

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---



FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISION DE INGENIERIA ELECTRICA

SENSOR OPTICO DE VELOCIDAD ANGULAR

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO ELÉCTRICO - ELECTRÓNICO

PRESENTA:

PALMA VARGAS SALVADOR

DIRECTOR DE TESIS: DR. GABRIEL EDUARDO SANDOVAL  
ROMERO

CIUDAD UNIVERSITARIA

2005



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.

## INDICE

### INTRODUCCION

### CAPITULO 1

#### SENSORES

1.- Sensores .....	1
1.1.- Características de los sensores .....	3
1.2.- Sistemas de Medición Electrónicos .....	7
1.3.- Conclusión .....	10
1.4.- Bibliografía .....	11

### CAPITULO 2

#### PRINCIPIOS DE OPTOELECTRONICA

2.- Dispositivos Emisores de Luz .....	12
2.1.- Funcionamiento del Láser .....	13
2.2.- Fuentes Semiconductoras Emisoras de Luz .....	20
2.2.1.-Diodo Láser .....	21
2.3.- Detectores Ópticos .....	25
2.4.- El Fotodiodo .....	28
2.5.- Tipos de Fotodiodos .....	30
2.6.- Ruido en Fotodetectores .....	32
2.7.- Conclusiones .....	35
2.8.- Bibliografía .....	36

### CAPITULO 3

#### INTERFEROMETRIA

3- Interferencia .....	38
3.1.-Tipos de Interferómetros .....	48
3.2.- Interferómetro de Sagnac .....	51
3.3.- Conclusiones .....	57
3.4.- Bibliografía .....	58

## CAPITULO 4

### GIROSCOPIOS

4.- Giroscopios .....	60
4.1.- Tipos de Giroscopios .....	60
4.2.- El giroscopio Mecánico .....	61
4.2.1.- Definición .....	61
4.2.2.- Referencias Históricas .....	62
4.2.3.- Descripción del Giroscopio Mecánico .....	63
4.2.4.- Propiedades .....	65
4.3.- El Giroscopio de Fibra Óptica .....	66
4.3.1.- Referencias Históricas .....	67
4.3.2.- Descripción Básica del Giroscopio de Fibra Óptica .....	68
4.3.3.- Características .....	69
4.4.- Aplicaciones de los Giroscopios .....	71
4.5.- Conclusiones .....	72
4.6.- Bibliografía .....	72

## CAPITULO 5

### DISEÑO, IMPLEMENTACION Y MODIFICACIONES DEL INTERFEROMETRO DE SAGNAC

5.- Diseño, Implementación y Modificaciones del Interferómetro de Sagnac .....	74
5.1.- Análisis y Diseño de las Etapas Electrónicas del Sistema .....	81
5.2.- Medición del Patrón de Interferencia del Efecto Sagnac .....	86
5.2.1.- Cálculo del Área del Sistema Interferométrico .....	88
5.2.2.- Modelo Matemático del Interferómetro Construido .....	95
5.3.- Análisis de Resultados del Patrón de Interferencia Obtenido .....	97

ANALISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES .....	105
---	-----

### PERSPECTIVAS Y NUEVAS EXPERIMENTACIONES:

I.- Nuevas Aplicaciones del Efecto Sagnac .....	108
II.- Medición de Campo Magnético, Eléctrico y Desplazamientos en baja escala (Micrómetros) .....	108

ARTÍCULOS DESPRENDIDOS DE ESTA TESIS.....	109
---	-----

## INTRODUCCION

### INTRODUCCION

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, éste es el caso del giroscopio de fibra óptica. Este dispositivo es ampliamente usado como sensor de rotación de 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 está 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 éste 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.

En un principio el interferómetro de Sagnac solo pudo ser empleado para mediciones en las cuales se tenían grandes cambios en el desfase de las señales del lazo interferométrico, ya que no se contaba con los avances necesarios para poder realizar detecciones de pequeños cambios de fase en las señales, debido a que los sistemas de medición como fotodetectores, amplificadores, filtros, etc. no tenían la capacidad de los sistemas que existen ahora. Es por ello que parte de nuestros experimentos se basan en los avances electrónicos para poder hacer detecciones de cambios de fase de hasta menos de 0.1nm en un interferómetro de Sagnac con área de  $0.025\text{m}^2$ . Además de proponer cambios en el esquema del interferómetro original, adicionando algunos elementos que ayudan a lograr una mayor sensibilidad, exactitud y reducción de ruido.

La propuesta que se hace en ésta tesis es la de construir un sistema de sensado óptico para velocidades angulares, a base del efecto Sagnac y con métodos de detección a base de la teoría de interferencia óptica. Todo esto basado en los adelantos en dispositivos optoelectrónicos y electrónicos como se mencionó anteriormente. Como parte de éste objetivo, se pretenden realizar cambios en el diseño original, esto es, mejorar el sistema interferométrico propuesto por Sagnac con los nuevos dispositivos.

Además de proponer el objetivo de construcción y diseño como sensor óptico de velocidades angulares, se pretende analizar los resultados que se obtengan para poder determinar que tan rentable puede llegar a ser éste sistema, esto es, ver si es conveniente realizar mejoras posteriores para otro tipo de aplicaciones, además de analizar que tanto puede competir con los sistemas de medición que existen o compararlo con alguno de ellos, tanto en desempeño como en rentabilidad.

## INTRODUCCION

Estos objetivos adicionales van ligados a la idea de la versatilidad de otros sistemas interferométricos, ya que el interferómetro de Sagnac tiene aplicaciones similares a los interferómetros de Fabry-Perot y Mach-Zendel como son mediciones de longitudes o desplazamientos muy pequeños hasta de nanómetros, la diferencia entre ellos es el rango de sensado de estos desplazamientos ya que cada interferómetro tiene diferente rango y resolución, esto depende de las características físicas con las que está constituido cada interferómetro. Todos estos sistemas interferométricos están todavía siendo empleados en diversas investigaciones, para nuevas y viejas aplicaciones o mejoras como la que proponemos.

En la actualidad existen diversos sistemas de sensado de velocidades angulares, algunos de ellos diseñados hace mucho tiempo y algunos otros más recientes, sistemas basados en efectos mecánicos, magnéticos, eléctricos, etc. Pero a últimas fechas los sistemas de detección óptica han comenzado a desplazar a muchos de los sistemas mecánicos, esto debido a que la sensibilidad, resolución y rentabilidad de los sistemas ópticos es superior a los mecánicos, además de tener un rango de ruido muy pequeño comparado con los mecánicos. Una ventaja muy notable de los sistemas ópticos sobre los otros, es la rentabilidad ya que la miniaturización y bajo costo los hacen superiores. Muchas ventajas más pueden ser analizadas en ésta comparación, pero para ello se necesita realizar un análisis de los sistemas en particular. Es por ello que en ésta tesis se pretende mostrar ésta ventaja de los sistemas ópticos con la realización de los objetivos propuestos.

Para la realización de los objetivos de ésta tesis, es necesario tener los conocimientos necesarios, saber aplicarlos e investigar sobre las propuestas realizadas. Como se podrá observar en el desarrollo de éste trabajo, se hace una recopilación de los temas fundamentales sobre los que está basada la realización de los objetivos. Además de que se podrá observar el desarrollo de la construcción del sistema y de los resultados obtenidos. Finalmente se verá lo interesante de la propuesta del sistema de sensado óptico elaborado.

## **CAPITULO 1**

### **SENSORES**

#### **INTRODUCCIÓN**

En este capítulo se pretende dar las bases de construcción del sensor realizado para ésta tesis, además de los parámetros propios y teóricos del mismo, esto nos ayudara a comprender el desarrollo que comprende la construcción, análisis, experimentación y mejoramiento de cualquier sistema de sensado.

El presente capítulo, es un pequeño análisis sobre los diferentes tipos de sensores y de sus características, con ello no se pretende realizar un estudio muy cuidadoso de los sistemas de sensado y de todos los parámetros que se involucran, tan solo se pretende asentar las bases de los sistemas de sensado y de cómo funcionan estos, cuales son sus características y parámetros generales para poder pasar al proceso de análisis de ingeniería, el cual da las características principales y etapas de construcción de los diversos dispositivos de sensado electrónicos.

## 1.- SENSORES

La palabra sensor es una derivación de la palabra latina *sentire*, que significa percibir. Un sensor por lo tanto, sugiere alguna equivalencia con los sentidos humanos; los sensores nos proveen de información sobre el mundo físico y químico con señales, las cuales no podrían ser percibidas directamente por nuestros sentidos. En el diccionario la palabra sensor se refiere a un dispositivo que responde a estímulos físicos o químicos y transmite el resultado como señales detectables. Así un sensor puede detectar una señal (o energía) de entrada y convertirla en una apropiada señal (o energía) de salida ya procesada en información.

Otro dispositivo relacionado muy cercanamente con los sensores es el transductor, el cual también es una derivación de una palabra en latín *transducere*, que significa, guiar a través de. El transductor es un sistema que convierte una señal física en otra sin las etapas posteriores de acondicionamiento de la señal, por esto es solo un elemento del sensor. El sensor y el transductor muchas veces son empleados como sinónimos, pero la diferencia entre ambos es casi imperceptible, ya que el sensor desarrolla una transducción y todo el procesamiento de la señal detectada y el transductor es un elemento del sensor que convierte la señal de una forma a otra. Por lo tanto en ésta tesis se emplea el término sensor como todo el dispositivo de medición, con todos los elementos para el procesamiento de la señal y el transductor tan solo como un elemento que realiza la etapa de cambio de parámetros físicos en el sensor.

La idea principal de un sensor es la de detectar y convertir una energía de una forma a otra con todo el procesamiento que la envuelve, por lo tanto, es necesario clasificar los tipos de energía que hay para poder analizar los tipos de sensores que existen y como se catalogan cada uno de ellos.

1. Energía atómica: Está relacionada con la fuerza entre los núcleos y electrones de un átomo.
2. Energía Eléctrica: Es la perteneciente a los campos eléctricos, magnéticos, corrientes, voltajes, cargas, conductividad, permisividad, permeabilidad, fase, polarización, etc.
3. Energía Gravitacional: Está relacionada con la atracción gravitacional entre una masa y la tierra.
4. Energía magnética: Trata sobre los campos magnéticos.
5. Energía de la masa: Fue descrita por Albert Einstein como parte de su teoría de la relatividad y está dada por  $E=mc^2$ .
6. Energía Mecánica: Perteneciente al movimiento, desplazamientos, velocidades, aceleraciones, acústicos, deformación, presión, etc.
7. Energía Molecular: Está ligada con la energía existente entre las moléculas.
8. Energía Nuclear: Al igual que la molecular, está liga la energía entre los núcleos de los átomos.
9. Energía Electromagnética: Es la relacionada con las ondas electromagnéticas como microonda, ondas de radio, rayos X, fotones, luz visible, infrarrojo, ultravioleta, rayos Gamma, etc.
10. Energía Térmica: Está relacionada con la energía cinética de los átomos y las moléculas.

Para cada tipo de energía hay una señal correspondiente asociada con ella, para sensores prácticos no se considera a la energía nuclear y la de masa. La energía atómica y molecular pueden ser consideradas como una sola y éstas a la vez se consideran como una señal química. La energía gravitacional y la mecánica son ambas relacionadas con una señal mecánica, por lo tanto con éstas consideraciones tenemos seis tipos de señales.

1. Señal Química.
2. Señal Eléctrica o Electrónica.
3. Señal Magnética.
4. Señal Mecánica.
5. Señal Electromagnética.
6. Señal Térmica.

Los tipos de señal para su detección son muy pocas, pero debido a que éstas consideran una gran cantidad de parámetros y de diferentes señales a la vez, el número de sensores para distintas magnitudes físicas es tan elevado que no se puede proceder racionalmente a su estudio sin clasificarlos previamente de acuerdo a algún criterio, pero también debido a esto algunas señales pueden ser medidas de diferentes formas, por lo que los criterios no establecen una buena clasificación de los sensores. Un ejemplo es el sensor del cual trata ésta tesis, el cual es un sensor de velocidad angular, lo que nos indicaría rápidamente que se trata de una señal mecánica y por lo tanto la detección debe tratarse por esos medios, sin embargo, la detección es de tipo electromagnética, por lo que no se encuentra dentro de un criterio adecuadamente. Por lo tanto solo se hablará de señales y no de criterios de detección.

## 1.1.- CARACTERÍSTICAS DE LOS SENSORES

El comportamiento del sistema de medición viene condicionado por el sensor empleado. Es por ello importante describir las características de los sensores; sucede que, en la mayoría de los sistemas de medición, la variable de interés varía tan lentamente que basta con conocer las características estáticas del sensor. Ahora bien, las características estáticas influyen también en el comportamiento dinámico del sensor, es decir, en el comportamiento que presenta cuando la magnitud medida fluctúa a lo largo del tiempo. No obstante, se suele evitar su consideración conjunta y se procede a la distinción entre características estáticas y dinámicas, estudiándose por separado. Los conceptos empleados para describir las características estáticas no son de aplicación exclusiva a los sensores, sino que son aplicables a todo instrumento de medición.

### **Características estáticas**

Para todo transductor existe una relación ideal o teórica entre la salida y la magnitud a medir. Si el transductor estuviera diseñado idealmente y fabricado de materiales ideales utilizando métodos y técnicas también ideales, la salida de este transductor ideal, indicaría siempre el valor real de la medida y seguiría exactamente la curva teórica prescrita, que especifica la relación entre la salida y la magnitud aplicada sobre el rango del transductor.

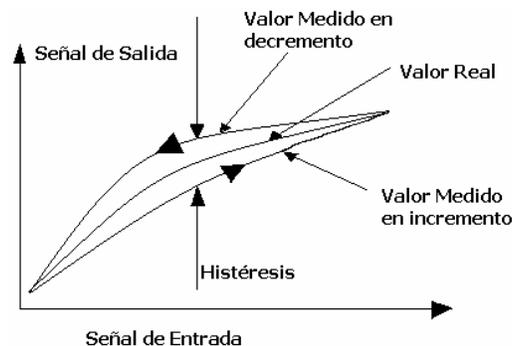
La curva del transductor real, sin embargo, está afectada por el comportamiento no ideal del transductor, que ocasiona que el valor de la magnitud indicada esté desviado respecto del valor real. La diferencia algebraica entre el valor indicado y el real (o teórico) es el error del transductor.

Aunque la manera más simple para considerar los errores de un transductor, es la de establecer las desviaciones máximas respecto de una línea o curva de referencia especificada, que define la relación entre la salida y la magnitud a medir sobre el rango del transductor (banda de error), la existencia de errores individuales como la no linealidad, no repetibilidad, histéresis, desplazamiento del cero (*offset*) y desplazamiento de la sensibilidad debe ser analizada separadamente y se atribuye a la naturaleza de estos errores.

Entre las características estáticas principales de un sensor encontramos la repetibilidad, la histéresis, la sensibilidad, la linealidad, el rango de sensado o umbral que definen a la banda de errores. También tenemos la exactitud que es una característica que no está dentro de los errores, debido a que ésta se presenta en ausencia de ellos. Además de éstas características tenemos muchas otras que se convierten en características propias de algún sistema de sensado en específico o de alguna señal.

La repetibilidad o repetitividad también denominada reproducibilidad, es la habilidad de un transductor para reproducir lecturas de salida iguales, cuando se aplica la misma magnitud de manera consecutiva bajo las mismas condiciones y en la misma dirección. Se expresa como la máxima diferencia existente entre las lecturas de salida, determinadas. Si el muestreo se realiza aumentando el número de ciclos de calibración, se obtiene una medida estadística de la repetitividad.

La histéresis es la diferencia máxima a la salida, de un valor a medir para un valor determinado anteriormente cuando éste valor es alcanzado mediante el aumento o la disminución de la magnitud, en otras palabras, éste error se presenta cuando al realizar una medición resulta con un incremento en la magnitud y posteriormente se realiza en un decremento y los valores al llegar al mismo punto no coinciden (figura 1.1) La histéresis se expresa como un porcentaje de error.



**Fig. 1.1** Curva característica de histéresis.

La sensibilidad es simplemente la relación en el cambio en la salida con respecto al cambio en el valor de la magnitud a medir. Establece la pendiente de la curva de calibración. El mínimo cambio en la salida del sensor que es suficiente para variar el valor de la medición, es decir, la señal mínima detectable por el sensor. Es deseable tener una alta sensibilidad y si es posible constante.

La linealidad expresa el comportamiento diferencial de la curva de calibración respecto a una línea recta especificada. Se expresa como un porcentaje dentro de un rango ( $\pm \_ \%$ ), la máxima desviación de cualquier punto de calibración, a partir del punto correspondiente en la línea recta especificada durante un ciclo de calibración. Cuando se realiza más de un ciclo de calibración se especifica la peor linealidad observada.

El umbral o rango de sensado se refiere al valor de medición sobre el cual el sensor es capaz de medir, se especifica como los límites superior e inferior de medición.

Una banda de error es la banda de desviaciones máximas de los valores de salida respecto a una línea especificada de referencia debido a causas atribuibles al transductor. Como estas desviaciones pueden ser debidas a la no linealidad, no repetibilidad, histéresis, desplazamientos de la sensibilidad y otros, se comprueba que las características de un transductor son fáciles de especificar y determinar cuando se conocen las características individuales. Una banda de error se especifica en términos de ( $\pm \_ \%$ ), y su determinación está basada en las desviaciones máximas observadas durante un periodo mínimo de dos ciclos de calibración consecutivos. En la banda de error estático se encuentran errores aplicables a las condiciones ambientales, perturbaciones, vibraciones o aceleraciones.

La exactitud es la cualidad que caracteriza la capacidad de un instrumento de medida de dar valores que se aproximen al valor verdadero de la magnitud medida. En español se emplea como sinónimo de exactitud el término precisión. El valor exacto, verdadero o ideal, es el que se obtendría si la magnitud se midiera con un método ejemplar. Se considera como tal aquel método de medida en el que se coincide que es suficientemente bueno para la finalidad pretendida con los resultados que se obtengan.

La exactitud de un sensor se determina con la calibración estática. Ésta consiste en mantener todas las entradas (temperatura, humedad, vibraciones, etc.) excepto una, en un valor constante. La entrada a estudiar se varía entonces lentamente, tomando sucesivamente valores dentro del margen de medida y se van anotando los valores que toma la salida. Estos valores en función de los de la entrada definen la curva de calibración. Para conocer el valor de entrada se debe tener un valor bien conocido, constituyendo lo que se denomina como patrón de referencia.

La discrepancia entre la indicación del instrumento y el valor verdadero o patrón de referencia se denomina error. La diferencia entre la indicación del instrumento y el verdadero valor se denomina error absoluto.

$$\text{Error absoluto} = \text{Resultado} - \text{Valor Verdadero} \quad (1.1)$$

Sin embargo, lo más común es especificar el error como un cociente entre el error absoluto y el verdadero valor de la magnitud medida, cociente que se denomina error relativo.

$$\begin{aligned} \text{error\_relativo} &= \frac{\text{error\_absoluto}}{\text{valor\_verdadero}} \\ \text{error\_relativo} &= \frac{\text{resultado} - \text{valor\_verdadero}}{\text{valor\_verdadero}} \end{aligned} \tag{1.2}$$

### **Errores sistemáticos**

La calibración estática de un sensor permite detectar y corregir los denominados errores sistemáticos. Se dice que un error es sistemático cuando en el curso de varias mediciones de una magnitud de determinado valor, bajo las mismas condiciones, varía de acuerdo a una ley que determina como cambian las condiciones en las cuales se pueden controlar. Muchos de estos errores pueden ser humanos al realizar la medición, por lo tanto pueden ser eliminados por algunos métodos o al realizar las lecturas con procedimientos fiables y evitando estos errores.

### **Errores Aleatorios**

Los errores aleatorios son también errores accidentales o fortuitos, con ello se da a entender que pueden ser inevitables. Estos errores existen en condiciones que son incontrolables y que afectan la medición. La ausencia de variaciones de unas a otras lecturas cuando se está realizando una serie de mediciones de la misma magnitud, no es necesariamente una indicación de ausencia de errores aleatorios ya que pueden hacer que estos errores de magnitudes muy pequeñas que la resolución del dispositivo no sea capaz de detectar.

Estos errores se atribuyen mucho a cambios ambientales: de temperatura, humedad, vientos, cambios en campos electromagnéticos, etc. Es decir en cualquier fenómeno físico o químico que altere las mediciones que se realicen y que no se puedan controlar.

### **Características dinámicas**

La presencia de inercias (masas, inductancias, etc.), capacidades (eléctricas, térmicas, fluidas, etc.) y, en general elementos que almacenan energía, hacen que la respuesta de un sensor a señales de entrada variables sea distinta a la que presenta cuando las señales de entrada son constantes.

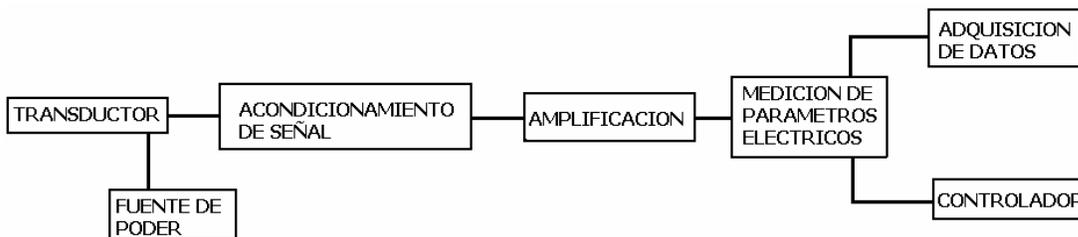
La descripción del comportamiento del sensor se hace en éste caso mediante las denominadas características dinámicas: error dinámico y velocidad de respuesta (retardo). El error dinámico es la diferencia entre el valor indicado y el valor exacto de la variable medida, siendo nulo el error estático.

La velocidad de respuesta, indica la rapidez con que el sistema de medida responde a los cambios en la variable de entrada. En cuanto a la medida, no importa mucho que exista un retardo entre la magnitud aplicada a la entrada y la indicación correspondiente a la salida. Pero si el sensor forma parte de un sistema de control, éste retardo puede dar lugar a oscilaciones.

La determinación de las características dinámicas de un sensor parten principalmente de desarrollos matemáticos complejos sobre el sistema completo, ya que para esto se deben de conocer todas las características del sensor y a partir de ello determinar el modelo matemático del mismo, para posteriormente realizar un análisis matemático del comportamiento del sensor a diferentes tipos de señales de entrada y conocer su comportamiento. Esta determinación de las características dinámicas del sensor obedece principalmente a sistemas de control y retroalimentación principalmente, por lo que para el diseño de un sensor, solo se toman en cuenta las características estáticas del mismo.

## 1.2.-SISTEMAS DE MEDICIÓN ELECTRÓNICOS

Un sistema de medición electrónico, normalmente contienen al menos cinco de los ocho subsistemas o elementos indicados en la figura 1



*Fig. 1.2 Etapas de un sistema de medición electrónica.*

El transductor es un dispositivo analógico que convierte a una variable física en otra, por lo regular se convierte a una variable física más fácil de medir (como una cantidad eléctrica). Un ejemplo es un micrófono que convierte las ondas sonoras en una cantidad eléctrica ya sea una corriente o un voltaje; éste cambio de una variable a otra es por lo regular proporcional, esto es, que a un valor de la variable física a medir le corresponde un valor de la variable física a la que se convierte, esto puede ser comprobado cuando el instrumento es apropiadamente calibrado.

La fuente de poder provee por lo regular, la energía necesaria al transductor para realizar la conversión de parámetros físicos, aunque en muchos casos la fuente de poder alimenta a la etapa de acondicionamiento o amplificación y no al transductor. El transductor puede funcionar sin la necesidad de una fuente externa de energía, como en el caso del micrófono, el fotosensor, un bimetálico, etc. Los cuales realizan la conversión sin necesidad de energía externa a ellos. La fuente de poder puede ser una fuente de corriente o una fuente de voltaje, ya sean de directa o alterna, dependiendo de los requerimientos de los transductores empleados.

Los acondicionadores electrónicos son circuitos que convierten, compensan, manipulan o acoplan la salida del transductor en una cantidad eléctrica práctica. Existen compensadores, moduladores, demoduladores, integradores, diferenciadores, etc. Que son algunos de los acondicionadores de señal más empleados en electrónica y por tal, en sistemas de medición electrónica.

Los amplificadores o preamplificadores, son parte del sistema de medición que se requieren cuando la salida eléctrica del transductor o de la etapa de acondicionamiento de señal es muy pequeña (señales de milivolts o menores). La salida que entrega el amplificador o preamplificador, puede ser nuevamente procesada para obtener un mejor nivel de la señal deseada y medirla más fácilmente. Una amplificación muy grande no es por lo regular muy buena, ya que con ella se agregan o amplifican parámetros indeseables en la señal de información, como son ruido o saturación, e incluso la pérdida de la señal de sensado.

La medición de los parámetros eléctricos se hace con dispositivos que muestran la medición en forma que puedan ser leídos e interpretados; los dispositivos pueden ser de tipo analógicos o digitales. Entre estos dispositivos de medición eléctrica encontramos osciloscopios, oscilogramas, voltmetros, amperímetros, o grabadores magnéticos que muestran la señal eléctrica en forma analógica, asimismo hay aparatos de forma digital, solo que estos entregan valores numéricos de la señal.

Las etapas de procesamiento y control, son etapas de adquisición de datos, que sirven principalmente para hacer mediciones más exactas y guardar información de cada medición registrada. Para éste propósito se necesitan un convertidor análogo-digital y una etapa de adquisición de datos, para poder tener un control a través de una computadora del sistema de medición completo.

### **Análisis de Ingeniería**

Un análisis ingeniería debe ser realizado para evaluar los nuevos o modificados diseños de componentes de maquinaria, estructuras, sistemas electrónicos, sensores, etc. Con el fin de asegurar un eficiente y rentable desarrollo del prototipo cuando esté en operación. Dos aproximaciones pueden ser seguidas en el desarrollo de un análisis, éstas son: el modelado teórico y la experimentación práctica.

En el modelado teórico, un modelo analítico de los elementos es formulado y se asume que son diseñados para ciertas condiciones de operación, las cargas a los componentes, las propiedades del material y sus probables fallas. Las ecuaciones que representan a cada elemento, son el modelo analítico que describe su comportamiento; estas ecuaciones son resueltas empleando métodos matemáticos exactos o recientemente métodos numéricos computacionales. El análisis teórico da como resultado el diseño de un sistema con la posibilidad de mejoramiento del mismo, además del probable comportamiento del sistema físico y sus potenciales fallas.

Las incertidumbres existen a menudo y corresponden a la eficacia de los resultados del modelo analítico y a los procedimientos numéricos. Aquí es cuando cabe señalar, sí el modelo matemático refleja todos los aspectos del diseño del prototipo, sí se asumen todas las condiciones de operación y cargas impuestas a cada elemento del sistema, sí son tomados en cuenta todas las condiciones de frontera en el modelo, y si han sido tomados en cuenta los errores que se introducen en el sistema dentro del análisis numérico.

En la experimentación práctica, un prototipo o un modelo a escala de los componentes pueden ser fabricados, pero también se puede comenzar con la construcción del sistema original, además un programa de prueba es diseñado, para evaluar el desempeño de los elementos como del sistema completo en servicio, de ésta manera se obtienen las primeras mediciones de las cantidades más importantes que puedan ser controladas o adecuadas para el mejoramiento del sistema. Éste análisis elimina dos serias incertidumbres del análisis teórico, ya que no se necesita de un modelo analítico y todo el comportamiento del sistema es con respecto a las condiciones del funcionamiento físico, además de que las propiedades de cada elemento no son necesarias o se pueden ir tomando en cuenta con forme se necesiten. Una de las desventajas sobre el análisis teórico es que, en la experimentación práctica se necesitan mayores recursos económicos para desarrollar el sistema completo.

La aproximación preferida y tal vez la mejor, es una combinación del análisis teórico y de la experimentación práctica, ya que el análisis teórico puede conducir a un mejor entendimiento del sistema, además de la realización de un análisis completo de los resultados para identificar claramente cada problema. Después del análisis teórico un programa completo sobre el diseño, puede ser desarrollado y de ésta manera verificar el modelo teórico y cotejar los resultados teóricos con los prácticos, además de señalar las condiciones de operación, propiedades de materiales y comprobar la exactitud de los procedimientos numéricos; para de ésta manera realizar las mejoras pertinentes al sistema completo.

Los resultados del análisis teórico son muy importantes en el diseño del programa de desarrollo experimental, ya que con ello es posible localizar y orientar a los transductores a ser más exactos o a especificar la posición de más sensibilidad de los mismos para poder reducir el número de mediciones notablemente. El número de pruebas que se necesitan realizar con el sensor completo deben de ser las adecuadas, para que éstas cubran completamente todo el espectro de sensado del sistema y las condiciones a las que está sujeto.

Los resultados arrojados por el procedimiento experimental son comparados con el modelo teórico para confirmar la validez de los procedimientos numéricos, ya que si existen diferencias significativas, el modelo teórico debe ser modificado y los nuevos resultados obtenidos, se compararan con los resultados experimentales para obtener un análisis completo de los dos procedimientos que se validen entre ellos.

Después de que el análisis experimental es confirmado y el análisis completo es establecido, debido a la combinación de los análisis teóricos y prácticos, es posible optimizar el sistema para obtener una mayor sensibilidad, rango de sensado, reducción de costo, rentabilidad, condiciones de operación, eficiencia o modificar el sistema completo en

su diseño mecánico, estructural o electrónico, incluso, esto da la pauta para el desarrollo de nuevos elementos de todo el sistema como es el caso del transductor.

### 1.3.- CONCLUSIONES

Durante el desarrollo de éste capítulo, se habló principalmente de los sensores y sus características, esto nos da las bases sobre los parámetros de medición del dispositivo de sensado construido. Debido a que el sistema del que se habla en ésta tesis, se trata de un sensor o dispositivo de medición y es necesario dar las características principales de estos, para ello se tratan temas que relacionan a todos los dispositivos de medición o sensores en general.

Al estudiar los parámetros físicos de los sensores, se habló también de la naturaleza de estos, los errores que involucran cada uno de ellos y como afectan directamente la señal de sensado y al valor de la medición final. Los parámetros que se analizaron fueron los principales de todo sensor o sistema de medición, parámetros como: repetibilidad, exactitud, linealidad, histéresis, rango, sensibilidad, etc. Dentro de todo sistema de medición y principalmente en sus parámetros, existen diferentes causas que llevan a que la respuesta del sistema no sea la adecuada, éstas variaciones son conocidas como errores, por lo que estos errores fueron también discutidos en éste capítulo como parte de los parámetros de medición de los sensores.

En el análisis de los sistemas de medición electrónicos, se realizó un estudio de cada una de las etapas de procesamiento de la señal. El dispositivo de sensado construido está basado en un fenómeno óptico, por lo que es necesario realizar una transducción óptico-electrónico de la señal para poder realizar un procesamiento de ésta, para esto se realizó un estudio de todo el sistema de medición electrónico, el funcionamiento de cada una de sus etapas, los elementos involucrados, el procesamiento de la señal como amplificación y filtrado, el cambio de parámetros físicos y la etapa de medición eléctrica. Éste análisis de sistema de medición electrónico es muy general, ya que la gran mayoría de estos sistemas mantienen un esquema y etapas como la analizada.

Finalmente se realizó un análisis sobre la ingeniería de construcción de un dispositivo de medición, esto con el propósito de dar un panorama general de cómo se crea y desarrolla un proyecto de ingeniería, desde la investigación, hasta las aplicaciones pasando por todas las etapas, como la construcción, el análisis matemático, análisis de resultados, experimentación, mejoras, etc.

Todos los estudios y análisis teóricos realizados son importantes, debido a que con ellos podemos determinar que tan funcional es el dispositivo construido, además de poder tener los parámetros necesarios de todo dispositivo de medición y poder comenzar la explicación del funcionamiento completo del sistema.

#### 1.4.- BIBLIOGRAFÍA

1. Sensores y Acondicionadores de Señal, Ramón Pallás Areny, Ed. Marcombo-Boixre editores, 2ª Edición, 1994
2. Semiconductor sensors, S.M. Sze, Ed. John Wiley and Sons, 1994
3. Sensores y Analizadores, Harry N. Norton, Ed. Gustavo Gili, Barcelona, 1984
4. Understanding Smart Sensors, Randy Frank, Ed. Artech House, 2a Edición, 2000

## **CAPITULO 2**

### **PRINCIPIOS DE OPTOELECTRÓNICA**

#### **INTRODUCCION**

Los nuevos sistemas de sensado ópticos, emplean elementos optoelectrónicos como fuentes emisoras de luz y fotodetectores basados en semiconductores, el proyecto realizado para ésta tesis es un claro ejemplo de estos sistemas de sensado óptico y de los elementos optoelectrónicos que emplean. Es por ello que se realiza un estudio de los principales elementos optoelectrónicos que se utilizan en los sistemas de sensado óptico.

Primeramente las fuentes emisoras de luz son dispositivos que han permitido la creación de nuevos dispositivos y sistemas electrónicos que solo fueron concebidos en la imaginación, como es el láser, del cual se realiza un estudio de cómo funciona y de sus propiedades, posteriormente para la detección de la emisión de estos tipos de fuentes se debe realizar un estudio de los elementos detectores. Estos tipos de detectores son generalmente usados para monitorear potencia en el sensor, aunque también pueden ser empleados para detectar la intensidad de un espectro discreto cuando son usados en conjunto con otros elementos ópticos como rejillas y filtros. Para poder dar un buen análisis de la detección óptica es necesario primero discutir la estadística de detección, entonces se podrán analizar también los principios básicos de funcionamiento de semiconductores para la detección y dar un panorama general de los tipos de detectores existentes y sus características propias, para finalmente dar una explicación sobre un fenómeno inherente en todos los sistemas de detección, el ruido.

## 2.- DISPOSITIVOS EMISORES DE LUZ

El desarrollo del láser abrió un nuevo mundo de posibilidades para la investigación en óptica, permitiendo la creación de dispositivos y circuitos ópticos que anteriormente solo existían en la imaginación. Para poder ser rentable en diversas aplicaciones, estos dispositivos deberían de ser de bajo costo, pequeños, potentes y eficaces, por lo que se realizaron grandes esfuerzos en un principio y aún continúan en el campo de los semiconductores y las fuentes semiconductoras emisoras de luz. El éxito en el desarrollo de ésta tecnología ha sido una de las llaves para nuevas tecnologías que han permitido el adelanto en los sistemas de comunicaciones como discos compactos, lectores de códigos de barras, impresoras láser y una amplia gamma de dispositivos ópticos que han revolucionado nuestras vidas.

### 2.1.-FUNCIONAMIENTO DEL LASER

#### Historia del desarrollo del láser

En 1917 el Físico Alemán Albert Einstein, propone que las partículas de luz con energía (fotones) de una frecuencia específica, pueden estimular a los electrones del átomo para emitir energía radiante, como luz de la misma frecuencia (otros fotones de las mismas características que el incidente). En éste fenómeno físico se basa el funcionamiento del láser. El nombre “láser” es una palabra formada con las iniciales de la frase *Light amplification by stimulated emission of radiation* (amplificación de luz por emisión estimulada de radiación).

Fue en 1958 cuando C. H. Townes y A. L. Shawlow propusieron que los principios en que se basaba la amplificación de luz también podría aplicarse a las microondas, logrando con ello el primer dispositivo amplificador por emisión estimulada de radiación en microondas “el maser”, así después se contempló la posibilidad que esto es posible de aplicarse a la amplificación de luz. Pocos años más tarde, T. H. Maiman desarrolló el primer láser operante, el cual estaba formado por una barra de rubí con extremos reflejantes y rodeado por una lámpara de gas helio-neón (*He-Ne*). Pronto se observó que muchas sustancias podrían servir como medios activos para la emisión láser.

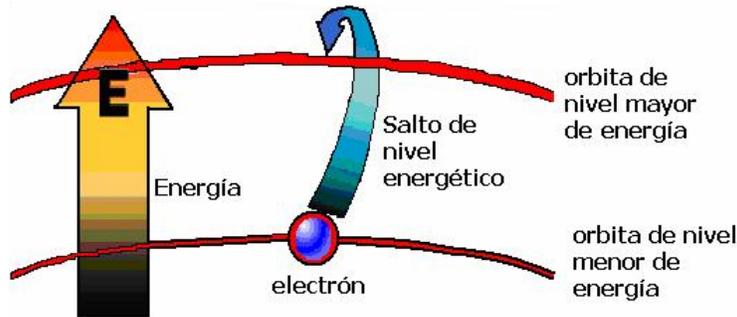
El desarrollo del primer láser de bióxido de carbono ( $CO_2$ ), se le acredita a C. K. N. Patel, quien realizó su trabajo en los laboratorios Bell. Apenas tres años después en 1966, el primer láser industrial de  $CO_2$  fue construido por los ingenieros de *Coherent Radiation Laboratories* (Laboratorios de Radiación Coherente), empresa que actualmente se denomina *Coherent, Inc.*

## Funcionamiento del láser

El proceso de emisión láser podría expresarse en una forma simplificada como “*amplificación de luz*”. La idea principal del fenómeno de emisión láser, está determinada por la capacidad que tienen los fotones para estimular la emisión de otros fotones, cada uno con las mismas características que el primero como frecuencia y dirección.

Conforme a la teoría cuántica, los átomos y las moléculas tienen niveles definidos de energía y pueden pasar de un nivel a otro en saltos discontinuos. El cambio de energía necesario para un salto, está dado por la absorción o la emisión de una cantidad discreta de radiación electromagnética. Las frecuencias de la radiación y los intervalos entre los niveles de energía son características del átomo y por lo tanto difieren de elemento a elemento.

En otras palabras, si se aplica energía a un átomo, como por ejemplo calor, es de esperarse que algunos electrones de una orbita de nivel bajo de energía, realicen una transición o salto a una orbita con mayor nivel de energía. Figura 2.1.



