láser es mayor y también saturaba al fotodetector. Esta saturación es tan grande que no es posible detectar ningún tipo de variación en la intensidad debido a la interferencia constructiva o destructiva.

El tercer láser empleado fue un láser semiconductor con modulo de control en la potencia. Al poder variar la potencia del láser, es posible encontrar el punto más estable de éste y trabajar en él. De ésta forma se localizó la potencia más estable generada por éste láser a 0.41 [mA]. Aunque ésta magnitud de estabilidad en la potencia del láser no fue la única encontrada, ya que existen otras para éste láser en particular; Las otras magnitudes de estabilidad del láser son a 0.14 [mA], 0.67 [mA] y a 0.91[mA]. Sin embargo ésta potencia

fue la empleada debido a que se localizó dentro del intervalo lineal de trabajo del fotodetector, éste punto se ha discutido en este capítulo y en el anterior. En las figuras siguiente se muestran la gráficas de estabilidad del láser a ésta potencia.

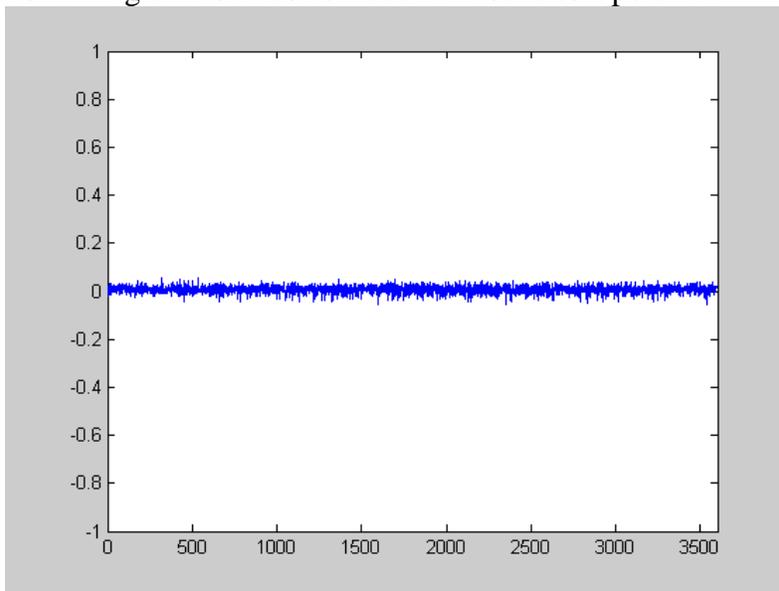


Fig. 4.9 estabilidad del láser a 1 hora

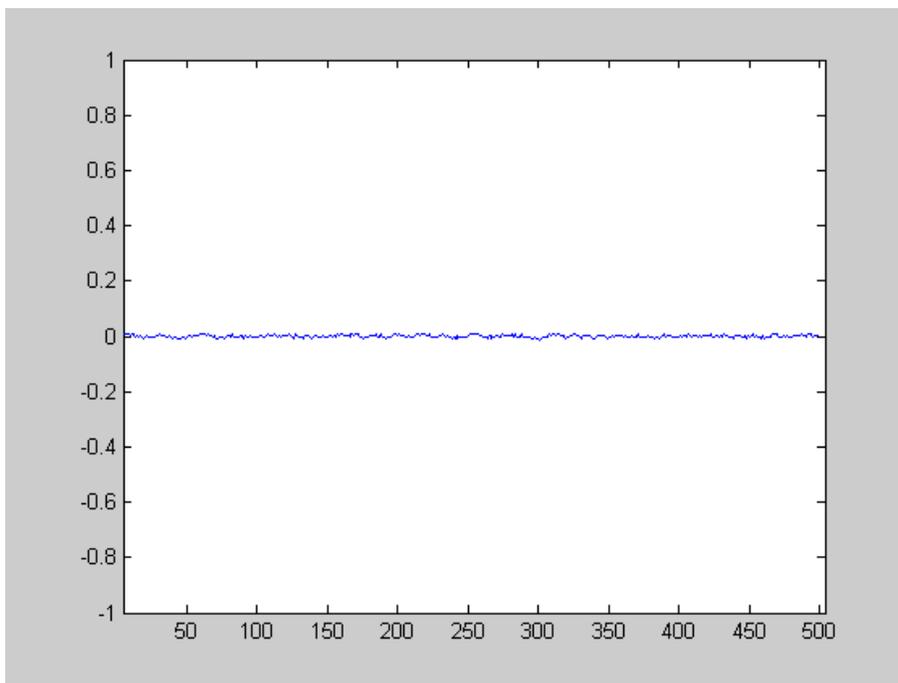


Fig. 4.10 estabilidad del láser en 5 segundos

Las pruebas hechas para los láseres son tanto de corto tiempo de 5 [s] de duración con muestreo de 50 milisegundos y de largo tiempo de 1 hora de duración con muestreos de 1 [s]

Una vez localizadas las magnitudes de potencia más estables para el láser seleccionado, fue posible encontrar cual de éstas magnitudes se localiza dentro del intervalo de detección del fotodetector y determinar cual está dentro del intervalo lineal. Para lograr éste objetivo fue necesario generar la curva de comportamiento del fotodetector al estar sometido a diferentes potencias. La curva se generó al aplicar una potencia a partir de cero al láser para generar un flujo fotónico que incidiera directamente en el fotodetector. El fotodetector está conectado al sistema de transducción óptico-electrónica para poder determinar el voltaje entregado debido a la potencia óptica. La curva obtenida se muestra en la siguiente figura.

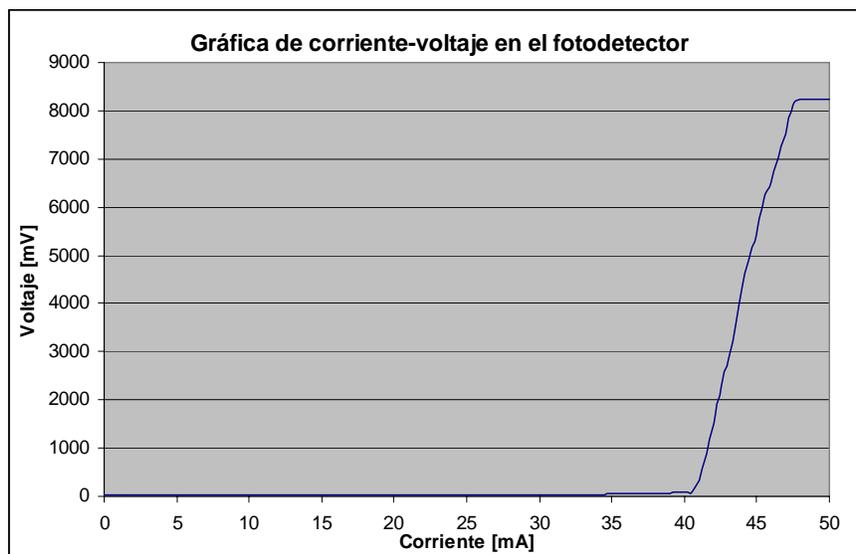


Fig. 4.11 Curva del fotodetector generada por el láser.

En ésta curva se observa la potencia en la que el láser trabaja hasta su saturación y el intervalo lineal del mismo. Por lo tanto observando la curva y las magnitudes de potencia del láser a los cuales es más estable, se escogió la potencia de 0.41 [mA] como se mencionó anteriormente. Con esta potencia del láser es posible hacer sensado en ambas direcciones de movimientos angulares o de interferencias constructivas o destructivas y poder ser detectadas con éste interferómetro en particular.

Una medición que también fue necesaria para conocer posibles defectos en la fibra o pérdidas de potencia dentro de ella, fue la de medir la potencia y estabilidad del láser a través del lazo interferométrico en ambos sentidos. Los resultados nos muestran que las pérdidas son muy pequeñas en un lazo interferométrico de 100 [m] por lo que no se consideran dentro de algún problema, por lo tanto no existen defectos en la fibra para ambos sentidos de la trayectoria óptica.

Como se discutió anteriormente, en las mediciones realizadas en los diseños de los dos tipos de interferómetros, solo se muestran algunas mediciones debido a que éstas mediciones fueron repetitivas y demuestran la repetibilidad del sistema al mismo estímulo.

En el interferómetro de Sagnac en óptica de volumen, se realizó la medición del cambio en el movimiento de las líneas de interferencia debido al defasamiento de sus haces provocado por un movimiento angular. El intervalo de mediciones fue desde $320^\circ/\text{s}$ hasta $10^\circ/\text{s}$, sin embargo entre los 10 y $20^\circ/\text{s}$, la cantidad de ruido que se genera no permite ver una señal muy clara por lo que se debe tener un filtrado mayor, recordando que el filtrado que se realizó en el sistema de transducción opto-electrónica es muy sencillo. Sin embargo el intervalo es todavía mayor debido a que a movimientos más rápidos a $320^\circ/\text{s}$ es posible obtener mejores señales debido a que éste interferómetro tiene un intervalo de trabajo parecido al de los tacómetros, en medir revoluciones por segundo. Este tipo de mediciones no fueron realizadas debido a que el mismo prototipo no permite realizar mediciones de velocidades superiores; el motivo es que debido a la instrumentación empleada para éste diseño, muchos de los elementos montados en el sistema giratorio, no tiene la estabilidad suficiente para soportar fuerzas centrífugas que permitan hacer mediciones de velocidades superiores a algunas revoluciones por segundo. Además los cables con los que se conectan la fuente y el detector también impiden tal propósito. Sin embargo con las mediciones realizadas y de acuerdo a la teoría, es posible que éste interferómetro tenga un intervalo mucho mayor al que se pudo medir. Esto se puede realizar al emplear la ecuación que modela el interferómetro de Sagnac para obtener el valor teórico, sin embargo para obtener el valor práctico es necesario generar cambios en la instrumentación del sistema, tales como la eliminación de cables y/o alambres para el láser y el fotodetector, además de construir un prototipo con elementos con alto grado de estabilidad mecánica e inmune a ruido mecánico generado por los movimientos. En las figuras siguientes se muestran tres gráficas de movimientos angulares generados por el interferómetro en óptica de volumen.

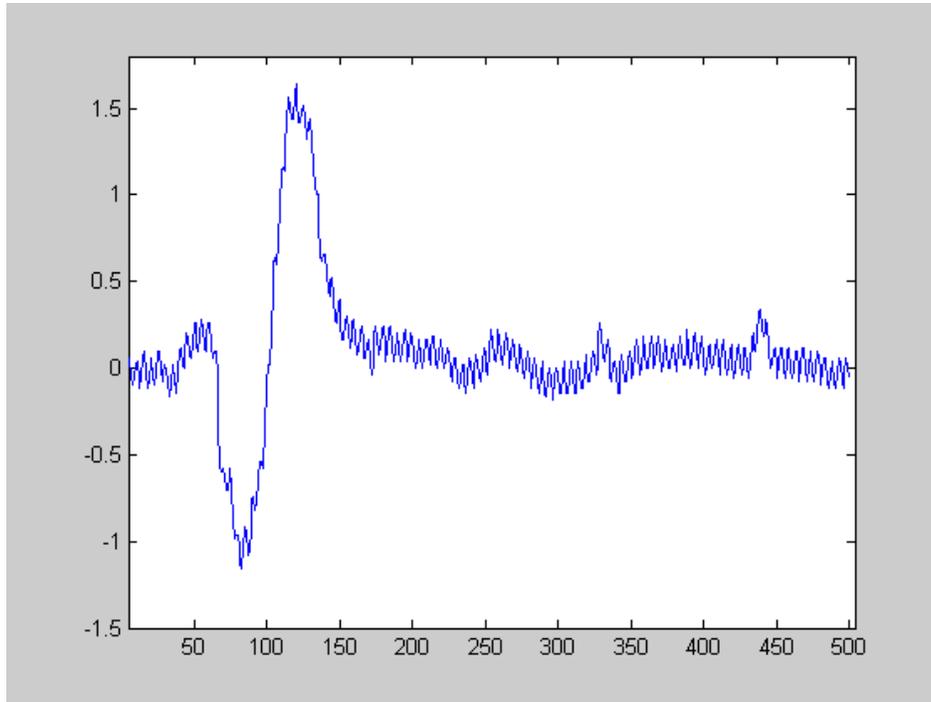


Fig. 4.12 Curva de un movimiento angular de $320[^\circ/s]$ obtenida con el interferómetro de óptica de volumen

En la figura anterior se muestra un movimiento angular a una velocidad de $320^\circ/s$. En éste movimiento se muestra un giro en sentido horario y rápidamente un cambio a sentido antihorario para demostrar la funcionalidad del interferómetro a sensar ambos sentidos del movimiento. En el eje de las abscisas tenemos la cuenta que realiza el osciloscopio empleado, esto es 500 muestras a una velocidad de muestreo de $50[s/S]$ o 50 muestras por segundo. La medición tardó 10 segundos completamente por lo tanto son 500 muestras. En el eje de las ordenas tenemos el voltaje entregado por el sistema opto-electrónico. Este voltaje es simétrico, ya que para un movimiento en sentido horario tenemos un voltaje negativo entregado por el sistema y para el sentido antihorario tenemos un voltaje positivo.

De la misma forma se realizaron varias mediciones a velocidades angulares cercanas a los $10^\circ/s$, arrojándonos gráficas como la que se muestra en la siguiente figura.

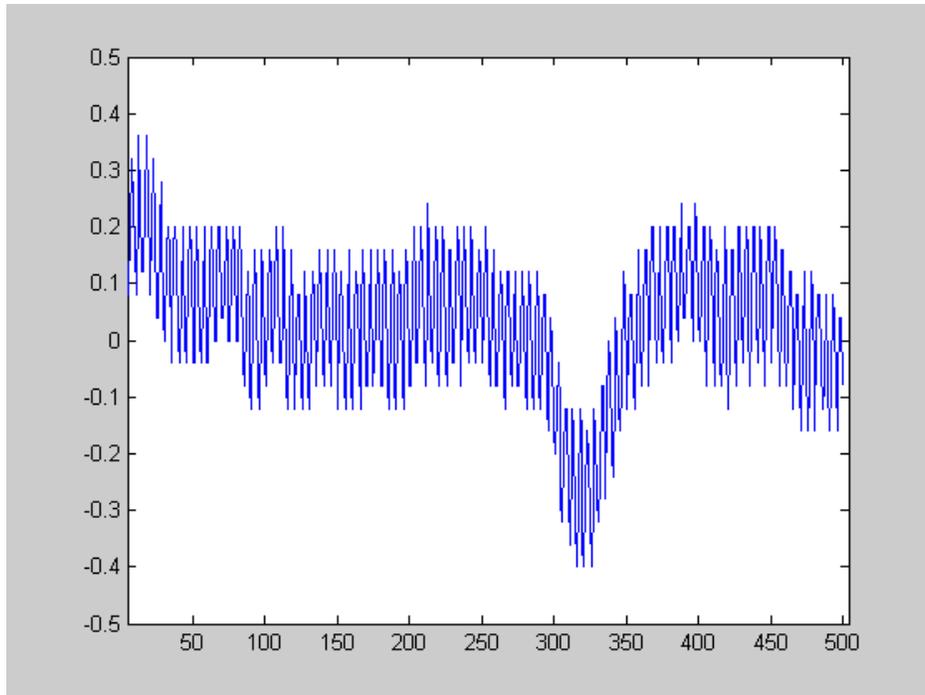


Fig. 4.13 Curva de un movimiento angular de $10[^\circ/s]$ obtenida con el interferómetro de óptica de volumen

En ésta figura se observa un movimiento angular de aproximadamente $10^\circ/s$, sin embargo la cantidad de ruido es muy grande para obtener una gráfica muy clara, no obstante es posible observar el movimiento en sentido horario como una perturbación del voltaje en un pico negativo. Nuevamente el osciloscopio nos entrega el número de muestras que hace en un periodo de tiempo. El tiempo de adquisición del osciloscopio es de $100[S/s]$, esto es 100 muestras en un segundo esto es un muestreo mayor. De igual manera en el eje de las ordenas tenemos el voltaje generado por el sistema. Este voltaje es más de tres veces menor al de un movimiento de mas de $300^\circ/s$, sin embargo el interferómetro no es lineal debido a que las líneas de interferencia presentan un patrón sinusoidal, de tal manera que es necesario hacer mediciones en todo el intervalo para generar la curva de calibración del interferómetro y obtener la relación de movimiento angular-voltaje.