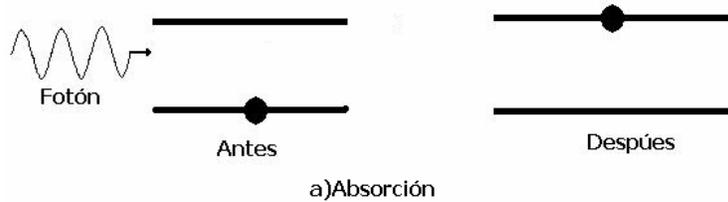
**Fig. 2.1** Salto del electrón de un nivel bajo de energía a un nivel superior al suministrarle energía al átomo.

Una vez que el electrón se mueve a un nivel alto de energía, por la inestabilidad que se presenta, éste necesita regresar a su estado base o a su nivel bajo de energía. Para hacerlo, éste regresa la energía que le fue suministrada en forma de fotón (partícula de luz con ciertas características energéticas que dependen del salto entre los niveles de energía). En condiciones normales, la mayoría de los átomos o moléculas permanecen en su nivel más bajo de energía o estado fundamental. Cuando estas partículas son excitadas por una radiación electromagnética exterior como un destello de luz, por una descarga eléctrica, incremento en la temperatura, o por otros medios y pasan a un nivel de energía superior, al regresar de nuevo al estado fundamental, emiten luz incoherente. (Este fenómeno ocurre en las lámparas fluorescentes y en algunos tipos de lámparas de alumbrado publico).

Éste fenómeno en el cual un átomo adquiere y después pierde la energía suministrada es conocido como emisión fotónica, y es la base del funcionamiento del láser. Hay dos tipos de emisiones que son las principales para que éste fenómeno sea empleado. La emisión estimulada y la emisión espontánea.

### Tipos de emisiones (espontánea y estimulada)

A fin de comprender los fenómenos de emisión espontánea y estimulada, comencemos por recordar que la luz es emitida y absorbida por los átomos mediante los mecanismos llamados de emisión y de absorción, respectivamente. Si el electrón de un átomo está en una orbita de baja energía, puede pasar a una orbita de mayor energía solamente sí absorbe energía del medio que lo rodea, generalmente en la forma de un fotón luminoso. Éste es el proceso de absorción que se representa mediante la figura 2.2.



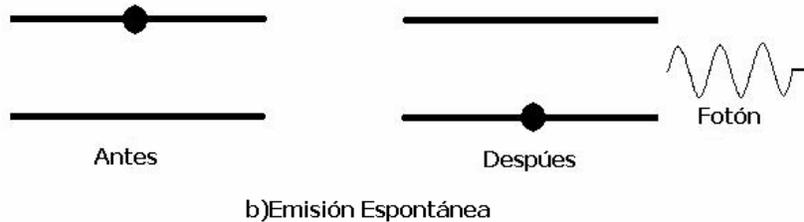
*Fig. 2.2* Proceso de absorción.

En ambos procesos, la frecuencia  $\nu$  de la onda absorbida o emitida está determinada por la magnitud  $E$  de la energía emitida o absorbida, según la relación obtenida por Planck (ecuación 2.1).

$$E = h\nu \quad (2.1)$$

Donde  $E$  es la energía del fotón,  $h$  es la constante de Planck y  $\nu$  es la frecuencia.

La emisión espontánea, se presenta cuando un átomo se encuentra en un nivel alto de energía y de manera espontánea decae a su estado base liberando un fotón, esto es, la emisión espontánea es el fenómeno en el cual un átomo que se encuentra en un estado excitado se moverá a un nivel bajo de energía emitiendo un fotón de manera independiente. Éste proceso de emisión se muestra en los diagramas de la figura 2.3.

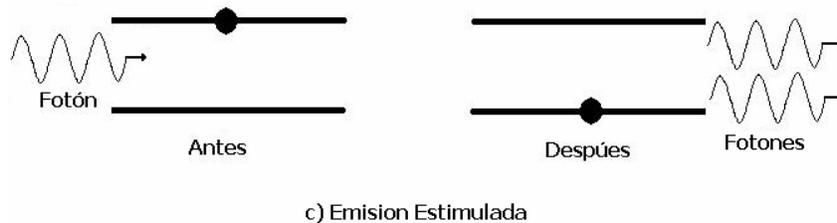


*Fig. 2.3* Proceso de Emisión Espontánea.

Cuando un electrón está en una orbita de mayor nivel energético también decimos que está en un estado superior. El electrón no puede permanecer en un estado superior un tiempo demasiado grande, sino que tiende a caer al estado inferior, emitiendo un fotón, después de un tiempo sumamente corto, menor que un microsegundo, al que se denomina vida media del estado. Es por eso que éste proceso de emisión se conoce como emisión espontánea.

La energía que necesita un electrón para subir al estado superior no necesariamente se manifiesta bajo la forma de fotón. También puede absorber la energía que se le suministre mediante otros mecanismos, como por ejemplo, mediante una colisión con otro átomo, con calor o un campo eléctrico (Voltaje). Si estamos subiendo constantemente los átomos de un cuerpo al estado superior mediante algún mecanismo cualquiera, estos caerán espontáneamente al estado inferior emitiendo luz. A éste proceso se le conoce con el nombre de bombeo óptico. La emisión de luz es entonces un proceso en el que todos los átomos del cuerpo participan, pero en forma independiente y totalmente desincronizada y aleatoria. Dicho de otro modo, las fases de las ondas no tienen ninguna relación entre si, o lo que es lo mismo, no están alineadas.

Existe una segunda forma de emisión de luz por un átomo, llamada emisión estimulada, que se representa mediante la figura 2.4. Si un electrón está en un estado superior y recibe un fotón de la misma frecuencia del que emitiría si bajara al nivel inferior, desestabilizaría a éste átomo, induciéndolo a emitir inmediatamente. Después de ésta emisión estimulada existirían dos fotones en lugar de uno, el que estimuló y el estimulado. Naturalmente para que la emisión estimulada se lleve a cabo se requiere que el electrón del átomo excitado permanezca tiempo suficientemente largo para darle la oportunidad al fotón estimulador a que llegue al átomo. Por ésta razón es más fácil el proceso de emisión estimulada si el nivel superior de energía del átomo tiene una vida media relativamente larga.



**Fig. 2.4** *Proceso de Emisión Estimulada.*

Como los átomos tienden constantemente a caer al estado o nivel fundamental, se necesita lograr que éstos permanezcan en un estado superior de energía, esto se logra dándoles la energía suficiente con un bombeo óptico, lo que es lo mismo, inyectando suficientes fotones para que los átomos absorban su energía y se eleven a un nivel alto. Éste proceso se denomina inversión de población y es absolutamente indispensable para que se produzca la emisión láser. En sí la inversión de población es el incremento del número de átomos excitados, logrando que en el material existan mas átomos en niveles altos de energía que en niveles bajos, incrementándose de igual manera la probabilidad de emisión.

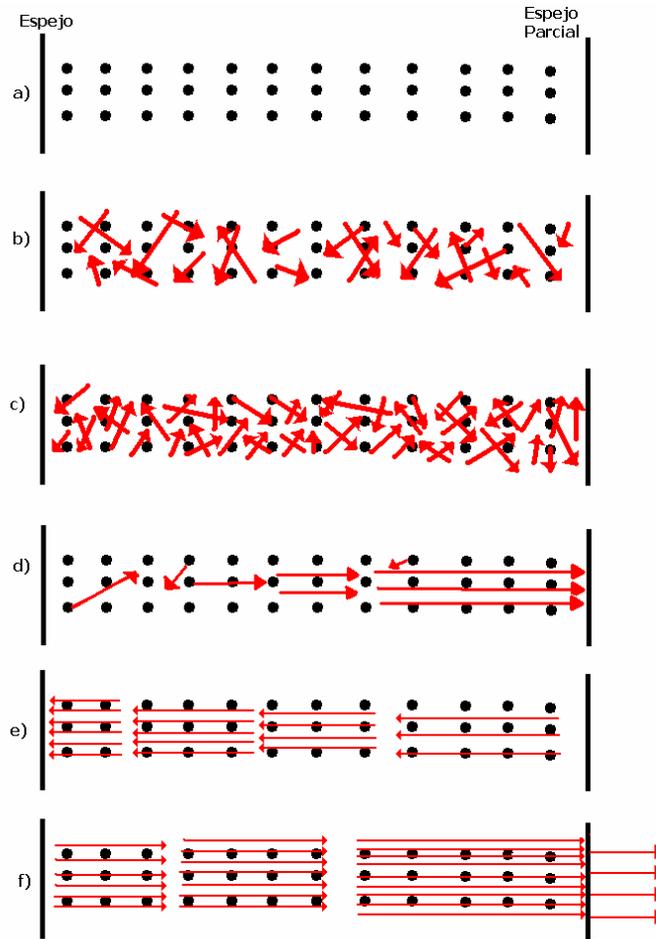
No todas las sustancias tienen las propiedades para ser medios emisores láser, puesto que un medio eficaz de emisión láser debe ser suficientemente excitable para alcanzar la inversión de población. En ésta condición hay una ganancia neta de luz que se genera. Es decir, el medio excitado produce más fotones de los que absorbe.

Si consideremos un material sujeto a un bombeo óptico, a fin de que sus átomos regresen constantemente al nivel superior. Supongamos también que la vida media de éste estado superior es lo suficientemente larga como para permitir la emisión estimulada (esto depende del tipo de material). Finalmente si hacemos incidir en éste material un fotón de la frecuencia adecuada para provocar la emisión estimulada, lograremos dos fotones de las mismas características, es decir con la misma dirección y frecuencia. Los dos fotones obtenidos al continuar sus viajes provocarán de manera independiente cada uno emisiones estimuladas en otros dos átomos excitados provocando otros fotones de las mismas características. Como se puede ver, se provocará una reacción en cadena, por lo que a la salida no se tendrá un solo fotón, sino una multitud de fotones de las mismas características que el que se inyectó. Dicho de otra manera, se habrá amplificado la luz mediante el mecanismo de emisión estimulada.

Debido a la emisión de fotones la inversión de población disminuye. La rapidez con la que los átomos del nivel superior, regresan al nivel inferior por la emisión de fotones, es muy alta. A consecuencia de esto, tiende a disminuir la inversión de población, llevando a una disminución de átomos en el nivel superior de energía y a aumentar en el nivel inferior. A fin de que éste proceso sea continuo, podemos colocar un sistema de realimentación para que la emisión sea constante, para ello se emplea una cavidad resonante o resonador óptico.

La finalidad de un resonador óptico es la de realimentar al material con una parte de los fotones que se amplificaron, para volver a una inversión de población y tener nuevamente una gran cantidad de átomos excitados, logrando que la emisión sea continua.

Además de servir el resonador como una retroalimentación también determina todas las características del haz láser, excepto la longitud de onda (ésta, está determinada por el salto entre niveles de energía del material). El resonador está formado por un tubo de vidrio que envuelve al material emisor, además con un espejo en cada extremo alineado con precisión. Uno de estos espejos es 100% reflector, mientras que el otro refleja solo una porción determinada de luz; por ejemplo un 85%. La cantidad de luz aumenta en el resonador por la reflexión al hacer varios cientos de viajes de ida y vuelta, a través del material y entre los espejos. La parte que se libera por el espejo parcialmente transparente, ósea el 15%, es el haz láser que se emite. El 85% restante que queda dentro del resonador, es el que mantiene la inversión de población y determina las características de la parte que se emite como la alta coherencia temporal y espacial.



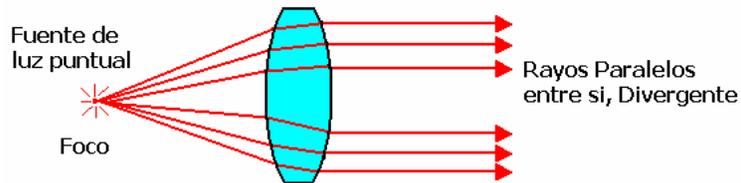
*Fig. 2.5 Procesos de Emisión Láser (Resonador Óptico).*

En la figura 2.5 se muestra el esquema conceptual del proceso láser, desde la iniciación hasta la emisión estable del haz. En a), los átomos se encuentran en el estado fundamental porque no existe ninguna energía de excitación. Cuando se aplica el voltaje de excitación al medio, muchos átomos son excitados pasando a un nivel superior y se emiten fotones espontáneamente b) y c). Si un fotón emitido choca con un átomo excitado d), ocurre una amplificación, ya que ese átomo será estimulado a emitir un fotón idéntico al primero y que se moverá en la misma dirección. La emisión estimulada prosigue, puesto que cada uno de los fotones es capaz de provocar la emisión de más. El movimiento de los fotones puede realizarse en cualquier dirección, pero aquellos que se desplazan paralelos al eje del tubo chocan en un espejo de los extremos y se reflejarán hacia atrás, paralelamente al mismo eje e). Éstos son los fotones que forman dentro del tubo el haz de luz coherente, de una sola frecuencia, al reflejarse en uno y otro sentidos, estimulando la emisión de más fotones idénticos en una reacción en cadena. Algunos de estos fotones f) pasan a través del espejo parcialmente transmisor y emergen como un haz de rayos paralelos, mientras que otros continúan oscilando en el resonador, generando más fotones. Este fenómeno continuará mientras se mantenga la inversión de población entre los átomos del medio emisor láser.

### Características del láser (coherencias espacial y temporal)

Las características principales del láser, que lo distinguen sobre otros tipos de fuentes luminosas, son dos propiedades específicas y especiales de la luz, que técnicamente reciben el nombre de coherencia espacial y coherencia temporal. Aunque estas palabras pueden sonar impresionantes, denotan dos características de la luz y del láser que pueden ser explicadas fácilmente.

Con el fin de poder explicar la coherencia espacial, consideremos una fuente luminosa puntual, éste concepto de fuente puntual es solo ideal ya que las fuente puntuales no existen, debido a que por más pequeña que sea una fuente de luz, siempre tendrá algún tamaño y una fuente puntual no lo tiene. La fuente puntual de luz emite frentes de onda esféricos y concéntricos. Si colocamos una lente convergente frente a ésta fuente luminosa y la fuente puntual queda exactamente en el foco de la lente, como se muestra en la figura. La luz saldría entonces de la lente en un haz de rayos paralelos, o lo que es lo mismo con frentes de onda planos y paralelos entre si, como se ve en la misma figura 2.6. Se dice que una fuente puntual o infinitamente pequeña tiene una coherencia espacial perfecta y que a diferencia de cualquier fuente con un tamaño físico éstas tiene una coherencia muy pobre, en otras palabra, la luz emitida por otro tipos de fuente a las láser tienen una dispersión de la luz muy grande ósea que su haz luminoso se dirige en todas direcciones a diferencia de la luz láser que tiene una direccionalidad muy alta o coherencia espacial.



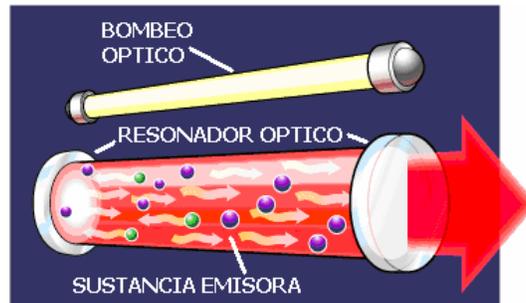
**Fig. 2.6** Conversión de fuente de luz puntual (ondas esféricas) a rayos paralelos (ondas planas).

Son muchas las aplicaciones en las que es necesario tener una fuente de gran coherencia espacial, por ejemplo, para tener un frente de onda único en interferometría en el cual se basa el fenómeno físico que se emplea para la finalidad de ésta tesis.

La segunda característica del láser tiene que ver con la cantidad de colores que emite la fuente luminosa simultáneamente, o el ancho de banda de ésta, es decir, con el grado de monocromaticidad. Por ejemplo, una fuente de luz blanca no es monocromática, pues emite todos los colores del espectro visible, incluyendo también luz infrarroja y ultravioleta, al mismo tiempo. La luz de un foco de color rojo es más monocromática que una fuente de luz blanca, esto porque la luz que emite ésta fuente contiene colores cercanos al rojo, como el naranja, infrarrojo y toda la gamma de colores rojos. Mientras más monocromático sea un haz luminoso se dice que tiene mayor coherencia temporal. La luz láser tiene el haz más coherente temporalmente que hay, siendo casi perfecto, con un ancho de banda muy estrecho, es decir, tiene alta monocromaticidad o está formado por un solo color su haz luminoso.

### Requisitos fundamentales para la emisión láser

Todos los equipos láser tienen tres elementos fundamentales: la sustancia emisora, que proporciona átomos, iones o moléculas que producen la amplificación de la luz; una fuente de energía para excitar el medio (bombeo óptico) y un resonador óptico para facilitar la retroalimentación de la luz que amplifica. La figura 2.7 ilustra en forma esquemática los elementos básicos que se emplean en un láser.



*Fig. 2.7 Esquema del láser.*

### 2.2.-FUENTES SEMICONDUCTORAS EMISORAS DE LUZ

La luz puede ser emitida por un material semiconductor como resultado de la recombinación electrón-hueco. Una fuente externa de energía puede ser empleada para excitar el par electrón-hueco en un número suficiente tal que una gran cantidad de recombinación espontánea de radiación, causando que el material alcance una radiación luminiscente. Una manera conveniente de producir ésta radiación es a través de una unión *p-n*, la cual tiene el efecto de una inyección de electrones y huecos dentro de la misma región de espacio; el resultado de ésta recombinación es llamada **inyección electroluminiscente** (injection electroluminescence).

Un diodo emisor de luz (*LED*) es un dispositivo fabricado con una unión *p-n* con materiales semiconductores que emiten luz vía inyección electroluminiscente. Si el voltaje se incrementa mas allá de cierto valor, el número de electrones y huecos en la región de unión puede llegar a ser suficientemente grande para que la inversión de población pueda llevarse a cabo, produciéndose la emisión estimulada y siendo mayor que la absorción. La unión puede entonces ser usada como un diodo amplificador láser o con la apropiada reacción como una inyección de diodo láser.

Las fuentes semiconductoras de fotones, en ambas formas como *LED* y como inyectores láser, sirven como eficientes transductores eléctricos a fotón. Son dispositivos muy convenientes ya que pueden ser controlados a través de la corriente que se les inyecta. Son de tamaño pequeño, alta eficiencia, gran rentabilidad y compatibles con los sistemas electrónicos, por lo que son muy importantes en muchos factores y por ello empleados exitosamente en muchas aplicaciones. Entre estos dispositivos encontramos las lámparas

indicadoras, pantallas, escáneres y sistemas de impresión, sistemas de comunicación a través de fibra óptica y sistemas de almacenamiento ópticos como los discos compactos.

### 2.2.1.- DIODO LÁSER (LD)

Hemos visto que en un *LED* (fuente semiconductor emisora de luz) la emisión fotónica es espontánea, bajo la acción de un campo eléctrico, tal emisión se produce en forma totalmente aleatoria. Hay que notar que el hecho de que, aunque la radiación fuese estrictamente monocromática, las diferentes ondas que la componen no están en fase debido precisamente a que cada emisión es independiente de cualquier otra en su generación; esto lleva consigo que unas anulen a otras total o parcialmente a otras y que la potencia neta de salida se vea reducida con respecto a la que tendría de no ocurrir estos fenómenos de interferencia.

Por el contrario el láser se caracteriza porque su emisión es coherente; es decir, los trenes de ondas que emergen de él, están siempre en fase, independientemente de cual sea su ancho espectral de emisión (este ancho espectral es mucho más reducido que el de los *LEDs*).

Un láser semiconductor de inyección es un amplificador semiconductor láser que es suministrado con una reacción óptica. Esto se lleva a cabo a través de una unión de materiales *p-n* dopados, los cuales son fabricados con materiales semiconductores. La corriente inyectada es suficientemente grande para producir una ganancia óptica. La reacción óptica es suministrada por espejos, los cuales son usualmente obtenidos añadiendo al semiconductor, materiales cristalinos a lo largo de sus planos laterales. El índice de refracción entre el cristal y el aire a su alrededor produce una reflexión en el material. Así el semiconductor cristalino actúa como un medio de amplificación y como un medio resonador. Prediciendo que el coeficiente de ganancia es lo suficientemente grande, la reacción convierte el amplificador óptico en un oscilador óptico. El dispositivo es llamado láser semiconductor de inyección o diodo láser.

El diodo Láser (*LD* por sus siglas en inglés) es similar al diodo emisor de luz (*LED*). En ambos dispositivos, la fuente es una corriente eléctrica inyectada en la unión *p-n*. La diferencia principal es que la luz emitida por un *LED* es generada por emisión espontánea y la de un *LD* por emisión estimulada.

En comparación con otros tipos de láseres, el láser de inyección tiene un mayor número de ventajas como son: tamaño pequeño, alta eficiencia, integrabilidad con dispositivos y componentes electrónicos y una fácil modulación a través de la corriente eléctrica que se le inyecta. Sin embargo el ancho espectral de un semiconductor láser es más grande que los otros tipos de láser.

Normalmente, la distribución de los diferentes estados energéticos de los electrones a una cierta temperatura tienen un carácter probabilístico y responde a una curva como la de la figura 2.8, en la que los niveles bajos de energía se encuentran más concurridos que los de

alta energía por la tendencia de la naturaleza a mantener todos los cuerpos en el mínimo nivel posible.

Einsten afirmó que cuando un fotón incide sobre un átomo pueden ocurrir dos cosas:

- a) Si su nivel es bajo, la absorción del fotón lo eleva y puede separar un electrón dando lugar a la creación de un par electrón-hueco, lo que constituye el principio del funcionamiento de los fotodetectores. Lo más probable es, por lo tanto, que cuando un fotón incida sobre uno de estos electrones eleven su nivel energético y el fotón ceda su energía a éste electrón: estamos ante el caso normal de un material que absorbe luz cuando ésta incide sobre él.
- b) Lo anterior no excluye pensar que, aún con pequeña probabilidad, pueda ocurrir el caso contrario, esto es, que un fotón que incida sobre uno de los pocos electrones de alta energía le obligue a pasar a un estado de menor excitación, lo que es relativamente fácil si éste electrón se encuentra en estado metaestable. Ello implicaría la emisión de un nuevo fotón.

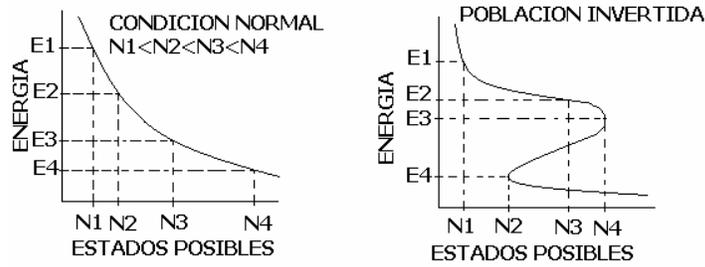
Sin embargo, para que ocurra cualquiera de las dos probabilidades mencionadas, debe cumplirse que la frecuencia del fotón incidente sea exactamente igual al cociente entre el salto energético del electrón (valor fijo para cada material) y la constante de Planck (Ec. 2.2).

$$f = \frac{\Delta E}{h} \quad (2.2)$$

Cuando se da ésta condición y solo entonces, el nuevo fotón tiene la misma frecuencia, fase y polarización que el incidente, es decir, que la radiación estimulada es totalmente coherente con la onda electromagnética que la provocó o, lo que es lo mismo, el nuevo fotón, surgido a consecuencia de la emisión estimulada, no difiere en absoluto del que lo provocó. Estaríamos ante un fenómeno de absorción negativa o amplificación de la luz.

Un caso particular del inciso b) lo constituyen aquellos cuerpos cuyos átomos se encuentran excitados por la acción de un campo eléctrico y de modo espontáneo producen radiación, al caer esos electrones desde su posición metaestable a la mínima energía, éste es el caso del *LED*. Salvo ésta particularidad, es necesario el fotón incidente para que se produzca una emisión forzada o estimulada.

La probabilidad de que ocurra éste último evento se puede aumentar incrementando el número de electrones excitados, es decir, haciendo que el número  $N_3$  de electrones de alta energía, que originalmente era mas pequeño que el  $N_4$  de baja energía, supere a éste, lo que se conoce como inversión de población.



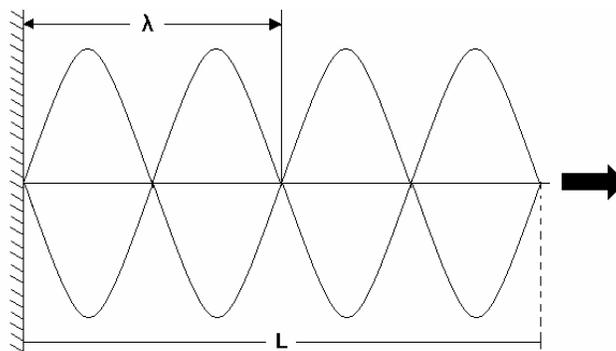
**Fig. 2.8** Curvas de niveles de energía.

Cuando se somete el cuerpo a una fuerte de excitación (bombeo del medio amplificador) se crean las condiciones para que una parte de esos electrones ascienda a un nivel de energía superior, compensando la disminución de energía de aquellos que ya han emitido un fotón.

En los diodos de unión  $p-n$  y tipo heteroestructura, el proceso de inversión de población se produce en la capa activa al inyectar en ella los electrones procedentes de la fuente externa; las uniones de mayor salto energético que la circundan impiden, por su efecto de pozo, que las recombinaciones se produzcan fuera de aquí.

Pero también se puede pensar sí es posible que éste amplificador de luz se automantenga mediante una realimentación positiva, o sea, se convierta en un oscilador, de modo análogo a lo que ocurre en los osciladores convencionales o al láser.

En efecto, se puede conseguir que los fotones producidos, sea su utilización como fuente de luz, pero al mismo tiempo debe emplearse una parte de ellos para realimentar el proceso de radiación estimulada. Si la distancia entre las caras extremas del eje de propagación es un número entero de semilongitudes de onda de la radiación emitida (figura 2.9), aquellos fotones que no escapen y sufran sucesivas reflexiones estarán en fase con los incidentes y podrán crear nuevos fotones. Cuando la ganancia neta de un fotón que recorre un circuito completo se hace igual a la unidad, la reacción en cadena se hace crítica y se produce el efecto láser. La corriente necesaria para que el proceso se automantenga es la llamada corriente de umbral, por debajo de la cual se extingue y se comporta como un *LED*.



**Fig. 2.9** Cavity resonant of the laser.

Para poder subsistir en la cavidad resonante, la luz debe producir interferencias constructivas, lo que implica que la longitud de la cavidad debe ser igual a un múltiplo entero de veces la media longitud de onda de la luz. La longitud de onda de la luz es igual a  $\lambda/n$  en un medio de índice  $n$ . Se tiene entonces la relación (ecuación 2.3).

$$L = m \frac{\lambda}{2n} \quad (2.3)$$

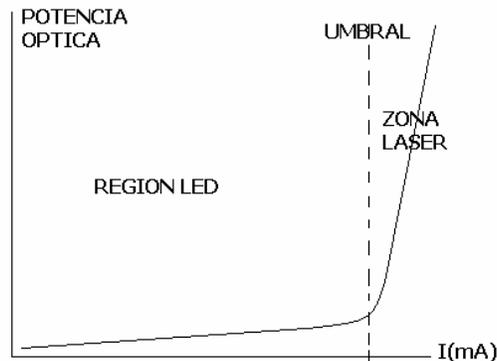
Donde  $L$  es la longitud de la cavidad y  $m$  es el orden de los modos que pueden existir en esa cavidad.

Las condiciones, por lo tanto, para que se produzca el efecto láser son:

- Existencia de una fuente de bombeo del diodo.
- Corriente superior a la de umbral.
- Dimensiones adecuadas de la cavidad resonante.

Actualmente se fabrican diversos tipos de láser para varias longitudes de onda a base de aleaciones cuaternarias de semiconductores de los grupos III y IV.

Por la rapidez de la emisión estimulada, los láseres pueden ser modulados a velocidades más altas que los *LED*. Otra característica importante del láser es la dependencia de la potencia de emisión con la temperatura, lo que obliga a incorporar en el modulo transmisor circuitos de control de corriente de polarización o bien a mantener el láser en un ambiente térmicamente estable. Figura 2.10.



**Fig. 2.10** Curva corriente-potencia del diodo láser.

Como se puede apreciar, la potencia media es superior a la que proporcionan los *LED*, así como la frecuencia máxima de modulación.

En cuanto al espectro de emisión es de notar que varía, desplazándose a mayores longitudes de onda al aumentar la temperatura.

Los parámetros más normales de los diodos láser se muestran en la siguiente tabla.

	Ga Al As	In Ga As P
Longitud de onda (nm)	800-900	900-1550
Anchura espectral (nm)	0.1-4	0.1-6
Estabilidad espectral (nm/°C)	0.2	0.5
Potencia (mW)	5-20	5-20
Corriente de Umbral (mA)	80-150	40-100
Ancho de banda (GHz)	0.5-2	0.5-2
Vida Media (Horas)	10 <sup>6</sup>	10 <sup>6</sup>

### 2.3.-DETECTORES ÓPTICOS

Los detectores más comúnmente empleados en sensores ópticos son los semiconductores, fotodiodos y fotodiodos de avalancha. Estos tipos de detectores son generalmente usados para monitorear la potencia enviada desde el sensor al detector. Estos detectores pueden ser también empleados para detectar intensidad o la componente discreta de un espectro cuadrado; son usados a la vez con los apropiados componentes ópticos como filtros o polarizadores. Para la detección de distribución espectral, es importante la longitud de onda de detección, por lo que se emplean sistemas multiplexados y un arreglo de fotodetectores es empleado al mismo tiempo con un sistema de difracción y polarización.

#### Estadísticas de detección óptica

El proceso de detección envuelve la conversión de energía óptica en forma de fotones en una señal eléctrica en forma de electrones. Posteriormente puede ser procesada por métodos electrónicos de filtrado, amplificación, conversión de parámetros eléctricos, etc. Si la probabilidad de que un fotón con energía  $h\nu$  produzca un electrón en un detector es  $\eta$ , entonces el promedio de producción de electrones  $\langle r \rangle$ , para un haz incidente de potencia  $P$  está dado por:

$$\langle r \rangle = \frac{\eta P}{h\nu} \quad (2.4)$$

La producción del par electrón-hueco debida a la incidencia de fotones como una razón constante  $\langle r \rangle$ , está distribuida aleatoriamente en el tiempo y obedece a la distribución estadística de Poisson, así que la probabilidad de producción de  $m$  electrones en algún intervalo de medición  $\tau$  está dado por:

$$P(m, \tau) = (\langle r \rangle \tau)^m \frac{1}{m!} e^{-\langle r \rangle \tau} \quad (2.5)$$

Esta distribución es válida para la detección en tiempo-variable de señales ópticas, donde el periodo de muestreo  $\tau$  es muy corto comparado con el periodo de la señal óptica. En suma la media de fluctuación de sucesos dentro del intervalo promedio sobre un número igual al periodo esta dado por:

$$\langle (n - \langle n \rangle)^2 \rangle = \langle n^2 \rangle - \langle 2n \langle n \rangle \rangle + \langle n \rangle^2 = \langle n^2 \rangle - \langle n \rangle^2 = \langle n \rangle \quad (2.6)$$

Las estadísticas que rodean a la detección óptica son muy importantes en la determinación de un mínimo detectable de los niveles de una señal y de ahí determinar lo que es la máxima sensibilidad en sensores. Este punto es suficiente para notar que la corriente eléctrica es proporcional a la potencia óptica incidente en el detector, y ésta relación está dada por:

$$i = \langle r \rangle e = \frac{\eta e P}{h\nu} \quad (2.7)$$

Un cambio en la entrada de potencia óptica  $\Delta P$ , resulta de un cambio en la salida de corriente,  $\Delta i$ . Ya que la potencia eléctrica es proporcional a  $i^2$  de cualquier manera la potencia eléctrica de salida del detector varía cuadráticamente con la potencia óptica de entrada, haciéndolo un detector de ley cuadrática.

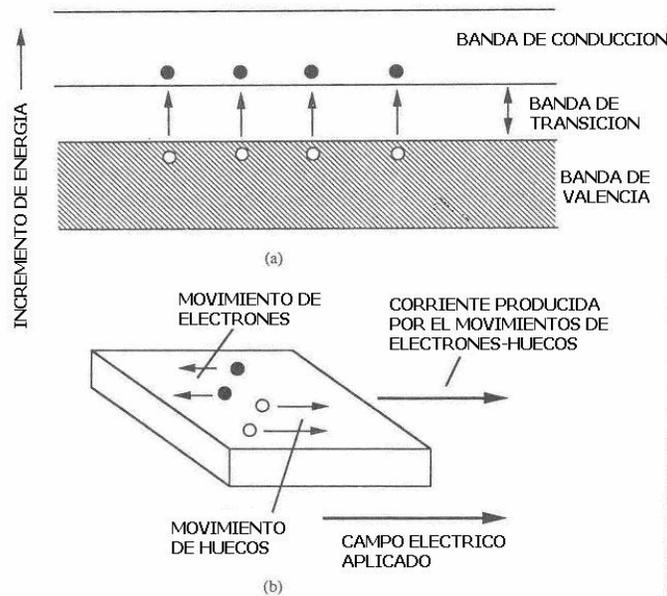
### Principios Básicos de los semiconductores

El término semiconductor, se refiere a un material el cual tiene la habilidad de conducir electricidad entre aislantes y conductores, esto se logra haciendo que el material aislante obtenga la propiedad de conducir electricidad. Los más importantes materiales semiconductores son el Silicio, Germanio y compuestos de Galio, Indio y Arsénico. Los semiconductores pueden ser del tipo  $n$ , los cuales tienen un exceso de electrones o de tipo  $p$ , que tienen un exceso de huecos, esto es, la ausencia de electrones en una región permitida de energía. Los electrones de los semiconductores tienen ciertos niveles de energía que están cercanos entre ellos en bandas de valencia. Las bandas bajas de energía son ocupadas primero con el resultado que solo permite una determinada banda, determinado por las propiedades del sólido. Las dos bandas más energéticas, la banda de valencia y la banda de conducción, son muy importantes, como es también la región energética entre ellas. La banda de valencia representa el límite máximo de energía del material. La banda de conducción representa la mínima energía en la cual los electrones pueden moverse más libremente a través del canal del semiconductor. La banda directa de un semiconductor es aquella en la cual el máximo de la banda de valencia y el mínimo de la banda de conducción ocurren en el mismo momento del electrón conocido como vector  $k$ . El Galio es un ejemplo de un material con banda directa. En un material de banda indirecta, el máximo de la banda de valencia y el mínimo de la banda de conducción ocurren en diferentes valores de  $k$ . El silicio es un ejemplo de un material de banda indirecta. Si en algún tipo de material semiconductor ocurre que exista algún tipo de impureza, sin defectos

en el canal entre las bandas de valencia y conducción, éste tipo de material es conocido como *semiconductor intrínseco*. Para éste tipo de material ocurre que a bajas temperaturas la banda de valencia está llena y la banda de conducción está vacía.

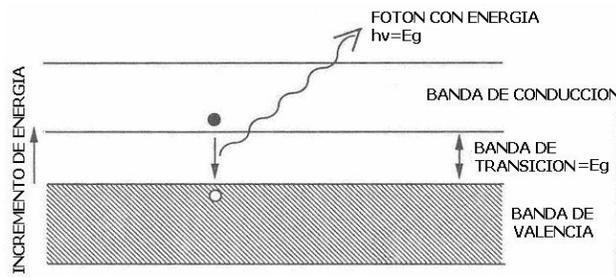
La banda de energía en tales materiales es frecuentemente pequeña ( $\sim 1\text{eV}$ ), por lo que la excitación térmica de los electrones a una alta temperatura provee suficiente energía que permite a algunos electrones moverse a la banda de conducción.

De ésta manera los electrones que se mueven, dejan atrás una carga positiva o huecos en la banda de valencia. Bajo la aplicación de un campo magnético, ésta corriente o movimiento de electrones puede fluir también.



**Fig. 2.11** a) Bandas de energía del semiconductor, b) Movimiento de los portadores (electrón-hueco) en los semiconductores

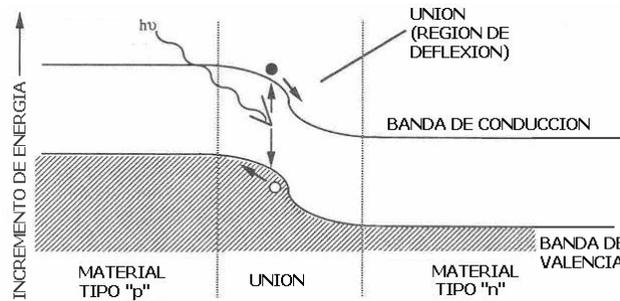
Para un semiconductor intrínseco a una temperatura uniforme, hay una concentración invariable de portadores (electrón-hueco). Aunque los portadores son creados a través de una excitación térmica, éstos también son destruidos por la misma recombinación electrón-hueco. Esto ocurre cuando un electrón en la banda de conducción realiza la transición a un hueco o a un estado vacante en la banda de valencia. Al realizar éste proceso se desprende una cantidad de energía aproximadamente igual a  $E_g$  en forma de luz (emisión de un fotón) o vibración del canal entre las bandas de valencia y conducción (creación de fonón). Un ejemplo de ésta emisión espontánea de fotón se muestra en la figura 2.12.



**Fig. 2.12** Proceso de emisión fotónica en un semiconductor.

## 2.4.-EL FOTODIODO

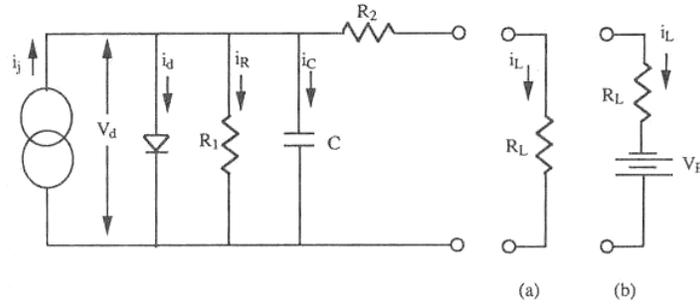
Un fotodiodo consiste en una unión semiconductor  $p-n$ . Cuando tal unión es formada, una región de alto campo eléctrico existe entre los dos tipos de material ésta región se llama *región de deflexión*. Dentro de ésta región los electrones y huecos son creados por la absorción de un fotón y son excitados fuera de la zona por el campo eléctrico, dejando un vacío de carga. Ésta situación es mostrada en la figura 2.13.