No obstante al someter al interferómetro a movimientos constantes en un sentido y el otro respectivamente, es posible observar que el instrumento responde a tales estímulos al generar la curva de respuesta. Este movimiento es también generado a una velocidad de aproximadamente $10^\circ/s$ en un sentido y rápidamente en el otro sin detener la medición. La gráfica obtenida se muestra en la figura siguiente.

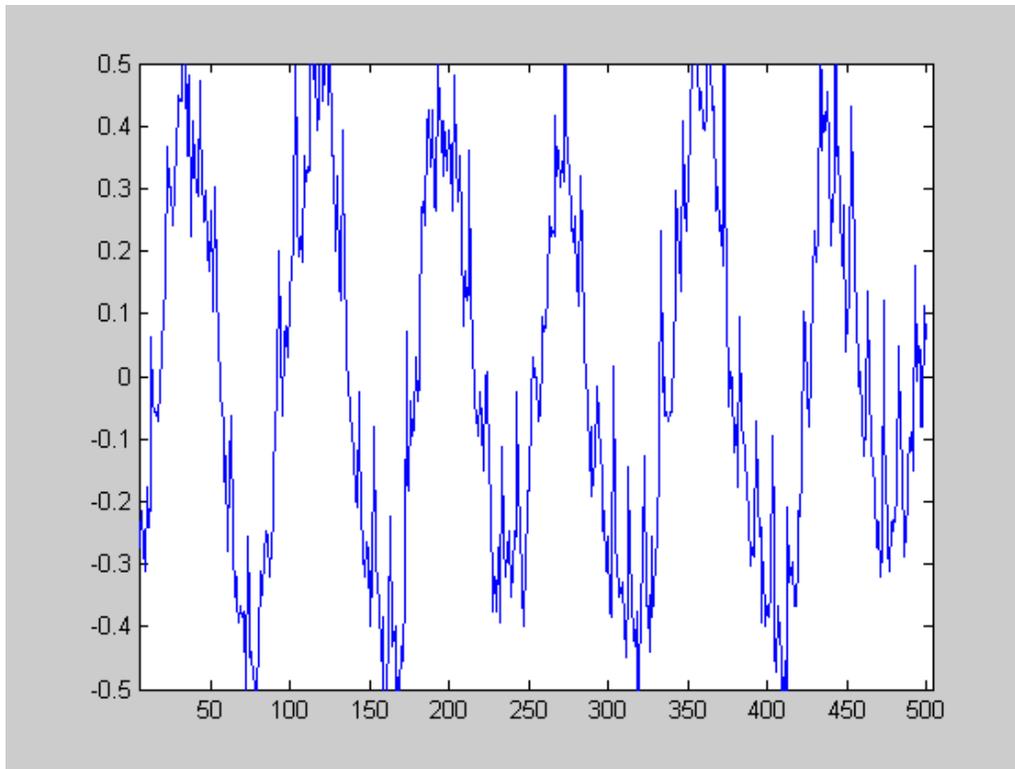


Fig. 4.14 Curva de movimientos angulares de 10 [°/S] obtenida con el interferómetro de óptica de volumen

Resultados de movimientos angulares en el interferómetro de óptica de volumen

De la misma forma que para el interferómetro en óptica de volumen, se obtuvieron los resultados para el interferómetro en fibra óptica, esto es, se realizaron varias mediciones del mismo comportamiento para asegurar la repetibilidad del instrumento, además de asegurar que las mediciones fueran de la misma magnitud para observar la exactitud también.

Los resultados obtenidos con el interferómetro de fibra óptica tienen una mejor resolución que el de óptica de volumen, además de que el ruido es mucho menor también. Esto se debe a que el área encerrada por el lazo interferométrico es mucho mayor en fibra óptica, además de que el láser empleado en el interferómetro en fibra óptica tiene una estabilidad mucho mejor que el de óptica de volumen.

En ésta tesis se muestran dos gráficas de varias obtenidas, en la primera observamos el comportamiento del interferómetro en fibra óptica a un movimiento angular de 3°/s aproximadamente en sentido horario. De la misma manera tenemos que el resultado que nos entrega el sistema opto-electrónico es un pico negativo durante el movimiento. Aun cuando es muy pequeña la variación es muy claro el movimiento y con la posibilidad de realizar una amplificación y filtrado para alcanzar una sensibilidad mucho mayor todavía. Este resultado se muestra en la figura siguiente.

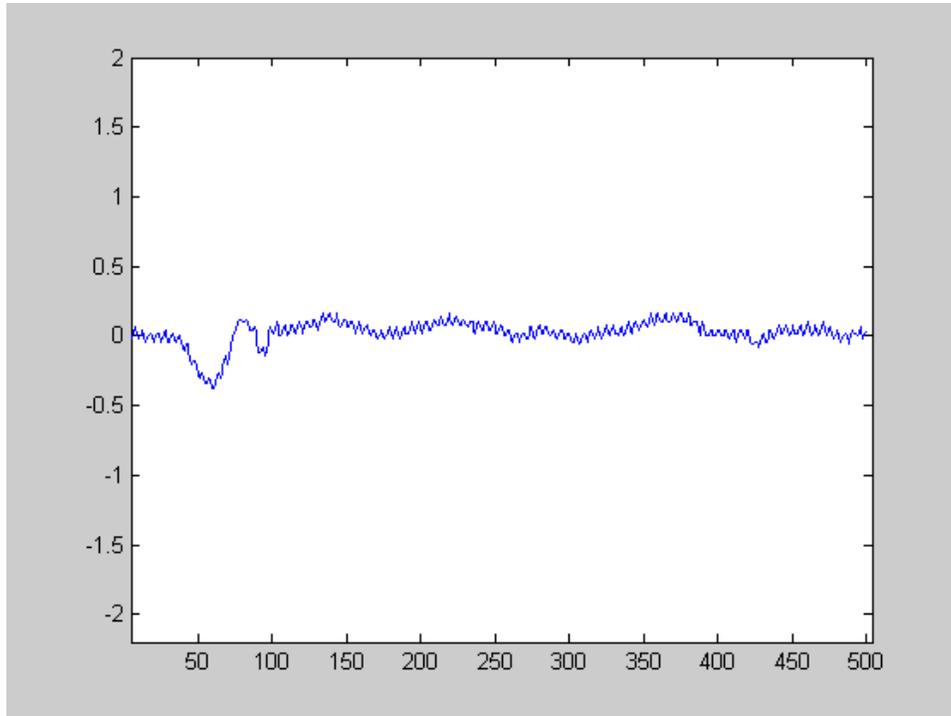


Fig. 4.15 Curva de un movimiento angular de $3[^\circ/s]$ obtenida con el interferómetro de fibra óptica

En la figura anterior observamos la gráfica de un movimiento angular en sentido horario con una magnitud de $3^\circ/s$. En el eje de las abscisas tenemos el número de muestras entregadas por el osciloscopio, esto es, 500 muestras las cuales están a una velocidad de muestreo de 50 S/s, esto es 50 muestras por segundo. Como se observa la perturbación tiene un tiempo de duración de aproximadamente un segundo y el ángulo de movimiento es medido directamente en el sistema físico para determinar la magnitud. También se observa que la perturbación originada por el movimiento es mucho más clara que la generada por el interferómetro en óptica de volumen. Como se comentó esto se debe a que el área del lazo interferométrico es mayor y a que el láser es mucho más estable, además de que no existen ruidos externos como alguna filtración de una luz externa dentro de la fibra óptica como puede ocurrir en el interferómetro de óptica de volumen.

Con respecto a movimientos de velocidades mucho mayores, la gráfica obtenida es muy clara, la cantidad de ruido es prácticamente nula comparada con la señal, además de que la magnitud en voltaje entregado por el sistema opto-electrónico es mucho mayor a las mediciones anteriores. Para ésta medición se repitió el método de realizar un movimiento en ambos sentidos, esto es, hacer un movimiento en sentido antihorario e inmediatamente un movimiento en sentido horario para obtener los dos movimientos en una misma gráfica. Este resultado se muestra en la figura siguiente.

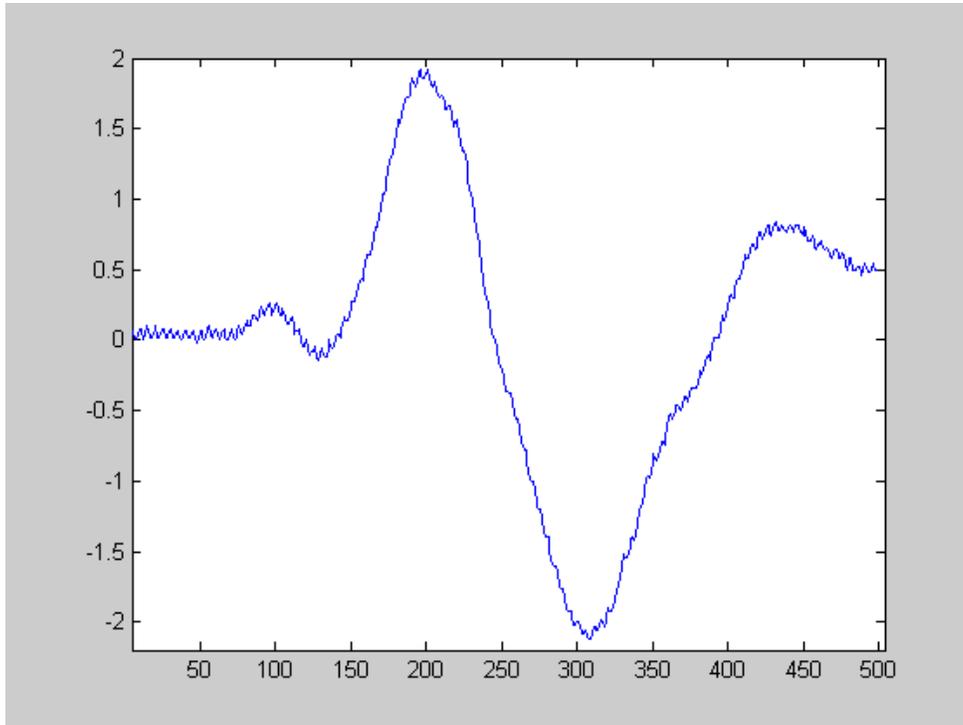


Fig. 4.16 Curva de un movimiento angular a una velocidad de 5rps en ambos sentidos de giro, obtenida con el interferómetro de fibra óptica

En esta gráfica observamos un movimiento angular con una velocidad de aproximadamente de más de 5 revoluciones por segundo, esto se logró al hacer un movimiento muy rápido en el interferómetro, debido a que en él no se emplean piezas mecánicas que puedan generar ruido en la medición y a que la fuente y el fotodetector son parte de lazo interferométrico. Para ésta medición se realizó un movimiento muy rápido de 360° aproximadamente en 0.2 segundos. Este tiempo se observa en el osciloscopio al ver el tiempo que tardo la perturbación. El ángulo de giro se mide directamente desde donde comenzó el giro hasta donde terminó. En el eje de las abscisas tenemos que el osciloscopio trabaja a una velocidad de muestreo de 500 [S/s] o muestras por segundo.

En esta gráfica también observamos que no se realizó el movimiento a la misma velocidad para cada sentido, ya que en el movimiento en sentido antihorario se observa que la perturbación tardo aproximadamente 0.2 [S] y en la de sentido horario tardo 0.3 [s] el movimiento. Esto se debe al error humano al realizar el movimiento, ya que se trata de un movimiento rápido en el que no es muy fácil de controlar la velocidad. También observamos que existe una simetría entre las magnitudes ya que son prácticamente las mismas para los dos sentidos solo cambia el signo de la magnitud reportada.

De la misma forma que en el interferómetro en óptica de volumen podemos observar que es factible que el intervalo de éste interferómetro es mayor, sin embargo obtener mediciones mucho mayores o menores a las que se reportan en ésta tesis, necesitaría de un trabajo adicional en la instrumentación, metodología de medición y análisis de resultados y mejora en el instrumento diseñado.

4.3.- CONCLUSIONES.

El desarrollo de ésta tesis estuvo orientado a la construcción de dos interferómetros de Sagnac, tanto en óptica de volumen como en fibra óptica, con la finalidad de mejorar su sensibilidad en sus configuraciones básicas. El objetivo de las aplicaciones es emplear éstos interferómetros como parte de sistemas de sensado de otros parámetros físicos diferentes a los movimientos angulares. Para poder lograr éstos objetivos fue necesario hacer un estudio de los fenómenos físicos que envuelven a ambos interferómetros, así como todos los temas necesarios para el desarrollo práctico de éstos dispositivos. También fue necesario hacer las propuestas necesarias en el mejoramiento de los esquemas básicos fundamentándolos solidamente para su desarrollo físico. Estos diseños fueron construidos físicamente y pudieron ser comprobadas las propuestas hechas. Además éstas propuestas fueron demostradas teóricamente y están explicadas completamente a lo largo de ésta tesis.

Conjuntamente con éstas herramientas teóricas, también se recurrieron a otras herramientas para realizar un diseño sencillo de la medición de las señales que entregara cada sistema interferométrico. Debido a la naturaleza de éstos interferómetros, la señal entregada por ambos es similar en varios parámetros, por lo que fue posible crear un sistema de transducción opto-electrónico igual para ambos interferómetros, esto es trabajar con la instrumentación adecuada para obtener buenas mediciones de señales entregadas por los sistemas interferométricos.

Este sistema de transducción opto-electrónico está basado en el tipo de señal que entregan los interferómetros de Sagnac; al conocer las características propias de las señales como son el offset presentado por ambos, el cual es similar, el ruido de ultrabaja frecuencia (drift) también está dentro de la misma magnitud inferior a los 0.1 [Hz], el ruido de alta frecuencia se comienza a presentar a 1 [kHz]. De ésta forma fue posible generar las etapas electrónicas necesarias para poder obtener una señal que contuviera la menor cantidad de éstos ruidos, una amplitud posible de ser leída con dispositivos de fácil manejo como multímetros u osciloscopios, pero principalmente que se encuentre dentro del intervalo de adquisición de datos de las computadoras para poder ser digitalizado y posteriormente tener un procesamiento digital a través de sistemas de cómputo. Este objetivo se encontró fuera de los que se marcaron inicialmente, sin embargo debido a la gran ventaja que ofrecen los sistemas de cómputo en el sentido de una fácil adquisición de datos y un procesamiento digital de señales, es necesario adecuar algunos objetivos durante el desarrollo de los trabajos futuros, en sistemas de sensado aplicando a los interferómetros de Sagnac como parte de esos sistemas. También se realizó un acondicionamiento de la señal para poder determinar el sentido del giro de cualquiera de los osciloscopios, esto se logró al situar la señal a un valor de cero al estar cualquiera de los dos sistemas en reposo y entregar un valor de señal de acuerdo al sentido del movimiento con un signo en el voltaje.

Finalmente los resultados obtenidos cumplen con el objetivo de mejorar los dos sistemas interferométricos de Sagnac, tanto en óptica de volumen como en fibra óptica; al permanecer en su configuración básica, y mejorar la sensibilidad de ambos sistemas. Todos éstos resultados están explicados a lo largo de este último capítulo demostrando la factibilidad de los diseños propuestos.

BIBLIOGRAFÍA

- 1.- Kjell Krakenes, “Sagnac interferometer for underwater sound detection noise properties”, optics letters / Vol. 14, No. 20 / October 15, 1989
- 2.- P. Fomitchov Sridhar, J.D. Achenbach, “compact phase-shifted Sagnac interferometer for ultrasound detection”, Optic and laser technology, vol. 29 no.6.
- 3.- Sridhar Krishnaswamy, J.D. Achenbach, “Extrinsic and intrinsic Sagnac interferometer for ultrasound detection”, Optical Engineering 1997.
- 4.- M. L. Jakobsen, D. Harvey, “Optical probing of acoustic emission from a rotating tool holder with a Sagnac interferometer”, Proc. Instn Mech Engrs Vol 213.
- 5.- J. Blake, R. T. de Carvalho, “In-Line Sagnac Interferometer Current Sensor”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, January 1996
- 6.- Keiichi Sawada, Masayuki Okihara, “A Wearable Attitude-Measurement System Using a Fiberoptic Gyroscope”, Presence, Vol. 11, No. 2, April 2002, 109–118, the Massachusetts Institute of Technology.
- 7.- Kjell Krakenes, Kjell Blotekjir, “Sagnac interferometer for underwater sound detection: noise properties”, optics letters / Vol. 14, No. 20 / October 15, 1989
- 8.- Motoharu Matsuura, Naoto Kishi, “All-optical wavelength and pulse-width conversion with a Sagnac interferometer semiconductor-based switch”, optics letters / vol. 28, no. 2 / january 15, 2003.
- 9.- Moon Fuk Chan, Guansan Chen, “Optimal sensing of current based on an extrinsic Sagnac interferometer configuration”, Optics and Lasers in Engineering 30 (1998) 17-24.
- 10.- Palma S. “Detection limit of a Sagnac Interferometer”, VI simposium: La optica en la industria, Monterrey, Mexico, 2007.
- 11.- G.W. Day, A.H. Rose, “Faraday effect, the state of the art”, Fiber optic and laser sensors, SPIE, Vol. 985.
- 12.- Masao Takahashi, Kin'ich Sasaki, “Sagnac interferometer-type fibre-optic current sensor using single-mode fiber down leads”, Meas. Sci. Technol. 15 (2004) 1637–1641.
- 13.- Shayne X. Short, Alexandr A. Tselikov, “Imperfect Quarter-Waveplate Compensation in Sagnac Interferometer-Type Current Sensors”, Journal of lightwave technology, vol. 16, no. 7, july 1998
- 14.- Sandoval Eduardo, “Limite de detección de un giroscopio de fibra óptica usando una fuente de radiación superluminiscente”, Revista mexicana de física, 49 (2) 2003.

BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA CONSULTADA.

- 1.- E. De la Rosa, L. A. Zenteno, A. N. Starodumov, and D. Monzon, All-fiber absolute temperature sensor using an unbalanced high-birefringence Sagnac loop , OPTICS LETTERS, 1996
- 2.- Jesse Zheng, All-fiber single-mode fiber frequency-modulated continuous-wave Sagnac gyroscope, OPTICS LETTERS, 2004
- 3.- Motoharu Matsuura and Naoto Kishi,, All-optical wavelength and pulse-width conversions with a Sagnac interferometer semiconductor based switch, OPTICS LETTERS / Vol. 28, No. 2 / January 15, 2003
- 4.- P.P. Yupapin_, P. Chunpang, An experimental investigation of the optical switching characteristics using an optical Sagnac interferometer incorporating one and two ring resonators, Optics And Laser Technology, 2007.
- 5.- Ke-Xun Sun, Martin M. Fejer, Balanced heterodyne signal extraction in a postmodulated Sagnac interferometer at low frequency, October 1, 1997 / Vol. 22, No. 19 / OPTICS LETTERS
- 6.- J. Kim and F. X. Kärtner, F. Ludwig, Balanced optical-microwave phase detectors for optoelectronic phase-locked loops, December 15, 2006 / Vol. 31, No. 24 / OPTICS LETTERS
- 7.- P. A. FOMITCHOV, S. KRISHNASWAMY, J. D. ACHENBACH, Compact phase-shifted Sagnac interferometer for ultrasound detection, Optics & Laser Teclmology, Vol. 29. No. 6, pp. 333-338, 1997
- 8.- Chang-Seok Kim, Bernard Choi, and J. Stuart Nelson, Compensation of polarization-dependent loss in transmission fiber gratings by use of a Sagnac loop interferometer, OPTICS LETTERS / Vol. 30, No. 1 / January 1, 2005
- 9.- David H. Hurley and Oliver B. Wright, Detection of ultrafast phenomena by use of a modified Sagnac interferometer, September 15, 1999 / Vol. 24, No. 18 / OPTICS LETTERS
- 10.- Gabriel Jodor, Guillermo Santiago; _, Ver_onica Slezak, Digitally processed, phase-reading fibre gyroscope, Optics & Laser Technology 32 (2000) 343{346
- 11.- Chang-Seok Kim,* Fatima N. Farokhrooz, and Jin U. Kang, Electro-optic wavelength-tunable fiber ring laser based on cascaded composite Sagnac loop filters, July 15, 2004 / Vol. 29, No. 14 / OPTICS LETTERS
- 12.- O. Tarasenko* and W. Margulis, Electro-optical fiber modulation in a Sagnac interferometer, OPTICS LETTERS / Vol. 32, No. 11 / June 1, 2007

- 13.- K. J. Blow, N. J. Doran, and B. K. Nayar, Experimental demonstration of optical soliton switching in an all-fiber nonlinear Sagnac interferometer, OPTICS LETTERS / Vol. 14, No. 14 / July 15, 1989
- 14.- Kazuhiko Misawa and Takayoshi Kobayashi, Femtosecond Sagnac interferometer for phase spectroscopy, OPTICS LETTERS / Vol. 20, No. 14 / July 15, 1995
- 15.- E. A. Kuzin, B. Ibarra Escamilla, and D. E. Garcia-Gomez, Fiber laser mode locked by a Sagnac interferometer with nonlinear polarization rotation, October 15, 2001 / Vol. 26, No. 20 / OPTICS LETTERS
- 16.- Xiaojun Fang, Fiber-optic distributed sensing by a two-loop Sagnac interferometer, OPTICS LETTERS / Vol. 21, No. 6 / March 15, 1996
- 17.- D. S. Lim, H. K. Lee, K. H. Kim, S. B. Kang, J. T. Ahn, and Min-Yong Jeon, Generation of multiorder Stokes and anti-Stokes lines in a Brillouin erbium-fiber laser with a Sagnac loop mirror, November 1, 1998 / Vol. 23, No. 21 / OPTICS LETTERS
- 18.- Bing Qi, High-resolution, large dynamic range fiber length measurement based on a frequency-shifted asymmetric Sagnac interferometer, December 15, 2005 / Vol. 30, No. 24 / OPTICS LETTERS
- 19.- Kazi Sarwar Abedin, Masaharu Hyodo, and Noriaki Onodera, Measurement of the chromatic dispersion of an optical fiber by use of a Sagnac interferometer employing asymmetric modulation, March 1, 2000 / Vol. 25, No. 5 / OPTICS LETTERS
- 20.- M. C. Gabriel and N. A. Whitaker, Jr., Measurement of ultrafast optical nonlinearities using a modified Sagnac interferometer, OPTICS LETTERS / Vol. 16, No. 17 / September 1, 1991
- 21.- Moon Fuk Chan, Guansan Chen, Optimal sensing of current based on an extrinsic Sagnac interferometer configuration, Optics and Lasers in Engineering 30 (1998) 17-24
- 22.- G.T. Bold, T.H. Barnes, Phase-difference amplification using a Sagnac interferometer, Optics and Lasers in Engineering 33 (2000) 203-217
- 23.- Xiaojun Fang and Richard O. Claus, Polarization-independent all-fiber wavelength-division multiplexer based on a Sagnac interferometer, OPTICS LETTERS / Vol. 20, No. 20 / October 15, 1995
- 24.- Darwin K. Serkland, Glenn D. Bartolini, Anjali Agarwal, Prem Kumar, and William L. Kath, Pulsed degenerate optical parametric oscillator based on a nonlinear-fiber Sagnac interferometer, May 15, 1998 / Vol. 23, No. 10 / OPTICS LETTERS
- 25.- S. Hannemann,* E. J. Salumbides, and W. Ubachs, Reducing the first-order Doppler shift in a Sagnac interferometer, June 1, 2007 / Vol. 32, No. 11 / OPTICS LETTERS

- 26.- Ilya Golub and Eli Simova, Ring resonator in a Sagnac interferometer as a birefringence magnifier, January 1, 2005 / Vol. 30, No. 1 / OPTICS LETTERS
- 27.- H. J. Arditty and H. C. Lefovre, Sagnac effect in fiber gyroscopes, August 1981 / Vol. 6, No. 8 / OPTICS LETTERS
- 28.- Kjell Krakenes, Sagnac interferometer for underwater sound detection noise properties, OPTICS LETTERS / Vol. 14, No. 20 / October 15, 1989
- 29.- C. X. Yu,* H. A. Haus, and E. P. Ippen, Soliton squeezing at the gigahertz rate in a Sagnac loop, May 15, 2001 / Vol. 26, No. 10 / OPTICS LETTERS
- 30.- T. Shirai, Surface-profile measurement by means of a polarization Sagnac interferometer with parallel optical feedback, March 1, 1999 / Vol. 24, No. 5 / OPTICS LETTERS
- 31.- M. Jinno and T. Matsumoto, Ultrafast all-optical logic operations in a nonlinear Sagnac interferometer with two control beams, OPTICS LETTERS / Vol. 16, No. 4 / February 15, 1991
- 32.- Yat Hei Lo, A.R.D. Somervell, T.H. Barnes, Wavefront measurement with a phase-shifting lateral-shearing Sagnac interferometer operating in broadband light, Optics and Lasers in Engineering 43 (2005) 33–41

Angular movement optical sensor

Salvador Palma-Vargas^{a*}, G. Eduardo Sandoval-Romero^a, Angélica Ramírez-Ibarra^a

^aCentro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico,
Universidad Nacional Autónoma de México, A. P. 70-186, D. F., 04510, México

ABSTRACT

Most of the investigations that exist about the interferometer of Sagnac in our days, are made through fiber optic, which has the great advantage of having a big area size in very little space wound in a nucleus. The first interferometers of Sagnac, were used for very big angular speeds measures, it didn't have the advances to carry out detections of small signs, because the measurements systems like photo-detectors, amplifiers, filters, etc. didn't have the capacity of the systems that now exist. That is one reason that our experiments are based on the electronic advances, to make detections of phase changes of until less than 0.1 nm with area of 0.025 m². Besides we proposed changes in the original interferometer diagram, adding some elements that can helps to achieve a bigger sensibility, accuracy and reduction of noise.

Another of the advantages of use an interferometer of Sagnac, is work directly with the beams that travel through it, because we can observe the behavior from the optic road to external physical effects, like angular velocity or speed and little movements. Finally the acquisition devises and the software were used for calculate the angular frequency of the sensor directly from the experiment and know the parameters of the movement.

Keywords: Fiber optic gyroscope, Sagnac's interferometer, optic interference, electronic stage.

1. INTRODUCTION

The development and advances in the knowledge of the science have brought with it a great advance in the applications of the same ones, like the progress and study of the fiber optic, and the exploration of applications to new and old measure devices, as consequence of this, exist devices which were developed directly in fiber optic, this is the case of the fiber optic gyroscope (FOG) [1] [2]. This device is broadly used as sensor of angular rotation movements, and it is very used in marine and air sailing systems, even in space sailing systems, like satellites or space stations [3] [4]. The theory base of this device is the Sagnac effect, which is the base of study of this investigation, because it is a good field to develop some investigations and new proposals. Most of the investigations that exist about the Sagnac's interferometer in our days, are through a nucleus of fiber optic, which has the great advantage that it can have a great area size in very little space with a wound in a nucleus, for such reason it can have a bigger sensibility in the system, because at the delay of the signs that travel through the interferometric loop [5].

In a principle the Sagnac's interferometer could be employed for measures with a big delay between the signs traveling in the interferometric loop, because didn't exist the necessary advances to be able to carry out detections of small phase changes in the signs and the measure systems like photo-detectors, amplifiers, filters, etc. didn't have the capacity of the systems that exist now, also the new acquisition systems, and the powerful tools of calculation of the new softwares, help to make easy the visualization, calculation and quick measure of the parameters systems. This is a reason for our experiments are based on the electronic advances to be able to make detections of phase changes of until less than 0.1nm in a Sagnac's interferometer with an area of 0.025m² [6] and make a quick processing of the output signals.

The Sagnac's interferometer has similar applications like the interferometer of Fabry-Perot and Mach-Zender, because they can make measures of length or very small displacements until nanometers, the difference among them is the displacements sensed range for each interferometer, because each one has different range and resolution, that depends on the physical characteristics with is constituted each interferometer [7].

* ingsalvargas@yahoo.com.mx; phone 52 55 56228602 ext. 1190; fax 52 55 56228651

Also the construction objective and design like optic sensor of angular movements, it is necessary make an analysis of the results obtained, to determine that so profitable is the system, and this is, to see if it is convenient to carry out later improvements for another type of applications and build a automatic acquisition system, besides to analyze that so much can compete with the measure systems that exist or to compare it with some of them, like in performance and in profitability.

2. MEASUREMENT METHOD

The physical theory of the Sagnac effect is explained with a phase change among the beams in contra-propagation, and this phase change is dependent of the area contained by the optic loop made by the beams, besides the angular speed that suffers the whole system. In the modern systems, this optic loop is through a fiber optic, with it we increase the area of the system, having a wound of fiber with many turns and we enlarge its sensibility [8], also exist other mechanisms to give a great sensibility to the interferometrics systems, like fiber optics dopated, mix with other interferometrics shemes, etc. In the original design of the Sagnac's interferometer the area is very small, otherwise a big system would be obtained, for this are used amplifiers of great magnitude and efficiency to be able to obtain favorable results and avoid this problem [2][9].

The difference phase of the beams in the Sagnac's interferometer is given for:

$$\Delta \phi_R = \frac{8 \pi A}{c \lambda} \Omega , \tag{1}$$

The difference time of the beams in the Sagnac's interferemeter is given for:

$$\Delta t_v = \frac{4 A \Omega}{c^2} , \tag{2}$$

Where:

- λ - It is the wavelength of the light beam.
- Ω - It is the angular speed of the system,
- c - It is the speed of the light in the air,
- A - It is the area contained by the optic loop.
- π - It is a constant.

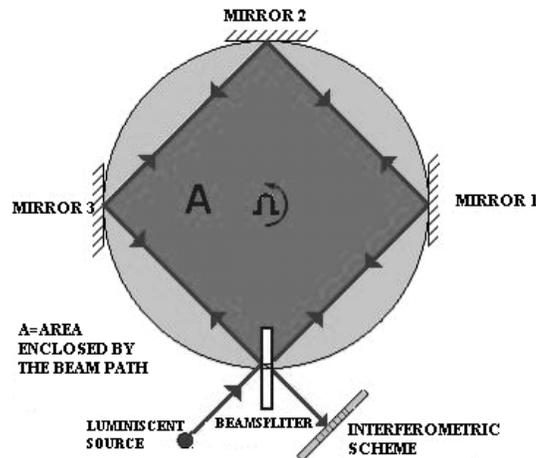


Fig. 1: The Sagnac's interferometer is showed in the figure; it looks the basic components of the system, which are: a luminescent source, a beamsplitter and 3 or more mirrors that form the optic loop to obtain with it an interferometric scheme.

This phenomenon is applicable for any closed loop, not necessarily regular form. For example the beam can be divided in two and travel for an square optic loop, or it can be totally irregular, with this, we can affirm that the effect is independent of the optic path in that the two beams form the area, but it is dependent of the area contained by the beams.

3. EXPERIMENTAL WORK

One of the objectives of this work is build an interferometer system, with base in the Sagnac effect and that their operation can be employed to carry out physical measurements as angular movements, like speeds, velocities and angular displacements, also made calculation software with the acquired data from the experiment to get quickly the results of the movement. The special characteristic of the system resides in that was built in the basic and simple configuration of the effect, this with the purpose of being able to work with the new sensed and amplification systems that now exist and to obtain good results, besides having the advantage of can interact directly with the beams that travel through it and with this to have a great sensibility in the changes of the path of the beams.

The scheme of the system built that is shown in the figure 2, is similar to the ideal interferometric system proposed in the Sagnac effect, which consists of a luminescent source, a beamsplitter, some mirrors that form the optic loop, with that which we will be able to obtain an interferometric scheme to carry out analysis of results.