**Fig. 2.13** Regiones del semiconductor.

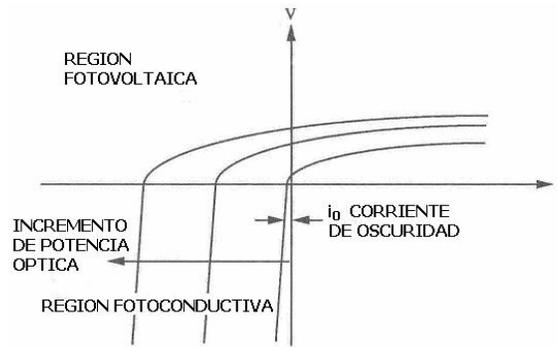
Ésta unión puede por lo tanto servir como un detector óptico cuando es físicamente configurado así, la potencia óptica (fotones) incide en la región de deflexión, donde son convertidos los pares de electrón-hueco que son empujados fuera de ésta zona creando una separación e incremento de cargas. Éste aumento de cargas puede ser detectado de dos maneras dependiendo de cómo la unión sea eléctricamente conectada. Si la unión está conectada como un circuito abierto, el voltaje a través de la unión es medido de modo fotovoltaico. Pero si la unión es un circuito cerrado, una corriente fluye a través del mismo, en ésta configuración la corriente es medida de modo fotoconductor.

El circuito equivalente a un fotodiodo se muestra en la figura 2.14. Éste circuito puede ser empleado de dos diferentes maneras. La primera parte del esquema muestra la configuración correspondiente al circuito fotovoltaico y en la segunda parte del esquema se explica el circuito correspondiente a una medición de fotoconductividad.



**Fig. 2.14** Circuito equivalente del fotodiodo, a) fotovoltaico, b) fotocorriente.

La respuesta típica de un fotodiodo se muestra en la figura 2.15.



**Fig. 2.15** Respuesta Voltaje-Corriente del fotodiodo.

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.

$$i = i_0 \left( e^{eV/k_B T} - 1 \right) - i_s \tag{2.8}$$

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 de acuerdo a la ecuación estadística de detección analizadas anteriormente, por lo que combinando ambas ecuaciones tenemos:

$$i = i_0 \left( e^{eV/k_B T} - 1 \right) - \frac{\eta e P}{h\nu} \tag{2.9}$$

Esta ecuación describe la generación global de la característica corriente voltaje de un fotodiodo en presencia de iluminación.

La determinación de la eficiencia de conversión de potencia de un fotodiodo, puede ser realizada empleando la ecuación anterior y multiplicándola por el voltaje generado por el fotodiodo.

Por lo que la potencia eléctrica  $P_e$  entregada por el fotodiodo está dada por:

$$P_e = iV$$

$$P_e = i_0V \left( e^{eV/k_B T} - 1 \right) - \frac{\eta e P V}{h\nu} \quad (2.10)$$

## 2.5.-TIPOS DE FOTODIODOS

### Fotodiodo $p-n$

Como cualquier fotodetector, el fotodiodo depende de la generación de portadores para su operación. Un fotodiodo es una unión  $p-n$  cuya corriente de inversa aumenta cuando es absorbido un fotón o fotones. Aunque los fotodiodos son rápidos comparados con los fotoconductores, éstos no presentan amplificación. En éstos tipos de dispositivos de detección óptica, los fotones son absorbidos en cualquier parte del dispositivo con un coeficiente de absorción  $\alpha$ , para ello hay tres posibles localizaciones donde el par electrón-hueco puede generarse.

La primera zona o zona de deflexión es donde los portadores generados rápidamente toman rumbos opuestos bajo la influencia de un campo eléctrico. Los electrones se mueven hacia la unión  $n$  y los huecos hacia la unión  $p$ , dando una corriente creada en el circuito externo en dirección inversa de  $n$  a  $p$ . La segunda zona o zona intermedia, es donde los portadores son generados fuera de la zona de deflexión, pero en su vecindad tienen la oportunidad de entrar a la zona por difusión; un electrón proveniente de la unión  $p$  es rápidamente transportado a través de la unión y de ésta manera contribuir como una carga  $e$  al circuito externo, con un hueco sucede lo mismo que con el electrón. El tiempo transitorio en el cual los portadores vagan a través de la zona de deflexión y la  $R_C$  del dispositivo juega un papel importante en la respuesta del tiempo de los detectores optoelectrónicos. También los portadores generados cerca del área de deflexión toman algún tiempo para entrar a ésta área, esto es un tanto lento como para contribuir en éste proceso.

Los fotodiodos se usan usualmente en la región de polarización inversa, debido a que se reduce el tiempo transitorio, se aumenta el ancho del área de deflexión y con ello reduciendo la capacitancia de la unión; con el aumento del área de deflexión se aumenta la sensibilidad y con ello se hace más fácil coleccionar mayor cantidad de luz.

### **Fotodiodo $p-i-n$**

El detector  $p-i-n$  tiene un número mayor de ventajas que el  $p-n$ , ya que éste dispositivo tiene una unión  $p-n$  con una capa intrínseca entre ambos materiales; ésta estructura sirve para extender el ancho de la región de soporte del campo eléctrico y con ello aumentar el área de deflexión. Las ventajas de éste dispositivo son varias entre las cuales tenemos un incremento en el ancho de la zona de deflexión y así aumentando la captura de luz; al aumentar el ancho del área de deflexión también se disminuye la capacitancia entre la unión y la constante de tiempo  $R_C$ .

### **Fotodiodo de heteroestructura**

Estos tipos de fotodiodos están formados por dos semiconductores de diferentes bandas de valencia, los cuales tienen ventajas sobre una unión  $p-n$ , ya que puede usarse su transparencia óptica para minimizar la absorción óptica afuera de la región de deflexión. El uso de diferentes materiales puede dar dispositivos con gran distribución y flexibilidad.

### **Fotodiodos Schottky**

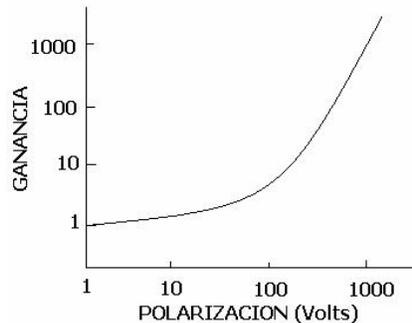
Son heterouniones de metal semiconductor. Una delgada y semitransparente capa metálica es usada en lugar del material  $p-n$  en la unión del fotodiodo; ésta pequeña capa de semiconductor se comporta como un metal en presencia de luz. Hay varias razones por las cuales son empleados éstos fotodiodos, una de ellas es que pueden absorber en la banda visible y ultravioleta del espectro electromagnético con un coeficiente de absorción grande. El metal semiconductor tiene una capa de deflexión en la superficie, así se elimina la absorción de ésta área realizándose directamente la conversión de potencia óptica en potencia eléctrica.

### **Fotodiodos de Avalancha**

La necesidad de dispositivos de alta velocidad de operación, señala el uso de valores pequeños de carga resistiva para la detección óptica. Esto también determina una señal muy pequeña de la señal de voltaje en el fotodetector, como consecuencia los fotodetectores son frecuentemente combinados con preamplificadores de alta velocidad en un solo paquete para producir una señal aceptable. Otro método existente para proveer una señal de amplificación sin sacrificar la velocidad de operación es el dispositivo óptico llamado fotodiodo de avalancha (*APD* por sus siglas en inglés).

Si una unión semiconductor  $p-n$  se le aplica un alto valor de voltaje, la generación óptica de portadores será incrementada a muy altas energías debido al campo eléctrico en la región de deflexión. Esos portadores tienen suficiente energía para excitar portadores adicionales de la banda de valencia a la banda de conducción. Los portadores iniciales retienen suficiente energía para permanecer en la banda de conducción. Por lo que la conducción producida por la absorción óptica es multiplicada a través de un proceso en el que los portadores excitados continuamente producen a su vez nuevos portadores que continúan de la misma manera produciendo más portadores en un proceso de avalancha, de ahí el

nombre del dispositivo. La figura 2.16 muestra la corriente multiplicada por un fotodiodo de avalancha, como se puede ver la variación no es lineal.



**Fig. 2.16** Curva Polarización-Ganancia del fotodiodo de avalancha.

Para muchas aplicaciones los fotodiodos de avalancha ofrecen una solución al problema de detección de alta velocidad o para señales ópticas muy pequeñas. Estos dispositivos son muy susceptibles al ruido en la señal amplificada debido a las fluctuaciones en la temperatura y al voltaje de excitación. Por tal razón estos dispositivos requieren de una estabilización térmica y de una muy buena regulación del voltaje de excitación para lograr una alta precisión en su uso.

### Arreglos de fotodetectores

Un fotodetector individual registra el flujo notable de fotones como una función del tiempo, en contraste, un arreglo contiene un gran número de fotodetectores que pueden simultáneamente registrar flujos de varios puntos en el espacio, esto como varias funciones del tiempo. Tales arreglos permiten el cambio u absorción de imágenes ópticas; un tipo de arreglo de detectores es el *microchannel plate*. Modernos arreglos microelectrónicos que permiten otro tipo de tecnologías, las cuales tienen fotodetectores individuales llamados píxeles.

## 2.6.-RUIDO EN FOTODETECTORES

El problema del ruido en un detector óptico, se relaciona con la resolución, exactitud y el rango dinámico disponible de una señal detectada. El ruido es la porción de la señal que varía en forma aleatoria de manera impredecible (dentro del ancho de banda de interés) y es por lo tanto inconveniente para la señal de información del fotodetector. El ruido puede ser generado de diferentes formas, por lo que existen diferentes tipos de ruidos, entre los cuales están el ruido de disparo, ruido de oscuridad y ruido térmico los que son más importantes.

Existen varias formas de obtener las ecuaciones apropiadas para cuantificar los diferentes tipos de ruidos, pero para éste propósito solo se mencionan los tipos de ruido sin llegar a la comprobación de cada uno de ellos y solo se da la ecuación de ruido de cada uno de ellos mencionando el fenómeno físico del se que produce cada uno.

### Ruido producido por corrientes de DC en los circuitos de detección

Si una corriente promedio de DC  $i_{dc}$  fluye a través del circuito de detección, ésta corriente contribuye a la señal de medición  $i_s$ , y adicionalmente con otras corrientes como la corriente de oscuridad del detector  $i_d$  y alguna corriente de base  $i_B$ . Esto se puede mostrar de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$i_{dc} = i_s + i_d + i_B \quad (2.11)$$

El ruido de oscuridad, es el asociado a la corriente producida por el fotodiodo en ausencia de luz, esto debido a que se generan portadores sin la existencia de un fotón que los provoque.

La principal consideración sobre la corriente que fluye en el circuito de detección es que ésta produce una potencia de ruido  $i_N^2 R_L$  (Ley de Joule) debida a las componentes de  $i_{dc}$ . La parte cuadrática de ésta ecuación es la corriente y está dada por:

$$i_N^2 = 2ei_s \Delta v + 2ei_B \Delta v + 2ei_d \Delta v \quad (2.12)$$

Donde cada término de ésta ecuación es cada una de las corrientes mencionadas y que sumadas forman la corriente total elevada al cuadrado. El primer término de la ecuación es conocido como ruido de disparo, los siguientes dos términos, son llamados ruido de fondo y ruido de oscuridad, respectivamente.

Finalmente la señal detectada puede ser relacionada con la potencia óptica  $P$  tomando en cuenta la estadística de detección óptica y la corriente de ruido de la siguiente manera:

$$i_N^2 = 2e^2 \frac{\eta P_s}{h\nu} \Delta v + 2e^2 \frac{\eta P_B}{h\nu} \Delta v + 2ei_d \Delta v \quad (2.13)$$

Donde  $P_s$  representa la señal óptica incidente en el detector y  $P_B$  es la radiación óptica de fondo incidente en el detector.

Donde finalmente la potencia total incidente en el detector constituida por la señal óptica, la estadística de detección óptica y el ruido nos da la ecuación:

$$Potencia = R_L i_N^2 \quad (2.14)$$

Sustituyendo las dos últimas ecuaciones tenemos:

$$Potencia = 2e^2 R_L \frac{\eta P_s}{h\nu} \Delta v + 2e^2 R_L \frac{\eta P_B}{h\nu} \Delta v + 2ei_d \Delta v R_L \quad (2.15)$$

### Ruido Térmico

El ruido térmico o *ruido Jhonson*, es la expresión para las fluctuaciones de corriente o voltajes inducidos térmicamente a través de un elemento disipativo del circuito de detección, éste elemento es una carga resistiva  $R_L$  que se refiere a la resistencia del fotodetector. Considerando el modelo físico de un elemento resistivo, éste consta de una estructura cilíndrica con una sección transversal de una cierta área y longitud, constituyendo un cierto volumen. Dentro de este volumen los electrones tienen una cierta energía cinética asociada con su movimiento aleatorio térmico.

Dentro de éste volumen un electrón puede tener colisiones con otros electrones, átomos o iones generando vibraciones. Esto significa, que un electrón tendrá cierto tiempo de colisión; ahora considerando que el volumen contiene  $N$  electrones por unidad de volumen en el material resistor, la conductividad del mismo cambia constantemente y de manera aleatoria, por lo que esto genera una corriente parásita conocida como ruido térmico. La potencia de ruido térmico tiene la siguiente ecuación asociada:

$$i_N^2 = \frac{4k_B T}{R_L} \Delta v \quad (2.16)$$

Donde  $K_B$  es la constante de Boltzman que asocia la cantidad de energía de cada electrón con la temperatura,  $T$  es la temperatura absoluta del elemento y  $R_L$  es la resistividad del elemento.

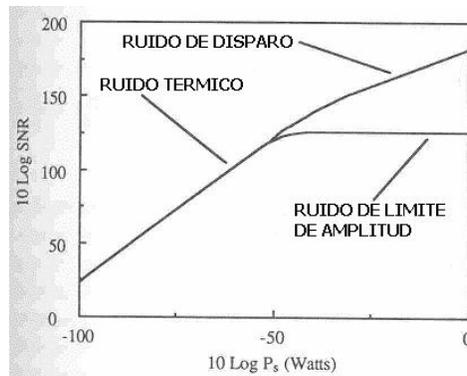
### Señal a Ruido

Basándonos en la ecuación de ruido térmico y en la ecuación de corriente de ruido, podemos calcular la señal a ruido (*SNR* por sus siglas en inglés) de un sencillo fotodiodo. La señal a ruido esta dada por lo tanto por la ecuación:

$$SNR = \frac{i_S^2}{i_N^2} \quad (2.17)$$

$$SNR = \frac{(\eta e P_S / h\nu)^2}{(2e^2 \eta / h\nu)(P_S + P_B)\Delta v + 2e i_d \Delta v + (4k_B T / R_L)\Delta v}$$

La gráfica que nos muestra los límites de separación del ruido es la figura 2.17. Para éste ejemplo, la longitud de onda empleada fue de  $820nm$ , con  $\eta=0.8$ ,  $\Delta v=1$ ,  $P_B=0$ ,  $i_d=70nA$  y  $R_L=1k\Omega$ . A muy bajos niveles de potencia el ruido predominante es el térmico. En ésta sección la señal a ruido aumenta de manera cuadrática con la potencia óptica y manteniéndose siempre éste en la señal; a una potencia mayor los ruidos de disparo y otros como los de corrientes continuas, se manifiestan llegando a un límite de amplitud de los mismos.



**Fig. 2.17** Límites de separación de ruido del fotodiodo.

## 2.7.- CONCLUSIONES

El estudio de los dispositivos optoelectrónicos, está basado principalmente en el fenómeno físico de la conversión de energía luminosa a energía eléctrica, o viceversa. Para poder emplear tal fenómeno, es necesario realizar aplicaciones tecnológicas prácticas, por tal motivo, en éste capítulo se realizó el análisis de éste fenómeno y de las aplicaciones más concretas en elementos optoelectrónicos como detectores y fuentes ópticas. Gracias a los avances tecnológicos, los nuevos dispositivos de sensado son ahora optoelectrónicos, ese es el caso del sensor construido para ésta tesis, en el que el fenómeno físico en el cual esta basado, es un fenómeno óptico y por ello se necesita de una detección de ese tipo.

Primeramente se hizo un análisis del funcionamiento de los dispositivos semiconductores emisores de luz desde una perspectiva física, para poder comprender el fenómeno que involucra a éstos dispositivos. Posteriormente se estudió a las diferentes fuente semiconductoras emisoras de luz, como el láser, los *LEDs* y los *LD*, esto para hacer una comparación entre ellos y dar las bases del porque se debe de elegir a un cierto dispositivo para trabajar con él en un determinado sistema o proyecto.

Al estudiar a las fuentes semiconductoras emisoras de luz, es necesario por lo tanto, hablar de los detectores semiconductores de luz, por ello, también se realizó un análisis de la naturaleza de los dispositivos sensores de luz, así como una comparación de éstos para poder establecer la elección de un cierto elemento con las características necesarias para el dispositivo que se construyó.

Finalmente se abordó un tema muy importante en todo dispositivo sensor, el ruido. El ruido como en cualquier sistema de sensado, comunicaciones o electrónico es inevitable, para ello se realizó un análisis de su naturaleza y de los efectos posibles dentro del sistema y su respuesta, esto con la finalidad de anularlo o por lo menos minimizarlo. Para éste análisis se hizo una selección de la información necesaria del tema, ya que éste puede ser muy extenso e innecesario para el propósito de ésta tesis, por éste motivo, en éste capítulo se habló del ruido en los elementos de detección, ya que son los más susceptibles a él.

## 2.8. - BIBLIOGRAFÍA

- 1.- Advances in optical masers, Arthur L. Schawlow, Scientific American Inc.
- 2.- Daniel Malacara, “Óptica Tradicional y Moderna”, La ciencia Para Todos, Fondo de Cultura Económica, No. 84, Cáp. III, pp.50-59, Primera Edición 1989
- 3.-E. Hecht, *Optics* (Addison–Wesley Pub. Co., New York, 1990).
- 4.- Francis T.S. Yu, “Fiber Optic Sensors”, University Park, Pennsylvania, Ed. Marcel Dekker, pp. 383-415, 2002
- 5.-Eric Udd, “Fiber Optic Sensor, An introduction for engineers and scientist”, Wiley-Interscience Publication, First edition, pp 233-267, 1991
- 6.- Ana Maria Ceto, “La Luz”, La Ciencia para todos, Fondo de Cultura Económica, No. 32, Cáp. IV, pp. 88-92, Segunda Edición 1999
- 7.-Edward L. Safford, introducción a la fibra óptica y el láser, ED. Paraninfo, Cáp. VI, VII, Madrid España.
- 8.-Fundamentals of Photonics, Bahaa E. A. Saleh, Malvin Carl Teich, Wiley-Interscience publications, Cap. XIV, XVI, XVII, 1991
- 9.-Richard Saunders, Lasers, Ed. Limusa, 1992 Primera Edición.
- 10.- D.C. Winburn Marcel, Decker Inc. USA, 1997

## **CAPITULO 3**

### **INTERFEROMETRÍA**

#### **INTRODUCCIÓN**

El fenómeno óptico de interferencia, es un fenómeno empleado ampliamente en un sin número de sistemas de detección y de medición, tales como detecciones de inhomogeneidades de superficies, calibración de sistemas ópticos como telescopios y microscopios, detección de movimientos muy pequeños (micrómetros o nanómetros). Para realizar éstas mediciones se construyen arreglos ópticos en los cuales se obtiene una interferencia óptica como respuesta. Existen varios tipos de arreglos que permiten realizar éstas detecciones, uno de éstos arreglos es el interferómetro de Sagnac, en el cual ésta basado el sistema de sensado construido para ésta tesis.

El estudio y análisis del fenómeno de interferencia es muy importante para poder comprender las bases teóricas del sistema construido, además de conocer el fenómeno físico en el cual ésta basado el sensor que obedece a un segundo fenómeno físico, llamado efecto Sagnac. Estos dos fenómenos van asociados ya que uno es el fenómeno físico que se está sensando y el otro es la respuesta del primero a un arreglo del mismo nombre. En éste capítulo se dan todas estas bases de los fenómenos físicos involucrados en el sensor construido, para poder comprender su funcionamiento y realizar perfeccionamientos.

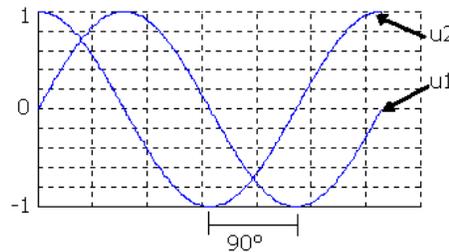
### 3.- INTERFERENCIA

El fenómeno de interferencia se explica cuando dos o mas ondas ópticas están presentes simultáneamente en una misma región del espacio, la función de onda total es la suma de las funciones de onda individuales. Éste principio está basado en la superposición de ondas, siguiendo la linealidad de la ecuación de onda. Para ondas monocromáticas (una sola frecuencia), el principio de superposición es también aplicable, pero hay que tomar en cuenta que al tratarse de funciones de onda, sus amplitudes son complejas. Ésta superposición es dependiente de la linealidad de la ecuación de Helmholtz.

El principio de superposición no es aplicable a la intensidad óptica. La intensidad de superposición de dos o más ondas no es necesariamente la suma de sus intensidades. La intensidad de la onda resultante está relacionada con la interferencia entre éstas ondas. La interferencia no puede ser explicada en base a los rayos ópticos ya que éstos dependen de la diferencia de fase entre las ondas superpuestas.

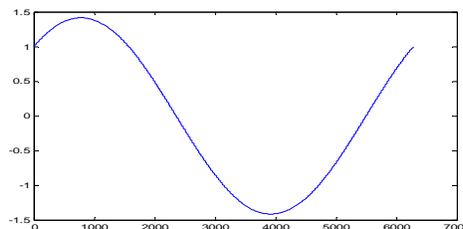
#### Interferencia de dos ondas

Cuando dos ondas monocromáticas de amplitudes complejas  $U_1(r)$  y  $U_2(r)$  están superpuestas, el resultado es una onda monocromática también de la misma frecuencia y de amplitud compleja. En la figura 3.1 vemos dos ondas de igual frecuencia y amplitud, con un defasamiento entre ellas.



**Fig. 3.1** Dos ondas ( $U_1$  y  $U_2$ ) con  $90^\circ$  de defasamiento igual frecuencia y amplitud.

En la figura 3.2 observamos el resultado de la suma de las dos ondas, observando que ésta nueva onda tiene la misma frecuencia que las anteriores pero con diferente amplitud a las mismas debido a la interferencia ocurrida.



**Fig. 3.2** Resultado de la suma de las dos ondas anteriores, se mantiene la misma frecuencia, pero cambia la amplitud.

La explicación matemática del ejemplo anterior se logra considerando a las ondas como funciones complejas,  $U_1$  y  $U_2$ .

$$U(r) = U_1(r) + U_2(r) \quad (3.1)$$

La intensidad de las ondas que la constituyen son  $I_1 = |U_1(r)|^2$  y  $I_2 = |U_2(r)|^2$  y la intensidad total de la onda es:

$$I = |U|^2 = |U_1 + U_2|^2 = |U_1|^2 + |U_2|^2 + U_1^* U_2 + U_1 U_2^* \quad (3.2)$$

Si cambiamos la forma de onda a su forma de Euler para mayor facilidad, tenemos:

$$U_1 = I_1^{1/2} \exp(j\Phi_1) \quad \text{y} \quad U_2 = I_2^{1/2} \exp(j\Phi_2) \quad (3.3)$$

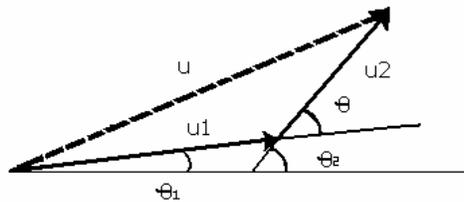
Donde  $\Phi_1$  y  $\Phi_2$  son las fases de las dos ondas.

$$I = I_1 + I_2 + 2(I_1 I_2)^{1/2} \cos \Phi: \quad (3.4)$$

**ECUACION DE INTERFERENCIA**

Por lo tanto la diferencia de fase entre ambas ondas es:  $\Phi = \Phi_1 - \Phi_2$ .

Esta relación es conocida como la ecuación de interferencia, y también puede ser vista geoméricamente con el diagrama fasorial. (Figura 3.3). En el cuál se demuestra que la magnitud del fasor  $U$  depende de la diferencia de fases  $\Phi$  y no solo de las magnitudes de los fasores que lo componen.



**Fig. 3.3** Diagrama fasorial de la suma de dos ondas con la misma frecuencia y amplitud ( $U_1$  y  $U_2$ ), con resultado del fasor  $U$  con la misma frecuencia pero diferente amplitud.

La suma de dos ondas no es la suma de sus intensidades, ya que el resultado de la suma o resta es una onda de forma compleja siguiendo el principio de superposición de ondas, esto es conocido como interferencia entre las dos ondas. Éste término de interferencia puede ser positivo o negativo refiriéndose a una interferencia constructiva o una interferencia destructiva. Sí  $I_1 = I_2 = I_0$ , sustituyendo en la ecuación de interferencia tenemos:

$$I = 2I_0(1 + \cos \Phi) \quad (3.5)$$

Con la identidad trigonométrica  $1 + \cos\beta = 2\cos^2(\beta/2)$ , obtenemos:

$$I = 4I_0 \cos^2(\Phi/2) \quad (3.6)$$

Por lo que aparentemente si las intensidades son iguales, la intensidad total es 4 veces mayor, pero esto depende del ángulo entre las ondas. Para  $\Phi = \pi$ , la superposición de ondas se cancela una con otra y la intensidad es cero. Cuando  $\Phi = \pi/2$  o  $\Phi = 3\pi/2$ , los términos de la interferencia desaparecen y queda  $I = 2I_0$ , por lo que para éste caso en el cual las ondas están desfasadas  $90^\circ$  o un múltiplo de éste, la intensidad es la suma de las intensidades.

La fuerte dependencia de la intensidad  $I$  con la diferencia de fase  $\Phi$  entre dos ondas nos permite medir éstas diferencias para detectar la intensidad de luz. Éste principio es empleado en numerosos sistemas ópticos y es conocido como fenómeno de interferencia óptica.

La interferencia no puede ser observada en sistemas que contengan múltiples tipos de onda, ósea que las ondas sean de diferentes frecuencias y la diferencia de fase esté cambiando continuamente, por lo que la diferencia de fases asume valores variables, los cuales son distribuidos uniformemente entre  $0$  y  $2\pi$ , así que el promedio ( $0 + 2\pi/2 = \pi$ ) lo cual nos produce en el término  $\cos\Phi = 0$  de la ecuación de interferencia y el término de interferencia desaparece. Éste tipo de luz con tal variabilidad es conocida como parcialmente coherente. Por lo que la interferencia solo se limita al estudio de la luz coherente (con una misma frecuencia o fase).

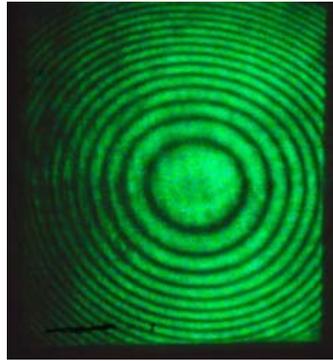
La interferencia es acompañada de una redistribución espacial de la intensidad óptica, sin violar la conservación de energía, por ejemplo cuando las dos ondas tienen intensidades iguales  $I_1$  y  $I_2$ , como resultado de la dependencia de la diferencia de fases  $\Phi$ .

Considere la superposición de dos ondas planas, cada una con una intensidad  $I_0$ , propagándose en la dirección  $z$ , y asumiendo que una de las ondas está atrasada por una distancia  $d$  con respecto de la otra, y las ecuaciones de cada onda son:  $U_1 = I_0^{1/2} \exp(-jkz)$  y  $U_2 = I_0^{1/2} \exp[-jk(z-d)]$ . La intensidad  $I$  de la suma de éstas ondas puede ser determinada sustituyendo  $I_1 = I_2 = I_0$  y  $\Phi = kd = 2\pi d/\lambda$  en la ecuación de interferencia, así tenemos:

$$I = 2I_0 [1 + \cos(2\pi d/\lambda)] \quad (3.7)$$

La dependencia de la intensidad  $I$  se debe al atraso  $d$ . Si el atraso es múltiplo de  $\lambda$ , la interferencia constructiva es completa y ocurre con intensidad total ( $I = 4I_0$ ). De la misma manera si  $d$  es un múltiplo de  $\lambda/2$ , la interferencia es destructiva completa y ocurre con una intensidad  $I = 0$ . El promedio de la intensidad es la suma de las dos intensidades  $2I_0$ .

Debido a que la interferencia puede ser constructiva o destructiva, en varios sistemas de interferencia o sistemas ópticos observamos franjas de líneas muy luminosas que corresponden a la interferencia constructiva, de la misma manera en el mismo sistema observamos líneas oscuras intercaladas entre las líneas luminosas que corresponden a una interferencia destructiva. Figura 3.4 muestra éste fenómeno.



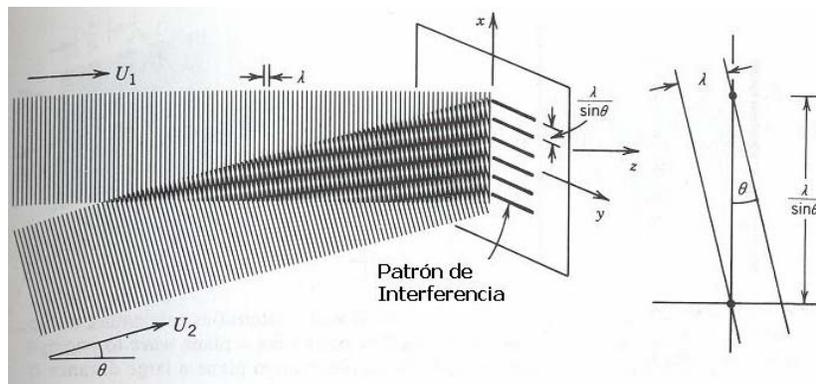
**Fig. 3.4** Patrón de Interferencia, interferencia constructiva corresponde a líneas claras, interferencia destructiva corresponde a líneas oscuras.

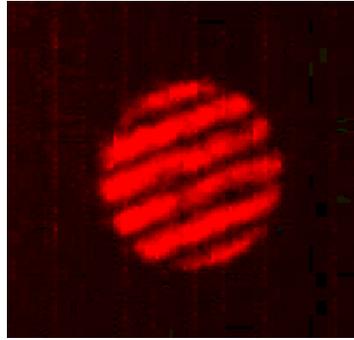
### Interferencia de dos ondas planas oblicuas

Considere ahora la interferencia de dos ondas planas de igual intensidad, una propagándose en la dirección  $z$   $U_1=I_0^{1/2}exp(-jkz)$  y la otra a un ángulo  $\Phi$  con el eje  $z$  en el plano  $x-z$ ,  $U_2=I_0^{1/2}exp[-j(k\cos\Phi z+k\sin\Phi x)]$ . (Véase la figura 3.5). En el punto  $z=0$  del plano, las dos ondas se encuentran con una diferencia de fase  $\Phi = kx\sin\Phi$ , por lo que la ecuación de interferencia produce la intensidad total de:

$$I_2=I_0[1+\text{Cos}(k\text{Sin}\Phi x)] \quad (3.8)$$

Éste patrón varía sinusoidalmente en el eje  $x$ , y con un periodo  $2\pi/k\sin\Phi=\lambda/\sin\Phi$ , como se ve en la figura 3.5. Si  $\Phi=30^\circ$  por ejemplo, el periodo es de  $2\lambda$ . Esto sugiere un método de imprimir o crear un patrón sinusoidal de alta resolución para emplearlo como una difracción discordante. Esto también sugiere un método de monitoreo del ángulo de llegada  $\Phi$  de una onda al mezclarse con otra onda de referencia y obtener la distribución resultante de su intensidad. En si éste es el principio de la holografía.

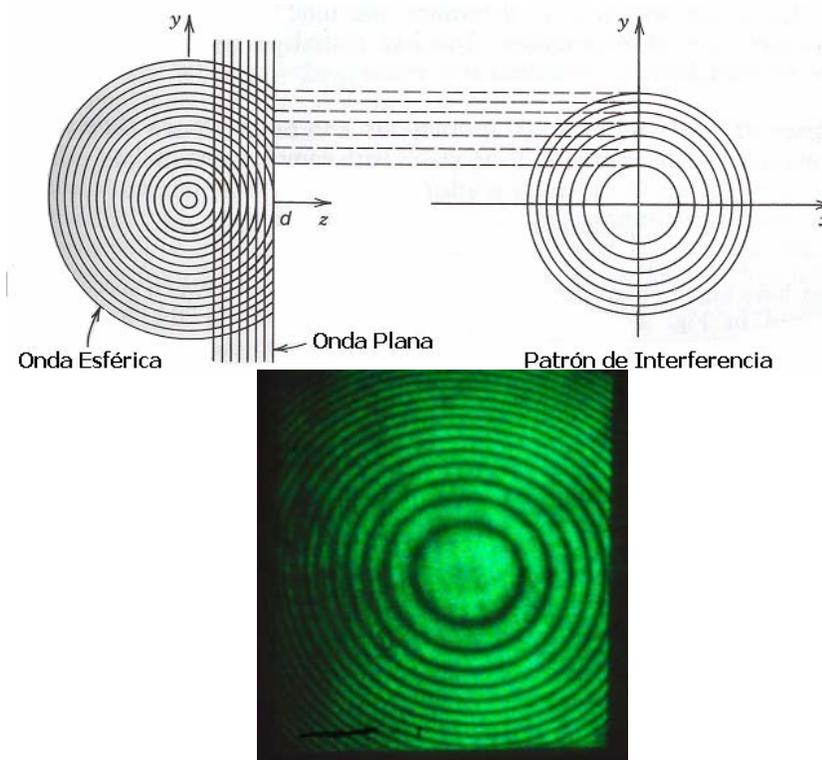




**Fig. 3.5** Patrón de interferencia formado por dos ondas planas oblicuas a) Esquema, b) Patrón interferométrico formado por dos ondas planas oblicuas.

### Interferencia de una onda plana y una onda esférica

Una onda plana de amplitud compleja  $A_1 \exp(-jkz)$  y una onda esférica de amplitud compleja  $(A_2/z) \exp(-jkz) \exp[-jk(x^2+y^2)/2z]$ , interfieren en el plano  $z=d$ . Derivando una expresión de intensidad total  $I(x,y,d)$ , vemos que el lugar geométrico generado de puntos de intensidad cero es denotado por anillos concéntricos como se observa en la Figura 3.6.



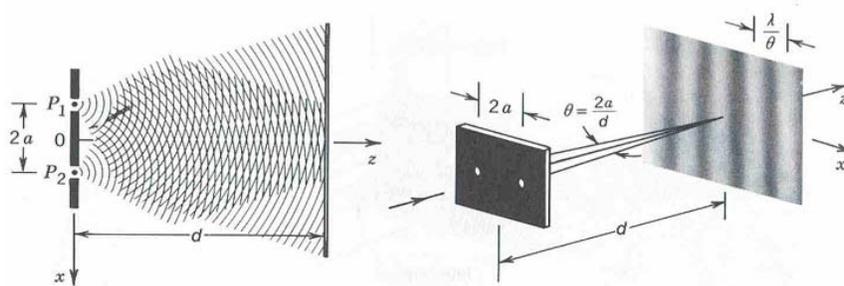
**Fig. 3.6** Patrón de interferencia formado una onda plana y una onda esférica a) Esquema, b) Patrón interferométrico formado por una onda plana y una onda esférica.

### Interferencia de dos ondas esféricas

Dos ondas esféricas de igual intensidad  $I_0$ , originalmente en los puntos  $(a,0,0)$  y  $(-a,0,0)$  interfieren en el plano  $z=d$ . Éste sistema es similar al que empleó Thomas Young en su experimento de la doble rejilla, en el cuál se demuestra la interferencia. Empleando la aproximación paraboidal, para las ondas esféricas obtenemos que la intensidad es:

$$I(x,y,d)=2I_0(1+\text{Cos}[2\pi x\Phi/\lambda]) \quad (3.9)$$

Donde  $\Phi=2a/d$  es aproximadamente el ángulo sustentado por los centros de las dos ondas en el plano de observación. La intensidad tiene un patrón periódico de  $\lambda/\Phi$ . La figura 3.7 muestra este ejemplo.



**Fig. 3.7** Patrón de intensidad de un patrón interferométrico.

### Interferencia de múltiples ondas

Cuando múltiples ondas monocromáticas de amplitudes complejas  $U_1, U_2, \dots, U_M$  y de misma frecuencia se suman, el resultado es una onda monocromática con amplitud compleja  $U= U_1+U_2+\dots+U_M$ . Conociendo las intensidades de cada una de las ondas individuales,  $I_1, I_2, \dots, I_M$ , no es suficiente para determinar la intensidad total  $I=|U|^2$  ya que las fases relativas deben también de conocerse. El papel que juegan las fases es mostrado en los siguientes ejemplos.

### Interferencia de $M$ ondas de igual amplitud y de igual diferencia de fase

El análisis de la interferencia de  $M$  ondas con amplitudes complejas, es un poco más complejo que los anteriores, pero para mayor facilidad se ilustra matemáticamente éste procedimiento.

$$U_m=I_0^{1/2}\exp[j(m-1)\Phi], \quad m=1,2,\dots,M \quad (3.10)$$

Todas las ondas tienen la misma intensidad  $I_0$  y diferencia de fases  $\Phi$  entre las ondas sucesivas como se ve en la figura 3.8(a). Al obtener una expresión para la intensidad de la superposición, es conveniente introducir una variable  $h=\exp(j\Phi)$ , y rescribir la ecuación

como  $U_m = I_0^{1/2} h^{m-1}$ . Ahora la amplitud compleja de la onda resultante de la suma de todas las ondas es:

$$U = I_0^{1/2} (1 + h + h^2 + \dots + h^{M-1}) \quad (3.11)$$

Empleando una igualdad de series y sucesiones tenemos:

$$U = I_0^{1/2} [(1-h^M)/(1-h)] \quad (3.12)$$

Sustituyendo el valor de  $h$ :

$$U = I_0^{1/2} [(1-\exp(jM\Phi))/(1-\exp(j\Phi))] \quad (3.13)$$

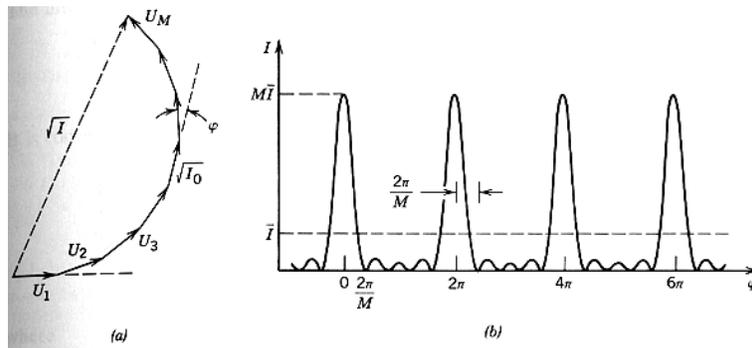
Ahora para tener la amplitud compleja total tenemos:

$$I = |U|^2 \quad (3.14)$$

$$I = I_0 \left| \frac{\exp(-jM\phi/2) - \exp(jM\phi/2)}{\exp(-j\phi/2) - \exp(j\phi/2)} \right|^2 \quad (3.15)$$

Aplicando igualdades trigonométricas tenemos:

$$I = I_0 \frac{\text{Sin}^2(M\phi/2)}{\text{Sin}^2(\phi/2)} \quad (3.16)$$



**Fig. 3.8** Esquema de interferencia de  $M$  ondas de igual amplitud y de igual diferencia de fase.

Como observamos la intensidad  $I$  es fuertemente dependiente de la diferencia de fase  $\Phi$ , como se ve en la figura 3.8(b), por ejemplo para  $M=5$  y cuando  $\Phi=2\pi q$ , donde  $q$  es un

integrador, todos los fasores están alineados (llevan la misma dirección) así que la amplitud total es  $M$  veces la de una componente individual y el valor de intensidad máxima es  $M^2 I_0$ . La intensidad máxima es de ésta manera  $M$  veces mayor que la intensidad individual. Si  $M$  es muy grande, la sensibilidad de las fases puede ser drástica ya que la máxima intensidad puede ser mucho muy grande. Ahora para una diferencia de fase  $\Phi$  donde ésta cambia ligeramente de  $2\pi q$ , la intensidad cae rápidamente. En particular cuando es  $2\pi/M$  la intensidad sería cero.

### Interferencia de un número infinito de ondas de amplitudes progresivamente pequeñas y con igual número de fase

Ahora se examinará la superposición de un número infinito de ondas de igual fases entre ellas y con amplitudes que decrecen con índice geométrico.

$$U_1=I_0^{1/2}, U_2=hU_1, U_3=hU_2=h^2U_1, \dots \quad (3.17)$$

Donde  $h=re^{j\Phi}$ ,  $|h|=r<1$ , y  $I_0$  es la intensidad de la onda inicial. La amplitud de la onda es tan pequeña la  $(m-1)$ -ésima por el factor  $r$  y la diferencia de fase  $\Phi$ . El fasor resultante se ilustra en la figura 3.9(a).

La onda superpuesta compleja tiene una amplitud compleja dada por:

$$U=U_1+U_2+U_3+\dots \quad (3.18)$$

Sustituyendo (3.17) en (3.18):

$$U=I_0^{1/2}(1+h+h^2+\dots) \quad (3.19)$$

Reduciendo términos tenemos:

$$U = \frac{I_0^{1/2}}{1-h} = \frac{I_0^{1/2}}{1-re^{j\Phi}} \quad (3.20)$$

La intensidad  $I=|U|^2=I_0|1-re^{j\Phi}|^2=I_0[(1-r\cos\Phi)^2+r^2\sin^2\Phi]$ , del cual:

$$I = \frac{I_0}{(1-r)^2 + 4r\sin^2(\phi/2)} \quad (3.21)$$

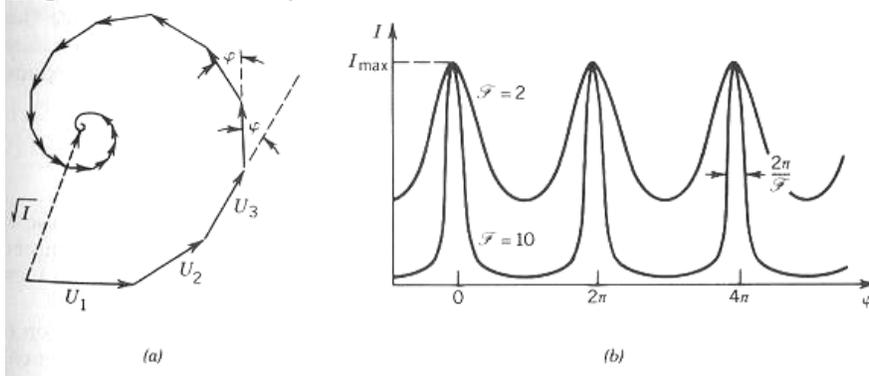
Reescribiendo la ecuación de la siguiente manera:

$$I = \frac{I_{\max}}{1 + (sF/\pi)^2 \sin^2(\phi/2)} \quad (3.22)$$

Donde  $I_{max}=I_0/(1-r)^2$ , y la cantidad:

$$F = \frac{\pi r^{1/2}}{1-r} \quad (3.23)$$

Donde  $F$  es el parámetro llamado *finura*.



**Fig. 3.9** Esquema de interferencia de un número infinito de ondas de amplitudes progresivamente pequeñas y con igual número de fase.

### Luz Policromática

La función de onda de una luz policromática es una función armónica en el tiempo ósea que se extiende sobre todo el tiempo (de  $-\infty$  a  $\infty$ ), esto es idealmente ya que no puede ser conocida realmente.

### Descomposición en Fourier

Una onda policromática puede se explicada como la suma de muchas ondas monocromáticas a través del uso del método de Fourier. Ya que conocemos como las ondas monocromáticas son transmitidas a través de componentes ópticos, podemos determinar el efecto de los sistemas ópticos en luz policromática usando el principio de superposición.

Una función arbitraria del tiempo puede ser la función de onda  $u(r,t)$ , en una posición fija  $r$  y puede ser analizada como una superposición integral de funciones armónicas de diferentes frecuencias, amplitudes y fases.

$$u(r,t) = \int_{-\infty}^{\infty} U_{\nu}(r) \exp(j2\pi\nu t) d\nu \quad (3.24)$$

Donde  $U_{\nu}(r)$  esta determinada por el acarreo de la transformada de Fourier.

$$U_{\nu}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t,r) \exp(-j2\pi\nu t) dt \quad (3.25)$$

Revisando la transformada de Fourier y sus propiedades.

### Representación Compleja

Ya que  $u(r,t)$  es real,  $U_\nu(r)$  puede ser una función simétrica de  $\nu$ .  $U_{-\nu}(r) = U_\nu^*(r)$ . La integral de la ecuación (3.24) puede por lo tanto ser simplificada usando ésta relación quedando:

$$\int_{-\infty}^0 U_\nu(r) \exp(j2\pi\nu t) d\nu = \int_0^{\infty} U_{-\nu}(r) \exp(-j2\pi\nu t) d\nu \quad (3.26)$$

$$\int_{-\infty}^0 U_\nu(r) \exp(j2\pi\nu t) d\nu = \int_0^{\infty} U_\nu^*(r) \exp(-j2\pi\nu t) d\nu$$

Así que  $u(r,t)$ , es la suma de la función compleja y su conjugado.

$$u(r,t) = \int_{-\infty}^0 [U_\nu(r) \exp(j2\pi\nu t) + U_\nu^*(r) \exp(-j2\pi\nu t)] d\nu \quad (3.27)$$

Como en el caso de la luz monocromática, la función de onda compleja está definida por dos veces el primer término de la ecuación (3.27), por ser simétrica.

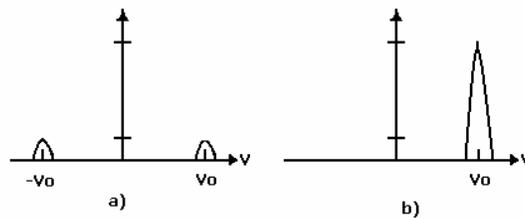
$$U(r,t) = 2 \int_0^{\infty} U_\nu(r) \exp(j2\pi\nu t) d\nu \quad (3.28)$$

Así que su parte real es la función de onda.

$$U(r,t) = \text{Re}\{U(r,t)\} = 1/2[U(r,t) + U^*(r,t)] \quad (3.29)$$

La función de onda compleja (También llamada Señal analítica compleja) es por lo tanto obtenida de la función de onda por un proceso de tres pasos: (1) determinar su transformada de Fourier; (2) eliminar frecuencias negativas y multiplicar por 2; y (3) determinar su transformada inversa de Fourier. Ya que cada componente de Fourier satisface la ecuación de onda, la función de onda compleja  $U(r,t)$  ella misma satisface la ecuación de onda.

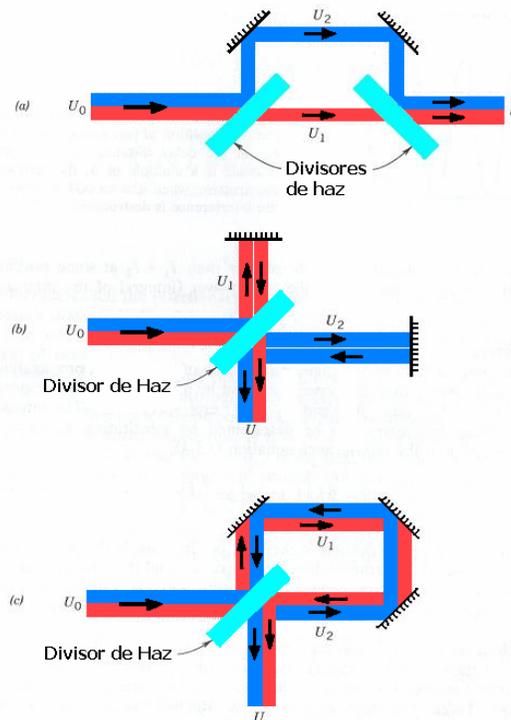
Las magnitudes de las transformadas de Fourier de la función de onda y de la función de onda compleja de una onda cuasi-monocromática se ilustran en la figura 3.10. Una onda cuasi-monocromática tiene componentes de Fourier con frecuencias confinadas dentro de una estrecha banda  $\Delta\nu$  alrededor de la frecuencia central  $\nu_0$ , así que  $\Delta\nu \ll \nu_0$ .



**Fig. 3.10** a) Magnitud de la transformada de Fourier de la función de onda; b) Magnitud de la transformada de Fourier correspondiente a la función de onda compleja.

### 3.1.- TIPOS DE INTERFEROMETROS

Un interferómetro es un instrumento óptico que separa una onda en dos ondas usando un divisor de haz (*Beamsplitter*), éstas dos nuevas ondas pueden ser iguales en magnitud o diferentes, dependiendo del divisor de haz, así se pueden redireccionar éstas dos ondas usando espejos para después recombinarlas empleando otro o el mismo espejo divisor de haz y detectando la intensidad de su superposición. Tres importantes ejemplos de interferómetros se muestran en la figura 3.11.



**Fig. 3.11** Tres importantes ejemplos de interferómetros son: (a) interferómetro de Mach-Zehnder, (b) Interferómetro de Michelson e (c) Interferómetro de Sagnac.

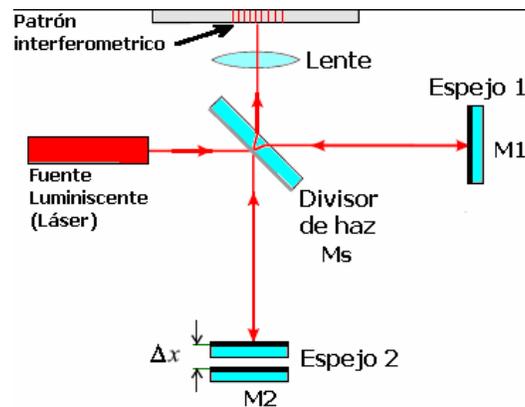
Ya que la intensidad  $I$  es dependiente de la fase  $\Phi = 2d/\lambda = 2\pi nd/\lambda_0 = 2\pi vd/c_0$ , donde  $d$  es la diferencia entre las distancias viajadas por las dos ondas, el interferómetro puede ser usado para medir variaciones de la distancia  $d$ , el índice de refracción  $n$ , la longitud de onda  $\lambda_0$ , o frecuencia  $\nu$ . Por ejemplo si  $d/\lambda_0 = 10^4$ , a un cambio de  $\Delta n = 10^{-4}$  de índice de refracción, le corresponde un cambio de fase de  $\Delta\Phi = 2\pi$ . También la fase cambia por completo a  $2\pi$  si  $d$  cambia una longitud de onda  $\lambda$ . Un cambio en el incremento de la frecuencia  $\Delta\nu = c/d$  tiene el mismo efecto. Los interferómetros pueden servir como espectrómetros, los cuales miden el espectro de una luz policromática. En el interferómetro de Sagnac los caminos ópticos son los mismos pero opuestos, así que esa rotación del interferómetro da como resultado un

cambio de fase  $\Phi$  proporcional a la velocidad angular de la rotación del interferómetro. Éste sistema discutido es conocido como giroscopio.

### Interferómetro de Michelson

El interferómetro de Michelson es uno de los instrumentos de interferencia más conocido, tanto por sus múltiples aplicaciones como por su importancia en el desarrollo de nuestro entendimiento del mundo físico. Usando éste dispositivo, Michelson y Morley pusieron en evidencia la inconsistencia de la teoría del éter. Éste hecho contribuyó al desarrollo de la teoría de la relatividad. En la Fig. 3.12 se presenta un diagrama esquemático del interferómetro de Michelson.

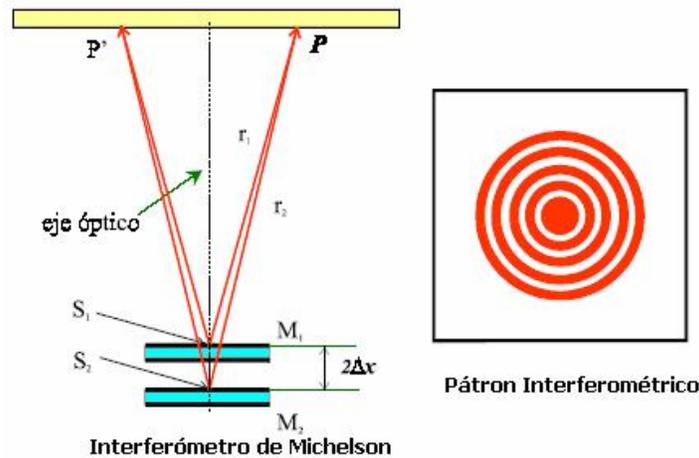
Éste interferómetro puede construirse sencillamente a partir de componentes factibles de encontrar, o bien de componentes adquiridas específicamente para éste fin. Desde luego existen modelos comerciales listos para su uso.



*Fig. 3.12 Diagrama esquemático del interferómetro de Michelson.*

Éste interferómetro se basa en el principio de división de un haz luminoso por un divisor de haz (“*beam splitter*”) o espejo semitransparente,  $M_s$ . En  $M_s$  el haz incidente es en parte transmitido al espejo  $M_1$ , y en parte reflejado al espejo  $M_2$ . En éstos espejos, ambos haces son reflejados. Luego de transmitirse y reflejarse nuevamente en  $M_s$ , dichos haces se recombinan en la pantalla  $P$ . Dependiendo de la diferencia de caminos que éstos haces hayan recorrido, la interferencia en la pantalla será constructiva o destructiva. En rigor, si los espejos  $M_1$  y  $M_2$  no son exactamente perpendiculares, caso frecuente, cada porción de haz que se refleja en distintas partes de los espejos llegará a la pantalla habiendo recorrido longitudes distintas. Esto resultará en que sobre la pantalla observemos un conjunto de líneas brillantes y oscuras, cuya orientación dependerá de cómo se realice el ajuste fino de los espejos  $M_1$  y  $M_2$ . Por lo tanto para obtener buenos resultados con éste instrumento es importante disponer de buenos posicionadores de los espejos. Es importante contar con algún modo de regulación de los espejos. Los espejos  $M_1$  y  $M_2$  deben ser espejos superficiales, es decir con plateado o aluminado en la cara frontal. Tanto los espejos como

los posicionadores se pueden fabricar en forma manual o adquirirse de proveedores comerciales. Cuando los espejos  $M_1$  y  $M_2$  son perpendiculares, en la pantalla se observan anillos concéntricos brillantes y oscuros. La razón de éstos anillos puede entenderse notando que los espejos  $M_s$ ,  $M_1$  y  $M_2$  tienen por efecto producir dos imágenes de las fuentes  $S_1$  y  $S_2$  separadas una distancia  $2\Delta x$  como ilustra la Fig. 3.13. Aquí  $\Delta x$  es la diferencia de longitud de los brazos del interferómetro delimitado por  $M_s$  a  $M_2$  y  $M_s$  a  $M_1$ . El origen de los anillos está asociado a que la diferencia de los caminos  $r_1$  y  $r_2$  varían con la posición del punto  $P$  en la pantalla. Sin embargo, ésta diferencia de camino es la misma para cualquier circunferencia centrada en el eje óptico del interferómetro



**Fig. 3.13** Diagrama esquemático del interferómetro de Michelson.  $S_1$  y  $S_2$  son las dos imágenes de la fuente formadas por los espejos  $M_s$ ,  $M_1$  y  $M_2$ . A la derecha vemos el patrón de interferencia cuando los espejos están perfectamente perpendiculares.

Si consideramos solo el punto correspondiente al centro del patrón de interferencia, es decir el punto en la pantalla por donde pasa el eje óptico, es posible predecir la intensidad de la luz en éste punto, a partir de la diferencia de camino de los rayos luminosos. Más específicamente, la diferencia de fase de los rayos que se reflejan en  $M_1$  y  $M_2$  serán:

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \Delta x \quad (3.30)$$

Y por consiguiente, usando el principio de superposición, la intensidad media será:

$$I = I_0 \cos^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) = I_0 \cos^2\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta x\right) \quad (3.31)$$

Donde  $\Delta x$  es la diferencia de longitud de los brazos del interferómetro. Si se monta uno de los espejos  $M_1$  o  $M_2$  sobre un posicionador lineal móvil, es posible variar la distancia  $\Delta x$  en forma controlada y medible. Para visualizar más fácilmente las imágenes de interferencia es conveniente utilizar una lente convergente entre el interferómetro y la pantalla de modo de amplificar el tamaño del patrón de interferencia. Otra precaución a tener en cuenta en la preparación del interferómetro es la correcta alineación del mismo. Un modo práctico de proceder consiste en alinear en primer lugar el espejo  $M_2$ . Esto se logra haciendo que el haz

reflejado por  $M_2$  vuelva de regreso a la fuente misma de láser, o sea que la imagen reflejada esté ubicada en el punto de salida del propio láser. Seguidamente se procede a posicionar  $M_s$ . La posición de  $M_s$  debe ser tal que el rayo reflejado a  $90^\circ$  llegue a la zona central del espejo  $M_1$ . Una vez logrado esto, se realiza el ajuste de  $M_1$ , observando que el haz reflejado por  $M_1$  incida en la pantalla y se superponga con el haz reflejado por  $M_2$ . Recién cuando se logra ésta condición es conveniente colocar la lente para aumentar el tamaño de la imagen en la pantalla. La lente debe estar bien centrada con el haz. Esto se manifiesta por el hecho de que el centro del patrón interferométrico con y sin lente no varía de posición. Una vez que se visualizan claramente las imágenes reflejadas por los dos espejos, se realiza un ajuste fino de  $M_1$  hasta que aparezcan franjas de interferencia. La prueba final de que efectivamente estamos visualizando dicho patrón de interferencia, consiste en bloquear alternativamente uno de los haces reflejados. Al bloquear uno de ellos las franjas de interferencias desaparecen y solo se observa una región iluminada, pero al posibilitar que ambos haces alcancen la pantalla se notará la presencia de la imagen de interferencia característica del interferómetro. Ésta simple operación, evidencia uno de los principios más fundamentales de las ondas, *el principio de superposición*, que explica porqué luz mas luz a veces resulta en más iluminación (franja brillante) y a veces luz mas luz resulta en oscuridad (franja oscura).

### 3.2.-INTERFERÓMETRO DE SAGNAC

Éste efecto fue demostrado primeramente en 1911 por Harress y en 1913 por Sagnac, así es como es conocido ahora como efecto Sagnac, debido a la increíble precisión de las técnicas de interferometría que empleó, con aparatos que son capaces de detectar y medir cantidades extremadamente pequeñas de rotación absoluta. Una de las primeras aplicaciones de éste fenómeno fue el experimento formado por Michelson y Gale en 1925 para medir el índice de rotación de la tierra con un rectángulo óptico de  $2/5$  milla a lo largo de  $1/5$  milla ancho. Más recientemente con la invención del láser y los leds láser se ha podido reducir a una pequeña escala los aparatos de medición para el mismo propósito. Estos aparatos son llamados giroscopios láser, los primeros fueron desarrollados en 1963 y han estado constantemente evolucionando adquiriendo nuevas mejoras. Ahora los giroscopios láser son usados para la navegación y direccionamiento de sistemas de aeronaves, barcos, transbordadores espaciales y muchas otras aplicaciones. Estos aparatos son capaces de detectar una rotación de hasta 0.00001 grados por hora.

El interferómetro basado en el efecto Sagnac, es aquel en el cual se produce una diferencia de fase  $\Delta\phi_R$  proporcional a el índice de rotación  $\Omega$  en un anillo interferométrico. El efecto Sagnac originalmente estaba compuesto de una fuente colimada y un divisor de haz que separaba el haz de entrada en dos ondas iguales, las cuales se propagaban en dirección opuesta a lo largo de una trayectoria cerrada definida por espejos. El patrón de franjas de interferencia se obtenía con un mínimo de desalineación de uno de los espejos y un cambio lateral del patrón era observado en el sistema cuando era rotado. Éste cambio del patrón de franjas corresponde a un cambio fase  $\Delta\phi_R$  entre las dos ondas en contrapropagación, el cual también depende del área  $A$  encerrada por la trayectoria.

Esto puede ser explicado al considerar un polígono regular de trayectoria  $M_0M_1...M_{N-1}M_0$ . En el reposo ambas trayectorias opuestas son iguales, pero en rotación alrededor del centro, para la co-rotación (sentido de rotación y trayectoria en la misma dirección), la trayectoria se incrementará de  $M_0M'_1...M'_{N-1}M'_N$ . Y para la contra-rotación, la trayectoria decrecerá de  $M_0M''_1...M''_{N-1}M''_N$ . De hecho para un observador en el reposo inercial de referencia, los puntos  $M_i$  se mueven en un círculo de radio  $R$  y la luz se propaga a lo largo del polígono de tamaño  $M'_iM'_{i+1}$  o  $M''_iM''_{i+1}$  en vez de la trayectoria  $M_iM_{i+1}$ . En particular el primer lado del polígono de la trayectoria de co-rotación comienza en  $M_0M'_i$ . Usando  $2\theta$  para representar el ángulo entre  $M_0OM_1$ ,  $\delta\theta$  el ángulo  $M_0OM'_1$ ,  $L_M$  de longitud  $M_0M_1$  y  $\delta L_M$  el incremento en la longitud de la trayectoria  $M_0M'_1 - M_0M_1$ , por lo que tenemos:

$$\delta L_M = M_1M'_1 \cos \theta \tag{3.32}$$

$$M_1M'_1 = R\delta\theta \tag{3.33}$$

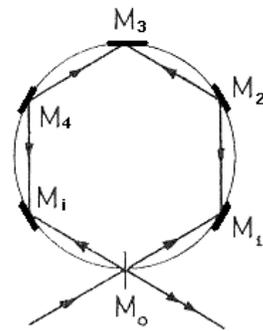


Fig. 3.14 Esquema del Interferómetro de Sagnac.

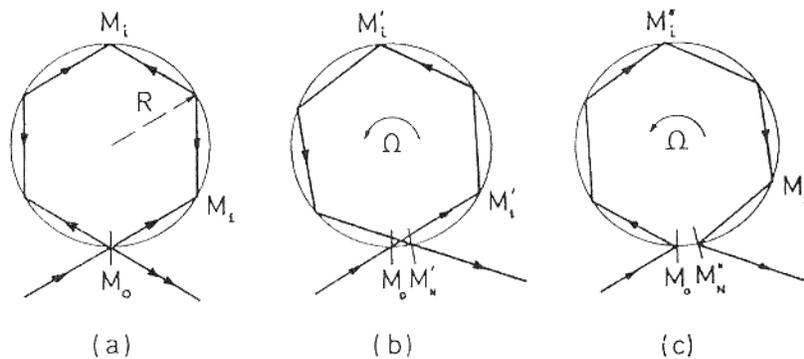
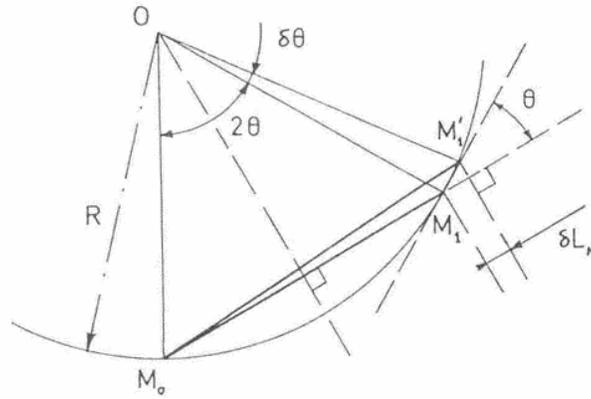


Fig. 3.15 Anillo interferométrico con trayectoria de polígono regular. a) en reposo, b) en co-rotación, c) en contra-rotación.

Éste ángulo  $\delta\theta$  es de primer orden, el ángulo de rotación durante la propagación entre  $M_0$  y  $M_1$  es:

$$\delta\theta = \frac{L_M}{c} \Omega \quad (3.34)$$



**Fig. 3.16** Análisis geométrico del efecto Sagnac en uno de los lados del polígono.

Y ya que  $L_M = 2R\sin\theta$  y el área del triángulo  $M_0OM_1$  es  $A_t = (\text{base} \cdot \text{altura})/2$  por lo tanto  $A_t = (R\sin\theta)(R\cos\theta)$ , esto produce:

$$\delta L_M = \frac{2A_t\Omega}{c} \quad (3.35)$$

El fenómeno es observado en la estructura en reposo, donde la luz se propaga siempre a la velocidad  $c$ , por lo tanto, el incremento en la trayectoria  $\delta L_M$  corresponde a un incremento  $\delta t^+$  del tiempo de propagación que esta representado por la ecuación (3.36):

$$\delta t^+ = \frac{\delta L}{c} = \frac{2A_t\Omega}{c^2} \quad (3.36)$$

De esta manera existe el mismo incremento para cada lado del polígono y la variación opuesta  $\delta t^- = -\delta t^+$  en la dirección de contra-rotación. La diferencia  $\Delta t_v$  del tiempo de propagación entre las dos trayectorias opuestas en el vacío está dado por la ecuación (3.37):

$$\Delta t_v = 2 \frac{\Sigma A_t \Omega}{c^2} = \frac{4A\Omega}{c^2} \quad (3.37)$$

Donde  $\Sigma A_t$  es la suma de todas las áreas triangulares (El área completa  $A$  encerrada por la trayectoria de la luz). Para obtener esta medida interferométrica, se logra con la diferencia de tiempo la cual permite analizar la diferencia de fase dada por la ecuación (3.38):

$$\Delta\phi_R = \omega \cdot \Delta t_v = \frac{4\omega A}{c^2} \Omega \quad (3.38)$$

Donde  $\omega$  es la frecuencia angular de la onda. Estos resultados son muy generales y pueden ser aplicados para algún eje de rotación y para alguna trayectoria cerrada si están contenidos en un plano, usando el producto escalar  $A \times \Omega$  obtenemos:

$$\Delta\phi_R = \frac{4\omega}{c^2} A \cdot \Omega \quad (3.39)$$

Donde  $\Omega$  es el vector del coeficiente de rotación y  $A$  es el vector del área equivalente de la trayectoria cerrada definida en términos de la integral de línea:

$$A = \frac{1}{2} \oint r \times dr \quad (3.40)$$

Donde  $r$  es el vector de coordenada radial. El efecto Sagnac aparece como el flujo del vector de rotación  $\Omega$  a través del área cerrada.

Para poder comprender mejor el efecto Sagnac, es posible considerar un simple caso ideal de una trayectoria circular, la cual es igual a tener un número infinito de polígonos que definen la trayectoria. La luz entrará al sistema dividiéndose en dos ondas en contrapropagación, las cuales regresaran con la misma fase después de haber realizado el recorrido a lo largo de la misma trayectoria en direcciones opuestas. Ahora cuando el interferómetro está rotando, un observador en un punto de referencia en reposo verá la luz entrando al interferómetro en el punto  $M$  y viajando con la misma velocidad de la luz en el vacío  $c$  en direcciones opuestas; De éste modo durante el tiempo de propagación  $t_v$  a través del lazo, el haz dividido se ha movido a  $M'$ , y nuestro observador ve que la onda propagada en co-rotación se ha propagado sobre una trayectoria mayor que la onda que se propagó en contra-rotación. Ésta diferencia de trayectoria  $2\Delta l_v$  puede ser medida por métodos interferométricos.

Ésta explicación es sencilla, pero no debemos de olvidar el punto fundamental: esto es, observar desde la estructura en movimiento o rotación, ya que ambos eventos (regreso de la onda de co-rotación y onda de contra-rotación al divisor de haz) toman lugar en el mismo punto en el espacio, su diferencia de tiempo de ocurrencia se conserva (de primer orden en  $v/c$ ) en algún punto de referencia. De hecho, esto es interesante de comparar el efecto Sagnac con el bien conocido problema de cinemática relativista, el cual explica la simultaneidad de eventos en un movimiento no absoluto.

Consideremos ahora un sistema compuesto por una fuente  $S$  localizada a una distancia igual entre dos espejos  $M_1$  y  $M_2$ . La luz es emitida por la fuente en direcciones opuestas y después reflejada por los espejos, ambas ondas regresan a la fuente al mismo tiempo. Ahora si el sistema se mueve lateralmente, un observador fuera del sistema en movimiento observará a la luz golpeando primero al espejo  $M_1$ , después verá a la luz en el otro sentido golpear al otro espejo  $M_2$ . El retraso entre ambos eventos es esencialmente el mismo retraso en el efecto Sagnac, reemplazando la trayectoria circular por la distancia entre los dos espejos y la velocidad tangencial de rotación por la velocidad de traslación. De ésta manera

en el caso de traslación, ambos eventos toman lugar en dos diferentes puntos y el principio de causalidad no puede ser explicado. Un observador en el sistema de co-movimiento, tiene que esperar para ambos regresos de la luz a la fuente para observar que ocurrirá al mismo tiempo. Entonces éste observador solo puede deducir que en su estado de referencia en movimiento, la luz golpea a ambos espejos al mismo tiempo. Hay que notar que la fuente también está en movimiento para el observador fuera del sistema o en un punto de referencia en reposo y él ve que la luz regresa de ambos lados al mismo tiempo.

Esto es consistente con lo que se había dicho previamente, debido a que el regreso a la fuente son dos eventos que toman lugar en el mismo punto y si son simultáneos es porque se está observando en algún punto de referencia fuera del sistema.

(Nota: El Efecto Sagnac puede ser interpretado también como un doble efecto Doppler en el divisor de haz. En lugar de realizar una aproximación temporal, se analiza espacialmente considerando al sistema como congelado en un cierto instante. El observador fuera del sistema medirá una onda transmitida dos veces y mantendrá la misma longitud de onda, mientras la onda opuesta es reflejada dos veces en el movimiento dividido.)

### Caso de un medio

Ahora si la luz se propaga en un medio, como en el caso del giroscopio de fibra óptica, se puede demostrar que la diferencia de fase del efecto Sagnac permanece sin cambio. Considerando nuevamente una trayectoria circular por simplicidad, en reposo ambas ondas se propagan a la velocidad  $v=c/n$ , donde  $n$  es el índice del medio. El retorno del haz al divisor se realiza al mismo tiempo dado por:  $t_m=2\pi R/v = 2\pi nR/c = nt_v$ . Cuando el interferómetro está girando, el divisor de haz se mueve a lo largo de una longitud  $\delta l_m = R\Omega t_m$  durante el tiempo de propagación  $t_m$ . Ésta longitud es  $n$  veces más grande que  $\Delta l_v$ , pero en éste caso, la velocidad de la luz no es la misma en ambas direcciones. En efecto éste experimento es observado en el punto de referencia fuera del sistema y un arrastre Fizeau ocurre debido al movimiento del medio. Esto depende de las direcciones relativas de la propagación de la luz y del medio en movimiento. En el plano de referencia fuera del sistema, las velocidades de co-rotación y de contra-rotación de las ondas son respectivamente:

$$\begin{aligned} v_{cr} &= \frac{c}{n} + \alpha_F R\Omega \\ v_{cr} &= \frac{c}{n} - \alpha_F R\Omega \end{aligned} \quad (3.41)$$

Donde  $\alpha_F$  es el coeficiente de arrastre Fizeau y  $R\Omega$  es la velocidad tangencial del medio. La diferencia de tiempo de propagación llega a ser:

$$\Delta t_m = \Delta t_v n^2 (1 - \alpha_F) \quad (3.42)$$

Donde  $\Delta t_m$  podría ser el valor en el vacío. Ya que  $\alpha_F = 1 - \alpha_F$ , el arrastre de Fizeau compensa para el efecto en el índice  $n$  y esto es:

$$\Delta t_m = \Delta t_v \quad (3.43)$$

Esta perfecta compensación no es tan fortuita como podría parecer en el análisis. Una rigurosa aproximación tiene que ser considerada en las leyes del electromagnetismo en un sistema en rotación y resolver la ecuación de propagación en este sistema. Tal análisis muestra sin ninguna ambigüedad que el efecto Sagnac es un atraso temporal que no depende del medio por lo que no hay cambio si se usa una fibra óptica.

Nota: Es necesario ser cuidadoso ya que el valor del coeficiente de arrastre de Fizeau es frecuentemente dado por:

$$\alpha_F = 1 - \frac{1}{n^2} - \frac{\omega}{n} \frac{dn}{d\omega} \quad (3.44)$$

De hecho, en el experimento de Fizeau la velocidad de la luz  $v$  es primero medida con el medio en reposo y está representado por la ecuación (3.45):

$$v = \frac{c}{n(\omega_0)} \quad (3.45)$$

Donde  $\omega_0$  es la frecuencia de la luz en la referencia fuera del sistema. Cuando el medio en movimiento tiene una velocidad  $v_m$ , la velocidad de la luz llega a ser:

$$v_F = \frac{c}{n(\omega_0)} + \left[ 1 - \frac{1}{n^2} - \frac{\omega_0}{n} \frac{dn}{d\omega} \right] v_m \quad (3.46)$$

Hay un término de dispersión  $\left[ \frac{\omega_0}{n} \frac{dn}{d\omega} \right]$  debido a que la frecuencia vista por el medio.

En su propio sistema de referencia no hay  $\omega_0$ , pero una frecuencia  $\omega_p$  la cuál es cambiada debido al efecto Doppler:

$$\frac{\omega_p - \omega_0}{\omega_0} = \frac{v_m}{v} = \frac{n v_m}{c} \quad (3.47)$$

De cualquier manera, el efecto puro de Fizeau es por lo tanto:

$$v_F = \frac{c}{n(\omega_p)} + \left[ 1 - \frac{1}{n^2} \right] v_m \quad (3.48)$$

### 3.3.- CONCLUSIONES

El fenómeno físico de interferencia, es muy conocido en el campo de la óptica, por ello es muy empleado en muchísimos sistemas optoelectrónicos para realizar mediciones de muchos tipos, además de ser muy práctico y confiable, ya que éste fenómeno tiene una gran sensibilidad, debido a que está basado en las ondas electromagnéticas de la luz y por lo tanto la sensibilidad es acorde con la longitud de onda con la que se trabaje. En ésta tesis, el sistema de sensado construido está basado en un efecto óptico, conocido como efecto Sagnac, que da como resultado una interferencia óptica. Es por esto que el estudio de la interferencia óptica es necesario para conocer el comportamiento del fenómeno y de su detección, para ello se realizó el análisis del fenómeno físico en general para pasar posteriormente al fenómeno físico en particular.

El análisis del fenómeno físico y del sistema construido, nos da en éste capítulo las herramientas necesarias para poder determinar las características y comportamiento del sistema completo una vez construido, para ello se deben de tener todos los elementos necesarios como el estudio matemático y físico del fenómeno.

Éste capítulo en sí, es el análisis teórico del fenómeno en el que está basado el sistema de detección de ésta tesis, es por ello importante mencionar todas las características que posee éste fenómeno físico, para poder comprender el comportamiento y deducir los resultados del sistema, además de que, una vez construido el sistema nos da las bases para poder determinar los errores y correcciones del dispositivo.

Finalmente mencionaré que éste fenómeno físico fue tomado como base del sistema por tener gran sensibilidad, ya que el esquema original todavía puede ser modificado para realizar algunas mejoras del sistema interferométrico, tanto en la etapa de construcción, como de detección y procesamiento electrónico.