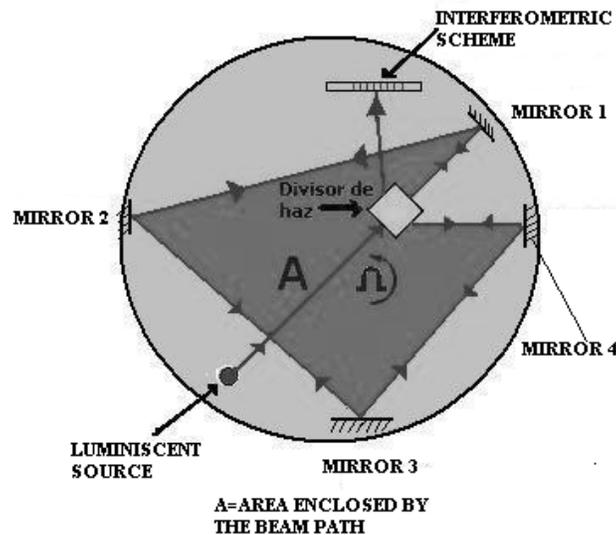


Fig. 2. Sagnac's interferometer in open loop configuration.

In the figure 2 we can see that the interferometer consists of a source of high coherence (laser at 670 nm), a beamsplitter (50-50), mirrors (95% reflection), photo-detector, electronic amplifier, movable base, collimator and base for adjustable mirrors.

Contrary to the original outline, in the system that we build, the optic loop it is not a regular form and the laser beam crosses the system and later is divided in two beams for travel in contrary paths formed by mirrors and return to recombine them, another characteristic of this system is that the interference scheme is formed in a different place of the luminescent source, to this way get a detection of the optical signal by a electronic system, and later to amplify and filter the electronic signal to obtained the result sign.

This second objective mentioned, is the detection of the sign through an optics-electronic transduction detection method. All this based on the advances in devices optoelectronics and electronic as it was mentioned previously. As part of this objective, we propose changes in the original design; this is, to improve the interferometric system proposed by Sagnac with the new devices.

The proposal optic-electronic detection, is based in the change of the interferometric path, this is, when exist a movement angular, the interferometric path change, the position of the interferometric lines moves to the side to side depending of the direction of the movement, I mean, a line moves to right side of the interferometric path if the movement was in the clock direction and vice-versa with the movement of the interferometric line to the left side. This is based in the physical interference of the beams and the movement of the system. Using this idea of the movement of the lines, we propose a method of the light power detection of the Sagnac's interferometer. Using the well known edge effect, we put a collimator in the interferometric path with the edge effect, the edges divide a line of light in two, having just the half power of the line and a second edge divide a dark line in two in the same way; with this method we can made that the quantity of light change when exist a movement to direction or other direction, getting the answer of the system for a movement for clock direction or clock contra-direction. In the figure 3 this proposal is showed.

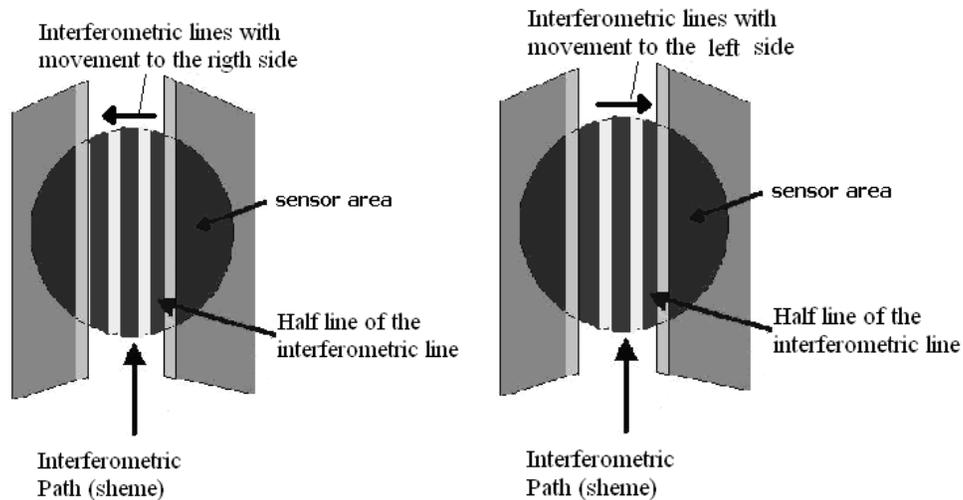


Fig 3. Interferometric path, divide with the edge effect to know the direction of the angular movement.

A new proposal is given in this work, that one is to fix the mechanical pieces, but not in a permanent way for posterior changes of the scheme, with this we avoid with this some disalignments, but to make that the beams can form the interferometric path, is necessary to have a great alignment of all the pieces of the system like mirrors, laser and beamsplitter. We propose a lent that open the beams at the output of the beamsplitter and with a single alignment we can get the interferometric path in a plane. With this we avoid the great alignment and problems to form the interferometric path In the figure 5 we show this proposal.

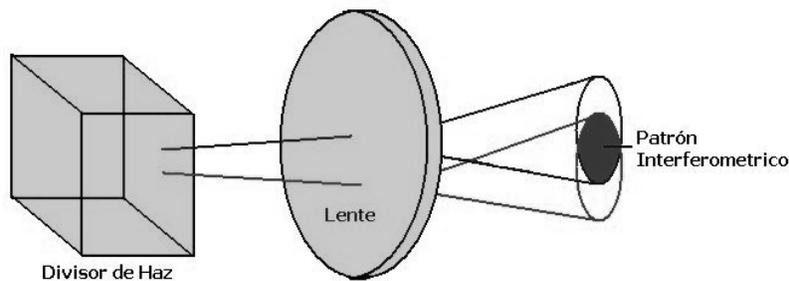


Fig. 4. With a lent at the output of the beamsplitter we can avoid a great alignment of the mirrors, laser and beamsplitter and form the interferometric path.

An instrumentation system for measures, it contains many elements that are employees after the transducer, this with the purpose of carrying out a manipulation of the sign that gives the transducer, this sign can be an electric sign as a voltage or a current. The electronic system made for measure the signal in the Sagnac's interferometer proposed, is showed in the next scheme.



Fig. 5 shows the electronic system built for measure the out signal from the Sagnac's interferometer

The first stage is the transduction optic-electronic, in that we can transform the optical signal in a electrical signal, this in made with a photo-detector, it can be made alto with a fix of photo-detector for more sensitivity. The second stage can be used or not, because is just an impedance fit that the next stage can made. This third stage is a pre-amplification, this necessary because the elements used in the physical build and the electronic detection, are not ideal, this is, that the elements presents loses and the signal is decreased in each one. In this last stage, the amplification is not so big, because the noise is amplificated too; because of this, the next stage is a filter for eliminated the noise caused by electromagnetic noise, environment noise, optical noise, etc. and just having the necessary signal.

A big amplification is made in the fifth stage, at time that the noise was eliminated, and we have a signal that can be used for detections or results of the movement, but additional to this stage, we can use another stages that can show us the graphical signal and get an data acquisition for a computational process of the signal.

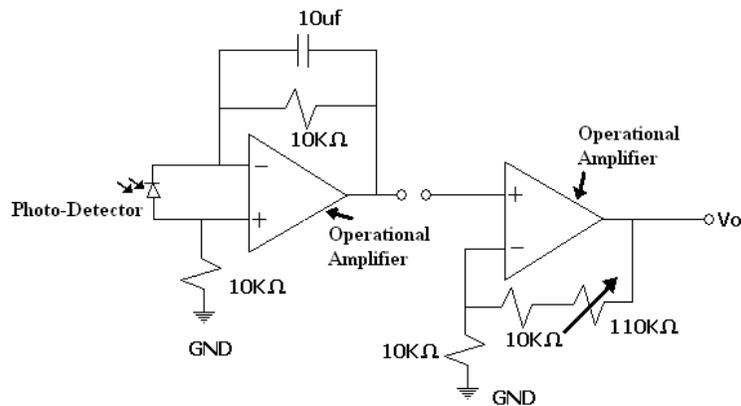


Fig. 6 electronic stages: transduction, impedance fit, and pre-amplification

In the stage of experimentation, always are some doubts about the results and system behavior, for eliminate this doubts, we used a system that realize the same measure and get a comparison between both system, this comparison, is just about response time, because, the measure range is different. The system used for this comparison is a fiber optic gyroscope (FOG). For this comparison we made the experiments of angular movements under same condition for both systems, working at same time, for this way get the results of both systems for same parameter at same time.

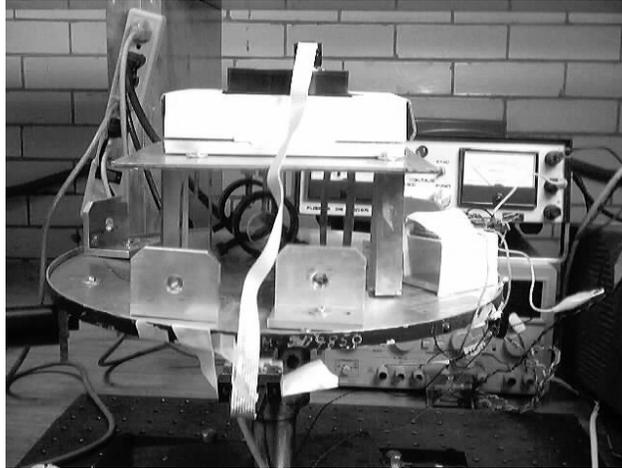


Fig. 7 The picture shows the two systems working at same time, with the same conditions for the same movement, this give us two responses from the same physical parameter, and made a comparison of the time response.

4. EVALUATION OF RESULTS

4.1 Angular movement (acceleration, velocity)

One in the ways of simple application of an interferometer of Sagnac, is as sensor of angular speed, for that, this device development is used for this proposition, also with the employment of systems of amplification of signs and filtrate we can exploit the device this way, a way to check the result obtained for the measure of physical parameters of angular speed, is with another similar device as it is already the developed gyroscope of optic fiber the one which also this based on the effect Sagnac.

The angular movements are not uniforms or constants, for that, the graphic shows an ascended curve that means acceleration, the descended part of the curve is a des-acceleration, and the constant line means a constant velocity. These observances are the system response for velocity and acceleration, and the graphic (Fig. 6.), form is the behaviour of the movement, with this, we can analyse each angular movement and found variation in it.

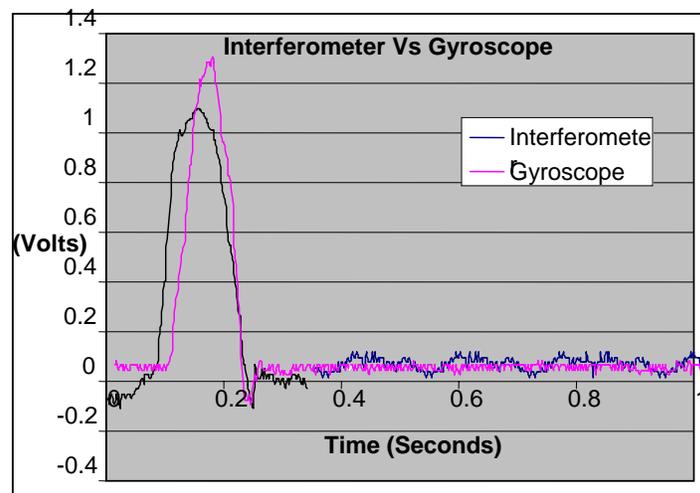


Fig. 8. Angular movement (Time vs. Voltage)

With an acquisition system we can sample the signal and get an output file of the measure, this file can be process and filtering digitally. With the proposal to make a calculation stage and improve the system response, we use the new computational systems and the powerful calculation softwares. A program in the software matlab in the graphical menu, we get the response of the system in frequency or angular frequency of the movement and we can know the broadband of the movement and if this was an acceleration movement, speed movement, and its angular displacement.

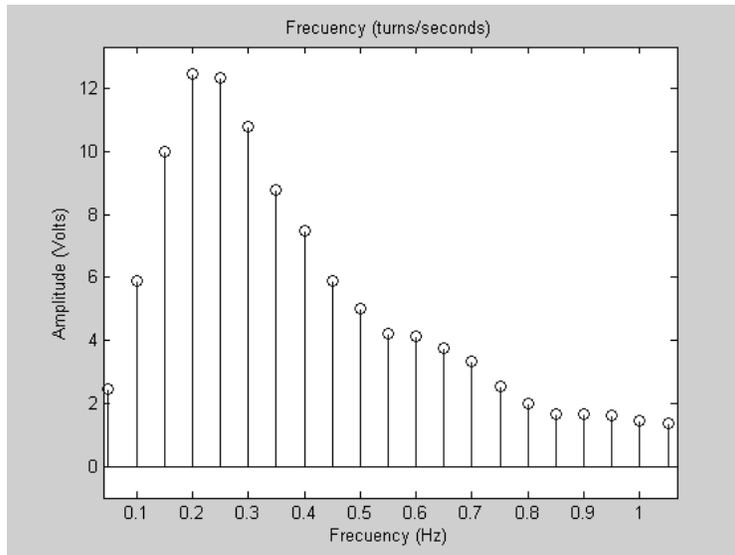


Fig. 9. Frequency graphic (Frequency vs. Voltage)

5. CONCLUTIONS

The principal objective for this work, was built an angular velocity optical sensor, based in the optical phenomenon of interference. The complete design of this interferometric system had some stages of construction and develop, but the principal propose made was made changes at the original scheme for get a better sensitivity, thought the new advantages of the electronic systems and made an analysis of performance and profitability. The proposes made at original system was a good idea for optimization and improve the original scheme.

We made a comparison between a new interferometric system proposed and a fiber optic gyroscope. Whit the results of this comparison, we can see the behavior of the system proposed and observe that both systems gives a similar response for the same physical parameter, this assure us the devise has the right behavior and give us a good response and the proposes made for the physical system were corrects.

Whit the changes made at the original interferometrical system, we can get a better response of the system, this is the principal contribution of this work, the proposed changes are the schematic structure, design, electronic stage. Finally we made and an acquisition data to improve the filtering and get the calculations for the answer in frequency with help of the software matlab and a program designed for this proposit.

REFERENCES

1. H. Lefevre, *The fiber optics gyroscope*, (Boston-London, Artech House), 1993.
 2. R.T. Carvalho, J.Blake, "The Sagnac Interferometer as a Two-Parameter Sensor", *Journal technology*, **13**, 7, 1995.
 3. J. M. Estudillo-Ayala et al, *Rev. Mex. Fís.*, **47**, 3, 2001.
 4. G. E. Sandoval-Romero, V. A. Nikolaev, "Límite de detección de un giroscopio de fibra óptica usando una fuente de radiación superluminiscente", *Rev. Mex. Fís.*, **49**, 155-165, 2002.
 5. Leszek R. Jaroszewicz, Zgigniew Krajewsky, Lech Solarz, "A new area of the fiber-optic Sagnac interferometer application", *Proceedings SBMO/IEEE MTT-S IMOC*, 661-666, 2003.
 6. J. Blake, P. Tantaswadi, R. T. de Carvalho, 'In-Line Sagnac Interferometer Current Sensor,' *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 11, pp. 116-21, Jan. 1996.
 7. S. M. Bennett, R. Dyott, D. Allen, J. Brunner, R. Kidwell, R. Miller, "Fiber optic rate gyros as replacements for mechanical gyros", *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, **AIAA-98-4401**, 1998.
 8. H.H Cerecedo, E.A.Kuzin, "Breve revisión del estado actual del interferómetro de Sagnac formado con fibra óptica de alta birrefringencia", *Rev. Mex. Fís.* **46**, 512-517, 2000.
 9. Salvador Palma Vargas, "Sensor óptico de velocidad angular", Thesis, , Laboratorio de Óptica Aplicada, Centro de Ciencias Aplicada y Desarrollo Tecnológico-UNAM, 2005.
-
1. H. Lefevre, *The fiber optics gyroscope*, (Boston-London, Artech House), 1993.
 2. G. E. Sandoval-Romero, V. A. Nikolaev, "Límite de detección de un giroscopio de fibra óptica usando una fuente de radiación superluminiscente", *Rev. Mex. Fís.*, **49**, 155-165, 2002.
 3. S. M. Bennett, R. Dyott, D. Allen, J. Brunner, R. Kidwell, R. Miller, "Fiber optic rate gyros as replacements for mechanical gyros", *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, **AIAA-98-4401**, 1998.
 4. J. M. Estudillo-Blake, P. Tantaswadi, R. T. de Carvalho, 'In-Line Sagnac Interferometer Current Sensor,' *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 11, pp. 116-21, Jan. 1996.
 5. H.H Cerecedo, E.A.Kuzin, "Breve revisión del estado actual del interferómetro de Sagnac formado con fibra óptica de alta birrefringencia", *Rev. Mex. Fís.* **46**, 512-517, 2000.
 6. Salvador Palma Vargas, "Sensor óptico de velocidad angular", Thesis, , Laboratorio de Óptica Aplicada, Centro de Ciencias Aplicada y Desarrollo Tecnológico-UNAM, 2005.
 7. R.T. Carvalho, J.Blake, "The Sagnac Interferometer as a Two-Parameter Sensor", *Journal technology*, **13**, 7, 1995.
 8. Ayala et al, *Rev. Mex. Fís.*, **47**, 3, 2001.
 9. Leszek R. Jaroszewicz, Zgigniew Krajewsky, Lech Solarz, "A new area of the fiber-optic Sagnac interferometer application", *Proceedings SBMO/IEEE MTT-S IMOC*, 661-666, 2003.

SENSOR OPTICO DE MOVIMIENTOS ANGULARES

S. Palma-vargas^{1*}, G.E. Sandoval-Romero¹, A. Ramirez-Ibarra¹

¹ Centro de Ciencias Aplicadas Y Desarrollo Tecnológico, Universidad Nacional Autónoma de México, A. P. 70-186, D. F., 04510, México

*Salvador Palma Vargas, 55+56228602 ext. 1190, ingsalvargas@yahoo.com.mx

Abstract

El desarrollo y avances en los conocimientos de la ciencia han traído con ello un gran avance en las aplicaciones de los mismos, prueba de ello es el progreso y estudio de la fibra óptica, así como la exploración de aplicaciones novedosas a nuevos y viejos dispositivos de medición, como consecuencia de esto, existen dispositivos los cuales fueron desarrollados rápidamente en fibra óptica, este es el caso del giroscopio de fibra óptica. Este dispositivo es ampliamente usado como sensor de rotación velocidades angulares, prueba de ello es que es muy usado en sistemas de navegación marítima y aérea, incluso en sistemas de navegación espacial, usado en transbordadores o estaciones espaciales. Este aparato esta basado en el efecto Sagnac, el cual es la base de estudio de esta investigación, ya que es un campo bueno para realizar algunas investigaciones de este interferómetro. La mayoría de las investigaciones que hasta ahora se realizan sobre el interferómetro de Sagnac en nuestros días son a través de lazos de fibra óptica, los cuales tienen la gran ventaja de que pueden tener un gran tamaño de área en muy poco espacio al estar enrollados en un núcleo, por tal motivo se puede tener una mayor sensibilidad del sistema, pero esto se da en el desfase de las señales que viajan a través del lazo interferométrico.

Keywords: Interferómetro, Sagnac, giroscopio de fibra óptica, interferometría

Introducción

En las dos últimas décadas se ha venido dando un gran desarrollo y progreso en el conocimiento de la óptica, esto ha traído un gran adelanto en las aplicaciones y mejoras de los dispositivos ópticos, como el perfeccionamiento y estudio de la fibra óptica, así como la exploración de aplicaciones a los nuevos y viejos dispositivos de medición y sensado, como consecuencia de esto, existen dispositivos que se desarrollaron directamente en fibra óptica, éste es el caso del giroscopio de fibra óptica (FOG por sus siglas en inglés) [1] [2]. Este dispositivo se usa ampliamente como sensor de movimientos de la rotación angulares, y es muy usado en sistemas de navegación marítimos y sistemas de la navegación aéreos, incluso en sistemas de navegación espaciales, como satélites o estaciones espaciales [3] [4]. La base teórica en la cual se fundamenta el FOG es el efecto Sagnac, que es también la base de estudio de esta investigación, debido a que es un campo

aun muy fértil para desarrollar algunas investigaciones y realizar propuestas nuevas de mejora. La mayoría de las investigaciones que existen sobre el interferómetro de Sagnac en nuestros días, están basadas en el uso de un núcleo de fibra óptica, el cual tiene la gran ventaja que puede tener un gran tamaño de área en espacio muy pequeño con una bobina de fibra, por la tal razón se obtiene una sensibilidad mayor en el sistema, debida al retraso de las señales que viajan a través de la bobina de fibra del interferómetro [5].

En un principio el interferómetro de Sagnac solo podrían emplearse para realizar mediciones de movimientos que generaran un retraso grande entre las señales que viajan en el núcleo de fibra del interferómetro, ya que no se contaba con los adelantos necesarios para poder llevar a cabo mediciones de cambios de la fase muy pequeños en las señales. Además los sistemas de la medición como los fotodetectores, amplificadores, filtros, etc. no tenía la capacidad de los sistemas que

existen ahora, también los nuevos sistemas de adquisición, y las herramientas poderosas de cálculo de los nuevos softwares, hacen mas fácil la visualización, cálculo y medición rápida de los parámetros del sistema interferométrico. Es por ello que una de las razones en la cual nuestra investigación es basada, es en los adelantos de los dispositivos electrónicos, las herramientas de cálculo computacionales y los nuevos dispositivos semiconductores de fotodetección. Con ello podemos hacer mediciones de cambios de la fase de hasta menos de 0.1nm en un interferómetro de Sagnac con una área de 0.025m² [6] y hacer un proceso rápido de las señales de salida entregadas por el interferómetro.

El interferómetro de Sagnac tiene aplicaciones similares a los interferómetros de Fabry-Perot y Mach-Zender, ya que con todos ellos se pueden hacer mediciones de longitud o desplazamientos muy pequeños hasta el nanómetros, la diferencia entre ellos son los intervalos de medición de los desplazamientos, ya que cada uno tiene un rango y resolución diferentes, que dependen de las características físicas que constituyen a cada interferómetro [7].

Además del objetivo de construcción y diseño de un sensor óptico de movimientos angulares, es necesario hacer un análisis de los resultados obtenidos, para determinar que tan rentable es el sistema, esto es, estudiar si es conveniente llevar a cabo mejoras más tarde para otro tipo de aplicaciones o construir un sistema de adquisición automático, además de analizar que tanto puede competir con los sistemas de medición que existen o para compararlo con algunos de ellos, como en desempeño y en rentabilidad.

Bases Teóricas

La teoría física del efecto de Sagnac se explica con un cambio de la fase entre dos haces en contra-propagación en el sistema interferométrico, este cambio de la fase es dependiente del área encerrada por el camino óptico formado por los haces, además de la velocidad angular que sufre el sistema completo. En los sistemas

modernos, éste camino óptico esta formado por una fibra óptica, con esta, se incrementa el área del sistema ya que al tener un núcleo o bobina de fibra con muchas vueltas, incrementamos el área y por lo tanto su sensibilidad [8], también existen otros mecanismos para incrementar la sensibilidad a este sistema interferométrico, como el dopaje de las fibras ópticas, mezclas con otros esquemas interferométricos, etc. En el esquema original del interferómetro de Sagnac, el área es muy pequeña, de otra manera se obtendría un sistema interferométrico muy grande, para evitar incrementar el área del sistema, se usan amplificadores de gran magnitud y eficacia para poder obtener resultados favorables y evitar este problema [2][9].

La diferencia de fase de los haces en contra-propagación en el interferómetro de Sagnac esta dada por:

$$\Delta \phi_R = \frac{8 \pi A}{c \lambda} \Omega \quad (1)$$

La diferencia de tiempo de arribo al divisor de haz, por los haces en el interferómetro de Sagnac esta dada por:

$$\Delta t_v = \frac{4A\Omega}{c^2} \quad (2)$$

Donde:

- λ - Es la longitud de onda de los haces de luz.
- Ω - Es la velocidad angular del sistema.
- c - Es la velocidad de la luz en el aire.
- A - Es el área encerrada por el camino óptico.
- π - Es una constante.

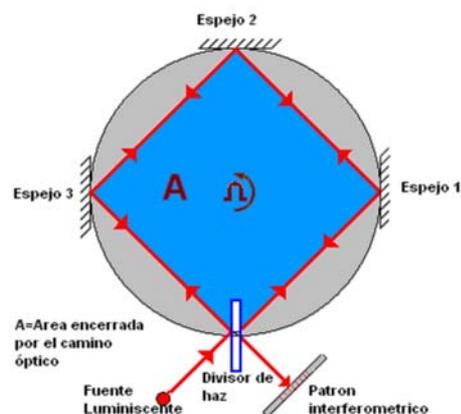


Fig. 1: El interferómetro de Sagnac es mostrado en la figura; se observan los componentes básicos del sistema: una fuente luminiscente, un divisor de haz (beamsplitter) y 3 o más espejos que forman el camino óptico para finalmente formar un patrón interferométrico.

Este fenómeno es aplicable para cualquier área cerrada, no necesariamente se debe de tener una forma regular. Por ejemplo el haz puede ser dividido en dos y puede viajar formando un camino óptico cuadrado, o puede ser totalmente irregular, es por ello que podemos afirmar que el efecto es independiente del camino óptico formado por los haces, pero si dependiente del área contenida por ellos.

Trabajo Experimental

Uno de los objetivos de este trabajo, es construir un sistema interferométrico, con base en el efecto de Sagnac para emplearse en mediciones físicas de movimientos angulares, como aceleraciones, velocidades y desplazamientos angulares. También se plantea la programación de un software de cálculo, con el cual se realiza la adquisición de datos y análisis del experimento para conseguir los resultados del movimiento rápidamente. La característica especial del sistema reside en que esta construido en la configuración básica y simple del efecto, esto con el propósito de trabajar con los nuevos sistemas de amplificación que ahora existen y obtener una mayor sensibilidad. Una de las grandes ventajas de trabajar con un sistema interferométrico en óptica de volumen, es que podemos trabajar directamente con los haces que viajan a través del sistema, con esto tenemos una gran sensibilidad en los cambios del camino formado por los haces.

El esquema del sistema construido se muestra en la figura 2, es similar al sistema interferométrico ideal propuesto por Sagnac, el cual consiste de una fuente luminiscente, un divisor de haz, y algunos espejos que forman el camino óptico. Con este esquema podemos obtener un sistema interferométrico para realizar mediciones de movimientos angulares, además con ayuda de un dispositivo de adquisición de datos y con un programa de cálculo se realiza un análisis y obtención de resultados rápidamente.

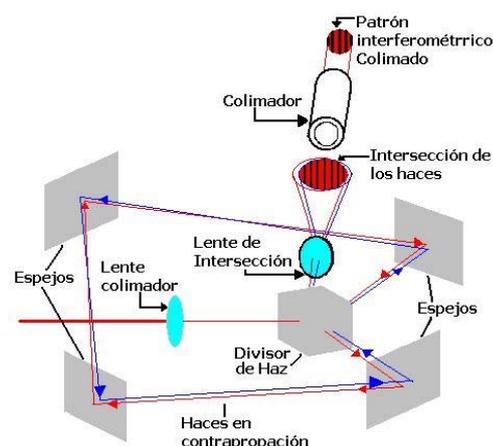


Fig. 2. el interferómetro de Sagnac en configuración de lazo abierto.

En la figura 2 podemos observar que el interferómetro consiste en una fuente de alta coherencia (láser a 670 nm), un divisor de haz (50-50), espejos (95% de reflexión), colimador. Posteriormente un fotodetector y la etapa de acondicionamiento de señal.

A diferencia del esquema original, en el sistema que construimos, el camino óptico no tiene una forma regular. Otra característica de este sistema es que el patrón interferométrico se forma en un lugar diferente a la fuente luminiscente, de esta manera se consigue la detección del patrón interferométrico con un fotodetector independiente a la fuente luminiscente, para después amplificar y filtrar la señal obtenida del foto-detector a través de un sistema electrónico y obtener una señal eléctrica como resultado del sistema interferométrico.

Un segundo objetivo propuesto, es la medición de la señal a través de un método de transducción óptico-electrónico para incrementar la sensibilidad al sistema evitando pérdidas o ruido electrónico. Como parte de este objetivo, nosotros proponemos cambios en el esquema original; esto con el objetivo de mejorar el sistema interferométrico propuesto por Sagnac.

La propuesta de detección y transducción óptico-electrónica, esta basada en el cambio del patrón interferométrico formado, esto es, cuando existe un movimiento angular, el patrón cambia de posición su alineación de interferencia, la posición del patrón varia según los

movimientos angulares de lado a lado dependiendo de la dirección del movimiento angular, esto es, una línea de interferencia constructiva se mueve hacia la derecha si el movimiento angular que sufre el sistema es en sentido de las manecillas del reloj, y vice-versa para el movimiento de la línea de interferencia al lado izquierdo. Este fenómeno físico está basado en la interferencia de los haces y el movimiento angular del sistema. Usando esta idea del movimiento de las líneas de interferencia del patrón interferométrico, nosotros proponemos un método para la detección de movimientos angulares con el interferómetro de Sagnac. Usando el bien conocido efecto navaja, empleamos un colimador en el patrón interferométrico, así solo tomamos una parte del patrón interferométrico. Posteriormente con el efecto navaja, dividimos una de las líneas de interferencia constructiva por la mitad con una navaja y de la misma manera una línea de interferencia destructiva con otra navaja; con este método nosotros podemos detectar un pequeño cambio en el patrón interferométrico, además podemos distinguir el sentido de movimiento en una dirección o en otra, esto es que, podemos saber la dirección de giro del sistema para el sentido de las manecillas del reloj o en sentido contrario a las manecillas del reloj. En la figura 3 se muestra esta propuesta.

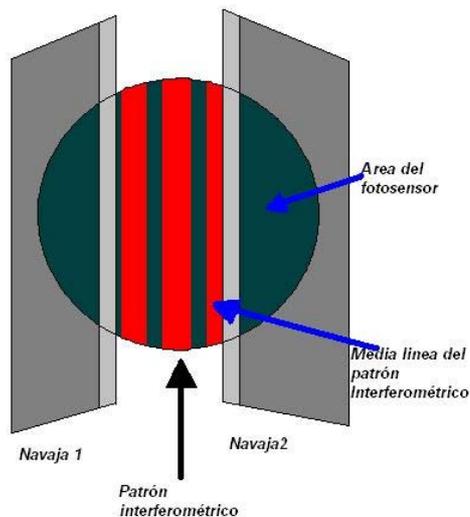


Fig 3. El patrón Interferométrico es dividido con el efecto navaja para distinguir la dirección del movimiento angular.

Un sistema de instrumentación para medición o sensado, contiene muchos elementos posteriores a la etapa de transducción, esto con el propósito de llevar a cabo un acondicionamiento de la señal entregada por el transductor, esta señal puede ser una señal eléctrica como un voltaje o una corriente. El sistema electrónico construido para la medición y acondicionamiento de la señal entregada por el transductor se muestra en la siguiente figura.

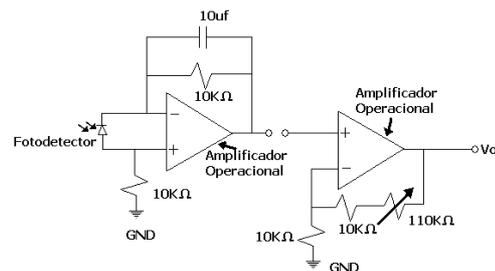


Fig. 4 Se muestra el sistema electrónico construido para la medición de la señal de salida del interferómetro de Sagnac.

Durante la experimentación, siempre hay algunas dudas sobre los resultados y comportamiento del sistema, para eliminar esta duda, empleamos un sistema que realiza la misma función de medición de movimientos angulares para hacer una comparación entre ambos sistemas. El sistema usado para esta comparación es un giroscopio de fibra óptica (FOG). Para esta comparación, se realizaron experimentos de medición de movimientos angulares bajo las mismas condiciones para ambos sistemas, trabajando ambos al mismo tiempo, de esta manera los resultados de ambos sistemas son para la misma medición.