### 3.4.- BIBLIOGRAFÍA

- 1.- Ana Maria Ceto, “La Luz”, La Ciencia para todos, Fondo de Cultura Económica, No. 32, Cáp. IV, pp. 88-92, Segunda Edición 1999.
- 2.- Daniel Malacara, “Óptica Tradicional y Moderna”, La ciencia Para Todos, Fondo de Cultura Económica, No. 84, Cáp. III, pp.50-59, Primera Edición 1989.
3. - F. Sears, M. Zemansky, H. Young y R. Freedman, Física universitaria, vol. I y II (Addison-Wesley Longman, México, 1999).
- 4.-. E. Hecht, Optics (Addison–Wesley Pub. Co., New York, 1990).
- 5.-. M. Alonso y E.J. Finn, Física, vol. II, Campos y Ondas y vol. III, Fundamentos Cuánticos y estadísticos (Fondo Educativo Interamericano; ED. inglesa, Addison-Wesley, Reading, Mass., 1967).
6. - J.B. Diamond, D.P. Donnelly, J.D. Breault and M.E. MacCarthy, “Measuring small vibrations with interferometry,” Am. J. Phys. **58**, 919 (1990).
7. - 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.
- 8.- Sagnac, G., “Sur la preuve de la réalité de l'éther lumineux par l'expérience de l'interféromètre tournant” Comptes rendus de l'Académie des Sciences Vol. 95, 1913, pp. 1410-1413.
- 9.-Eric Udd, “Fiber Optic Sensor, An introduction for engineers and scientist”, Wiley-Interscience Publication, First edition, pp 233-267, 1991.
- 10.- Francis T.S. Yu, “Fiber Optic Sensors”, University Park, Pennsylvania, Ed. Marcel Dekker, pp. 383-415, 2002.
- 11.-Fundamentals of Photonics, Bahaa E. A. Saleh, Malvin Carl Teich, Wiley-Interscience publications, Cap. XIV, XVI, XVII, 1991.

## **CAPITULO 4**

### **GIROSCOPIOS**

#### **INTRODUCCION**

El giroscopio al igual que el acelerómetro son sistemas de sensado tanto de rotación como de aceleración respectivamente, empleados ampliamente en la navegación. Los giroscopios proporcionan información de donde se dirige esa aceleración y de ésta manera la desviación sufrida y la distancia, estos dos parámetros, son los principales componentes para la navegación. Estos instrumentos están basados físicamente en la fuerza inercial o en las propiedades de la luz para su operación. Ésta es la principal aplicación del sistema de sensado construido basado en el efecto sagnac y sensado a través de métodos de interferometría, es por ello que en éste capítulo se realiza un análisis y comparación de los diferentes sistemas de sensado de velocidad angular tanto mecánicos como ópticos, así como su historia y las modificaciones que se le han realizado para poder con esto dar las bases suficientes de las justificaciones del sistema construido.

Así éste capítulo, nos da un panorama general de la evolución de los sistemas de sensado de velocidad angular y los futuros cambios, además de las nuevas aplicaciones de éstos dispositivos.

## 4.- GIROSCOPIOS

La operación principal de un giroscopio, es proporcionar información suficientemente clara, rápida y exacta de la velocidad angular que sufre un sistema, esto es la medición del ángulo que varía el sistema que se está midiendo y la velocidad del cambio de ese ángulo, a éste cambio se le conoce como velocidad angular y se puede medir como la cantidad de grados entre el tiempo que tarda éste movimiento. La medición de tal parámetro se puede llegar a determinar de diferentes maneras, esto con sistemas de medición angulares y de cronómetros, pero siempre existirá la incertidumbre que proporciona éste tipo de sistema. Además de mediciones por aproximación hay múltiples maneras de medición del parámetro velocidad angular, pero para sistemas en los cuales la medición necesita ser lo más exacta posible, además de ser movimientos extremadamente rápidos o demasiado pequeños que no se pueden lograr medir por aproximaciones, el giroscopio es el sensor adecuado para realizar dichas mediciones.

Los primeros giroscopios fueron usados en Alemania durante la primera y segunda guerra mundial para el armamento. Después de la guerra, un grupo de científicos alemanes bajo el mando de Werner Von Braun, desarrollaron ésta tecnología para misiles de Estados Unidos.

Desde entonces el desarrollo de sistemas de navegación y sus aplicaciones para diferentes áreas se ha incrementado notoriamente, debido a los diferentes diseños y fenómenos que emplean para su trabajo, los giroscopios tiene diferentes aplicaciones además de las de navegación, ya que con los rangos existentes de medición con los que se ahora se cuenta, se pueden realizar mediciones de otros tipos de fenómenos de movimiento angular, como es el de la tierra, motores, vibraciones mecánicas. Desde la aparición de los primeros giroscopios un gran cambio en los sistemas de medición de velocidades angulares se ha desarrollado, trayendo consigo múltiples mejoras y diseños, además de un crecimiento en la investigación de nuevos elementos del sistema, desarrollo de dispositivos basados en el giroscopio, como son el girocompás y el giropiloto, incrementando la rentabilidad de todos éstos aparatos.

### 4.1.- TIPOS DE GIROSCOPIOS

En la actualidad existen varios tipos de giroscopios, éstos basados en esquemas originales del giroscopio mecánico, giroscopio óptico y giroscopio de suspensión eléctrica. Todos éstos giroscopios han sido modificados a través del tiempo buscando cada uno de ellos tener una mayor resolución, sensibilidad, exactitud y rentabilidad. Con el paso del tiempo han pasado por múltiples cambios por lo que algunos se dirigieron hacia una meta específica y otros quedaron como fueron concebidos inicialmente, éste es el caso del giroscopio óptico, el cual cuenta con varios esquemas diferentes pero cada uno de ellos obedeciendo al efecto óptico básico; entre éstos giroscopios ópticos encontramos, el giroscopio interferométrico, el giroscopio en fibra óptica en su esquema básico, el giroscopio de fibra óptica de lazo abierto, el giroscopio de fibra óptica de lazo cerrado, el giroscopio de resonador láser y el giroscopio de resonador pasivo. Cada uno de éstos tiene características propias y que difieren de los demás, por lo que las aplicaciones de cada uno de ellos dependen de sus propiedades de construcción.

Lo mismo sucede con los giroscopios mecánicos y de suspensión eléctrica, ya que éstos los hay de uno, dos o tres grados de libertad, de detección eléctrica o magnética, con motor como cabeza principal o turbina de gas, con resonadores mecánicos o eléctricos, sellados al vacío o con algún gas inerte, etc.

Todos éstos nuevos y viejos diseños de giroscopios tienen y siguen teniendo la misma finalidad de sensado de velocidades angulares y por tal, aplicaciones que se han manejado desde hace mucho tiempo en que fueron concebidos éstos instrumentos, como es la navegación, velocidades de rotación de motores o turbinas, mediciones físicas como la velocidad de rotación de la tierra etc.

## **4.2.-EL GIROSCOPIO MECÁNICO**

El giroscopio o giróscopo, constituye una parte muy importante en los sistemas de navegación automática utilizados en los barcos hoy en día. Todo giroscopio presenta dos propiedades principales, la rigidez giroscópica y la precesión. Aunque desde el punto de vista físico es un aparato muy interesante de analizar, lo verdaderamente destacable es su aplicación a los instrumentos de navegación marina.

Una de sus utilizaciones más frecuentes es como elemento principal del girocompás, un aparato que ha venido a sustituir a bordo de muchos buques a las agujas magnéticas. La acción directora en estos instrumentos la ejerce un giroscopio con dos grados de libertad y amortiguamiento, para obtener así la indicación del norte verdadero. Los tipos de giroscopios y girocompases mecánicos principalmente usados son: “Anschütz”, (alemán); “Sperry”, (americano) y “Brown”, (inglés).

A lo largo de los años han ido introduciéndose una serie de variaciones que, sin afectar en nada a su concepción original, la han modificado para obtener una mayor precisión y seguridad de funcionamiento.

También cabe destacar su aplicación a los giropilotos o pilotos automáticos. La evolución sufrida en estos instrumentos también ha dado por resultado unos aparatos perfectamente logrados, pero siempre tomando como base al giroscopio construido hace más de un siglo por Foucault, que tenía como objetivo demostrar el movimiento de rotación de la Tierra.

### **4.2.1.-DEFINICIÓN**

El giroscopio, o también llamado giróscopo, es un dispositivo de medición de rotación que presenta dos propiedades fundamentales: la inercia giroscópica o ‘rigidez en el espacio’ y la precesión, que es la inclinación del eje en ángulo recto ante cualquier fuerza que tienda a cambiar el plano de rotación. Éstas propiedades son inherentes a todos los cuerpos en rotación, incluida la Tierra. El término giroscopio se aplica generalmente a objetos esféricos o en forma de disco montados sobre un soporte, de forma que puedan girar libremente en cualquier dirección; estos instrumentos se emplean para demostrar las

propiedades de rotación de un sistema o para indicar movimientos en el espacio. A veces se denomina giróstato a un giroscopio que sólo puede moverse en torno a un eje de giro. En casi todas sus aplicaciones prácticas, los giroscopios están restringidos o controlados de ésta forma.

#### 4.2.2.-REFERENCIAS HISTÓRICAS

El giroscopio fue ideado y construido por el físico Francés Foucault en 1852 para demostrar el movimiento de rotación de la Tierra. Éste aparato no era otra cosa que un *giroscopio simétrico y centrado*, con tres grados de libertad, al estar montado sobre una suspensión. El giroscopio elemental de Wheatstone, análogo al de Foucault, es también un giroscopio con tres grados de libertad.

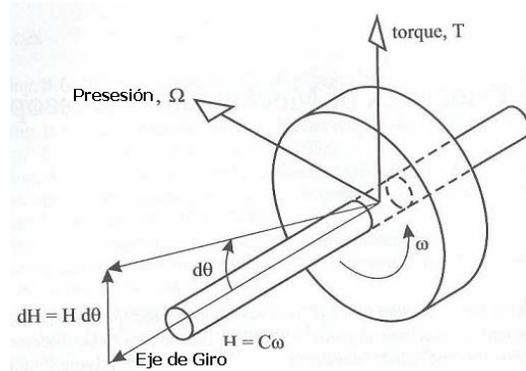
Foucault empleó un péndulo con una larga cuerda de 67 metros de longitud, el cual construyó en París. El peso empleado fue de 28Kg de acero y con un periodo de balanceo de 15 segundos. Como la tierra gira bajo del péndulo que se está balanceando, el plano de balanceo del péndulo comienza a rotar en sentido contrario a las manecillas del reloj (el sentido es debido a que Foucault se encontraba en el hemisferio norte). Éste fenómeno es conocido como coriolis.

El movimiento del péndulo es también perturbado por el aire, así que éste se vuelve inexacto para una referencia inercial. Así que empleando las experiencias de Bohnenberg (1810, Alemania) y Johnson (1832, Estados Unidos), Foucault desarrolló un sistema más pequeño y exacto en 1852 que constaba de una rueda suspendida como peso. Foucault empleó dos palabras griegas que significan “Vista” y “rotación”, *gyros* y *skopein*, así uniendo ambas palabras nace la palabra giroscopio para su diseño. Algunos autores se reservan ésta palabra para sistemas de rotación que constan de una rueda, pero Foucault en su libro emplea ésta palabra para cualquier instrumento con el cual se puedan realizar mediciones de señales de rotación.

Si bien los giróscopos actuales, de tipo inercial no se parecen mucho al primer giroscopio construido en 1852 por Foucault, sí conservan sus propiedades fundamentales. Éstas propiedades y características, se ven con claridad en las aplicaciones del giroscopio.

### 4.2.3.-DESCRIPCIÓN DEL GIROSCOPIO MECÁNICO

De la segunda ley de movimiento de Newton conocemos el momento angular de un cuerpo, el cuál permanece en reposo o en movimiento uniforme si no es afectado por una fuerza externa a éste. Ésta ley también se explica si la fuerza externa aplicada al cuerpo en reposo es un torque y la magnitud o carga de éste torque es igual a la magnitud del mismo ( $T$ ) a la que está sometido.



**Fig. 4.1** Esquema del principio básico del giroscopio mecánico.

Si el torque actúa sobre el eje de rotación, su efecto será un incremento en la velocidad angular dado por la ecuación:

$$T = C d\omega/dt = C\alpha \quad (4.1)$$

Donde:

$C$  = Momento de inercia sobre el eje (momento).

$\alpha$  = Aceleración Angular.

Si un torque es aplicado ortogonalmente al eje de giro del objeto, éste no puede cambiar la magnitud del vector de velocidad, pero puede cambiar su dirección esto es lo que sucede con la llanta de una bicicleta, que al girar el volante se aplica un torque exterior que cambia la dirección de la llanta pero no la magnitud del vector velocidad del momento angular de la llanta, esto se muestra en la Figura 4.1. El momento angular  $H$  permanece a lo largo del eje, y si un torque exterior  $T$  actúa sobre él, esto es, si un movimiento trata de girar la rueda hacia arriba, se obtendrá un vector llamado de precesión que obedece a la regla de la mano derecha. El pequeño cambio en el momento angular  $dH$  está en la misma dirección que  $T$  y su magnitud ahora es diferente por tratarse de vectores:

$$dH = H d\theta \quad (4.2)$$

Donde  $d\theta$  = es el ángulo girado. Combinándose ésta ecuación con la anterior, obtenemos la ley de los giroscopios mecánicos.

$$T = dH/dt = H d\theta/dt = H\Omega \quad (4.3)$$

Donde  $\Omega$  es la razón de presesión, que es la velocidad angular de la rueda sobre el eje normal al plano del giro y al torque aplicado.

### Nivel Parásito de Torque

Usualmente estamos tratando de reducir el ruido de baja frecuencia del giroscopio causado por torques parásitos, así que veamos el tamaño de un torque típico. Un giroscopio para navegación de  $1\text{-m/h}$  puede tener  $H=10^6 \text{ dyn}\cdot\text{cm}\cdot\text{s}$  ( $\text{gm}\cdot\text{cm}^2/\text{s}$ ), y necesitar tener un ruido de baja frecuencia aleatorio debajo de  $0.01 \text{ grados/hr}$ . Entonces:

$$\begin{aligned}\Omega &= 0.01^\circ/\text{h} = 4.8 \times 10^{-8} \text{ rad/s.} \\ T &= 4.8 \times 10^{-2} \text{ dyn}\cdot\text{cm.}\end{aligned}$$

Una dina es aproximadamente  $1 \text{ mg}$  de peso;  $0.05 \text{ mg}$  es el peso de una pieza de lamina de aluminio horneada de  $1\text{mm}$  cuadrado. Tal peso de un radio de  $1\text{cm}$  puede causar éste nivel de ruido de baja frecuencia.

### Ventajas del momento angular

Para enfatizar el beneficio que se obtiene de dar vueltas a la rueda del giroscopio. Asumamos que la fricción en el soporte transmite un torque  $T$  a la rueda. En el tiempo  $t$ , la aceleración de la rueda  $\alpha$  deja una velocidad angular  $\Omega_1$  esto es:

$$\alpha = T/C \Rightarrow \Omega_1 = (T/C)t \quad (4.4)$$

El mismo torque aplicado normalmente a la rueda dando vueltas a una velocidad angular  $\omega$  nos da una presesión angular de velocidad  $\Omega_2$ :

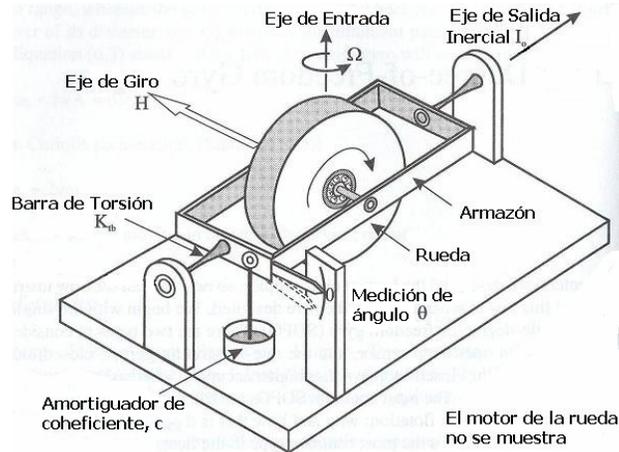
$$\Omega_2 = T/C\omega \text{ asi que } \Omega_1/\Omega_2 = \omega t \quad (4.5)$$

Si  $T$  representa un torque parásito no deseado, su efecto es  $\omega t$  veces más grande que si no hay giro de la rueda y  $\omega$  puede fácilmente ser  $2500 \text{ rad/s}$ ; así el momento angular se estabiliza más rápido que con la inercia estacionaria.

Existen dos tipos de giroscopio de un grado de libertad (*SDFG* por sus siglas en inglés), el de lazo abierto y el de lazo cerrado. El más empleado es el de lazo cerrado ya que es el más exacto, pero el de lazo abierto es más económico.

La razón de giro provee una señal proporcional a la razón de rotación (velocidad angular). La cabeza de un *SDFG* es una rueda girando a una alta velocidad y con bajo ruido, ésta es usualmente girada por un motor eléctrico. Existen modelos de *SDFG* para guiado de armamento en los cuales la rueda es girada por una turbina de gas. Debido a que el factor de escala depende del momento angular, el cual es proporcional a la velocidad de giro de la rueda, el empleo de sistemas con turbina solo se emplea en sistemas en los que se necesita una gran exactitud.

La rueda es montada en una armazón o soporte que es unida al chasis del instrumento por una o dos barras de torsión; si una es usada la otra es conectada al chasis para disminuir el ruido.



**Fig. 4.2** muestra la construcción de una barra de torsión y la armazón que están en el eje de salida del instrumento (OA), el eje sobre el cual el armazón gira en respuesta a la razón del eje de entrada (IA). La rueda y el motor montados están sellados dentro de la caja llena con un gas inerte el cual puede ser Helio, esto nos permite que el giro pueda ser llenado con un fluido húmedo. Ésta caja sellada forma el armazón el cual está unido a la barra de torsión.

#### 4.2.4.-PROPIEDADES

##### a) Rigidez giroscópica

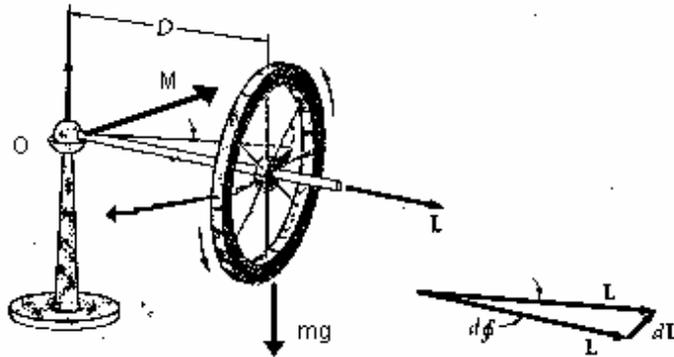
La rigidez en el espacio de un giroscopio es consecuencia de la segunda ley del movimiento de Newton, que afirma que un cuerpo tiende a continuar en su estado de reposo o movimiento uniforme si no está sometido a fuerzas externas. Por ejemplo una bala de fusil, que (al girar en torno a su eje durante el vuelo) presenta inercia giroscópica, y tiende a mantener una trayectoria más recta que si no girara.

##### b) Presesión

La presesión giroscópica aparece cuando a uno de los anillos, horizontal o vertical, se le aplica un par perturbador. Tendremos en cuenta que un par da lugar a un giro, y que éste par se representa por un vector normal al plano en que se aplican las fuerzas de fricción. El movimiento de presesión se puede definir como aquel que tiende a llevar el vector que representa el giro del rotor a coincidir con el que representa el par perturbador.

Consideremos el ejemplo de un giroscopio, cuyo eje de rotación varía de dirección. La figura 4.3 muestra un sistema de éste tipo, compuesto de una rueda de bicicleta que está libre para girar sobre un eje que tiene un punto situado a una distancia  $D$  del centro de la

rueda pero que es libre para girar en cualquier dirección.



**Fig. 4.3** Giroscopio Mecánico simple de un solo eje de rotación.

El peso  $mg$  de la rueda produce un vector momento  $M$  respecto al punto  $O$  el cual está dirigido hacia atrás y que produce una variación del momento cinético en esa dirección. Si la rueda está inicialmente girando sobre su eje, de modo que existe un momento cinético inicial a lo largo del eje  $L$ , la variación debida al momento producido por el peso es perpendicular a  $L$  y el eje se mueve en el sentido del momento de las fuerzas exteriores. Éste movimiento se denomina precesión.

### 4.3.-EL GIROSCOPIO DE FIBRA ÓPTICA

El giroscopio de fibra óptica (*FOG* por sus siglas en inglés), representa la principal solución a un gran número de aplicaciones de navegación, orientación y estabilización, en particular para el rango entre  $0.01$  a  $10^\circ/h$ . El *FOG* nos ofrece ventajas únicas por encima de los giroscopios mecánicos y del giroscopio de anillo láser (*RLG* por sus siglas en inglés), entre éstas ventajas encontramos:

- Dispositivo en estado sólido (sin movimientos mecánicos).
- No hay fluctuaciones al realizar mediciones.
- La sensibilidad puede ser incrementada al agregarse más fibra óptica.
- Tamaño pequeño (miniaturización).
- Alta rentabilidad.
- Larga vida útil.
- Rápido encendido.

El desarrollo del giroscopio en fibra óptica se remonta a mediados de los años 70's cuando Vali Shorthill construyó el primer sensor de rotación en fibra óptica. Con éste avance tan importante, siguieron otros esfuerzos de R.B. Brown de los laboratorios Navales en 1968, quien propuso un núcleo de fibra óptica como sensor de rotación. Las líneas de interferencia fueron obtenidas con un núcleo de fibra óptica en 1975 empleando una fibra monomodo. Durante los años siguientes un número de investigadores de todo el mundo realizaron lo que se conoce como el giroscopio de fibra óptica (*FOG* por sus siglas en inglés). El giroscopio cuenta con un error parcial de  $0.01^\circ/hr$  siendo éste dispositivo creado

en 1980. Aunque la operación fundamental del sistema es conocido en todo el mundo, los detalles del diseño completo y procesos de producción no son publicados por derecho de autor.

Grandes progresos se han logrado durante la década pasada en el desarrollo de fuentes ópticas de alto desempeño las cuales operan en la región del infrarrojo cercano, además de óptica integrada (*IOC* por sus siglas en inglés), éstas han venido a incrementar la sensibilidad del giroscopio de fibra óptica además de disminuir el ruido en las mismas.

Los recientes esfuerzos han sido dirigidos a la miniaturización, bajo costo, alto desempeño para los giroscopios de fibra óptica, para que éstos puedan operar bajo ambientes hostiles tales como situaciones militares.

### 4.3.1.-REFERENCIAS HISTÓRICAS

La teoría electromagnética propuesta por Maxwell y la teoría cuántica explican el fenómeno físico que se observa en los giroscopios ópticos. Newton propuso que la luz actuaba como corpúsculos luminosos y Huygens propuso que la explicación de la luz era a través de ondas explicando la refracción y la reflexión. En nuestros días sabemos que se comporta de ambas formas interactuando entre ellas.

Cuando Maxwell publicó su teoría electromagnética en 1860, demostró que las ondas electromagnéticas se propagaban a una velocidad de  $3 \times 10^8$  m/s. Él observó que éste era el mismo valor que se había calculado para la velocidad de la luz, por lo que propuso que la luz también se trataba de una onda electromagnética. El *éter* fue propuesto como el medio en el cual se propagaban las ondas electromagnéticas y estaba en todo el espacio, por lo que se propuso que el *éter* no tiene viscosidad ya que nunca se le pudo asociar ésta propiedad, ya que las leyes de los planetas de Kepler no la consideraban.

En 1887A. Michelson y E. Morley realizaron un experimento (un interferómetro) destinado a medir las variaciones de la velocidad de la luz debidas al movimiento de la tierra a través del *éter* el resultado fue negativo; la velocidad de la luz medida desde la tierra es la misma en todas las direcciones a pesar de que ésta se mueve. La conclusión final la dio Albert Einstein en 1905 diciendo que la velocidad de la luz y de cualquier tipo de radiación electromagnética, es siempre la misma y no dependen de la velocidad de la fuente, ni del observador que la recibe, por lo que desde este nuevo punto de vista el *éter* sale descartado como medio de propagación; también con ello se muestra que la dinámica Newtoniana resulta ser una teoría aproximada, cuyas formulas dan buenos resultados solo cuando la velocidad de los objetos es mucho menor que la de la luz.

Otra idea propuesta por Einstein, se refiere a que solo partículas sin masa pueden viajar a la velocidad de la luz por lo que propone que los corpúsculos a los que se refería Newton no tienen masa y por ello se mueven a la velocidad de la luz.

En 1913-1914 el francés George Sagnac diseñó un sistema con el cual trataba de reportar la existencia del *éter* sin llegar a demostrarlo, pero su experimento logró tener éxito como

sistema de medición de velocidades angulares, a éste efecto se le conoce como efecto Sagnac. Una de las primeras aplicaciones de éste fenómeno fue el experimento formado por Michelson y Gale en 1925, para medir el índice de rotación de la tierra con un rectángulo óptico de 2/5 milla a lo largo de 1/5 milla ancho.

El interferómetro fue hecho con espejos y la luz hace solo un viaje a través de la trayectoria para llegar al detector resultando en una baja sensibilidad del giro, por lo que éste experimento no prospero en sus inicios ya que no se contaba con los detectores capaces de registrar cambios en el patrón interferométrico de esa magnitud. En 1968 R.B. Brown de los laboratorios Navales de investigación, retoma este fenómeno y emplea un núcleo de fibra óptica como trayectoria y así aumentar la sensibilidad del sistema olvidándose del sistema original propuesto por Sagnac.

En 1975 la fibra monomodo es desarrollada y con ello se disminuyen las perdidas en ella, así que en ese año Vali y Shorthill de la Universidad de UTA crean un interferómetro con ésta fibra obteniendo un claro patrón interferométrico con él.

Las últimas modificaciones propuestas para el interferómetro de Sagnac proceden de Estados Unidos, Francia y Alemania. En 1980 se comienzan a emplear el efecto Sagnac como giroscopio comercial al cuál se le conoce como Giroscopio interferométrico de fibra óptica (*IFOG* por sus siglas en inglés) el cuál no es tan sencillo de hacer. Estos problemas eran principalmente identificados en la fibra óptica, la fuente luminiscente, y la arquitectura del mismo. En una conferencia de *MIT* en noviembre de 1981 se reportan 45 reportes sobre el *IFOG*, para 1989 se reportan 570 en todo el mundo.

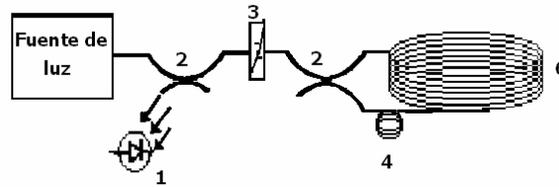
Los últimos reportes sobre *IFOG* reportan mejoras en todos los aspectos, además de nuevas aplicaciones como son el giropiloto para sistemas de navegación controlados remotamente, girocompases con 3 *IFOG*, los cuales son buscadores de norte real y aplicaciones directas como sensor de velocidad angular en sistemas de navegación marítimos, aéreos, especiales y terrestres.

#### **4.3.2.-DESCRIPCIÓN BÁSICA DEL GIROSCOPIO DE FIBRA ÓPTICA (IFOG)**

El *IFGO* es mostrado en la figura 4.4, éste es el interferómetro en fibra óptica análogo al sistema propuesto por Sagnac. La luz proveniente de la fuente de luz es dividida en 2 al 50% esto a través de un divisor de haz en fibra óptica (*Coupler*), para después viajar a través de un núcleo de fibra óptica, éste acoplado a las dos salidas del divisor de haz para que la luz dividida viaje en sentidos opuestos por el núcleo. Cuando los dos haces de luz regresan al divisor de haz, éste los recombina formándose la interferencia entre los dos haces para después volver a ser divididos en dos nuevamente por el mismo divisor de haz; uno de los haces regresa a la fuente de luz y el otro es dirigido a un detector. La intensidad de la luz en el detector es una medición de tipo interferométrica debida a los dos haces recombinados y a la razón de rotación del núcleo en su plano.

Ya que la intensidad luminosa puede cambiar por alguna causa en la fuente de luz (por ejemplo: temperatura, voltaje, corriente, etc.) la interferencia detectada puede variar por lo que para éste sistema en fibra óptica existen varias mejoras para corregir estos errores,

como polarización de la luz en la fibra óptica a través de rejillas bragg, modulación de la luz por un piezoeléctrico para determinar la dirección de giro, etc.



**Fig. 4.4.-** Configuración Mínima de IFGO. 4) Fotodetector, 5) Divisor de haz, 6) Polarizador, 7) PZT modulador, 8) Núcleo de fibra óptica.

### 5.3.3.-CARACTERÍSTICAS

El máximo de velocidad angular que puede un IFGO detectar se calcula fácilmente. Para saber cuando éste dispositivo puede dar resultados coherentes, esto se calcula con la ecuación (4.6):

$$\Delta_{\phi R} = \frac{8\pi AN}{\lambda c} \Omega \quad (4.6)$$

La cual es similar a la ecuación del interferómetro de Sagnac, pero ésta nueva ecuación toma en cuenta el número de vueltas el núcleo de fibra óptica y la velocidad angular de la luz es sustituida por la longitud de onda y fase.

Despejando  $\Omega$  que es la velocidad angular a la que esta sometida el sistema la ecuación (4.6) queda:

$$\Omega = \frac{\Delta_{\phi R} \lambda c}{8\pi AN} \quad (4.7)$$

Donde  $\lambda$  es la longitud de onda de la luz,  $c$  es la velocidad de la luz,  $N$  el número de vueltas y  $A$  es el área del núcleo de fibra óptica.

Suponiendo que el IFGO tiene un área de  $0.01 \text{ m}^2$  con 1000 vueltas de núcleo y la fuente de luz a una longitud de onda de  $1.5 \mu\text{m}$ , para un defasamiento de  $\pi/2$  donde éste valor es el máximo de detección del sistema ya que al pasar de éste valor, el sistema da valores repetidos de velocidades menores a la máxima. Sustituyendo estos valores en la ecuación de velocidad angular máxima detección del IFGO:

$$\Omega = \frac{\left(\frac{\pi}{2}\right)(1.5 \times 10^{-6})(3 \times 10^8)}{8\pi(0.01)(1000)} = 2.8125 [\text{rad} / \text{s}]$$

$$\Omega = 161.14 \text{ (}^\circ/\text{s)}$$

Esto nos dice que el máximo que puede detectar un *IFGO* de éstas características es de  $161^\circ$  en un segundo, éste valor no es lo suficientemente grande, ya que algunos vehículos de navegación, principalmente aérea llegan a tener cambios en su velocidad angular de hasta  $250^\circ/\text{s}$  y algunos hasta de  $500^\circ/\text{s}$ . Una solución a este problema es el de disminuir el área del núcleo esto disminuyendo el número de vueltas de la fibra óptica, pero disminuimos la sensibilidad para velocidades angulares pequeñas, por lo que el *IFGO* es empleado principalmente en sistema de velocidades angulares muy pequeñas.

Con esto no se está diciendo que el *IFGO* tenga una desventaja de medición de altas velocidades angulares, sino que para éste tipo de velocidades se tiene que tener un sistema más adecuado realizando modificaciones al esquema pero conservando su teoría y diseño, de hecho éste sistema puede tener sensibilidades muy grandes para baja velocidad como para muy alta velocidad.

Ahora también se puede hablar del mínimo de detección de velocidad angular que puede detectar un *IFGO*, para ello ya no depende tanto de las ecuaciones o de que tan grande sea el núcleo de fibra óptica, ya que estos sistemas no son ideales y por tal, tienen pérdidas las cuáles nos dan un límite de detección, esto principalmente se da en la fibra óptica y en los detectores.

La fibra óptica al ser un sistema no ideal tiene fugas de luz en toda su trayectoria llegando al punto en el que no se puede llegar a detectar, por lo que hay un límite para la dimensión en la fibra óptica y por lo tanto el tamaño también del núcleo, ya que al hacer más pequeño el núcleo de fibra óptica también estamos teniendo pérdidas en la fibra óptica al escaparse una parte de la luz de la misma. Por otra parte en los detectores también se encuentran algunas desventajas, ya que algunos de ellos requieren de un mínimo de luz para poder trabajar adecuadamente, recordando que los detectores no son lineales y por tal se pueden tener datos erróneos o no tener resultados.

El desempeño de los giroscopios ópticos es muy alto, esto debido a que se han logrado sistemas en que su estabilidad es muy buena, son inmunes al ruido eléctrico, no dependen de la gravedad en su funcionamiento (una gran ventaja en sistemas de navegación espacial), no presentan fatigas mecánicas, tiene una vida útil muy grande, manejo práctico y su sensibilidad es muy amplia hasta de  $0.0001^\circ/\text{h}$ , hasta miles de revoluciones por minuto.

#### 4.4.- APLICACIONES DE LOS GIROSCOPIOS

Los giróscopos constituyen una parte importante de los sistemas de navegación automática o guiado inercial en aviones, naves espaciales, misiles teledirigidos, cohetes, barcos y submarinos. Los instrumentos de guiado inercial de esos sistemas incluyen giróscopos y acelerómetros que calculan de forma continua la velocidad y dirección exactas del vehículo en movimiento. Estas señales son suministradas a una computadora, que registra las desviaciones de la trayectoria y las compensa. Los vehículos de investigación y misiles más avanzados también se guían mediante los llamados giroscopios láser o giroscopios de fibra óptica. Otro sistema avanzado, denominado giroscopio de suspensión eléctrica, emplea una esfera hueca de berilio suspendida en un soporte magnético.

El girocompás es una de las aplicaciones mas completas de los giroscopios, éste aparato es un dispositivo que nos indica la dirección del norte verdadero, esto se logra a través de un sistema formado por tres giroscopios, que actuando simultáneamente y con ayuda de un sistema de cómputo para realizar los cálculos necesarios, se puede encontrar el norte real en tiempo real. Su principal ventaja es que éste aparato es de bajo costo, trabaja en tiempo real y es inmune a ruido magnético y eléctrico; en el caso de los girocompases a base de giroscopios de fibra óptica, otra ventaja es el tamaño, ya que éstos dispositivos son de tamaños muy reducidos y pueden ser empleados en cualquier sistema de navegación marítima, aérea o terrestre.

El giropiloto es un aparato que se utiliza para mantener automáticamente el rumbo de naves marítimas o aéreas, sin necesidad de timonel o de piloto sobre un rumbo prefijado. Su uso a bordo de los buques, se remonta al año 1922, en que por primera vez fue instalado un piloto automático marca "*Sperry*" a bordo del buque tanque *J.A. Moffat*. Los primeros equipos, sencillos y robustos, operaban sobre el telemotor hidráulico del buque con lo cuál había una pérdida de movimiento, que disminuía notablemente su eficacia y rendimiento, quedando, además, sujeto a todas las perturbaciones propias de los telemandos hidráulicos. Para evitar estos inconvenientes, los equipos posteriores disponen de un sistema completo de telemotor eléctrico, que actúa directamente sobre el timón, independientemente del telemotor existente en el buque. La evolución en su aspecto general y en detalles de los pilotos automáticos o giropilotos, ha dado por resultado unidades perfectamente logradas, aptas para reaccionar cuando el buque cambia 1/6 de grado del rumbo previsto y capaces de mantener el rumbo del buque con un error menor de 0.4 grados en condiciones de buen tiempo. Una de las grandes ventajas del uso del giropiloto, desde un punto de vista económico y de eficacia militar, es la de hacer que el buque siga una ruta más exacta con menos uso del timón, lo cual reporta una economía de un 2 a 2.5 por ciento de combustible en ciertas condiciones.

#### 4.5.- CONCLUSIONES

Los diferentes sistemas de sensado que se han ido construyendo a lo largo de la historia, han sufrido muchísimas modificaciones a partir de la concepción inicial, modificaciones esquemáticas, de elementos, tamaño, sensibilidad, rango, etc. Es por ello que cada día se desarrollan nuevos y mejores dispositivos de medición que van sustituyendo a los viejos. Éste es el motivo de éste capítulo, el resaltar las mejoras y dar una comparación clara entre dos dispositivos que existen en el mercado del giroscopio.

El giroscopio fue primeramente construido en base a fenómenos mecánicos, posteriormente de sufrir una serie de modificaciones se fueron perfeccionando pero sin dejar de estar basados en los mismos principios. A partir de la invención del láser una gran área del conocimiento comenzó a desarrollarse y a cambiar muchísimos de los dispositivos mecánicos a ópticos, el giroscopio es uno de ellos. Las ventajas de emplear fenómenos ópticos a mecánicos son muchas, entre ellas encontramos, miniaturización, costo, rentabilidad, sensibilidad (la principal) y en la mayoría de casos que no dependen de elementos o fenómenos externos sino del mismo fenómeno involucrado, es decir, que los sistemas ópticos solo dependen del fenómeno que se desea detectar y no de un segundo fenómeno físico.

Así este capítulo es mas una comparación entre dos sistemas y los fenómenos empleados para un mismo sensado. Esto sirve como parte de las conclusiones finales y de las justificaciones de ésta tesis ya que también se busca mostrar la simplicidad de construcción, número de elementos empleados y costo de fabricación de ambos dispositivos, aun cuando solo se construyó el sistema óptico.

#### 4.6. - BIBLIOGRAFÍA

1. Anthony Lawrence, "Modern Inertial Technology", Ed. Springer, Introduction, Cap. 1, Cap 11. Second Edition. 1998
2. "Enciclopedia General del Mar" ED. Garriga. Tomo IV pp 844-851.
3. ROPARS, J (1965) "El compás giroscópico mecánico" ED. Gustavo Gili, pp. 65-113.
4. Ana Maria Ceto, "La Luz", La Ciencia para todos, Fondo de Cultura Económica, No. 32, Cáp. IV, pp. 88-92, Segunda Edición 1999
5. Francis T.S. Yu, "Fiber Optic Sensors", University Park, Pennsylvania, Ed. Marcel Dekker, pp. 383-415, 2002
6. Eric Udd, "Fiber Optic Sensor, An introduction for engineers and scientist", Wiley-Interscience Publication, First edition, pp 233-267, 1991
7. G.E.Sandoval-Romero et al, Revista Mexicana de Física No. 49(2), 2002.
8. H.H Cerecedo, E.A.Kuzin, "Breve revisión del estado actual del interferómetro de Sagnac formado con fibra óptica de alta birrifringencia", Revista Mexicana de Física Vol. 46, pp. 512-517.
9. S.M. Bennett, R.Dyott,"Fiber optic Rate Gyros As Replacements for mechanical Gyros".American institute of Aeronautics and Astronautics.