Fig. 5 En la imagen se muestra a los dos sistemas de sensado de movimientos angulares que trabajan al mismo tiempo bajo las mismas condiciones, esto nos da dos respuestas del mismo parámetro físico para hacer una comparación de los resultados.

Evaluación de Resultados

Los movimientos rectilíneos, angulares o de cualquier otro tipo son difícilmente constantes, esto es, que existen muchas variaciones de su velocidad o sus velocidades y no son uniformes o constantes. Es por ello que si tuviéramos una velocidad constante también tendríamos una gráfica que nos mostrara una constante. Las gráficas obtenidas con el sistema interferométrico construido para este trabajo, muestran una curva en la cual existe un comportamiento ascendente que significa aceleración, la parte descendente de la curva es una des-aceleración, y la línea constante una velocidad constante. Estos comportamientos de la curva son la respuesta del sistema para la velocidad y aceleración. Por lo tanto la forma de la curva es el comportamiento del movimiento angular al que fue sometido el sistema, con esto, nosotros podemos analizar cada movimiento angular y las variaciones de este.

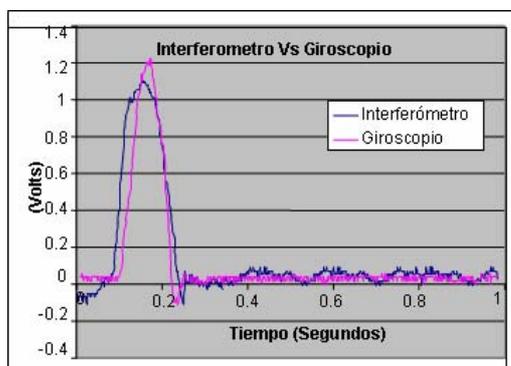


Fig. 6. el movimiento Angular (Tiempo vs. Voltaje)

Conclusiones

El objetivo principal de este trabajo, fue construir un sensor óptico, basado en el fenómeno óptico de interferencia y el efecto Sagnac, para medir movimientos angulares. El desarrollo completo de cualquier sistema interferométrico, tienen algunas fases de construcción y desarrollo, pero el propósito principal de este sistema en particular, era realizar cambios al esquema original para conseguir una sensibilidad mejor, empleando los nuevos sistemas electrónicos y realizar un análisis

de desempeño y rentabilidad. Las propuestas hechas son buenas ideas para la optimización y mejora del esquema original del interferómetro de Sagnac.

Se hizo una comparación entre el sistema interferométrico propuesto y un giroscopio de fibra óptica. Con los resultados de esta comparación, pudimos observar el comportamiento del sistema propuesto y observar que ambos sistemas dan una respuesta similar para el mismo parámetro físico, esto nos asegura que se tiene un comportamiento correcto y una buena respuesta.

Con los cambios realizados al sistema interferométrico original, hemos obtenido una mejor respuesta del sistema, ésta es la contribución principal de este trabajo, los cambios propuestos son la estructura esquemática, diseño de una etapa electrónica y detección a través de una transducción opto-eléctrica.

Referencias

- [1]. H. Lefevre, El giroscopio de ópticas de fibra, (Boston-Londres, Artech House), 1993.
- [2]. R.T. Carvalho, J.Blake, "El Sagnac Interferometer como un Sensor del Dos-parámetro", tecnología del Periódico, 13, 7, 1995.
- [3]. J. M. el Estudillo-Ayala et al, Rev. Mex. Fís., 47, 3, 2001.
- [4]. G. E. Sandoval-Romero, V. A. Nikolaev, "Límite de la detección del giroscopio del un de la fibra óptica usando una fuente del superluminiscente de la radiación", Rev. Mex. Fís., 49, 155-165, 2002.
- [5]. Leszek R. Jaroszewicz, Zgigniew Krajewsky, Lech Solarz, "UNA nueva área de la Sagnac interferometer aplicación fibra-óptica", Procedimientos SBMO/IEEE MTT-S IMOC, 661-666, 2003.
- [6]. J. Blake, P. Tantaswadi, R. T. de Carvalho, ' el En-línea Sagnac Interferometer el Sensor Actual, ' IEEE Trans. Delivery de Power, vol. 11, pp. 116-21, Ene. 1996.

- [7]. S. M. Bennett, R. Dyott, D. Allen, J. Brunner, R. Kidwell, Molinero de R., "Fibra el gyros de la proporción óptico como reemplazos para el gyros mecánico", Instituto americano de Aeronáutica y Astronáuticas, AIAA-98-4401, 1998.
- [8]. H.H Cerecedo, E.A.Kuzin, "el Breve revisión del estado el interferómetro del del real del formado de Sagnac contra la óptica de la fibra del birrefringencia del alta", Rev. Mex. Fís. 46, 512-517, 2000.
- [9]. Salvador Palma Vargas, "el óptico del Sensor de la velocidad angular", Tesis, Laboratorio de Óptica Aplicada, Centro de Ciencias Aplicada y Desarrollo Tecnológico-UNAM, 2005.

DETECTION LIMIT OF SAGNAC'S INTERFEROMETER

Salvador Palma-Vargas^{a*}, G. Eduardo Sandoval-Romero^a, Angélica Ramírez Ibarra^a
^aCentro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico,
Universidad Nacional Autónoma de México, A. P. 70-186, D. F., 04510, México

ABSTRACT

In this work an implementation of angular sensor movements is made based on the Sagnac effect, made it in volume optics, using a detection method of the interference lines and its amplified pattern. The new devices of sensing through optical systems, have given a new vision of measurement and instrumentation, guiding to new studies on designs and prototypes of themselves. An example of these developments is the advance in devices of sensing in fiber optic, such is the fiber optic gyroscope (FOG) which is based on the Sagnac effect. This device has a great sensitivity because the area enclosed by the interferometric ring, is through a fiber optic coil, which increases the sensitivity and diminishes the size of the device.

It is possible to indicate that in previous years, with the technology then existing, the utility to use the Sagnac effect like a gyroscope was very limited, because it was just employed to measure angular movements of great magnitudes and with very big areas, since there was not the optical detection systems of the great sensitivity that now exist or coherent sources with high power, indispensable elements in the implementation of the system. For that reasons, the application of this effect began to grow with the development of the fiber optic, and was possible diminish the size and increase the area of the device. Thus the Sagnac effect in volume optics was relegated by the fiber optic interferometer. Nevertheless using the new electronic systems of amplification and optoelectronic devices that now exist, we have rescued the Sagnac effect in volume optics to make measurements of angular velocities in an interferometric system of 0.25m². For this work, was necessary to create a detection system of great quality, this was made using a detection method of the interference lines and amplification of the interferometric pattern.

1. INTRODUCTION

In the last two decades has come giving to a great development and progress in the knowledge of the optics, this have brought a great advance in the applications and improvements of the optical devices, as the improvement and study of the fiber optic, as the exploration of applications to the new and old devices of sensing and measurement. The optical fiber sensors have matured so much in the last years, that from them a new technology exists that is still in developing [1, 2], measurement devices of temperature, pressure, flow of heat, sensing and gas detection, angular movements, etc. Many of these devices had a development stage, in which they were conceived in optics of volume and later modified in fiber optic to obtain greater sensitivities, size diminution or remote sensing. Nevertheless, some of them were not developed in their initial stage in this form, and having a main investigation of the effects that involve some physical parameter in fiber optical [3]. Some others were used in volume optics as prototypes of single investigation and could be developed widely when appeared the first fiber optic, and improved at the same time that the fiber optic technology manufacture advanced; this is the case of the fiber optic gyroscope based on the Sagnac effect [4, 5]. That is the reason that the great majority of the existing investigation of the Sagnac effect has been and is made in fiber optic.

The fiber optic gyroscope has a great advantage over the Sagnac's interferometer in volume optics, in the sense that the sensitivity of the Sagnac effect is based in the enclosed area by the interferometric path and with a fiber optic coil the area is increased and sensitivity is increased too. Nevertheless because in the last years the advance in systems of electronic measurement and optoelectronic devices has been able to rescue some of the designs obtained in volume optics to increase the sensitivity of these devices and make improvements in the designs constructed many years ago. Also thanks to the great advance obtained in the optic sources like lasers and leds mainly, it is possible to design systems of greater efficiency and stability in optical power. In addition, with amplification systems and electronic filters of great power that now exist, is possible to get better acquisition of signals with very low intensity involved in noise.

Due to the lack of the electronic and optoelectronic systems that exist at the present time, in previous years, this reason was a stone in the way for the design of optical sensors, as in sensitivity and performance as in design. Nevertheless although most of the systems of optical sensing are based on well-known physical effects, was necessary not just have the optoelectronic devices, and have systems of amplification and filtrate of great power, since most of these physical effects, have very low intensity to be able to be measured or to be detected through sensors of very low sensitivity. Some others sensor must be able to measure defacements, modulation or some other physical parameter between optical signals, which were not possible until the arrival of the fiber optics or the amplifying systems and/or analogical and digital electronic filters.

With the new existing computational tools, is also possible to make measurements in very fast and exact way, in addition to being able to make all the processing of the signal given by the interferometer, completely in a digital way through a computer, and with the help of specialized software, is feasible to make manipulations to the signal, obtain exact results of measurements, and diminishing the costs of the system with the analogical devices of signal processing. In addition to save the results of measurements and make a comparison between them with other later ones measurements, or just verify the operation of the interferometer.

The interferometer of Sagnac was used to make measurements of angular motions of several degrees per second and with dimensions of several square meters. Even there is a report of an interferometer system of some hectares that was made to obtain a greater sensitivity. The interferometer of Sagnac began to have applications of angular movements sensing for rotation systems, in which it was necessary to make precise measurements of the turn gave at the system with exactitudes of some degrees per second. It is for that reason that modern version of the interferometer, the FOG, is used with the same intention; with a sensitivity of until $0.001^\circ/\text{hr}$. with the intention to make measurements in terrestrial, marine, aerial positioning systems, and even in space positioning systems. Nevertheless for some measurements in which is not necessary to have a high resolution like that gives a FOG, is possible use single interferometric systems, but with a high trustworthiness and low cost. For that reason, in this work is done a rescue of the interferometer of Sagnac in volume optics using the new technologies of electronic systems and optoelectronic devices, increasing sensitivity and diminishing the size of the interferometric system that were exist in previous years.

At the beginning, the Sagnac's interferometer could be used to make measurements of movements that generated a great delay between the signals that travel in the optical way of the interferometer, since there weren't the advances necessary to be able to carry out measurements of very small changes of the phase in the signals. This is one of the reasons on which our investigation is based, in the advances of the electronics and the computational tools of calculation and the new semiconductor devices of photodetection. With it, we have could make measurements of phase changes of less of 0.1nm in an interferometer of Sagnac with an area of 0.025m^2 [6] and make a fast signals process of the output given by the interferometer.

The interferometer of Sagnac has applications similar to the interferometers of Fabry-Perot and Mach-Zender, since with all of them very small measurements of length or displacements can be done until the nanometers, the difference between them, is the intervals of displacements measurement, since each one has a different rank and resolution, that depend on the physical characteristics that constitute each interferometer [7].

In addition to the objective of construction and design of an optical sensor for angular movements, it is necessary to make an analysis of the obtained results, to determine the system profitable, is mean, to study how advisable to carry out improvements later for another type of applications or to construct an automatic system of acquisition, besides to analyze that as much it can compete with the systems of measurement that exists or to compare it with some of them, like in performance and yield.

2. THE SAGNAC EFFECT, THEORETICAL BASES

The Sagnac effect was demonstrated in 1913 by the French Sagnac. The physical principle is explained with a beam of light of a coherent source, which is injected to a beam splitter, that will divide the beam in two beams of the same characteristics of wavelength and amplitude, then to make them travel in a loop formed by an optical way of mirrors and later to recombine them in the same point where they were divided. Both beams form a closed trajectory, which enclose an area that dependent of the optical way, in addition the beams travel in opposite senses through the optical way formed by the mirrors. Therefore the trajectories that follow the beams are the same ones but in opposite senses, and finishing in the same point where the division of the beams was made. In figure 1 the scheme proposed by Sagnac is observed to demonstrate the operation of the physical phenomenon. [8]

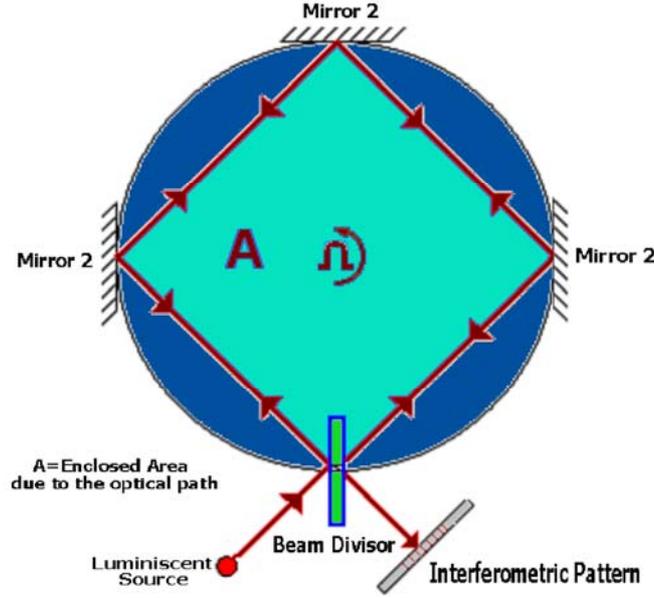


Figure 1. Sagnac's interferometer.

The phase difference of the beams in against-propagation in the Sagnac's interferometer is given by:

$$\Delta \phi_R = \frac{8 \pi A}{c \lambda} \Omega \quad (1)$$

The time difference of arrival at the beam splitter by the beams in the Sagnac's interferometer is given by:

$$\Delta t_v = \frac{4A\Omega}{c^2} \quad (2)$$

Where:

λ - Is the wavelength of the light beams.

Ω - Is the angular velocity of the system.

c - Is the speed of the light in the air.

A - Is the area locked up by the optical way.

π - Is a constant.

Due to the nature of the interference pattern that exists in the Sagnac's interferometer, is well know that this is originated by two plane waves of the same characteristics and that interfere in the plane of the beamsplitter with an angle θ between them. If we considered that the two plane waves are equal in intensity, one propagating in direction z , we have the equation of wave:

$$U_1 = I_0^{1/2} \exp(-jkz) \quad (3)$$

And the other with an angle θ with z -axis in the plane x - z , its equation of wave is:

$$U_2 = I_0^{1/2} \exp[-j(k \cos \theta z + \sin \theta x)] \quad (4)$$

In the point $z=0$ of the plane, the two waves are with a phase difference

$$\varphi = kx \sin \theta \quad (5)$$

Reason why the interference equation produces the total intensity of:

$$I_2 = I_0 [1 + \text{Cos}(k \text{Sin} \theta x)] \quad (6)$$

The pattern changes sinusoidal in x -axis, and with a period:

$$\frac{2\pi}{k \text{Sin} \theta} = \frac{\lambda}{\text{Sin} \theta} \quad (7)$$

Figure 2. For example, If $\theta = 30^\circ$, the period is 2λ . This suggests a method to print or to create a sinusoidal pattern of high resolution, to use it like a discordant diffraction. This also suggests a method of monitoring the angle θ between a wave when it is interfering with other wave of reference, and obtaining the resulting distribution of its intensity. [9]

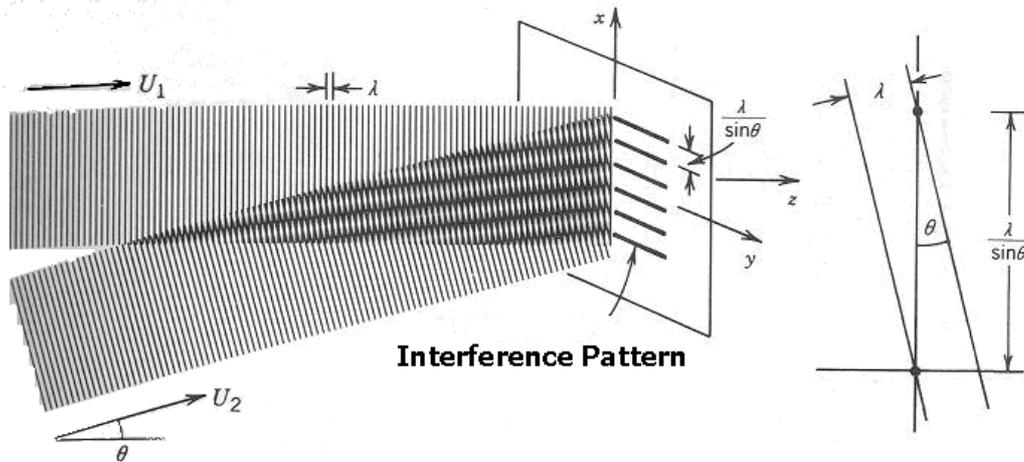


Figure 2. Interference pattern.