## **CAPITULO 5**

### **DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y MODIFICACIONES DEL INTERFEROMETRO DE SAGNAC**

#### **INTRODUCCION**

Los giroscopios ópticos han venido a reemplazar a los giroscopios mecánicos para las aplicaciones existentes hasta ahora. Su alto desempeño, su independencia de la gravedad, su gran sensibilidad, su alta tolerancia a vibraciones, los hace a los giroscopios ópticos ideales para propósitos comerciales y militares. Basados en el efecto interferométrico Sagnac. Existen dos tipos de interferómetros ópticos desarrollados, el de lazo abierto y el de lazo cerrado, pero dado al alto costo de desarrollo del interferómetro de lazo cerrado, es más conocido y empleado el de lazo abierto.

El giroscopio de lazo abierto es construido con una configuración mínima, la cual es similar a lo que es el interferómetro de Sagnac. El desempeño de un giroscopio óptico puede ser optimizado dependiendo de las aplicaciones individuales en las que puede ser empleado, por ejemplo cambiar el camino óptico o su área, sin cambiar alguno de los aspectos del esquema de trabajo del giroscopio.

La respuesta del giroscopio es debida al gran ancho de banda que posee, por lo que para determinadas aplicaciones se puede cambiar su espectro con algunos sencillos filtros analógicos. Debido a estas características en el espectro del giroscopio, existe una gran ventaja con respecto a los giroscopios mecánicos aumentando la exactitud ampliamente.

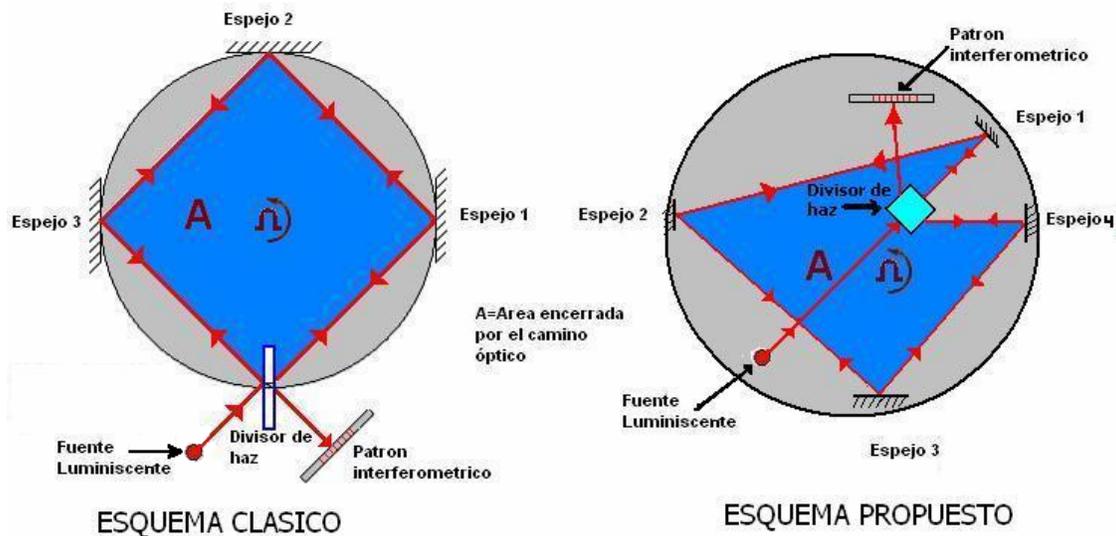
No es de sorprender que cada nueva tecnología tenga una ventaja sobre las ya existentes tecnologías, esto sucede con los giroscopios ópticos sobre los mecánicos, pero hay que recordar que cada tecnología tiene sus propias ventajas y atributos individuales. Por todas estas razones en este capítulo se analizan todas las modificaciones que se realizaron al ya existente interferómetro de Sagnac, con la principal aplicación de giroscopio óptico, en este análisis se detalla la construcción, diseño, modificaciones, modelado matemático y resultados del sistema interferométrico construido.

## 5.-DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y MODIFICACIONES DEL INTERFEROMETRO DE SAGNAC

El principio físico que explica el efecto Sagnac es explicado como un cambio de fase entre dos haces de luz en contrapropagación como se explicó en el capítulo 3, por lo que éste cambio de fase es dependiente del área encerrada por el camino óptico de los haces, además de la velocidad angular que sufre todo el sistema. En un principio el efecto fue planeado en forma que el área formada por los haces en contrapropagación formaban un cuadrado, proporcionándole un cierta característica al sistema completo y de éste modo poder obtener la ecuación que modela el efecto físico.

Al obtener la ecuación que modela el efecto, podemos determinar que ésta no toma en cuenta las longitudes que recorren los haces (la distancia entre la fuente y el detector), pero si toma en cuenta el área encerrada que forman los mismos, por lo que podemos determinar que el sistema es dependiente del área que encierran los haces y no del camino que estos siguen; en otras palabras, el efecto es dependiente del área encerrada por los haces en contrapropagación y no del camino óptico que estos sigan.

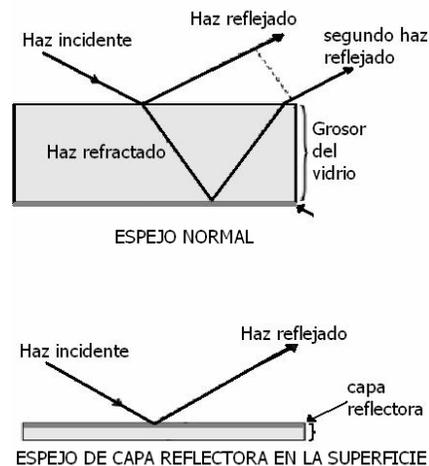
Tomando en cuenta ésta consideración sobre el efecto, se puede establecer una forma arbitraria en que los haces puedan viajar en contrapropagación, pero si considerar la mejor cantidad de área que estos puedan generar, por lo que a diferencia del esquema original, propongo un esquema diferente al original para poder ajustar los elementos ópticos necesarios y la etapa de detección en un solo esquema. Ésta modificación solo obedece a un cambio en el camino óptico, pero al igual que cualquier otro esquema mantiene las mismas características tanto físicas como matemáticas del efecto Sagnac. La diferencia de esquemas se muestra en la figura 5.1.



**Fig. 5.1** Se muestra que ambos esquemas poseen los mismos elementos, pero la diferencia solo es el camino óptico que forman los haces en contrapropagación, esto solo es una variante del sistema sin cambiar ninguna característica del mismo, ni la detección o algún otro parámetro físico externo.

Los elementos empleados son los mismos en ambos esquemas como es el divisor de haz, que no es más que un espejo semitransparente que divide la luz, dejando pasar la mitad de está como si fuera solo un vidrio y reflejando la otra mitad como si fuera un espejo. Éste divisor de haz, sirve tanto para dividir el haz que proviene de la fuente de luz como para volver a recombinar los dos haces después de viajar por el camino óptico formado por los espejos.

En el esquema se observa que hay espejos que forman el camino óptico por el cual viajan los haces divididos para después recombinarse, estos espejos tienen una alta reflectancia para evitar pérdidas o fugas de los haces de luz, además de que estos espejos tienen la peculiaridad de ser de primer plano, esto es, que la capa reflectora se encuentra en la superficie del vidrio y no en la parte posterior del mismo. Con éste tipo de espejos se evita que el índice de refracción del vidrio entre en juego en la etapa de detección y a la vez evitar ruidos como la doble reflexión del mismo haz, ya que con un espejo común, los haces de luz se reflejan tanto en la superficie del vidrio como en la capa reflectora en la parte posterior del vidrio, dando lugar a una segunda división de los haces de luz y a una interferencia entre estos que depende del grosor del vidrio. Éste fenómeno se ve más claramente en la figura 5.2.

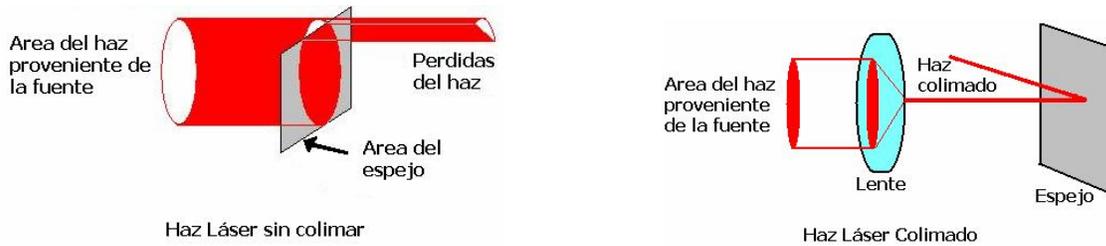


**Fig. 5.2** En la figura superior se ve el comportamiento de la luz en un espejo normal o con capa reflejante en la superficie posterior, en la figura inferior se observa el comportamiento de un espejo con capa reflejante en la superficie.

Otro cambio que se realizó al sistema, es aplicado al ajuste de los espejos que forman el camino óptico, ya que la luz de la fuente es dirigida a través de un lente al divisor de haz, del cual salen dos señales iguales que viajan por un camino óptico formado por los espejos en sentidos contrarios para volver a combinarse en el divisor de haz; al salir la señal de interferencia del divisor de haz es dirigida y amplificada por un lente hacia un colimador en el cual se encuentra el fotosensor.

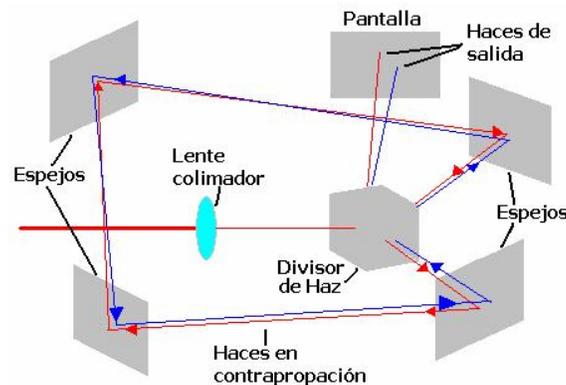
El primer lente empleado tiene la función de colimar el haz de luz proveniente de la fuente de luz, esto es, que el haz de luz que proyecta la fuente tiene un cierto grosor o área transversal, lo que hace que la potencia del láser se concentre en un área mayor, pero esto

no es el problema que se tiene, ya que el problema de éste, es que al tratarse de un spot de un área grande, se necesitan espejos mas grandes para que los rayos puedan reflejarse por completo. Esto se ve en la figura 5.3.



**Fig. 5.3** El primer lente empleado sirve para colimar el haz proveniente de la fuente y así captar todo el spot en los espejos.

Pero esto conduce a un problema mayor aun, ya que ahora al tratarse de haces de luz en un área muy pequeña, el alineamiento para formar el patrón interferométrico con estos haces, se vuelve extremadamente complicado y muy fácil de desalinear. Ésta desalineación se debe a que las piezas mecánicas que forman el sistema, como la base giratoria y las bases de los espejos tienen pequeños bordes, dobleces, o imperfecciones físicas, que sumadas provocan que los espejos no queden alineados entre sí, aún cuando a simple vista parezca que lo están. Al introducir el haz láser se verifica que las imperfecciones son muy grandes y que no se pueden corregir fácilmente, complicándose más el alineamiento al ser los haces de luz muy pequeños debidos a la colimación con el primer lente. Esto se ve más claramente en al figura 5.4.

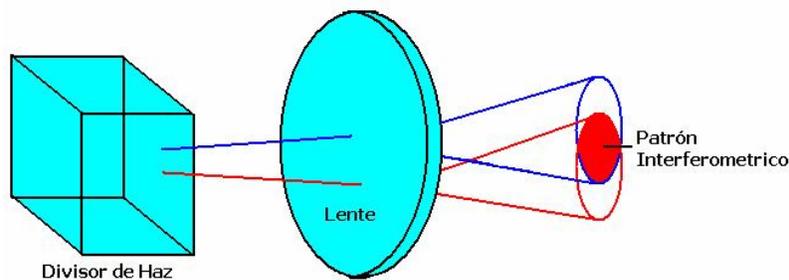


**Fig. 5.4** La propagación de los haces no es igual en la trayectoria que siguen, por lo que al recombinarse en el divisor de haz estos llegan a diferentes puntos en la pantalla.

Al tratar de corregir los defectos en las piezas mecánicas del sistema, se observa que es muy complicado el alinear todos los espejos, ya que por efecto de la gravedad o del movimiento del mismo sistema (fuerzas centrífugas y centrípetas de los movimientos angulares), siempre se desalineará alguna pieza y se necesitará estar alineándolas nuevamente en cada uno de los experimentos que se realicen.

Para corregir éste defecto se pueden fijar completamente las piezas, previniendo que existan movimientos posteriores de las piezas y que se descalibre el sistema, pero esto evitará que existan cambios posteriores para nuevos experimentos o ajustes.

La propuesta que se hace en esta tesis, es la de fijar las piezas mecánicas, pero no de forma permanente y que posteriormente puedan ser manipuladas con facilidad, evitando que cuando se esté trabajando con el dispositivo existan movimientos en las piezas y se desajusten. Para lograr que los haces puedan formar el patrón interferométrico fácilmente sin estar alineados, se propone una lente que habrá los spots de los dos haces y que los haga coincidir en un plano para formar la interferencia, ésta lente está ubicada a la salida del divisor de haz, de tal forma que estos se encuentran muy cercanos entre sí y pueden entrar al lente completamente y abrirse con facilidad. Esto se ve más claramente en la figura 5.5.

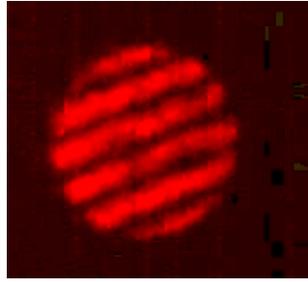


**Fig. 5.5** El segundo lente empleado a la salida del divisor de haz, sirve para corregir que los espejos no están alineados y así abrir los spots de los haces para formar el patrón de interferencia.

Los dos haces al abrirse se intersectan debido al lente y forman el patrón interferométrico. Otra de las ventajas del sistema es que, aunque los espejos se muevan, estos se pueden volver a alinear fácilmente y formar el patrón de nuevo, sin necesidad de alinear los haces en cada uno de los espejos.

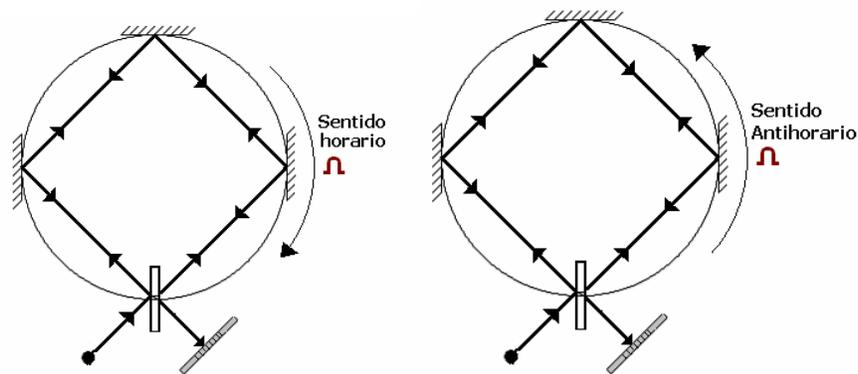
La última parte de la implementación del interferómetro, es la parte referente al patrón de interferencia, esto es, la forma en que se debe de formar el patrón de interferencia y la etapa de sensado del mismo. Para ello se necesita que el fotosensor que realizará la etapa de transducción, sea el adecuado y que principalmente capte la parte necesaria del patrón de interferencia, por tal motivo, se realizó un análisis sobre la mejor forma de sensado del patrón interferométrico y con ello del efecto físico que lo acompaña.

El patrón interferométrico creado por el sistema, es formado en la intersección de los dos haces de salida (después de ser abiertos por la lente), por tal motivo, el patrón interferométrico es solo una parte de la señal de salida del sistema y en éste caso se debe de tomar solo esa parte para el sensado, realizando una separación de la parte intersectada con la no intersectada, esto se logra con un colimador. A la salida del colimador solo obtenemos el patrón interferométrico del sistema, éste se muestra en la figura 5.6, éste es el patrón interferométrico real producido por el dispositivo construido para ésta tesis.



**Fig. 5.6** Aquí se muestra el patrón interferométrico que se obtuvo con el sistema construido para esta tesis.

Pero el movimiento angular del sistema puede ser en las dos direcciones del plano del interferómetro, esto es, en sentido horario o antihorario (dextrógiro o levógiro, figura 5.7 a) y b) respectivamente), esto nos da la desventaja de no poder determinar directamente cuál fue el sentido en el que fue el movimiento, por lo que para determinar éste último punto, se propone un efecto muy socorrido en la óptica, éste es el efecto navaja.

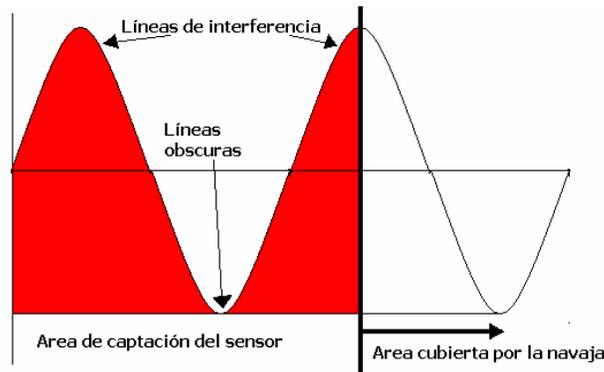


**Fig. 5.7** Los sentidos en los cuales puede girar el sistema a) horario, b) antihorario.

Se tiene que el patrón interferométrico consta de varias líneas de interferencia, pero al emplear todas las líneas de interferencia se está utilizando también el ruido de estas, además de que el sistema reduce su sensibilidad ya que teóricamente el efecto Sagnac se explica con un cambio en la diferencia de fase de los haces en contrapropagación y esto se ve reflejado en el movimiento de las líneas de interferencia de izquierda a derecha o de derecha a izquierda (según el desfase sea adelante o atrás); por lo que en el sistema de detección se tendría que, cuando una línea de interferencia sale del área de detección, otra está entrando y el sensor no detectaría la intensidad, ya que sería siempre la misma, por lo que empleamos el efecto navaja para solo utilizar una parte del patrón interferométrico y tener a una de las líneas a la mitad.

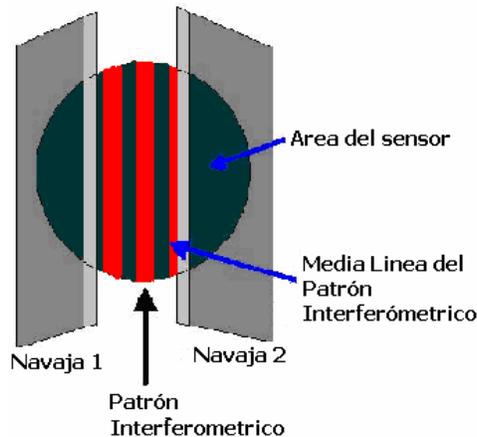
El patrón interferométrico está formado por líneas paralelas intercaladas entre partes claras y oscuras, esto obedece al fenómeno de interferencia explicado en el capítulo 3, estas líneas tienen un máximo de intensidad que son las líneas claras y un mínimo o nada de intensidad que son las líneas oscuras, éste cambio es de tipo sinusoidal ósea que la

intensidad aumenta gradualmente hasta llegar a un máximo y después disminuye para llegar a un mínimo, esto se observa mejor en la figura 5.8.



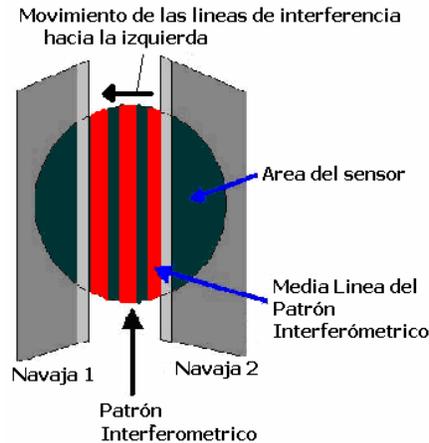
**Fig. 5.8** Variación de la intensidad de las líneas de interferencia.

La propuesta para detectar el movimiento en un sentido o en otro del sistema, es la de tomar a una de estas líneas de interferencia solo a la mitad a través del efecto navaja, para que cuando exista un movimiento, la línea saldrá del área de detección o entrará aún más, en otras palabras, con este fenómeno tendremos que la cantidad de luz que está en el detector sin movimiento será siempre la misma, como se ve en la figura 5.9.



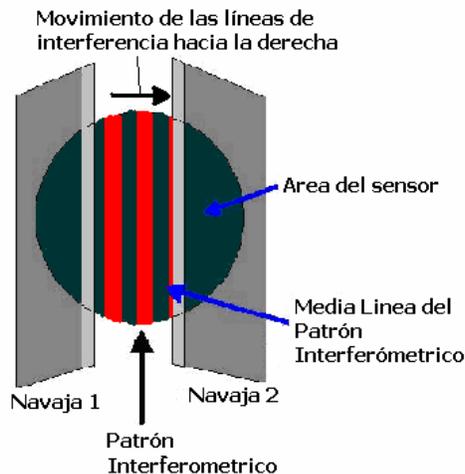
**Fig. 5.9** Efecto navaja.- Se utiliza una parte del patrón interferométrico y el fotodetector solo ve la parte que se desea, de ésta manera se divide una de las líneas a la mitad y se obtiene que la sensibilidad del sistema sea mejor además de poder determinar la dirección del giro, sin movimiento entrara la misma cantidad de luz siempre.

Ahora, al existir un movimiento en el sentido horario tenemos que las líneas de interferencia se moverán hacia la izquierda como se ve en la figura 5.10, por lo que la cantidad de luz que entró en el detector es mayor.



**Fig. 5.10** *Movimiento de las líneas de interferencia hacia la izquierda para el sentido horario, mayor captación de luz en el fotosensor.*

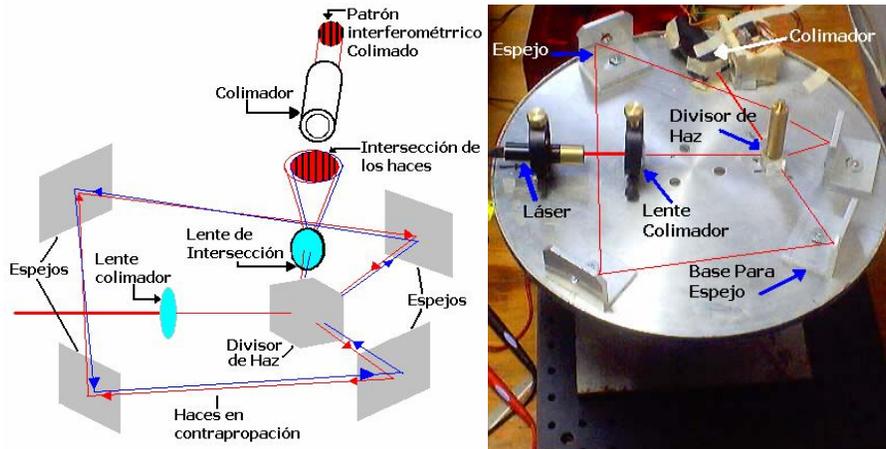
De ésta manera tenemos que la cantidad de luz que capta el fotosensor es mayor, lo que nos da un aumento de voltaje en la etapa de sensado electrónico. De la misma forma para el sentido antihorario, tenemos que las líneas se moverán a la derecha teniendo menor captación de luz en el fotosensor y una disminución en el voltaje en la etapa de sensado electrónico, como se ve en la figura 5.11.



**Fig. 5.11** *Movimiento de las líneas de interferencia hacia la derecha para el sentido antihorario, menor captación de luz en el fotosensor.*

Además de evitar el ruido y la poca sensibilidad del sistema, el efecto navaja nos da una herramienta muy sencilla para poder determinar el sentido de giro. Éste fenómeno también se puede explicar de otra manera, esto es como un *offset* del sistema, así estamos poniendo al sistema al estar sin movimiento en un valor de cero, por lo que cuando existe un movimiento en sentido horario el sistema arrojará valores positivos y con un movimiento en sentido antihorario con valores negativos.

El sistema completo queda finalmente con algunas variantes con respecto al sistema original propuesto por Sagnac, con cada una de las modificaciones propuestas y con la explicación de cada una de ellas, por lo que el sistema diseñado finalmente se muestra en la figura 5.12a en forma esquemática y en la figura 5.12b una fotografía del sistema armado para el trabajo con ésta tesis.



**Fig. 5.12** a) muestra el esquema propuesto con sus componentes y la ubicación de cada uno, b) muestra la imagen del sistema construido con todos sus componentes.

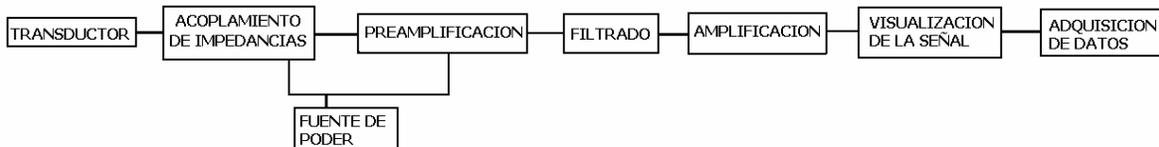
Finalmente al tener completo el sistema y obtener el patrón interferométrico que describe el fenómeno, la etapa de sensado debe de ser de acuerdo con las necesidades de medición, ésta etapa se realizó con un sistema de medición optoelectrónico, debido a que el sistema está basado en un fenómeno óptico. Para ello se necesita que la señal óptica pueda ser manipulable y medible, lo que implica una transformación de tipo electrónica (a parámetros eléctricos) que es mas confiable que otros tipos de mediciones físicas. Por lo que la medición del patrón de interferencia se realiza con un sistema electrónico.

## 5.1.- ANÁLISIS Y DISEÑO DE LAS ETAPAS DE SENSADO ELECTRÓNICAS DEL SISTEMA

Un sistema de instrumentación como el visto en el capítulo 1 (figura 1), contiene muchos elementos que son empleados después del transductor, esto con el fin de realizar un acondicionamiento de la señal que entrega el transductor, ésta señal puede ser una señal eléctrica como un voltaje o una corriente. Los circuitos electrónicos de acondicionamiento, son sistemas diseñados para manipular la señal de sensado que entrega el transductor. Existen muchos circuitos de acondicionamiento de señales eléctricas, estos circuitos funcionan de acuerdo a las necesidades del sensado, ya que cada sistema de medición requiere diferentes tipos de acondicionamiento o etapas de acondicionamiento, incluso si contienen las mismas etapas de acondicionamiento podemos ver una diferencia en cada una de ellas, ya que los transductores y los equipos de sensado obedecen a diferentes rangos de sensibilidad, ancho espectral, condiciones de operación, etc. Los cuáles los hace diferentes entre sí.

Existen un gran número de acondicionadores electrónicos de señal, los cuáles tienen una gran variedad de características propias de acuerdo a las necesidades requeridas; entre estos circuitos tenemos amplificadores, preamplificadores, atenuadores, filtros (paso banda, paso bajas, paso altas, supresores de banda), convertidores de voltaje a corriente o viceversa, convertidores análogo-digitales (*ADC*), convertidores digital-analógico (*DAC*), retardadores de señal (*delay*), convertidores de corriente alterna a directa (*AC-DC*), convertidores de corriente directa a corriente alterna (*DC-AC*), por mencionar entre los más importantes. Para los objetivos de ésta tesis solo mencionaré los acondicionadores de señal que se emplearon y porque se escogieron estos; también realizaré un análisis sencillo de cada uno de ellos.

El sistema de electrónico de medición del interferómetro de Sagnac diseñado en ésta tesis, consta de las etapas que se muestran en la figura 5.13.



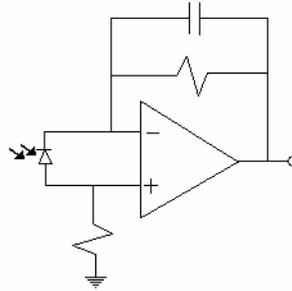
**Fig. 5.13** Etapas del sistema electrónico del interferómetro de Sagnac.

La primera etapa en un sistema de medición siempre es un transductor; para el caso de un sistema de medición óptico por lo regular es un fotodetector o fotosensor, muchas veces estos sistemas constan de varios transductores ópticos en arreglos de fotodetectores para obtener una sensibilidad mayor del sistema. El fotodetector empleado en éste sistema es un fotodiodo de avalancha de la marca *Edmund optics*.

La etapa posterior al transductor, podría ser una etapa de amplificación u otro tipo de acondicionamiento de la señal; quizá si el transductor nos entregara una señal lo suficientemente clara, como para poder realizar la medición eléctrica directamente, podríamos medir fácilmente los parámetros de sensado requeridos, pero la mayoría de los transductores requieren de etapas de acondicionamiento, principalmente de amplificación; pero al tratarse del transductor de un sistema del que no se conoce el comportamiento en los parámetros eléctricos al estar sensando, al iniciar la etapa de acondicionamiento se debe de interponer una etapa de acoplamiento de la señal de salida del transductor con la señal de entrada del acondicionamiento, ya que la señal se puede perder o atenuar debido al cambio de impedancias, por lo que la etapa intermedia es una etapa de acoplamiento de impedancias y así se garantiza que la mayor parte de la señal se mantendrá en las etapas posteriores.

La etapa de acoplamiento de impedancias se logra de diferentes maneras, una de éstas puede ser a través de transistores en una configuración que permita tal propósito, pero debido a la no linealidad de un transistor no es muy aconsejable emplear éste método. El método más conocido y más empleado es a través de un amplificador operacional. Éste circuito integrado puede ser empleado como acoplador de impedancias, ya que debido a sus características de entrada con impedancia muy grande (de megaohms) y salida con

impedancia muy pequeña (50 ohms), es ideal para que una señal pueda ser acoplada al no conocerse sus parámetros eléctricos o al ser una señal extremadamente pequeña, como la que se está midiendo de un fotosensor. Por lo que de la teoría de circuitos integrados, podemos emplear éste circuito en una configuración de seguidor, que no es más que un acoplamiento de impedancias evitando una amplificación o una atenuación de la señal de sensado, ésta misma configuración se conoce también como amplificación unitaria. Debido a que no hay amplificación no se requieren de cálculos para esta etapa de sensado. El esquema del circuito empleado para esta etapa es el mostrado a continuación.



**Fig. 5.14** Circuito de acoplamiento de impedancias.

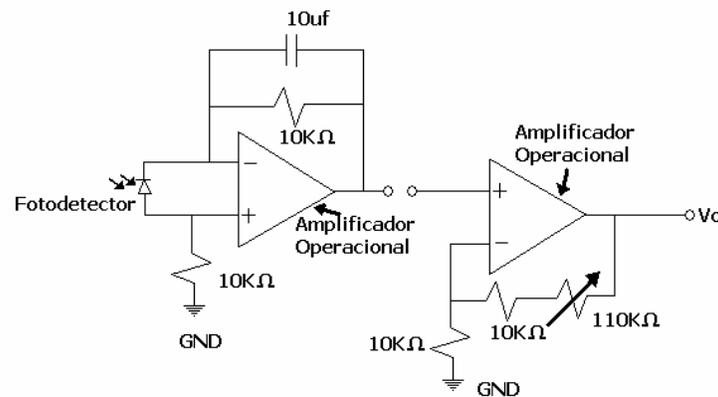
Las señales entregadas por un transductor por lo regular son señales muy pequeñas que requieren de una amplificación posterior a la etapa de transducción. Para el caso de un fotosensor es casi siempre necesario realizar ésta etapa de amplificación, y muchas veces una de preamplificación para poder manipular la señal que nos entrega el transductor.

La etapa posterior a la de acoplamiento es una preamplificación, debido a que los circuitos integrados son sistemas no ideales, tenemos algunas pérdidas de la señal en ellos, como una atenuación. Para el circuito de medición empleado en el sensado del efecto Sagnac, la tercera etapa es una preamplificación de la señal. Un amplificador es uno de los más importantes componentes o etapas de un sistema de instrumentación, ya que el amplificador tiene la función de incrementar una señal de niveles muy bajos a niveles necesarios para su procesamiento o medición.

Existen varios tipos de amplificadores y por tal, circuitos de amplificación; ellos debido a las necesidades requeridas, entre estos podemos mencionar, circuitos amplificadores a base de transistores y a su vez con diferentes configuraciones de amplificación. También existen varios circuitos integrados que realizan toda la operación de amplificación sin necesidad de cálculos de amplificación, elementos electrónicos, linealidad del sistema o análisis de configuraciones, como en el caso de los transistores; por lo que estos circuitos nos ahorran una gran cantidad de problemas de análisis, cálculos y ensamblado del circuito amplificador. Los circuitos más conocidos para amplificación de señales son los llamados amplificadores operacionales, los cuales constan de una miniaturización de transistores, diodos, resistencias, capacitores, etc. en un solo circuito integrado. Los amplificadores operacionales tienen varios propósitos, ya que son muy fáciles de adaptar a los procesos electrónicos y matemáticos que estos requieren, además de necesitar un número reducido de elementos pasivos externos a él y requerir cálculos muy sencillos para su empleo. También estos circuitos cuentan con una impedancia de entrada muy grande como ya se

mencionó, de alrededor de  $4 \text{ M}\Omega$ , con una capacitancia de  $8 \text{ pf}$  y con una máxima amplificación de hasta  $10^5$ . Estos circuitos tienen varias configuraciones en las cuales se pueden emplear, como sumadores, restadores, amplificadores inversores o no inversores por mencionar las más empleadas.

Para el circuito de sensado diseñado, se utilizó un amplificador operacional *TL082*, el cual consta en un solo circuito integrado de dos amplificadores operacionales, lo cual nos fue de mayor utilidad, ya que con éste circuito pudimos realizar la etapa de acoplamiento de impedancias y de preamplificación con un solo circuito integrado y en un solo circuito impreso. La etapa de amplificación fue una configuración de amplificador no inversor, lo cual es solo una amplificación directa sin la necesidad de invertir la señal. El esquema y cálculos de la etapa de preamplificación se muestran a continuación en la figura 5.15.



**Fig. 5.15** Circuito electrónico de sensado de la señal óptica del interferómetro de Sagnac.

Cálculo de ganancia de la etapa de preamplificación:

$$\text{Ganancia} = (1 + RB/RA). \quad (5.1)$$

Donde:  $RA = 10K\Omega$ ;  $RB = 10K\Omega + 110K\Omega = 20K\Omega$

Por lo tanto:

$$\text{Ganancia} = (1 + 110K\Omega/10K\Omega) = 11$$

Al concluir con ésta parte del circuito electrónico de sensado de la señal óptica, se pueden obtener resultados de sensado buenos, ya que la señal de medición ya es buena para ser medida, pero aun no son los óptimos. Las etapas posteriores de filtrado y de amplificación se realizaron con equipo electrónico de marca *Stanford Research Systems SRS60* y con la siguiente tabla de amplificación y filtrado. Estos datos cambian de acuerdo a las mediciones que se fueron tomando continuamente, esto debido a los cambios al sistema y a su mejoramiento.

- Filtrado: Paso banda (0.3Hz a 3Hz). Éste filtrado fue para todas las mediciones realizadas, pero debe de cambiar tanto el ancho de banda como la frecuencia central al realizarse mediciones de mas de  $360^\circ/s$  o menores de  $10^\circ/s$ , aunque también interviene la amplificación para éstas mediciones.
- Amplificación: (20 a 50 veces) Depende de la magnitud de giro, aunque para las mediciones realizadas fue de 20, La amplificación es directamente proporcional a la velocidad a la que se someta el sistema.

La etapa de filtrado obedece a que la señal al ser amplificada es amplificada junto con el ruido del sistema (óptico, disparo, detección, electromagnético, mecánico, etc.) por lo cual es necesario eliminar éste ruido sin quitar la señal que se está sensando; también en la etapa de amplificación se integran otros ruidos electrónicos como ruidos de disparo, térmicos, electromagnéticos, variantes en la polarización de los circuitos, etc. Además de que el fotosensor está captando todas las señales ópticas que están alrededor, esto es, que también detectan ruido ópticos como variables en la iluminación del lugar donde se están realizando las mediciones, cambios en la potencia del láser, variaciones en la detección del fotodetector, etc.

Para evitar todo éste tipo de disturbios en la señal, se realiza un filtrado de acuerdo a las necesidades de sensado, ya que como se están realizando mediciones de velocidad angular, éstas están ligadas directamente con una frecuencia de giro, o más específicamente con un ancho de banda de detección, por lo que éste ancho de banda debe de ser el mismo en el que trabaja el dispositivo construido. El ancho de banda del dispositivo está directamente relacionado con las velocidades angulares a las que está sometido el sistema, por lo que para una detección de velocidades muy pequeñas, el ancho de banda debe estar localizado en frecuencias muy bajas, además de realizar una buena elección del ancho de banda, esto es que la frecuencia angular es igual a la frecuencia de salida.

Los filtros que se emplean como todo dispositivo electrónico, no son ideales y por tal motivo no trabajan completamente filtrando las frecuencias completas que se necesitan, por lo que algunos de los ruidos se filtran al sistema y con ello se necesitan realizar otros tipos de filtrados para obtener una señal mas pura.

Con respecto a la etapa de amplificación, de igual manera que la de filtrado, ésta depende directamente de los parámetros de sensado que se necesiten, ya que para señales de velocidades angulares muy pequeñas, la amplificación debe ser muy grande y viceversa para señales de velocidades mayores. La amplificación se va incrementando con forme la velocidad es menor. La amplificación obedece matemáticamente a la ecuación del efecto Sagnac.