3. EXPERIMENTAL WORK

One objective throughout this work consists in create an interferometric system, based in the Sagnac's effect, to be used in physical measurements of angular movements, like acceleration, speed, velocity and angular displacements. The special characteristic of the system resides in its construction, and also in the basic and simple configuration of the effect, we have the purpose to work with the new systems of amplification that exist nowadays and to obtain a higher sensitivity. One of the best advantages to work with an interferometric system in volume optics is that we can work directly with the beams that travel through the system, with this we can achieve a higher sensitivity in the changes of the path formed by the beams.

The Sagnac's effect is applicable for any enclosed area, because of this reason is not necessary to have a regular form on the path. For example, the beam can be divided in two beams and these can travel forming a square optical path, or it could be completely irregular, that is why we affirm that the effect is

independent of the optical path formed by the beams, but is dependent of the area contained by them. This also can be observed in the equations that model the phenomenon (ec.1, 2), since in them we observed that the effect depends of the light source wavelength, the angular movement suffered by the system and of the area that enclose the beams in counterpropagation and not of the trajectory that these follow. With this fact is possible to make an interferometric system in which, the formed area enclosed by the beams could have any path even if it is not symmetrical, and the total dimensions of the system can be diminished. Thus in the interferometric system proposed in this work, the elements are in a different position from the traditional configuration of the Sagnac's interferometer.

The scheme of the constructed system is showed in figure 3; it is similar to the ideal interferometric system proposed by Sagnac that consists of a luminescent source, a beamsplitter, and some mirrors that form the optical way. [10]

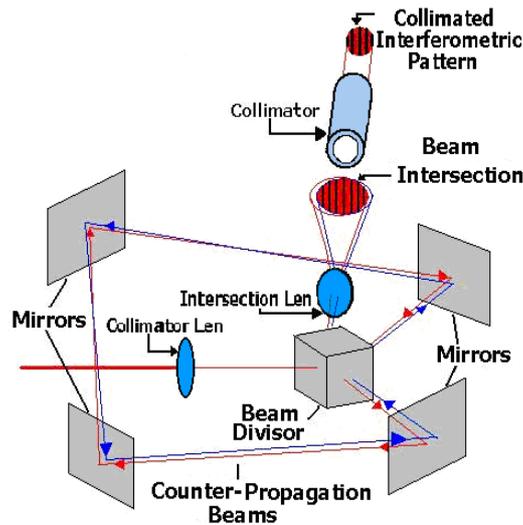


Fig. 3 The Sagnac's interferometer in configuration of open loop.

Figure 3: It can be observed that the interferometer consists of a high coherent source (laser to 670 nm), a beamsplitter (50-50), mirrors (95% of reflection), and collimator.

One of the proposed objectives is the measurement of the signal through an optical-electronic transduction method in order to increase the sensitivity and avoiding possible losses or electronic noise. For this, we propose changes in the original scheme; this with the objective to improve the interferometric system proposed by Sagnac.

The detection proposal and transduction optic-electronic is based on the changes formed on the interferometric pattern, we mean when an angular movement exist the pattern changes the position due to its interference alination; the position of the pattern changes according to the angular movements from side to side, depending of the direction of the angular movement. If one constructive line of interference is moving towards the right side if the angular movement suffered by the system is on clockwise and vice versa if the angular movement that suffers the system is to the left side.

This physical phenomenon is based on the beams interference and the angular movements occurred in the system. Using the idea of the interference lines movement of the interferometric pattern, we propose a method for the detection of angular movements with the Sagnac's interferometer. In addition if we employ the well-known knife effect, and also a collimator in the interferometric pattern, we are just taking a small part of the entire interferometric pattern obtained. Afterward with the knife effect the pattern will be divided, taking one of the lines of constructive interference partially with a knife and a line of destructive interference with another knife; with this method we can detect a small change in the interferometric pattern, furthermore we can distinguish the sense of movement in one direction or in another one, we mean, we can identify the direction of the movement in clockwise or in opposite direction, suffered for system for the sense.

In figure 4 is showed this proposal.

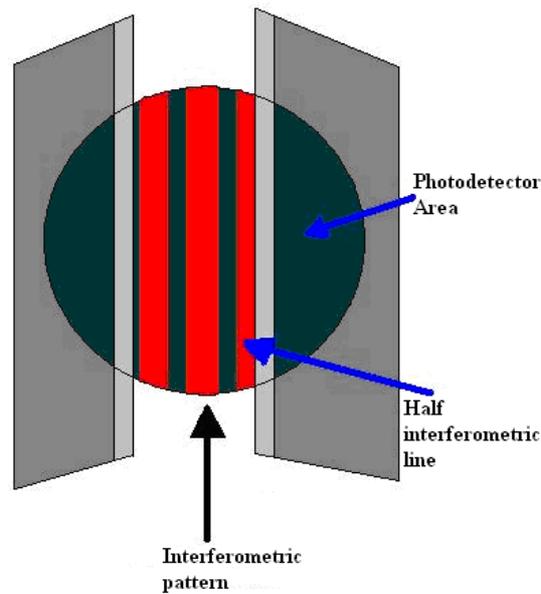


Fig 4. The Interferometric pattern is divided with the knife effect to distinguish the angular direction of movement.

The size of the line's wide depends of the incidence angle in the light beams interference plane, because of this, the line's wide can be modified by changing the incidence angle of the beams and the area enclosed by the beams. This is a huge advantage in the detection, since the distance between the lines depends on the wavelength light source too; working with long wavelengths as in this case at 632 nm, it is possible to make changes on the detection, the incidence angle of the beams and the position of the knives, to fit the sensing area of the photodetector.

An instrumentation system for measurement or sensing, contains many elements after the transduction stage, with the purpose to perform the signal given by the transducer, this signal can be an electrical signal like a voltage or a current. The electronic system constructed for the measurement and perform of the signal given by the transducer is in the following figure.

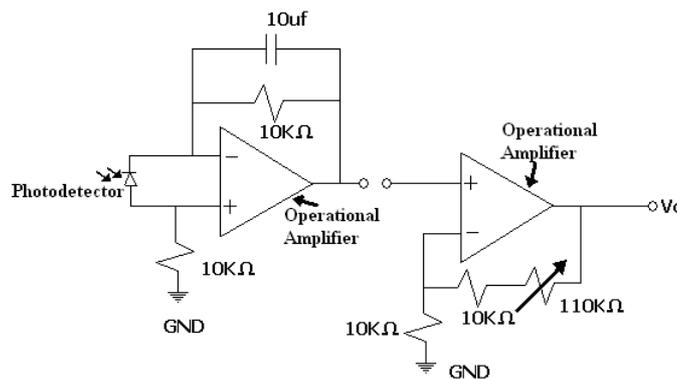


Fig 5. In the figure is showed the constructed electronic system for the measurement of the output signal from the Sagnac's interferometer.

The design proposal, besides it allows its use in a space configuration different from the Sagnac's interferometer, it let us obtain a higher sensitivity of the system using the knife effect like a part of the optical-electronic transduction system. Nevertheless the sensitivity is directly related to the line's wide of the interference pattern, since the movement of the lines is sensed by the photodetector or CCD camera. This is the main problem that we attacked in this work, it was necessary to know the theoretical bases in which the transduction is sustained to the complete sensor.

If an angular movement of the interferometric system exists, it's translated in the movement of the interference lines due for the defacement of the beams. Nevertheless to illustrate this movement of the interference lines is necessary to conceive the light beams like plane wavefronts.

When exists defacement in the wavefronts of the light beams, this is translated as a movement of the interference lines, because the wavefronts are intersected in a different place when the defacement does not exist. Consequence of these, the intersection of the beams depends of which one wavefront is delayed, therefore is possible to determine the rotation direction of the complete system determining the movement of the interference lines. Nevertheless the Sagnac's interferometer of volume optics, generates defacements of the beams of some nanometers for smaller areas to 1 [m²], the movement of the interference lines also has very small movements, often imperceptible.

Despite this method of sensing and transduction it can be used, since the wide of the lines depends on the angle between the light beams, and we can increase the sensitivity of the system, because having wide lines the movement of them is also bigger.

To obtain this proposal it's necessary to modify the interferometric system of Sagnac and we justified that the phenomenon is not dependent of the optical path using any form for the construction of the area. The proposal that we are doing is based on the equations that model the formation of the interferometric pattern (ec. 6 and 7), like in the analysis of the wave fronts that form the light beams, fig 6 and 7. Nevertheless the maximum sensitivity of this system is limited, due to the different noises and the physics of the system, reason why the maximum sensitivity occurs when the angle between both wave fronts is near to zero. It is for that reason that to have this maxima sensitivity is necessary to analyze the wide of the light beam and the distances between the mirrors that form the optical path.

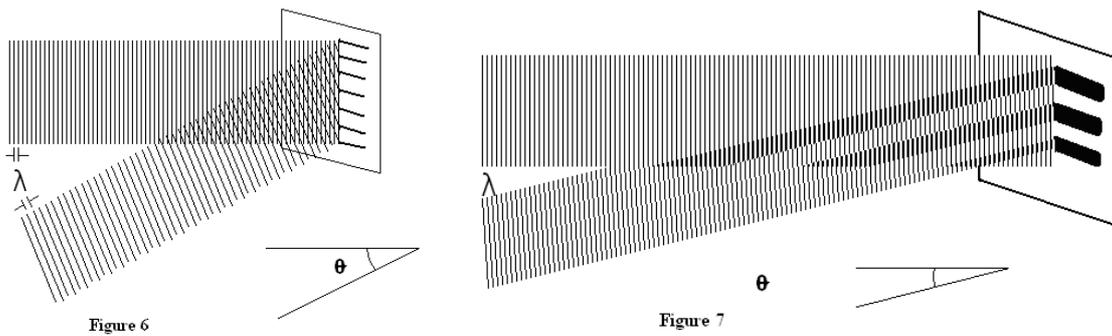


Fig. 6 and 7. Interferometric Patterns formed by plane wavefronts, with different angle of intersection.

4. RESULTS

The results obtained at this moment with this measurement method with the Sagnac's interferometer, were verified with a system that has an irregular area for the formation of an interferometric pattern of 15 interference lines, and we take just tree lines for the measurements of the angular movements. Nevertheless due to the big amount of lines, the sensitivity of the interferometer is for measurements of tens degrees per second. But it was possible to determine the sense of the movement through the effect knife and to determine the movement of the interference lines generated by the wave fronts of the beams. In addition it was possible to construct the electronic conditioning system to improve the measurement of these movements, avoiding or diminishing noises like the mechanic, electronic or electromagnetic, besides to amplify the signal given by the photodetector.

Nevertheless to increase the sensitivity of the system, a bigger analysis of the theoretical bases was made and later modified. We reached the conclusion that the sensitivity of the Sagnac's interferometer in volume optics, depends directly of the movement of the interference lines that are obtained when the beams interferes. For this, it was necessary to generate the equations that model the intersection of the interference lines, observing that its widelines depends directly of the angle between the beams that form them. Thus we can register them more easily, also we could have wider lines and therefore the movements of these will be also more sensible. Nevertheless it was necessary to determine the dependency from the Sagnac effect to the area and not to the optical path that form it.

A second interferometric system was constructed to prove the theory proposed. In this system the intersection angle of the beams, is obtained in the beam splitter and with a smaller angle near to 2° which

three interference lines were obtained in comparison to the first design, for that reason the measurements of smaller magnitude of angular movements, will be optimal with this new design due to the increment of the sensitivity. In figures 8 and 9 are showed the interferometric patterns with these two designs.



Fig. 8. Interferometric pattern, obtained with wavefronts with an intersection angle major of 10 degree.

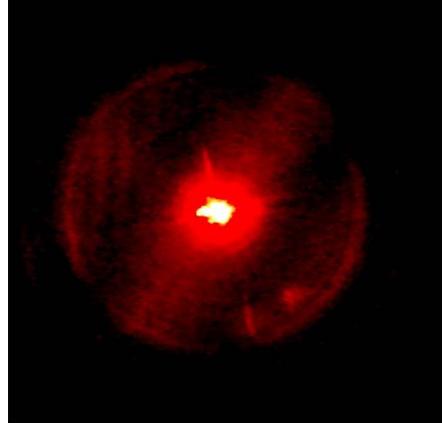


Fig. 9. Interferometric pattern, obtained with wavefronts with an intersection angle minor of 2 degree.

5. CONCLUSIONS

We proposed a method for the determination of the rotation or direction of a Sagnac's interferometer in optics of volume through the well-known knife effect, with a simple methodology that shows the determination of the turn due to the wave fronts that form the interferometric pattern. Nevertheless due to the thin of the interference lines, the sensitivity of the system is poor and it can be improved through electronic methods. To increase the sensitivity of the system to angular movements, an analysis of the physical bases of the Sagnac's effect and the formation of the interference lines was made, the interferometric pattern equations were obtained and with these results, a modification of the Sagnac's effect configuration was made theoretically, comparing the results obtained with the mathematical models. Thus the sensitivity limit of the Sagnac's interferometer in volume optics was exposed, using the movement of the interference lines like sensing method. Finally the theoretical and partial experimental results are showed.

REFERENCES

1. - A.L. Harmer, "Principles of optical fibre sensors and instrumentación", Batteelle, Geneva Research Centres, Switserland, Measurement and control, Vol. 15, pp. 143-151.
- 2.- Thomas G. Giallorenzi, Joseph A. Bucaro et al, "Optical Fiber Sensor technology", IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. QE-18(4), pp 626-665
3. - Charles M. Davis, "Fiber Optic Sensors: An overview, Optical Engineering", Vol. 24(2), pp 347-351.
- 4.-V. Vali, R.W.Shorthill, "Fiber ring interferometer", Optical Society of America, applied Optics, Vol. 15(5), pp 1099-1100.
5. - S. Ezekiel, H.J.Arditty, "Fiber optics gyroscopes, Fiber optic rotation sensors and related technologies", 2-26.
6. - R. Ulrich, "Fiber Optic rotation sensing with low drift", Optical Society of America, Optic Letters, Vol 5(5).

- 7.- Francis T.S. Yu, "Fiber Optic Sensors", University Park, Pennsylvania, Ed. Marcel Dekker, pp. 383-415, 2002.
8. - Sagnac, G., "L'éther lumineux démontré par l'effet du vent relatif d'éther dans un interféromètre en rotation uniforme," Comptes rendus de l'Académie des Sciences, Vol. 95, 1913, pp. 708-710.
9. - Bahaa E. A. Saleh, Malvin Carl Teich, "Fundamentals of Photonics", Wiley-Interscience publications, 1991.
- 10.- Salvador Palma-Vargas, Sandoval-Romero E, Ramirez-Ibarra A. , "Optical Angular Movement Sensor", Proc. SPIE Vol. 6343, 634329, Photonics North 2006; Pierre Mathieu; Ed.

Single Sagnac's Interferometers Instrumentation, based in the Best Detection Limit.