Posteriormente a la etapa de amplificación, se realiza comúnmente una visualización de la señal a través de un osciloscopio y así poder determinar el comportamiento de la señal, para analizar las etapas de sensado propuestas, determinar las mejoras al sistema completo y obtener una mejor señal de sensado con resultados óptimos. El osciloscopio empleado para éste dispositivo fue un *Tecktronix TDS 5020C*; éste osciloscopio es digital por lo que con él, se puede realizar adquisición de datos, para posteriormente realizar análisis de resultados

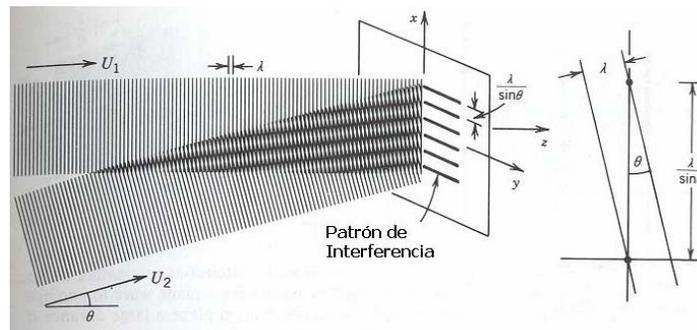
a través de una computadora y obtener las gráficas que se muestran en él. Ésta etapa fue de gran utilidad para obtener gráficas de sensado y compararlas posteriormente a través de un análisis de resultados, además de evitar una etapa posterior de adquisición de datos por computadora que requeriría de nuevas propuestas de diseño, adquisición, soporte y material en la última etapa.

Finalmente al tener el sistema de sensado electrónico completo, se pueden manipular algunas variables tanto del sistema físico como de la etapa de sensado electrónico, para poder realizar mejoras, ajustes y variaciones al dispositivo completo con el fin de tener una mayor resolución, sensibilidad y exactitud del mismo y así finalmente realizar los análisis de resultados y nuevos ajustes.

## 5.2.-MEDICIÓN DEL PATRÓN DE INTERFERENCIA DEL EFECTO SAGNAC

La medición del patrón de interferencia, es la parte en la cuál se realiza la etapa de transducción de la señal óptica a una señal eléctrica para su posterior procesamiento, sin embargo hay que tomar en cuenta algunas consideraciones sencillas. Además de que ésta es la etapa en la cual se está realizando la detección de la señal que se analiza, lo cual es la parte principal del sistema.

El patrón interferométrico que se forma es explicado más a detalle en el capítulo 3 que trata sobre interferencia. Éste patrón al tratarse de dos haces de luz formados por ondas planas (debidas a las características propias del láser), forman líneas paralelas en un plano de intersección, la figura 5.16 muestra éste fenómeno. El patrón interferométrico que se forma, es el que se mostró en la figura 5.6.



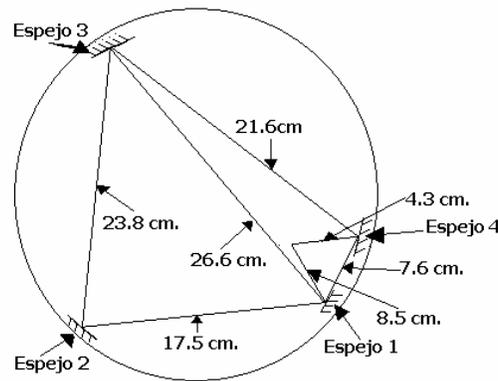
**Fig. 5. 16** Formación del patrón interferométrico.

La detección que se pretende realizar es la del cambio de fase en las líneas de interferencia que hay en el patrón interferométrico, esto es, el fenómeno que se vería en el patrón interferométrico al realizar un movimiento angular en el sistema, sería un movimiento en las líneas de interferencia del patrón. Éste movimiento sería un cambio de las líneas, moviéndose de lugar hacia la izquierda si se tratase de un movimiento en sentido horario y hacia la derecha si se tratase de un movimiento en sentido antihorario.

Esto se presenta debido a la diferencia de fases que sufren los haces en contrapropagación ya que los frentes de onda también llegan al plano defasados. Además hay que considerar que el patrón de interferencia (todo el spot de interferencia) no se está desplazando, solo que las líneas de interferencia están cambiando y que la interferencia es la que está cambiando pero no el lugar donde se realiza.

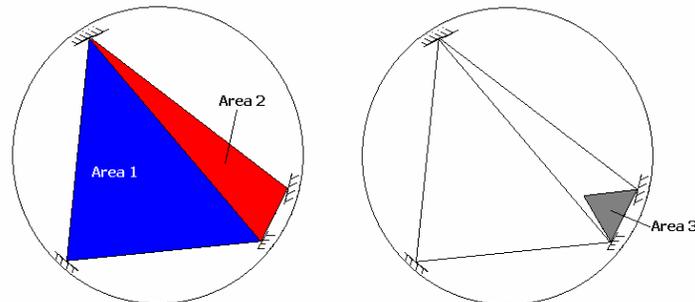
Ahora para saber la magnitud de movimiento en el patrón de interferencia y de los cambios en las intensidades de las líneas, se realiza el análisis del sistema para poder determinarlo matemáticamente con las ecuaciones del efecto Sagnac.

El sistema construido presenta las siguientes características físicas, con las cuáles se obtendrá el área que forman los haces en contrapropagación, para posteriormente desarrollar un modelo matemático del sistema, debido a que en la teoría se mencionó que la sensibilidad es dependiente del área que encierran los haces en contrapropagación. La figura 5.17 muestra las dimensiones físicas del sistema interferométrico construido.



**Fig. 5.17** Muestran las distancias de las trayectorias que siguen los haces y que forman un área cerrada, además de la distancia entre los espejos 1 a 3 y 1 a 4. También las distancias entre de los espejos 1 y 4 al divisor de haz.

En la figura anterior, se puede analizar que el área que encierran los haces en contrapropagación esta formada por una figura irregular, así que para determinar el valor del área, se dividirá ésta en tres triángulos y después se sumarán el área de los triángulos 1 y 2, para finalmente restarles el área del triángulo 3. Figura 5.18

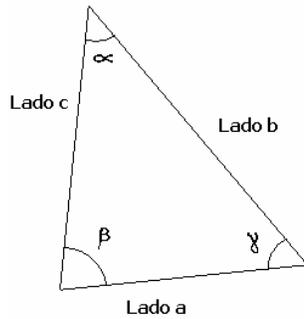


**Fig. 5.18** Triángulos formados para el cálculo del área del interferómetro.

### 5.2.1.- CÁLCULO DEL ÁREA DEL SISTEMA INTERFEROMÉTRICO

#### Triángulo 1

El triángulo 1 tiene las siguientes dimensiones:



*Triángulo 1*

$$\text{Lado } a = 17.5 \text{ cm.}$$

$$\text{Lado } b = 26.6 \text{ cm.}$$

$$\text{Lado } c = 23.8 \text{ cm.}$$

Donde  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  son los ángulos internos del triángulo, que se procederán a calcular.

Del teorema de cósenos tenemos que:

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc(\text{Cos } \alpha) \quad (5.2)$$

Despejando  $\alpha$  de la ec. 5.2:

$$\alpha = \text{Cos}^{-1} \frac{b^2 + c^2 - a^2}{2bc} \quad (5.3)$$

Sustituyendo los valores de los lados del triángulo en la ec 5.3, obtenemos el ángulo  $\alpha$ .

$$\alpha = \text{Cos}^{-1} \frac{26.6^2 + 23.8^2 - 17.5^2}{2(26.6)(23.8)}$$

$$\alpha = 40.1535^\circ$$

Ahora para el ángulo  $\beta$  empleamos el mismo teorema cambiando las variables:

$$b^2 = a^2 + c^2 - 2ac(\text{Cos } \beta) \quad (5.4)$$

Despejando  $\beta$  de la ec 5.4:

$$\beta = \text{Cos}^{-1} \frac{a^2 + c^2 - b^2}{2ac} \quad (5.5)$$

Sustituyendo los lados del triángulo en la ec. 5.5, obtenemos el ángulo  $\beta$ :

$$\beta = \text{Cos}^{-1} \frac{17.5^2 + 23.8^2 - 26.6^2}{2(17.5)(23.8)}$$

$$\beta = 78.5662^\circ$$

Para el ángulo  $\gamma$  se puede emplear el teorema de cósenos, pero también hay que recordar que la suma de los ángulos internos del triángulo es de  $180^\circ$ , por lo que empleando los dos métodos tenemos.

Con el método del teorema de cósenos:

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab(\text{Cos}\gamma) \quad (5.6)$$

Despejando  $\gamma$  de la ec. 5.6:

$$\gamma = \text{Cos}^{-1} \frac{a^2 + b^2 - c^2}{2ab} \quad (5.7)$$

Sustituyendo los lados del triángulo en la ec. 5.7, obtenemos el ángulo  $\gamma$ :

$$\gamma = \text{Cos}^{-1} \frac{17.5^2 + 26.6^2 - 23.8^2}{2(17.5)(26.6)}$$

$$\gamma = 61.2802^\circ$$

Comprobando con el método directo:

$$\alpha + \beta + \gamma = 180^\circ \quad (5.8)$$

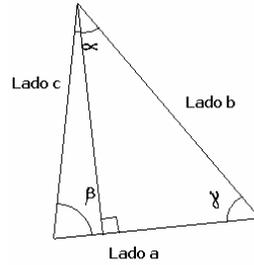
Despejando  $\gamma$

$$\gamma = 180^\circ - \alpha - \beta$$

Sustituyendo los ángulos  $\alpha$  y  $\beta$

$$\gamma = 180^\circ - 40.1535^\circ - 78.5662^\circ = 61.2802^\circ$$

Con los dos métodos obtenemos el mismo resultado, por lo que las operaciones se comprueban. De ésta manera tenemos los ángulos internos y los lados del triángulo 1. Ahora para calcular el área del triángulo 1, dividiremos el triángulo en dos triángulos rectángulos, así calcularemos el área de cada uno y después se sumarán:



*Triángulo 1 (dividido en dos triángulos rectángulos)*

De la función trigonométrica del coseno para  $\gamma$  tenemos que:

$$\text{Seno } \gamma = \frac{\text{cateto}_{\text{opuesto}}}{\text{hipotenusa}} \quad (5.9)$$

De ésta función conocemos el ángulo  $\gamma$  (por consiguiente también el seno de  $\gamma$ ) y la hipotenusa, así que el cateto opuesto es la línea que divide a los dos triángulos (o altura) y que podemos conocer despejándola de la función trigonométrica, quedando de la siguiente manera:

$$\text{Cateto opuesto} = (\text{hipotenusa}) \times (\text{seno } \gamma) \quad (5.10)$$

Sustituyendo valores:

$$\text{Hipotenusa} = 26.6 \text{ cm.}$$

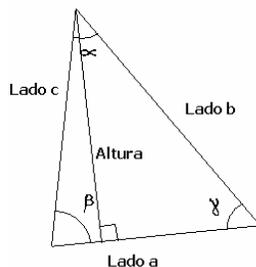
$$\text{Seno } \gamma = 0.8769$$

$$\text{Cateto opuesto} = \text{altura}$$

$$\text{Altura} = (26.6 \text{ cm.})(0.8769)$$

$$\text{Altura} = 23.3255 \text{ cm.}$$

Ahora las dimensiones totales del triángulo 1 son:



*Triángulo 1*

$$\begin{aligned} \text{Lado } a &= 17.5 \text{ cm.} \\ \text{Lado } b &= 26.6 \text{ cm.} \\ \text{Lado } c &= 23.8 \text{ cm.} \\ \alpha &= 40.1535^\circ \\ \beta &= 78.5662^\circ \\ \gamma &= 61.2802^\circ \\ \text{Altura} &= 23.3255 \text{ cm.} \end{aligned}$$

Ahora para el área del triángulo 1 tenemos que:

$$Area = \frac{base \times altura}{2} \quad (5.11)$$

La base es el *lado a*, por lo que el área es:

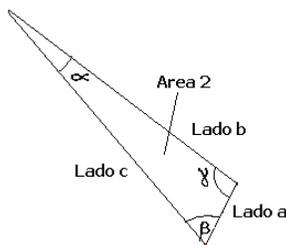
$$Area\_triangulo\_1 = \frac{(17.5cm)(23.3255cm)}{2}$$

$$\text{Área del Triángulo 1} = 204.0981 \text{ cm.}^2$$

### Triángulo 2

De la misma manera que se calculó el área del triángulo 1, se calculará el área del triángulo 2, al tratarse del mismo método se evitara las explicaciones de cada paso por haberse realizado ya.

El triángulo 2 tiene las siguientes dimensiones:



Triángulo 2

Lado  $a = 7.6 \text{ cm.}$   
Lado  $b = 21.6 \text{ cm.}$   
Lado  $c = 26.6 \text{ cm.}$

Donde  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  son los ángulos internos del triángulo.

Calculando los ángulos internos del triángulo tenemos:

Para  $\alpha$  tenemos (ec. 5.3):

$$\alpha = \text{Cos}^{-1} \frac{b^2 + c^2 - a^2}{2bc}$$

Sustituyendo los lados del triángulo:

$$\alpha = \text{Cos}^{-1} \frac{21.6^2 + 26.6^2 - 7.6^2}{2(21.6)(26.6)}$$

$$\alpha = 13.7139^\circ$$

Para  $\beta$  tenemos (ec. 5.5):

$$\beta = \text{Cos}^{-1} \frac{a^2 + c^2 - b^2}{2ac}$$

Sustituyendo los lados del triángulo:

$$\beta = \text{Cos}^{-1} \frac{7.6^2 + 26.6^2 - 21.6^2}{2(7.6)(26.6)}$$

$$\beta = 42.3605^\circ$$

Para  $\gamma$  tenemos (ec. 5.7):

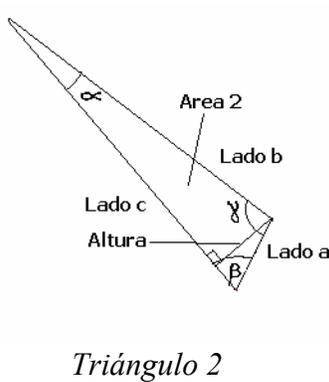
$$\gamma = \text{Cos}^{-1} \frac{a^2 + b^2 - c^2}{2ab}$$

Sustituyendo los lados del triángulo:

$$\gamma = \text{Cos}^{-1} \frac{21.6^2 + 7.6^2 - 26.6^2}{2(21.6)(7.6)}$$

$$\gamma = 123.9254$$

Para obtener la altura, dividimos el triángulo en dos y sacamos el cateto opuesto del ángulo  $\alpha$ , donde la hipotenusa es el *lado b* con la función trigonométrica del *seno* (ec. 5.9):



$$\text{Seno } \alpha = \frac{\text{cateto\_opuesto}}{\text{hipotenusa}}$$

Sustituyendo valores

$$\text{Hipotenusa} = 21.6 \text{ cm.}$$

$$\text{Seno } \alpha = 0.2370$$

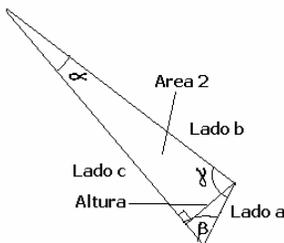
$$\text{Cateto opuesto} = \text{altura}$$

$$\text{Cateto opuesto} = (\text{hipotenusa}) \times (\text{Seno } \alpha)$$

$$\text{Altura} = (21.6 \text{ cm.})(0.2370)$$

$$\text{Altura} = 5.1192 \text{ cm.}$$

Ahora las dimensiones totales del triángulo 2 son:



$$\text{Lado } a = 7.6 \text{ cm.}$$

$$\text{Lado } b = 21.6 \text{ cm.}$$

$$\text{Lado } c = 26.6 \text{ cm.}$$

$$\alpha = 13.7139^\circ$$

$$\beta = 42.3605^\circ$$

$$\gamma = 123.9254^\circ$$

$$\text{Altura} = 5.1192 \text{ cm.}$$

Ahora para el área del triángulo (ec. 5.11), tenemos que:

$$\text{Area} = \frac{\text{base} \times \text{altura}}{2}$$

La base es el *lado c*, por lo que el área es:

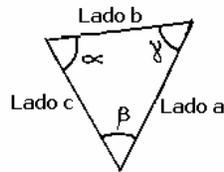
$$\text{Area}_{\text{triangulo}_2} = \frac{(26.6 \text{ cm})(5.1192 \text{ cm})}{2}$$

$$\text{Área del Triángulo 2} = 68.0853 \text{ cm.}^2$$

### Triángulo 3

Al igual que para los triángulos 1 y 2 el área del triángulo 3 se calculará con el mismo método, por lo que no se explicará cada paso.

El triángulo 3 tiene las siguientes dimensiones:



Triángulo 3

Lado  $a = 7.6 \text{ cm.}$

Lado  $b = 4.3 \text{ cm.}$

Lado  $c = 8.5 \text{ cm.}$

Donde  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  son los ángulos internos del triángulo.

Calculando los ángulos internos del triángulo tenemos:

Para  $\alpha$  (ec 5.3)

$$\alpha = \text{Cos}^{-1} \frac{b^2 + c^2 - a^2}{2bc}$$

Sustituyendo los lados del triángulo:

$$\alpha = \text{Cos}^{-1} \frac{4.3^2 + 8.5^2 - 7.6^2}{2(4.3)(8.5)}$$

$$\alpha = 63.1816^\circ$$

Para  $\beta$  tenemos (ec. 5.5):

$$\beta = \text{Cos}^{-1} \frac{a^2 + c^2 - b^2}{2ac}$$

Sustituyendo los lados del triángulo:

$$\beta = \text{Cos}^{-1} \frac{7.6^2 + 8.5^2 - 4.3^2}{2(7.6)(8.5)}$$

$$\beta = 30.3269^\circ$$

Para  $\gamma$  tenemos (ec. 5.7):

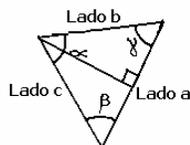
$$\gamma = \text{Cos}^{-1} \frac{a^2 + b^2 - c^2}{2ab}$$

Sustituyendo los lados del triángulo:

$$\gamma = \text{Cos}^{-1} \frac{7.6^2 + 4.3^2 - 8.5^2}{2(7.6)(4.3)}$$

$$\gamma = 86.4913^\circ$$

Para obtener la altura, dividimos el triángulo en dos y sacamos el cateto opuesto del ángulo  $\gamma$ , donde la hipotenusa es el lado  $b$  con la función trigonométrica del seno (ec. 5.9):



Triángulo 3

$$\text{Seno } \gamma = \frac{\text{cateto\_opuesto}}{\text{hipotenusa}}$$

$$\text{Cateto opuesto} = (\text{hipotenusa}) \times (\text{Seno } \gamma)$$

Sustituyendo valores:

$$\text{Hipotenusa} = 4.3 \text{ cm.}$$

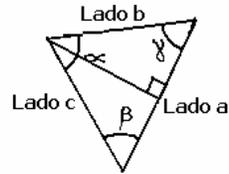
$$\text{Seno } \gamma = 0.0612$$

$$\text{Cateto opuesto} = \text{altura}$$

$$\text{Altura} = (4.3 \text{ cm.})(0.999960)$$

$$\text{Altura} = 4.2919 \text{ cm.}$$

Ahora las dimensiones totales del triángulo 3 son:



Triángulo 3

$$\begin{aligned} \text{Lado } a &= 7.6 \text{ cm.} \\ \text{Lado } b &= 4.3 \text{ cm.} \\ \text{Lado } c &= 8.5 \text{ cm.} \\ \alpha &= 63.1816^\circ \\ \beta &= 30.3269^\circ \\ \gamma &= 86.4913^\circ \\ \text{Altura} &= 4.2919 \text{ cm.} \end{aligned}$$

Ahora para el área del triángulo tenemos que (ec. 5.11):

$$\text{Area} = \frac{\text{base} \times \text{altura}}{2}$$

La base es el *lado a*, por lo que el área es:

$$\text{Area}_{\text{triangulo}_3} = \frac{(7.6\text{cm})(4.2919\text{cm})}{2}$$

$$\text{Área del Triángulo 3} = 16.3092 \text{ cm.}^2$$

Finalmente el área total del sistema es la suma de las áreas de los triángulos 1 y 2 menos el área del triángulo 3, por lo que esto es:

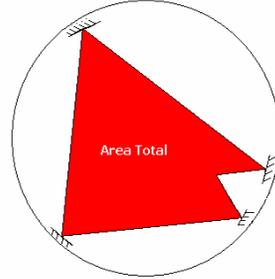
$$\text{Área Total} = \text{Área Triangulo 1} + \text{Área Triangulo 2} - \text{Área Triángulo 3}$$

$$\text{Área Total} = 204.0981 \text{ cm.}^2 + 68.0853 \text{ cm.}^2 - 16.3092 \text{ cm.}^2$$

$$\text{Área Total} = 255.8742 \text{ cm}^2$$

$$A = 0.02558742 \text{ m}^2 = 2.558742 \times 10^{-2} \text{ m}^2$$

En la figura 5.19 se muestra el área total que encierran los haces en contrapropagación.



**Fig. 5.19** Área encerrada por los haces en contrapropagación.

### Modelo del interferómetro de Sagnac

Los cálculos que nos permiten conocer el comportamiento del interferómetro, son las ecuaciones obtenidas para el efecto Sagnac en el capítulo 3, de ellas podemos deducir un modelo que nos muestre teóricamente el comportamiento del sistema completo y como se puede medir el defasamiento en los haces, además de ayudarnos a realizar la medición del patrón interferométrico, éstas ecuaciones son:

$$\Delta t_v = \frac{4A\Omega}{c^2} \quad (5.12)$$

*Ecuación de la diferencia de tiempo entre los haces en contrapropagación.*

$$\Delta\phi_R = \omega * \Delta t_v = \frac{4\omega A}{c^2} \Omega \quad (5.13)$$

*Ecuación de la diferencia de fase entre los dos haces.*

De éstas ecuaciones tenemos que la mayoría de los términos son constantes, como el área  $A$  encerrada por los haces (que ya se calculó), la frecuencia angular de la onda  $\omega$ , (ésta depende del láser que se emplee para éste caso se usó un láser a  $670 \text{ nm.}$ ) y la velocidad de la luz en el vacío  $c$  que es de  $3 \times 10^8 \text{ m/s.}$

El único término que no es constante es la velocidad angular del sistema, que es lo que se está midiendo con éste fenómeno, así que el resultado siempre dependerá de éste término.

Primeramente la frecuencia angular del láser ( $\omega$ ), es de:  $4.209734 \times 10^{-6} [\text{rad/s}]$ , éste dato es proporcionado por el fabricante del láser que se empleó.

Sustituyendo todas las constantes en las ecuaciones del efecto Sagnac (ec. 5.12 y ec. 5.13), tenemos:

$$\Delta t_v = \frac{4A\Omega}{(c)^2} = \frac{4(2.558742 \times 10^{-2})\Omega}{(3 \times 10^8)^2}$$

$$\Delta \phi_R = \frac{4\omega A\Omega}{c^2} = \frac{4(4.209734 \times 10^{-6})(2.558742 \times 10^{-2})\Omega}{(3 \times 10^8)^2}$$

Reduciendo las ecuaciones tenemos:

$$\Delta t_v = 1.137218 \times 10^{-18} \Omega$$

$$\Delta \phi_R = 4.787388 \times 10^{-24} \Omega$$

El análisis de dimensiones es:

$$A = [m^2]$$

$$\Omega = [^\circ/s]$$

$$\omega = [rad/s]$$

$$c = [m/s]$$

Nota: Para la velocidad angular del sistema ( $\Omega$ ), se puede considerar o no los grados, esto es:  $\Omega = [^\circ/s] = [1/s]$

$$\Delta t_v = \frac{\left[ \frac{[m^2] \left[ \frac{1}{s} \right]}{\left[ \frac{m}{s} \right]^2} \right]}{\left[ \frac{m^2}{s^2} \right]} = \left[ \frac{m^2 s^2}{m^2 s} \right] = [s]$$

$$\Delta \phi_R = \frac{\left[ \frac{[rad] \left[ \frac{m^2}{s} \right] \left[ \frac{1}{s} \right]}{\left[ \frac{m}{s} \right]^2} \right]}{\left[ \frac{m^2}{s^2} \right]} = \left[ \frac{(rad)(m^2)}{s^2} \right] = \left[ \frac{(rad)(m^2)(s^2)}{m^2 s^2} \right] = [rad]$$

Por lo tanto las ecuaciones que modelan al dispositivo construido con un área de  $2.558742 \times 10^{-2} m^2$  y con una fuente láser a  $670nm$  son:

$$\Delta t_v = 1.137218 \times 10^{-18} \Omega \quad (5.14)$$

*Ecuación de la diferencia de tiempo entre los haces en contrapropagación.*

$$\Delta\varphi_R = 4.787388 \times 10^{-24} \Omega \quad (5.15)$$

*Ecuación de la diferencia de fase entre los dos haces.*

De estas nuevas ecuaciones podemos deducir como se comporta el efecto Sagnac y las magnitudes que se obtendrán con ello.

Como se observa en las ecuaciones obtenidas (ec. 5.14 y 5.15), el dispositivo responde en forma lineal, esto es, que el defasamiento de los haces es directamente proporcional al movimiento angular del sistema, multiplicado por una constante, por lo que al sufrir el sistema un movimiento angular a una cierta velocidad, el sistema tendrá una determinada y única respuesta.

### **5.3.- Análisis de resultados del patrón de interferencia obtenido**

Una vez analizado, estudiado y construido el diseño propuesto del interferómetro de Sagnac, se obtuvo un modelo matemático que nos ayudó a suponer y predecir el comportamiento del sistema. Así la siguiente etapa de trabajo es la experimentación y observaciones del sistema completo, así como el análisis de los resultados arrojados por la experimentación.

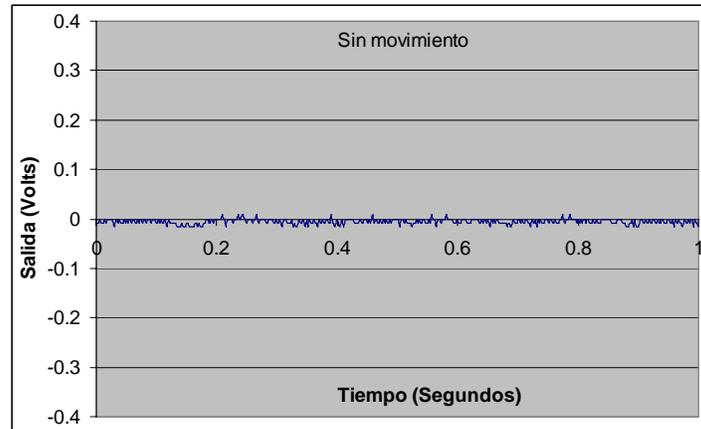
El análisis de resultados es muy sencillo, debido a que toda la etapa de transducción electrónica nos hace un procesamiento de la señal, disminuyendo procesos de análisis de gráficas, de ésta manera tenemos la obtención de los resultados, datos y magnitudes que se desean directamente.

Como se analizó en la etapa electrónica, la señal sensada es un voltaje de directa, el cual es directamente proporcional al movimiento del sistema, éste voltaje puede ser medido a través de un multímetro o voltmetro, pero también puede ser analizado con un osciloscopio, el cual nos muestra directamente el comportamiento de la señal en una gráfica. Para mayor facilidad de análisis y observación de la señal, se empleó para la experimentación un osciloscopio marca *Tecktronix TDS 5020C*, el cuál es digital y realiza adquisición de datos, lo que nos facilitó que se pudieran guardar las gráficas del comportamiento del sistema y de cada uno de los experimentos realizados.

Los experimentos realizados se muestran en tres etapas, pero cada uno de ellos fue realizado muchas veces para corroborar los resultados, esto fue en diferentes horas del día y diferentes días para ver el cambio en los resultados.

## EXPERIMENTO 1

La primera parte de experimentación es poner en funcionamiento el dispositivo y ver como trabaja sin un movimiento, esto nos ayuda a ver la cantidad de ruido que el sistema está registrando, en la figura siguiente se muestra la gráfica de éste experimento.



**Fig.5.20** Se muestra gráfica del sistema de sensado construido trabajando sin ninguna alteración de movimiento, esto es estático, así se puede observar el comportamiento y la cantidad de ruido del sistema. La escala de salida es la misma que se observa en los experimentos posteriores para comparar el ruido con la señal.

La cantidad de ruido que se observa en el sistema sin movimiento es muy pequeña, ya que el valor aproximado de la cantidad de ruido es de  $-0.016$  a  $0.8$  Volts, esto nos indica que el sistema es muy estable y que la cantidad de ruido al ser muy pequeña no influye en la señal de sensado como se verá en los experimentos realizados y en los resultados obtenidos.

En éste experimento se observa la cantidad de ruido del sistema fijo o sin movimiento, también se ve que el ruido no solo pertenece al sistema o a sus elementos, sino que es ruido proveniente de movimientos externos como temperatura, movimiento de personas u objetos cercanos, interferencia electromagnética, etc. Para ello se propone que el sistema debe de estar aislado de algunos tipos de ruido, como el provocado por movimientos mecánicos o de personas, así que los experimentos se realizaron cuando no hay estos ruidos. Para mayor referencia de la cantidad de ruido del sistema, las escalas están de acuerdo a los experimentos, esto se ve mejor en los valores numéricos de cada resultado en las gráficas.

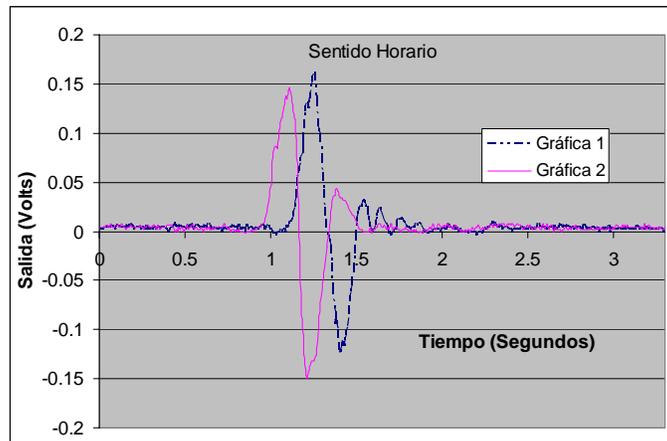
Los ruidos que se aislaron del sistema son el ruido mecánico, éste se aisló al poner el sistema a flotar en una cámara de aire evitando y filtrando movimientos provenientes de movimientos externos como de personas u algún otro movimiento; el ruido óptico se logró aislar al realizar los experimentos en ausencia de luz, esto cuando era de noche y tapando el sistema de cualquier fuga de luz con una caja o en un cuarto oscuro. Los demás ruidos como el electromagnético y el ambiental (temperatura, viento, humedad, etc.) son muy

pequeños como para que influyan en los resultados de los experimentos, así que no se realizó ningún filtrado extra, solo el electrónico.

## EXPERIMENTOS 2.- SENTIDO HORARIO

Los experimentos realizados fueron a diferentes velocidades angulares en el mismo sentido de giro y ángulo, además de que cada uno de los experimentos fue realizado aproximadamente 10 veces durante varios días, las gráficas mostradas fueron escogidas aleatoriamente, ya que todas son muy similares entre sí, incluso se puede llegar a pensar que se trata de la misma gráfica, solo se puede ver la diferencia con los datos de origen que nos da el osciloscopio. Esto nos muestra la repetitibilidad del sistema además de su exactitud y precisión. Para poder observar el grado de repetibilidad que tiene éste sistema, se muestran en una sola gráfica los resultados de dos experimentos distintos a una velocidad similar, además de que esto sirve para poder observar los comportamientos y tener puntos de comparación entre ambos experimentos y evitar tener muchas gráficas o figuras que se puedan confundir.

Gráficas de giro horario a  $90^\circ$ , El tiempo que dura el giro se obtiene de los puntos de la gráfica donde comienza la perturbación a donde termina.

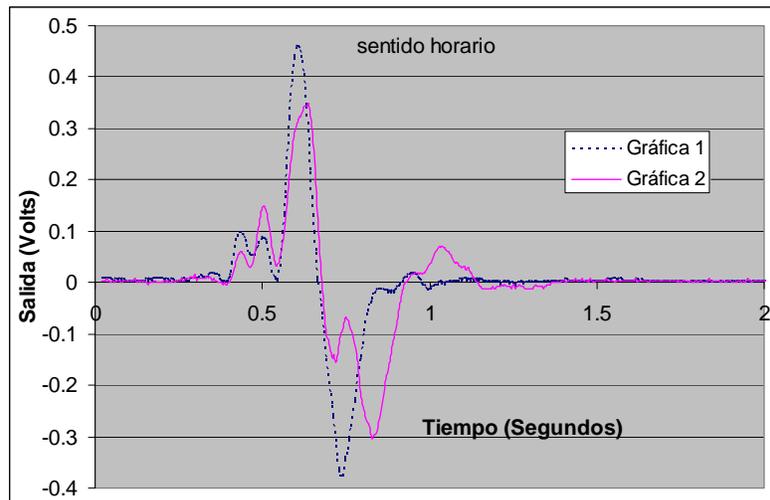


**Fig.5.21** Para la gráfica 1 (punteada) de éste experimento, tenemos un tiempo de 996 milisegundos que tardó el giro en sentido horario, el cuál fue a  $90^\circ$ , esto nos da una velocidad angular de:  $90.3614$  ( $^\circ/s$ ) y voltaje de 0.163Volts. La gráfica 2 (continua) nos muestra un tiempo de perturbación de 1.0032 segundos a  $90^\circ$  de giro, por lo que la velocidad angular es de:  $89.7129$  ( $^\circ/s$ ) con un voltaje de salida de 1.42 Volts.

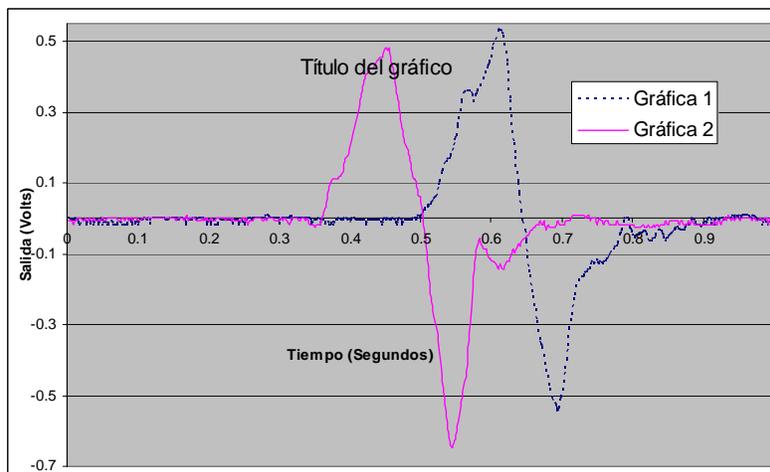
La primera observación que realizamos es el voltaje de salida que se obtiene en ambas curvas de las gráficas, ya que aunque son similares, el resultado de la velocidad angular es diferente por muy poco, debido a errores humanos y de medición, esto se ve mas claramente en el voltaje de salida, esto es debido a que el voltaje de salida es dependiente de la velocidad angular a la que el sistema esté sometido, por lo que obtendremos un valor de voltaje correspondiente a esa velocidad. Aunque solo se trata de dos grados de diferencia aproximadamente entre cada uno de los experimentos, la diferencia es demasiado pequeña e imperceptible a simple vista, pero con el análisis y visualización de las curvas observamos que hay una diferencia de voltaje ya mayor que nos permite deducir que

podemos obtener velocidades angulares mas pequeñas e imperceptibles a simple vista y también diferencias entre movimientos angulares aparentemente iguales.

Con el mismo ángulo y sentido de giro, se realizaron varios experimentos más, pero a una velocidad mayor, esto es a una velocidad angular superior a las anteriores, para poder determinar la hipótesis propuesta anteriormente de que se puede tener una mayor sensibilidad y ver cuanto puede ser ésta. Las figuras siguientes muestran las gráficas obtenidas.



**Fig. 5.22** Muestra la gráfica 1 (punteada) tenemos un tiempo de 748 milisegundos que tardó el giro en sentido horario, el cual fue a  $90^\circ$ , esto nos da una velocidad angular de:  $120.3208$  ( $^\circ/s$ ) y voltaje de 0.35 volts. Para la gráfica 2 (continua) tenemos un tiempo de 652 milisegundos que tardó el giro en sentido horario, el cuál fue a  $90^\circ$ , esto nos da una velocidad angular de:  $138.036$  ( $^\circ/s$ ) y voltaje de 0.46 Volts.



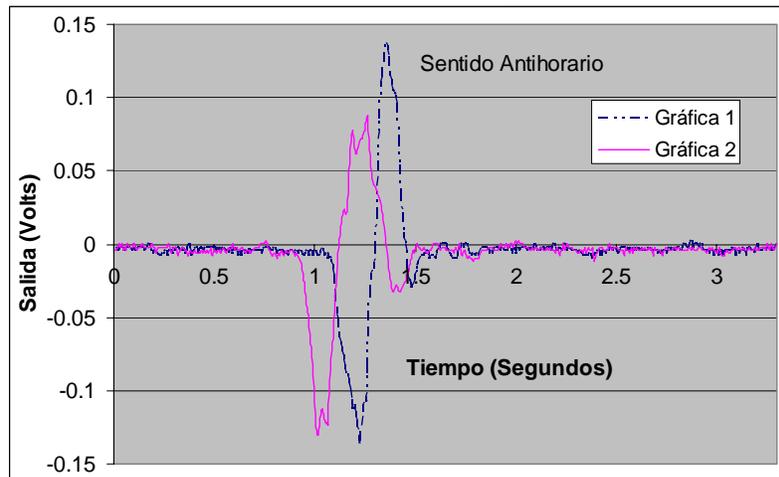
**Fig. 5.23** En la gráfica 1 observamos un tiempo de perturbación de 314 milisegundos para  $90^\circ$  y un voltaje de salida de 0.528 Volts, con lo que obtenemos un velocidad angular de  $286.62$  ( $^\circ/s$ ). La gráfica 2 muestra un tiempo de movimiento de 388 milisegundos a  $90^\circ$  con un voltaje de salida de 0.456 Volts, Con una velocidad angular calculada de  $231.95$  ( $^\circ/s$ ).

Los resultados obtenidos van de acuerdo a las hipótesis realizadas, esto es que, al existir un incremento de velocidad de giro, aumenta la velocidad angular y por lo tanto también se incrementa el voltaje de salida. Ésta conclusión es una de las más importantes, ya que con ella se está comprobando el modelo matemático obtenido, así como prediciendo el comportamiento para algunos otros tipos de movimientos sin la necesidad de experimentar más a fondo y muchas veces, por ultimo la experimentación nos lleva a realizar mejoras sobre el sistema y con el análisis de resultados, observamos que movimientos al parecer similares en velocidad angular a simple vista no lo son en realidad.