Salvador Palma-Vargas^{a*}, Angélica Ramírez-Ibarra^a, G. Eduardo Sandoval-Romero^a

^a*Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico,
Universidad Nacional Autónoma de México, A. P. 70-186, D. F., 04510, México*

Abstract. An interferometric system of volume optics and fiber optic were constructed and proved, showing the instrumentation technique made for these devices, supported in the new technologies of optical detection, amplification, analogical and digital filtrate and single data acquisition. Based on the Sagnac's effect of volume optics and fiber optic, the interferometer of Sagnac has many applications, nevertheless the methods of construction, design and instrumentation for the sensors manufacture of based on both designs are not very well-known, is for that reason that in this work approaches some of the methodologies for the design and construction of these devices, obtaining higher sensitivity and better contribution in its respective interferometric paths, for the sensing of different physical parameters in which they are applied. We used the single design for each interferometer, proposing the best detection limit for each one. The data acquisition was made with the proposal to obtain quick results, using the audio card of a PC, obtaining a real time measurements and digital processing of the signal in a single way.

Key words: Sagnac, Interferometer, instrumentation, data acquisition, labview.

INTRODUCTION

Considering the two configurations well-known of the interferometer of Sagnac, in optic of volume and fiber optic, they have been carried out multiples investigations to be able to determine their maxim sensibility theoretical as practical. The interferometer in optic of volume has been few studied in comparison with the interferometer in fiber optic; this is because according to the principle proposed by Sagnac in the XX century, it was limited just to a theory study, because didn't exist the technologic to be able to carry out a development of this interferometer, until the develop of the lasers. But even with the existence of the first lasers, the development of the interferometer of Sagnac in optic of volume was very limited and therefore just applicable as a system of academic demonstration because the interferometric loop used, had big dimensions and very pour sensibility, for this, was necessary to carried out a very big amplification with a bad efficiency in that time, therefore the interferometer of Sagnac was possible to make, but it was still very difficult to use as an efficient sensor of angular movements.

For the 60's in that the fiber optic was well developed using this channel of propagation the possibilities in the interferometer of Sagnac grew; In this way the development of the first interferometer of Sagnac in fiber optic lead the interferometer of Sagnac in optic of volume relegated and to a certain point forgotten or employed as the theoretic base of the fiber optic gyroscope. Since then, the interferometer of Sagnac in fiber optic was studied thoroughly, suffering some modifications and improvements until our days [1].

However the instrumentation or the electronics designs used for the detection opto-electronic are commonly left in second plane, giving a bigger importance to the physic effect or the physicals improvements in the fiber optic designs for new applications. Because of the big technological developments of sense systems, these optic-electronic detection systems have left to take care in the investigations works with the interferometers [2-4].

Part of the objectives of this work, is to show in a simple way to do the implementation of the optic-electronic sense system and the appropriate instrumentation to achieve a good sense signals of the interferometer of Sagnac in optic of volume and fiber optic, showing the sensed basics principles, optical detection, optic-electronic transduction and finally the appropriate process of the signal.

Where:

- λ - It is the wavelength of the light beams.
- Ω - It is the angular velocity of the system.
- c - It is the speed of the light in the air.
- A - It is the area enclosed by the optical path.
- π - It is a constant.
- N - Number of turns of the fiber optic nucleus.

This way the sensibility given by the interferometer in fiber optic is much bigger depending to the number of turns, growing N times this sensibility. Nevertheless many other factors interfere to be able to have a much bigger sensibility in the fiber optic interferometer. The study of a high sensibility in the fibers optics has made for many years [6-7].

The theory base of the Sagnac effect is the same one for both interferometers; nevertheless due to the high advantages that the fiber optic interferometer offers, the interferometer carried out in fiber optic has advantages very wide in comparison of optic of volume interferometer [8].

EXPERIMENTAL WORK

The main objective of this work resides in demonstrating the reaches in sensitivity of the interferometers of Sagnac in optic of volume and in fiber optic, based in the new electronics devices to carry out a detection of quality for both systems. The characteristic of each interferometer resides in that they are implemented in their basic configuration or scheme, with propose to work with the new systems of signal processing that now exist and obtain a higher sensibility.

The basic implementation of the interferometers has been carried out according to the basics principles of the interferometer of Sagnac. Although both interferometers can be built according of the basic principle, the interferometer employed in optic of volume was modified of its traditional configuration, since with these changes a remarkable increment is achieved in its sensibility. Using the proposal in which the system doesn't depend of the optical path that travel the beams in counterpropagation, but it depends of the area that contains; a modification it is made that helps in the appropriate distribution of the elements of the system [9]. The second modification is based on the sensibility given by the system that depends strongly on the optical detection stage and its transduction, for that, using the proposal of detection and transduction optic-electronic, based on the change of the interferometric pattern to reach the limits of detection [10]. It is possible achieve a system interferometric of Sagnac with high sensibility compared with the traditional interferometric system. This interferometer reaches a limit of detection maxim due to the number of interference lines that can be achieved for sensing. The scheme made of the interferometer of Sagnac in optic of volume for this work is shown in the figure 2. The interferometer in fiber optic was carried out in the minimal configuration.

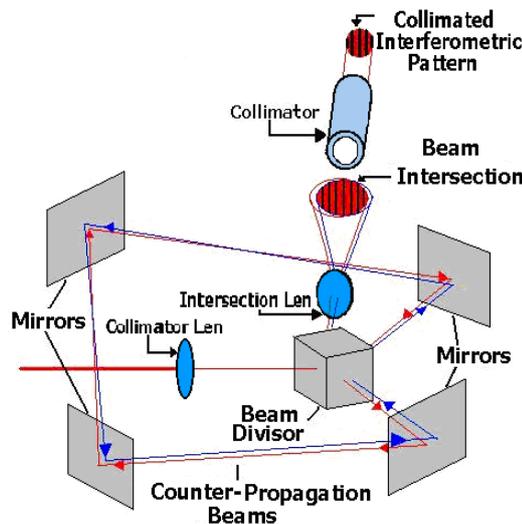


FIGURE 2. Scheme of the interferometer of Sagnac in volume optics.

Using any one of the proposed interferometric systems, with a simple transduction optic-electronic is possible to obtain the sensed signal eliminating big part of the characteristic noise in the system and increased the sensed signal. This is possible employing an appropriate instrumental handling of equipments for sensing and a small stage of electronic coupling.

One of the first steps to carrying out an optic sensing, it is to take care of the power detection interval of the photodetector, with the purpose of use its characteristics to the maximum. For it, is necessary to know the maximum and minimum limits of detection, since when the sensing is in process, is possible to be near of both power limits of the photodetector and affect the measure, giving errors like a saturation in power. Another point to take care is the linearity of the photodetector, for it, is necessary to use the curves that the manufacturer provides and to situate the sensing interval inside the lineal part of sensing of the device.

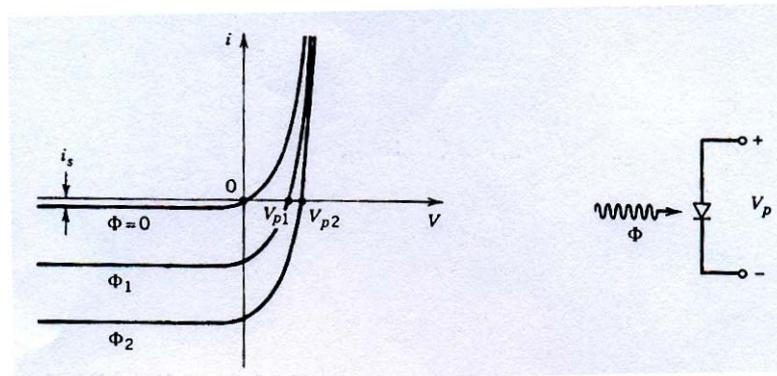


FIGURE 3. Curve voltage-current.

The optic detection systems like cameras CCD, possesses a coupling stage between the stages of signal processing and transducer, nevertheless when a designed sensing device is not possessed and it is necessary work with an own design; it is necessary to take care in this point, in the following figure it shown an electronic scheme of the coupling of the transducer with the processing stage.

The majority of the existent optic sensing systems possess other stages of processing add forward to the coupling stage and pre-amplification, these other stages are mainly of filtrate and amplification. These stages can be carried out in a very simple way taking some very important considerations for the optimum performance of the system.

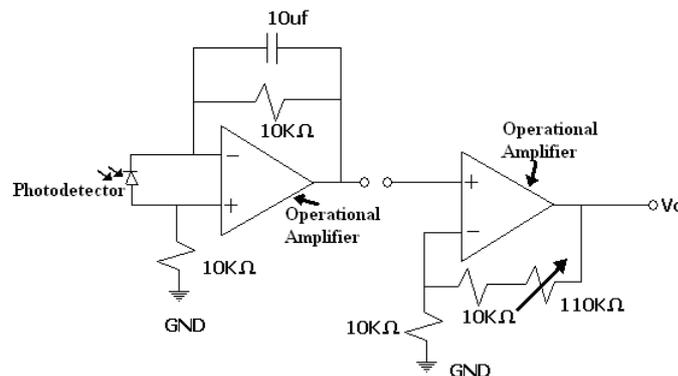


FIGURE 4. In the figure is showed the electronic system for the output signal coupling of the Sagnac's interferometer.

The interferometer of Sagnac can be mainly employed as sensor of angular movement, nevertheless its applications in other areas like sensor of other physicals magnitudes make it very attractive. Depending of the application of the interferometer; it is necessary change the interval of sensing. For the employment of sensor of angular movements, it is necessary to know the velocities of the movement to carry out the filtrate according to these velocities.

The signal of sensed given by the interferometer of Sagnac is based on a change in the power optic interference, for that, the signal can be monitored like a change in DC voltage in the transducer, then the coupling designed for the system should be a coupling in maximum voltage transfer. This coupling can be achieve making the output impedance of the measure system very low and the input impedance very high, this is, should the output of the proposed pre-amplificator have a very low impedance and the connection with the amplification system should possess a very high impedance (regularly 1MΩ).

Another problem in the measure is the offset presented by the pre-amplificator, this can be easy eliminated as the next stage to the pre-amplification. The elimination of this offset helps to adjust the sensed signal to zero when the interferometer is in static state. The offset can be eliminated in two ways, one with a voltage splitter or with capacitors in other way; the best method is the employment of capacitors. In this stage, is necessary the use of tantalium capacitors or ceramics, because the polarized capacitors forces us to requires a phase modulator in the scheme of the interferometer for the detection of the movement direction; in this process without this type of capacitors and due to the proposed instrumentation it is possible to do it without this element modulator.

With these considerations, it is possible to carry out a good instrumentation associate to the interferometer avoiding signal lost for coupling between the stages or attenuation. Once achieved all these stages is possible to use amplifiers and commercial filters, since the obtained signal is easy to manipulate from this point.

The obtained signal is enough to be sensed with a multimeter or an oscilloscope. This signal doesn't exceed the 5 Vpp of maximum. Using the sound acquisition card of a computer, it is possible also to carry out the signal and its process in real time. This is achieved because the sound acquisition card of the PC's possesses a filtrate stage with a range surrounded by 20 and 20 kHz, elimination of DC voltage and an analogical-digital conversion of 16 bits, also should consider the time sampling to determine the best option in the acquisition. Using a simple program in Labview of acquisition and signal process is possible to carry out the sensed signal and visualization in real time. This way is possible to avoid the analogical filtrate and to carry out a digital filtrate, selecting the filtrate interval and to modify easier, also is possible to save the measures and use them again or to carry out measurements of long time.

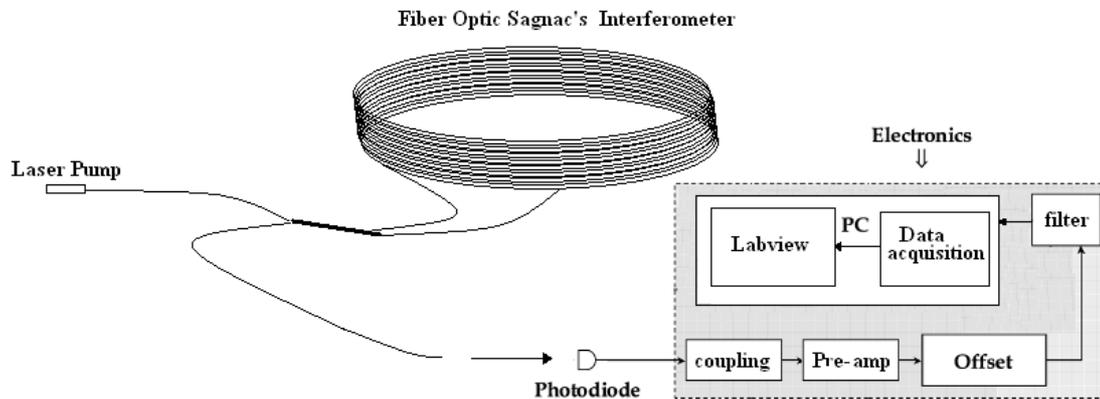


FIGURE 5. Single instrumentation for the Fiber Optic Sagnac's interferometer Scheme.

CONCLUSIONS

A good employment of the instrumentation systems for the signal sensing or detection, is vital for the acquisition and process of a sensing signal, nevertheless when is not possible to use instrumentation devices of high technologic, it is possible to use designs of low cost and with high efficiency, considering the parameters of the involved signal sensing, this is the objective of the shown work. Using the sound acquisition card of a computer is possible to use it for data acquisition with labview, carrying out a simple program and knowing the capacities of the sound acquisition card like the sampling time, is possible to carry out a digital signal process in real time oriented to the device application. The direct application of this design of smalls signals detection and prone to the noise, it can be scalable to sensing devices of another type of physics parameters; nevertheless in this work was employed the interferometer of Sagnac in optic of volume and fiber optic for the simplicity of the models and the problematic of these devices to carry out the signal detection. One of the advantages that was presented in this work is a device without a phase modulator in the fiber optic nucleus to determine the movement direction of the system, this is due that in the instrumentation for the signal detection, we consider the detection interval of the photodetector to measure the changes of intensity and the lineal part of the polarization and make possible to detect the changes in the signal directly in intensity without necessity of additional elements.

ACKNOWLEDGE

The paper have been done under the financial support of the Universidad Nacional Autónoma de México project DGAPA-PAPIIT IN115906-3, as well CONACYT project J50494-Y and under host of Telmex Foundation for travel to Salvador Palma Vargas to the congress in Campinas Brasil.

REFERENCES

1. H. C. Lefèvre, *The Fiber Optic Gyroscope*, Norwood, MA: Artech House, 1993.
2. B Culshaw, “*The optical fibre Sagnac interferometer: an overview of its principles and applications*”, electronic journals, 2006 Meas. Sci. Technol. 17 R1-R16
3. Leszek R. Jaroszewicz,” *Fibre-optic Sagnac interferometer as real sensor of the physical quantities* ”, Proceedings of the Symposium on Photonics Technologies for 7th Framework Program, Wroclaw 12-14 October 2006.
4. Charles M. Davis, “*Fiber Optic Sensors: An overview, Optical Engineering*”, Vol. 24(2), pp 347-351.
5. Sagnac, G., “*L'éther lumineux démontré par l'effet du vent relatif d'éther dans un interféromètre en rotation uniforme*,” Comptes rendus de l'Académie des Sciences, Vol. 95, 1913, pp. 708-710.
6. S. Ezekiel, H.J.Arditty, “*Fiber optics gyroscopes, Fiber optic rotation sensors and related technologies*”, 2-26.
7. Francis T.S. Yu, “*Fiber Optic Sensors*”, University Park, Pennsylvania, Ed. Marcel Dekker, pp. 383-415, 2002.
8. A.L. Harmer, “*Principles of optical fibre sensors and instrumentación*”, Batteelle, Geneva Research Centres, Switserland, Measurement and control, Vol. 15, pp. 143-151.
9. Salvador Palma-Vargas, Sandoval-Romero E, Ramirez-Ibarra A. , “*Optical Angular Movement Sensor*”, Proc. SPIE Vol. 6343, 634329, Photonics North 2006; Pierre Mathieu; Ed.
10. Salvador Palma-Vargas, Sandoval-Romero E, Ramirez-Ibarra A., “*Detection Limit of a Sagnac's Interferometer*”, Proc. SPIE; Volume 6422, Sixth Symposium Optics in Industry; 64220Y (May. 15, 2007).