### EXPERIMENTOS 3.- SENTIDO ANTIHORARIO.

Con el mismo procedimiento con que se realizaron los experimentos mostrados anteriormente para sentido horario, se efectuaron los experimentos para sentido antihorario; esto es, con las mismas condiciones de giro, filtrado de ruido mecánico y óptico, además de la cantidad de repeticiones de cada experimento y análisis de sus resultados.

La figura 5.24, nos muestra las gráficas de los primeros experimentos a una velocidad angular de aproximadamente  $90(^{\circ}/s)$  para el sentido antihorario, posteriormente tenemos otras dos figuras que muestran los resultados del sistema sometido a velocidades angulares superiores y con las mismas características de sentido y filtrado.

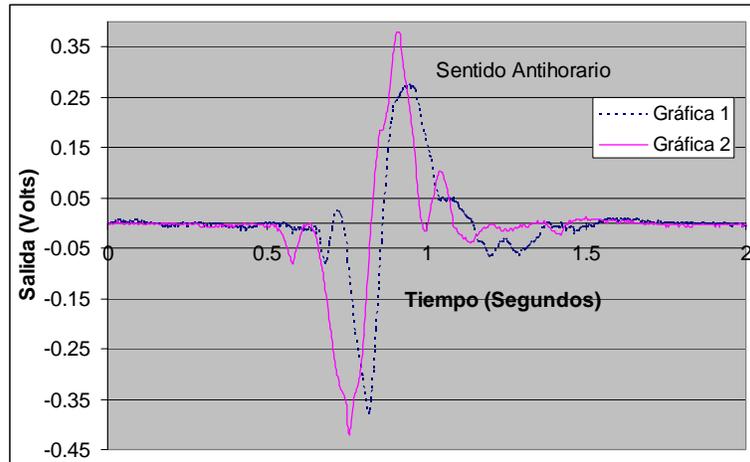


**Fig. 5.24** Muestra la gráfica 1, donde se muestra el experimento del interferómetro de Sagnac con un movimiento en sentido antihorario a  $90^{\circ}$  con un tiempo de 0.9866, un voltaje de salida de  $-0.134$  y una velocidad angular de  $91.22(^{\circ}/s)$ . En la gráfica 2 observamos un tiempo de perturbación de 1.0062 segundos para  $90^{\circ}$  y un voltaje de salida de  $-0.13$  Volts, con lo que obtenemos un velocidad angular de  $89.4454(^{\circ}/s)$ .

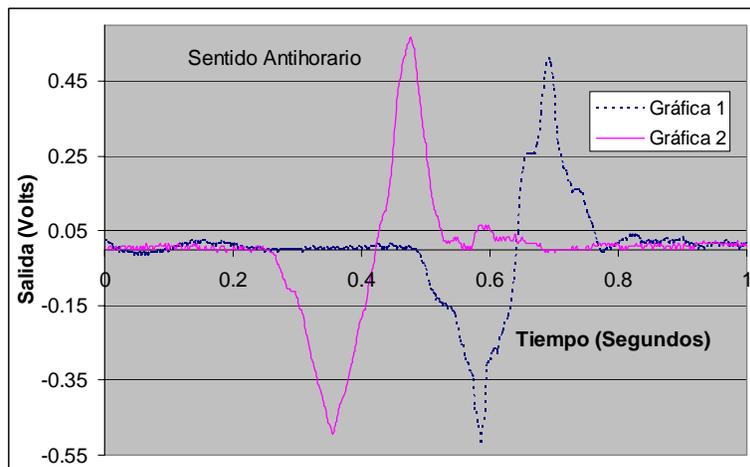
La primera observación que resalta en éstas gráficas es la dirección que toma la curva, ya que éstas comienzan en sentido negativo a diferencia de las gráficas para sentido horario que son positivas, esto nos muestra que el signo de la señal de salida del interferómetro va de acuerdo al sentido de giro del sistema, esto debido a la modificación propuesta y

analizada anteriormente del efecto navaja con el que comprobamos la hipótesis del cálculo del sentido de giro.

Las dos siguientes figuras, muestran los resultados del sistema sometido a una velocidad superior, de la misma manera en que se realizó para el sentido horario.



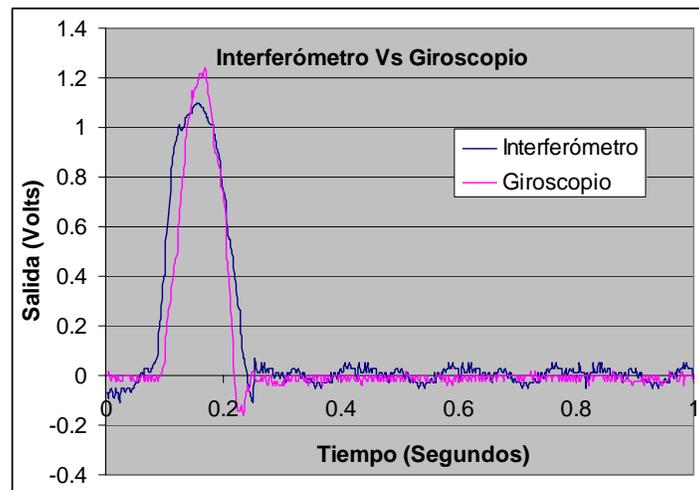
**Fig. 5.25** Muestra la gráfica 1 que el sentido de giro del sistema es antihorario, con un tiempo de 728 milisegundos a  $90^\circ$  y con un voltaje de salida de -0.38 Volts, con lo que tenemos una velocidad angular de  $123.62(^\circ/s)$ . La gráfica 2 muestra el resultado del interferómetro sometido a un giro de  $90^\circ$  en un tiempo de 0.678 milisegundos, lo que nos arroja una velocidad angular de  $133.13(^\circ/s)$  y con un voltaje de salida de -0.422 Volts.



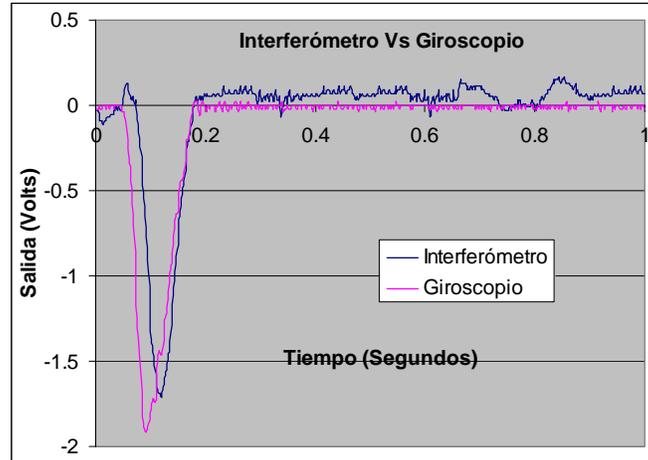
**Fig 5.26** Muestra la gráfica 1 muestra el resultado del movimiento al que el sistema estuvo sometido, a  $90^\circ$  de giro en sentido antihorario en un tiempo de 0.304 milisegundos, con un voltaje de salida de -0.496 Volts y una velocidad angular de  $296.05(^\circ/s)$ . La gráfica 2 muestra que el sistema estuvo sometido a un giro antihorario a  $90^\circ$  en un tiempo de 294 milisegundos, lo que da una velocidad angular de  $306.12(^\circ/s)$  y con un voltaje de salida de -0.516 Volts.

Las observaciones que tenemos sobre éstas últimas gráficas son similares a todas las anteriores, ya que éstas muestran el comportamiento del sistema a una velocidad angular superior a las que había sido sometido, por lo que los resultados que se obtienen van de acuerdo a las hipótesis realizadas, esto es, que se incrementó la velocidad angular y el resultado fue un incremento en el voltaje de salida y una disminución del tiempo.

Después de todas estas experimentaciones, se observa que el comportamiento del sistema es muy sencillo y fácil de deducir resultados. Pero siempre queda alguna duda de las experimentaciones que se realizan para cualquier investigación, para anular cualquier duda sobre estos resultados, lo más conveniente es hacer una comparación de resultados con algún otro aparato que realice la misma función, para esto se realizaron los mismos experimentos descritos con el interferómetro construido y con un giroscopio de fibra óptica marca *fizoptika* trabajando al mismo tiempo, de ésta manera se obtienen las mismas condiciones de trabajo de ambos sistemas y los resultados pueden ser vistos al mismo tiempo como se muestra en las dos siguientes Figuras.



**Fig. 5.27** Esta gráfica muestra el comportamiento del interferómetro construido y un giroscopio de fibra óptica trabajando simultáneamente, la respuesta de ambos es similar aunque el interferómetro tuvo que ser amplificado al doble para que el voltaje de salida fuera similar al del giroscopio. El giro fue de  $90^\circ$  con un tiempo de 0.192 milisegundos con voltaje de salida 1.1 para el interferómetro y de 1.24 Volts para el giroscopio, ambos a una velocidad angular de  $468.75$  ( $^\circ/s$ ) y con sentido horario.



**Fig. 5.28** En ésta gráfica se muestra la curva de comportamiento del interferómetro y un giroscopio de fibra óptica trabajando simultáneamente con movimiento en sentido antihorario,  $90^\circ$  en un tiempo de 0.136 segundos y un voltaje de salida de -1.71 Volts, lo que da una velocidad angular de  $661.76(^\circ/s)$ .

Al analizar las gráficas que comparan al interferómetro de Sagnac con un giroscopio de fibra óptica de marca conocida, podemos observar que el comportamiento de ambos dispositivos es similar, esto nos lleva a decir que el interferómetro construido responde de la misma forma que un giroscopio, con esto podemos estar seguros de que el dispositivo y su construcción tienen la respuesta deseada.

Todas las gráficas mostradas y las conclusiones sobre cada una de ellas, pueden ser englobadas en unas conclusiones generales, para poder hablar del sistema completo y su comportamiento, esto se hace en el análisis de resultados finales.

## ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

El objetivo de éste trabajo fue construir y mejorar un sensor de velocidades angulares a través del fenómeno físico de interferometría. El diseño completo del sistema interferométrico construido, tuvo muchas etapas para su realización, etapas como construcción, propuesta de diseño, cálculos físico-matemáticos y análisis de resultados. Todos ellos con la finalidad de lograr el objetivo, así como predecir y mejorar los resultados que se estaban buscando; para esto se realizó la investigación del fenómeno físico del interferómetro, posteriormente se realizaron los ajustes y modificaciones en la construcción del sistema, finalmente tenemos el análisis matemático del sistema y sus resultados que se exponen en éste apartado final.

Todos estos pasos que se siguieron, fueron con la finalidad de llegar a tener un dispositivo que tuviera un comportamiento eficaz, una gran sensibilidad, exactitud y repetibilidad.

Los resultados obtenidos fueron realizados mediante varias mediciones y experimentaciones de la magnitud física a medir (velocidades angulares), pero todos ellos con las mismas condiciones de filtrado, esto es con las mismas condiciones en la etapa de transducción electrónica, condiciones ambientales, ruido mecánico y óptico (Éstas condiciones fueron analizadas previamente). Por esto mismo se da un análisis de resultados general, en el que todas las observaciones son mostradas y estudiadas para el comportamiento del sistema en cualquier condición de movimiento o velocidad angular.

La construcción del sistema interferométrico, llevó consigo algunas modificaciones al sistema interferométrico original, con la idea de mejorar algunos aspectos de él, como exactitud, sensibilidad y reducción de ruidos. Para esto se realizaron propuestas y cambios en el diseño físico, de estos podemos concluir que: primeramente se propuso adicionar una lente que colima el haz proveniente de la fuente. Esto con la finalidad de concentrar el spot de los haces en una pequeña área y evitar fugas de estos a través de los espejos, además de disminuir ruido por movimientos mecánicos en los espejos, ya que ahora no es necesario tener una alineación muy exacta de estos. Debido a ésta lente, no es indispensable construir bases para espejos muy complicadas con sistemas mecánicos para la calibración, la lente empleada es una lente sencilla biconvexa. La adición de ésta primera lente nos lleva a realizar un cambio adicional para alinear los haces posteriormente, éste cambio es la segunda propuesta, la cuál fue adicionar una lente a la salida de los haces para formar el patrón interferométrico, esto con la finalidad de que aunque los haces no se encuentren alineados, con ésta lente se abren los spots de los haces y se hacen coincidir en el espacio para formar el patrón interferométrico, además de amplificar el tamaño del mismo. Con ésta lente evitamos más aun la necesidad de alinear completamente los haces, solo es necesario que estén próximos entre sí para poder intersectarlos con la lente. Ésta lente fue una lente cóncavo-convexa.

Otra propuesta importante fue la de emplear el efecto navaja para que el sistema pudiera realizar la distinción de sentido de giro a la que fue sometido. Ésta propuesta necesito de un análisis del comportamiento del sistema durante el movimiento angular y de los fenómenos físicos involucrados para poder realizar el mejor ajuste e implementación de éste método.

## ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Las gráficas obtenidas, muestran las curvas de comportamiento de la señal de salida del sistema interferométrico ante un movimiento angular, por lo que el resultado del mismo es la representación gráfica del movimiento. Al analizarse las gráficas, de ellas se puede conocer la velocidad angular a la que se somete el sistema, e incluso la aceleración angular; así como las variaciones de estos dos parámetros durante el movimiento, para ello hay dos tipos de curvas mostradas que son las principales para el análisis, estos dos tipos de curvas, son la respuesta al sentido de giro, ya que cuando la curva presenta un máximo de voltaje positivo, el giro al que se sometió el sistema fue en sentido horario, por lo tanto cuando existe un máximo de voltaje negativo, el giro al que se sometió el sistema fue en sentido antihorario.

Los movimientos experimentales realizados, son movimientos no uniformes ni en velocidad y/o aceleración; cuando se aplica el movimiento se parte de una velocidad cero hasta llegar a una velocidad máxima, para después ir disminuyendo hasta llegar nuevamente a una velocidad cero, de ahí la forma de la curva. Por lo tanto al incrementar la velocidad angular a la que se somete el sistema, éste también responde con un voltaje de salida diferente, en éste caso mayor en magnitud, de acuerdo al sentido de giro, es decir, que para el sentido horario el voltaje de salida será positivo y se incrementará el valor de voltaje, sí se incrementa la velocidad angular, de la misma manera para el sentido antihorario tenemos que, el voltaje de salida tendrá un voltaje negativo y su magnitud se incrementará al incrementar la velocidad angular. Existen resultados que pueden no estar muy congruentes con otras gráficas o con la lógica de éstas, esto es que, cuando se llega a incrementar o disminuir la velocidad angular al sistema, el voltaje de salida no es un cambio lineal, ósea que no se obtiene un valor de salida como se espera, esto se debe a errores externos, como errores de medición del ángulo, movimientos no lineales o variaciones en el movimiento, ruido externo, etc.

La repetibilidad de los experimentos y la verificación de estos, nos ayudaron a conocer mejor el comportamiento del sistema, además de dar mayor confiabilidad a cada experimentación.

La mejor manera de comprobar el comportamiento y desempeño del sistema, es someterlo a prueba con otro sistema que realice la misma función a él, para así realizar las mismas experimentaciones con ambos y hacer una comparación de resultados. Ésta comprobación se realizó con un giroscopio de fibra óptica, los resultados se confirman en las últimas gráficas mostradas, en las cuáles se observa que el comportamiento de ambos dispositivos es similar (prácticamente idéntico). Con ésta comparación de resultados del giroscopio de fibra óptica con el interferómetro construido, tenemos que, el interferómetro construido tiene una velocidad de respuesta similar al giroscopio, sensibilidad suficiente para realizar la comparación, ya que se tuvo que amplificar la señal de salida al doble (se esperaba superior la amplificación, hasta de 20 veces), sentido de giro detectable y en la misma dirección gráfica para ambos.

## ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

La implementación de un sistema interferométrico puede llegar a ser muy complejo, pero la construcción de éste sistema es muy sencilla de realizar y sin muchas técnicas de fabricación, medición, adquisición de datos y desarrollo matemático; ya que las mejoras realizadas ya fueron analizadas en ésta tesis, así como todos los desarrollos técnicos, matemáticos y científicos. Una de las grandes ventajas obtenidas en la construcción de éste sistema interferométrico para la medición de movimientos angulares, es su bajo costo, ya que cada uno de los elementos empleados puede ser adquirido fácilmente y a bajo costo; para diferentes aplicaciones puede cambiar un poco el costo, también puede cambiar dependiendo de la sensibilidad que se requiera alcanzar. La construcción de sistemas como éste lleva consigo un análisis sobre la ingeniería de construcción, esto es, la rentabilidad, aplicaciones, bajo costo y desempeño del sistema completo que pueden ser adicionadas posteriormente para una explotación de éste.

Con el cambio del esquema interferométrico original, se obtiene una respuesta superior del sistema a como se propone originalmente, ésta es la principal aportación de ésta tesis, como se mencionó durante el desarrollo del capítulo 4, estos cambios son en la etapa electrónica, esquemática o de diseño, adición de elementos al sistema, visualización y análisis de resultados.

**PERSPECTIVAS Y NUEVAS EXPERIMENTACIONES**

**I.- Nuevas Aplicaciones del efecto Sagnac**

El campo de estudio en la óptica y optoelectrónica es todavía muy grande, sensores ópticos, dispositivos optoelectrónicos, sistemas de comunicación, etc. Gracias al avance de estos dispositivos en la actualidad se cuenta con grandes avances tecnológicos en muchas áreas del conocimiento y sus aplicaciones. Algunos de estos instrumentos nuevos están basados en viejos esquemas, mejorándolos y proporcionándoles nuevas aplicaciones gracias a la sensibilidad que ahora tienen, un ejemplo claro es la fibra óptica, con la cual no solo se han encontrado aplicaciones en las comunicaciones, también existen muchísimos dispositivos de sensado que están basados en la fibra óptica y en las características de ésta, otros dispositivos ópticos son los láseres, fotosensores, resonadores ópticos, sustratos para guías de onda, etc. todos ellos cuentan con nuevas aplicaciones en todos los campos mencionados.

Así el interferómetro de Sagnac también cuenta con otras aplicaciones todavía no exploradas por completo, es por ello que dentro de las perspectivas menciono algunas de éstas investigaciones que se realizaron como parte complementaria de ésta tesis. Éstas aplicaciones pueden llegar a ser mejoradas notablemente, cambiando algunas de las características del esquema interferométrico para darle una mejor sensibilidad al parámetro en cuestión. De la misma manera que se realizaron todas las etapas de desarrollo del sistema interferométrico para sensado de velocidad angular, se puede desarrollar un sistema interferométrico para sensado de campos eléctricos, magnéticos y de desplazamientos micrométricos o hasta nanométricos.

**II.- Medición de Campo Magnético, eléctrico y desplazamientos en baja escala (micrómetros)**

Con el mismo dispositivo construido para ésta tesis, se realizaron pruebas de sensado para otros parámetros aparte de la velocidad y movimientos angulares, estos parámetros como ya se mencionó, son campo magnético y desplazamientos micrométricos únicamente. Éstas mediciones son solo experimentales, ya que al ser parte complementaria no se profundizó en los desarrollos físico-matemáticos de estos fenómenos físicos, solo se desea mostrar los alcances de éste proyecto y del interferómetro de Sagnac en general.

Algunas de las aclaraciones que mencionaré son, que la adquisición de datos se realizó con un multímetro digital marca Agilent el cual realiza adquisición de datos por computadora por más tiempo que el osciloscopio, lo que permite tomar medidas de más duración temporal, también se realizaron algunos cambios en el esquema interferométrico para mejorar la sensibilidad del sistema.

## PERSPECTIVAS Y NUEVAS EXPERIMENTACIONES

Debido a que el sistema está diseñado para medir velocidades angulares, se tuvieron que cambiar los parámetros de filtrado y amplificación electrónica y así conseguir una mayor sensibilidad de cada parámetro.

Para la medición de cada parámetro, se adicionaron algunos elementos, asimismo en la medición de desplazamientos micrométricos se emplearon elementos mecánicos en un espejo del camino óptico, para determinar la magnitud de cada movimiento. Para la medición del campo magnético se utilizó un imán permanente únicamente.

Los resultados obtenidos no se muestran, ya que solo se pretende señalar que el sistema construido puede funcionar para la medición de otros parámetros físicos, distintos a los de movimientos angulares, en los cuales se puede cambiar o mezclar el esquema del interferómetro con otros sistemas mecánicos, electrónicos u ópticos.

Finalmente se realizó una experimentación adicional, en la cual se pretende incrementar la sensibilidad del sistema, esto se realizó al tratar de medir la máxima sensibilidad del sistema, pero nos enfrentamos a un problema, el ruido a ultrabaja frecuencia, éste ruido conocido como *drift* se presenta cuando se tratan de realizar mediciones de baja escala. Además éste ruido es muy complicado de filtrar por medios electrónicos, así que una propuesta fue la de adicionar un elemento al esquema interferométrico, éste elemento es un piezoeléctrico que vibra a una frecuencia de entrada que se le aplique, éste elemento se colocó en uno de los espejos, con esto se elimina gran parte del ruido a baja frecuencia y se aumenta parte del de alta frecuencia, pero esto no es de mucha importancia para magnitudes de movimiento muy pequeñas.

En estos experimentos finales, se trata de mostrar los alcances que se pueden tener con el sistema interferométrico construido, con las modificaciones propuestas en ésta tesis. Asimismo se abren posibles modificaciones futuras para éste sistema y aplicaciones nuevas. Además éste apartado sobre perspectivas da una terminación a una serie de investigaciones y experimentaciones para ésta tesis, en la que se decidió solo tomar como principal objetivo, el desarrollo de un sistema interferométrico para la medición de velocidades angulares únicamente.

## **APLICACIONES DEL EFECTO SAGNAC**

Salvador Palma Vargas, G. Eduardo Sandoval Romero, Angélica Ramírez Ibarra  
Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, UNAM  
[ingsalvargas@yahoo.com.mx](mailto:ingsalvargas@yahoo.com.mx), [eduardos@aleph.cinstrum.unam.mx](mailto:eduardos@aleph.cinstrum.unam.mx),  
[aribarra2@hotmail.com](mailto:aribarra2@hotmail.com)

### **INTRODUCCION**

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, éste es el caso del giroscopio de fibra óptica. Éste dispositivo es ampliamente usado como sensor de rotación de 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. Éste aparato está basado en el efecto Sagnac, el cuál es la base de estudio de ésta 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 desfaseamiento de las señales que viajan a través del lazo interferométrico.

En un principio el interferómetro de Sagnac solo pudo ser empleado para mediciones en las cuales se tenían grandes cambios en el desfaseamiento de las señales del lazo interferométrico, ya que no se contaba con los avances necesarios para poder realizar detecciones de pequeños cambios de fase en las señales, debido a que los sistemas de medición como fotodetectores, amplificadores, filtros, etc. no tenían la capacidad de los sistemas que existen ahora. Es por ello que parte de nuestros experimentos se basan en los avances electrónicos para poder hacer detecciones de cambios de fase de hasta menos de 0.1nm en un interferómetro de Sagnac con área de 0.025m<sup>2</sup>.

El interferómetro de Sagnac tiene aplicaciones similares a los interferómetros de Fabry-Perot y Mach-Zendel como son mediciones de longitudes o desplazamientos muy pequeños hasta de nanómetros, la diferencia entre ellos es el rango de sensado de estos desplazamientos ya que cada interferómetro tiene diferente rango y resolución, esto depende de las características físicas con las que está constituido cada interferómetro.

### **BASES TEORICAS DEL EFECTO SAGNAC**

El principio físico del efecto Sagnac es explicado con un cambio de fase entre los haces en contrapropagación, por lo que éste cambio de fase es dependiente del área encerrada por el camino óptico de los haces, además de la velocidad angular que sufre todo el sistema. En los sistemas modernos, éste camino óptico es a través de una fibra óptica, con lo cual al tener un enrollado de fibra con muchas vueltas aumentamos el área del sistema y así ampliamos su sensibilidad. En el esquema del interferómetro el área es demasiado pequeña, de lo contrario se obtendría un sistema demasiado grande, para ello se emplean amplificadores de gran magnitud y eficiencia para poder obtener resultados favorables y evitar éste problema.

## PUBLICACION DESPRENDIDA DE ESTE TRABAJO

La diferencia de fase del interferómetro de Sagnac,  $\Delta\phi$ , está dada por:

$$\Delta\phi_R = \frac{4\omega}{v^2} A * \Omega ; \dots\dots\dots(1)$$

Donde:

- $\omega$ - es la frecuencia angular de la luz,
- $\Omega$ - es la velocidad angular del sistema,
- $v$ - es la velocidad de la luz en el aire,
- $A$ - es el área encerrada por el camino óptico.

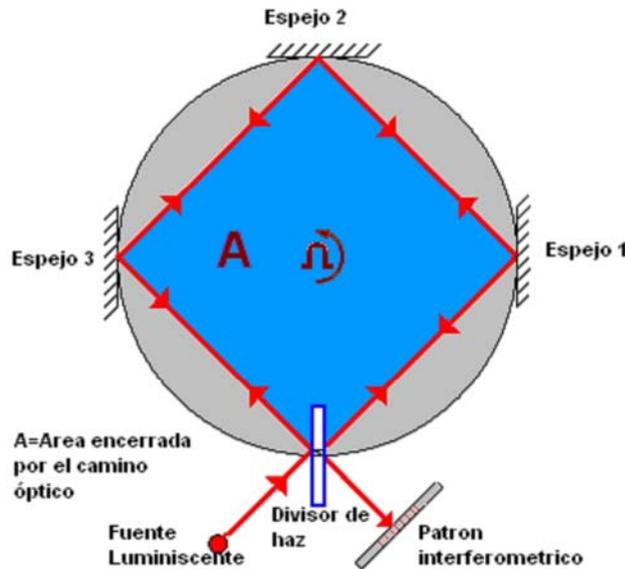


Figura 1:El interferómetro de Sagnac ilustrado en la figura, muestra los componentes básicos del sistema, los cuales son: una fuente luminiscente, un divisor de haz y 3 o mas espejos que forman el camino óptico para obtener con ello un patrón interferométrico.

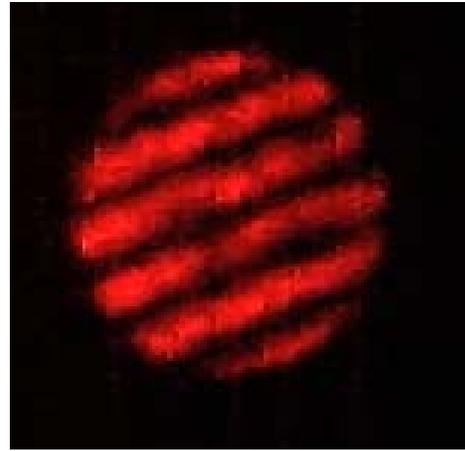
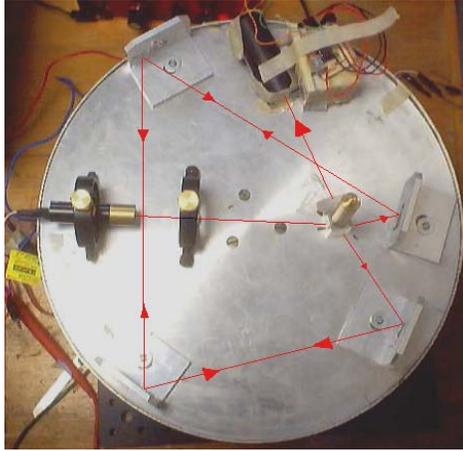
Éste fenómeno es aplicable para cualquier lazo cerrado, no necesariamente regular. Por ejemplo el haz puede dividirse en dos y viajar por un camino óptico circular o puede ser completamente irregular, con ello afirmamos que el efecto es independiente del camino óptico en que se propaguen los dos haces en contrapropagación, pero si dependiente del área encerrada por los haces.

### TRABAJO EXPERIMENTAL

Uno de los objetivos de éste trabajo es el de construir un sistema interferométrico con base en el efecto Sagnac con la característica de que su funcionamiento sea empleado para realizar mediciones físicas como velocidades angulares, campos magnéticos y desplazamientos a pequeña escala (micrómetros). La característica especial del sistema radica en que fue construido en la configuración básica y sencilla del efecto, esto con la finalidad de poder trabajar con los nuevos sistemas de amplificación y sensado que ahora existen y obtener resultados buenos, además de tener la ventaja de poder interactuar directamente con los haces que viajan a través de él y con esto tener una gran sensibilidad a cambios en la trayectoria de los haces.

**PUBLICACION DESPRENDIDA DE ESTE TRABAJO**

El sistema construido que se muestra en la figura 2, es similar al sistema interferométrico ideal que se propone en el efecto Sagnac, el cuál consta de una fuente luminiscente, un divisor de haz y unos espejos que forman el camino óptico, con lo cual podremos obtener un patrón interferométrico para realizar análisis de resultados.



*Fig. 2. Interferómetro de Sagnac en configuración de lazo abierto.*

*Fig. 3. Patrón interferométrico obtenido con éste dispositivo*



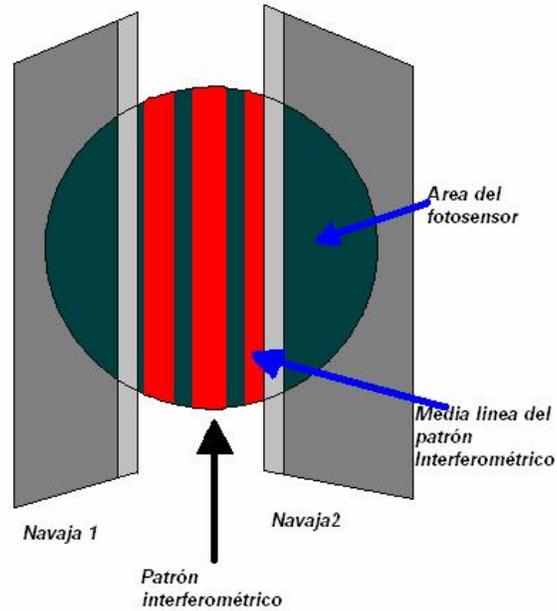
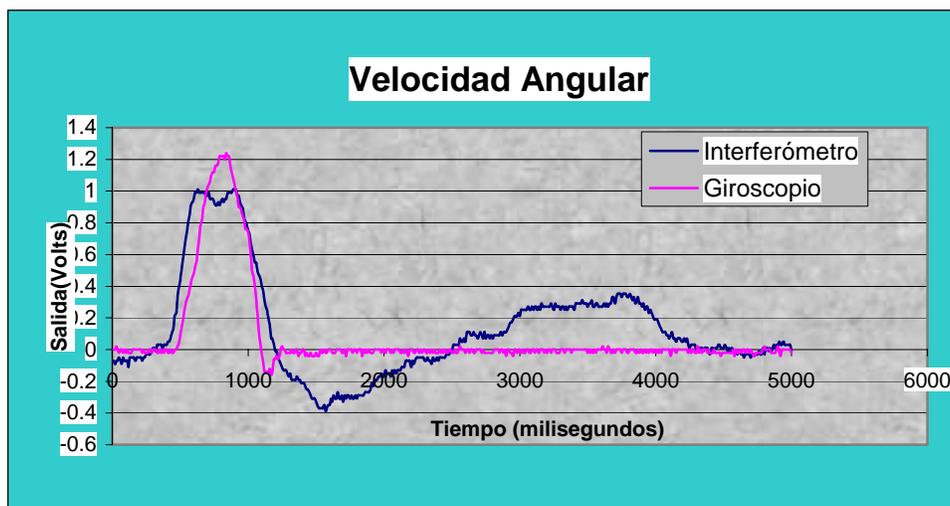


Figura 5: Efecto navaja.- Se utiliza una parte del patrón interferométrico y el fotodetector solo ve la parte que se desea, de ésta manera se divide una de las líneas a la mitad y se obtiene que la sensibilidad del sistema sea mejor

## RESULTADOS

### A.- Sensor de velocidad Angular

Una de las formas de aplicación sencilla de un interferómetro de Sagnac, es como sensor de velocidad angular, por lo que éste dispositivo que se desarrolló cumple completamente con éste objetivo, además con el empleo de sistemas de amplificación de señales y filtrado podemos explotar el dispositivo de ésta forma, una manera de comprobar los resultado obtenidos para la medición de parámetros físicos de velocidad angular, es con otro dispositivo similar como es el ya desarrollado giroscopio de fibra óptica el cuál también está basado en el efecto Sagnac.



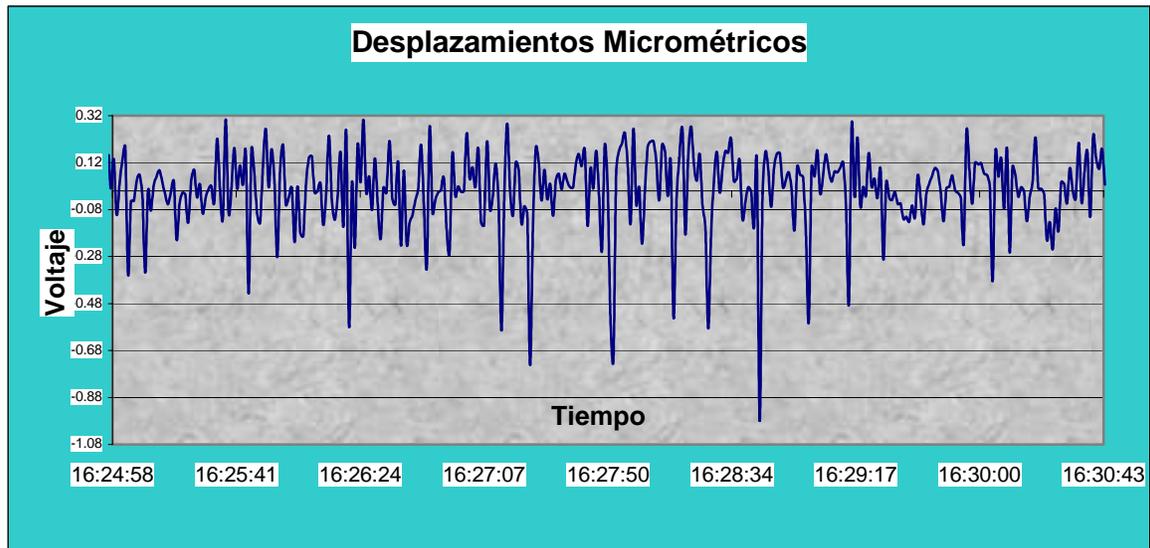
Gráfica 1: Velocidad angular (Tiempo vs. Voltaje)

## PUBLICACION DESPRENDIDA DE ESTE TRABAJO

La gráfica nos muestra la comparación entre el interferómetro de Sagnac que desarrollamos y el giroscopio de fibra óptica, ambos trabajando al mismo tiempo y por lo tanto a la misma magnitud de velocidad angular. La salida entregada por ambos dispositivos está en Volts, éste resultado es directamente proporcional al ángulo de desplazamiento que sufrieron los aparatos que fue de aproximadamente  $90^\circ$  y el tiempo está directamente en la gráfica. Con estos resultados podemos determinar la velocidad angular directamente con ambos dispositivos. También observamos que las gráficas son muy similares, la diferencia es la cantidad de ruido que aun conserva el interferómetro de Sagnac a diferencia del giroscopio de fibra óptica.

### B.- Sensor de desplazamientos o esfuerzos

Debido a la manera en que viajan los haces en el lazo interferométrico, se tienen las mismas características tanto ambientales como de pérdidas en cada uno de estos haces y éstas se cancelan al recombinarse los haces; pero de la misma manera el esquema es vulnerable a otros tipos de efectos como esfuerzos o desplazamientos en los soportes de los espejos, así estos efectos pueden ser medidos, puesto que el patrón interferométrico cambia dependiendo directamente de las intensidades a las que están sometidos los esfuerzos o desplazamientos, estos cambios pueden ser cercanos a los nanómetros, esto se logra debido a que la alineación del patrón de interferencia no es directamente dependiente de la alineación de los espejos, sino de las lentes empleadas; por lo que al existir cambios en el área encerrada por el camino óptico, hay un cambio en la intensidad del patrón interferométrico, con lo cual se miden estos cambios en desplazamiento y en esfuerzos.



Grafica 2: Desplazamientos micrométricos (Tiempo vs. Voltaje)

Ésta gráfica nos muestra los resultados experimentales sobre esfuerzos a los que está sometida una pieza metálica y con desplazamientos micrométricos. Los resultados arrojados por ésta gráfica son de voltaje, ya que esos son los que nos indican cuál fue el desplazamiento y el tiempo que duro; el desplazamiento es de aproximadamente 10 micrómetros, y el esfuerzo comienza con cada uno de los picos negativos que muestra la gráfica y termina con un pico también de aproximadamente la misma intensidad, el tiempo entre cada pico es el tiempo al que está sometida la pieza metálica a tal esfuerzo mecánico.

**BIBLIOGRAFIA**

1. Sagnac, G. Comptes rendus de l'Académie des Sciences Vol. 95, 1913.
2. R.T. Carvalho, J.Blake, "The Sagnac Interferometer as a Two-Parameter Sensor", Journal technology, Vol. 13, No. 7, Julio 1995
3. J.M. Estudillo-Ayala et al, Revista Mexicana de Física No. 47 (3) 2001.
4. G.E.Sandoval-Romero et al, Revista Mexicana de Física No. 49(2), 2002.
5. Leszek R. Jaroszewicz, Zgigniew Krajewsky, Lech Solarz, A new Area of the fiber-Optic Sagnac interferometer application, IEEE,
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,"Fiber optic Rate Gyros As Replacements for mechanical Gyros".American institute of Aeronautics and Astronautics.
8. H.H Cerecedo, E.A.Kuzin, "Breve revisión del estado actual del interferómetro de Sagnac formado con fibra óptica de alta birrifringencia", Revista Mexicana de Física Vol. 46, pp. 512-517.
9. Salvador Palma Vargas, tesis para obtener el grado de Ingeniero Eléctrico-Electrónico, Laboratorio de Óptica aplicada, Centro de Ciencias Aplicada y Desarrollo Tecnológico, UNAM.