



*"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"*

# UNIVERSIDAD DE SONORA

**DIVISIÓN DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES  
DEPARTAMENTO DE INVESTIGACIÓN EN FÍSICA  
Ingeniería en Tecnología Electrónica**

**Sensor de Temperatura Utilizando un Oscilador  
Optoelectrónico de Microondas Basado en Fibra  
Óptica**

TESIS QUE PRESENTA:

**EFRAIN OSVALDO LÓPEZ FIGUEROA**

PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**INGENIERO EN TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA**

DIRECTOR DE TESIS

**DR. ALEJANDRO GARCÍA JUÁREZ**



Hermosillo, Sonora

Abril 2016

# Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

# AGRADECIMIENTOS

*Le agradezco a Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, por ser mi fortaleza en todos los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias y sobre todo felicidad.*

*Le doy gracias a mis padres Efraín y Rosalba por apoyarme en todo momento, por los valores que me han inculcado, y por haberme dado la oportunidad de tener una excelente educación en el transcurso de mi vida y sobre todo por ser mi ejemplo de vida a seguir, porque me han enseñado a ser un buen hombre y sus consejos siempre van dirigidos hacia el bienestar mío, ustedes me dieron la vida y agradezco todo el cuidado que tuvieron conmigo, los éxitos que obtenga siempre se los dedicare con mucho amor a ustedes...*

*Le agradezco la confianza, apoyo y dedicación de su tiempo al Dr. Alejandro García por haber compartido conmigo sus conocimientos y sobre todo su amistad, por darme la oportunidad de permitirme trabajar y aprender de él, por sus consejos y paciencia, muchas gracias...*

## ÍNDICE

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Agradecimientos.....</b>  | <b>1</b>  |
| <b>CAPÍTULO 1.....</b>   | <b>5</b>  |
| <b>Introducción general.....</b>   | <b>5</b>  |
| 1.1    Introducción.....   | 5         |
| 1.2    Objetivo y objetivos específicos.....                                 | 6         |
| 1.3    Metodología.....  | 6         |
| 1.4    Hipótesis.....  | 7         |
| 1.5    Organización de la tesis.....   | 8         |
| Referencias.....   | 8         |
| <br>   |           |
| <b>CAPÍTULO 2.....</b>   | <b>10</b> |
| <b>Sensores Electrónicos.....</b>  | <b>10</b> |
| 2.1    Introducción a los sensores electrónicos.....                         | 10        |
| 2.2    Características de un sensor.....                                     | 11        |
| 2.2.1    Características estáticas.....                                      | 11        |
| 2.2.2    Características dinámicas.....                                      | 12        |
| 2.3    Parámetros importantes en la velocidad de respuesta de un sensor..... | 12        |
| 2.4    Sensores de luz.....  | 13        |
| 2.4.1    Sensores reflectivos y por intercepción.....                        | 13        |
| 2.4.2    LDR (Resistor dependiente de la luz).....                           | 13        |
| 2.4.3    Fotoceldas.....   | 14        |
| 2.4.4    Fotodiodos.....   | 14        |
| 2.4.5    Fototransistores.....   | 14        |
| 2.4.6    CCD y cámaras de video.....   | 15        |
| 2.5    Sensores de proximidad.....   | 15        |
| 2.5.1    Sensores inductivos.....  | 15        |

|  |  |           |
|--|--|-----------|
| 2.5.2  | Sensores de efecto hall.....                     | 15        |
| 2.5.3  | Sensores capacitivos.....                        | 16        |
| 2.5.4  | Sensores de ultrasonido.....                     | 17        |
| 2.5.5  | Sensores ópticos de proximidad.....              | 18        |
| 2.6  | Sensores de temperatura.....                     | 19        |
| 2.6.1  | Detector de resistencia metálica (RTD).....      | 19        |
| 2.6.2  | Termistor.....                                   | 19        |
| 2.6.3  | Sensor de circuito integrado (IC).....           | 20        |
| 2.6.4  | Termocuplas.....                                 | 20        |
|  | Referencias.....                                 | 22        |
| <b>CAPÍTULO 3.....</b>                                     |  | <b>23</b> |
| <b>Dispositivos de Radiofrecuencia (RF) y Ópticos.....</b> |  | <b>23</b> |
| 3.1  | Amplificadores de potencia de RF.....            | 23        |
| 3.2  | Funciones de los amplificadores de RF.....       | 23        |
| 3.3  | Características de un amplificador de RF.....    | 24        |
| 3.4  | Partes de un amplificador de RF.....             | 25        |
| 3.5  | Divisores de potencia para RF.....               | 26        |
| 3.6  | Fotodetectores.....                              | 28        |
| 3.6.1  | Eficiencia cuántica y responsividad.....         | 29        |
| 3.7  | Láseres.....                                     | 30        |
| 3.7.1  | Características físicas de la emisión laser..... | 30        |
| 3.7.2  | Caracterización de un haz laser.....             | 32        |
| 3.7.3  | Tipos de láseres.....                            | 33        |
|  | Referencias.....                                 | 34        |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>CAPÍTULO 4.....</b>   | <b>35</b> |
| <b>Sensores Óptoelectrónicos Basados en Fibra Óptica.....</b>  | <b>35</b> |
| 4.1 Oscilador de radiofrecuencia.....  | 35        |
| 4.2 Oscilador optoelectrónico.....   | 36        |
| 4.3 Aislador óptico.....   | 37        |
| 4.4 Atenuador de fibra óptica.....   | 39        |
| 4.4.1 Atenuadores fijos.....   | 40        |
| 4.4.2 Atenuadores variables (VOA).....   | 40        |
| 4.5 Control de polarización.....   | 41        |
| 4.6 Amplificador de fibra dopado con erbio (EDFA).....   | 42        |
| Referencias.....   | 48        |
| <br>   |           |
| <b>CAPÍTULO 5.....</b>   | <b>50</b> |
| <b>Modulador de Intensidad Electroóptico como Oscilador de Microondas para el<br/>Sensado de Temperatura: Teoría y Resultados.....</b> | <b>50</b> |
| 5.1 Introducción al modulador.....   | 50        |
| 5.2 Modulador de intensidad Mach-Zender de óptica integrada.....   | 51        |
| 5.3 Principio de operación MZI.....  | 52        |
| 5.4 Esquema de configuración para el sensado de temperatura.....   | 53        |
| 5.5 Resultados del análisis a una frecuencia de 1GHz.....  | 59        |
| 5.6 Resultados del análisis a una frecuencia de 2GHz.....  | 62        |
| 5.7 Resultados del análisis a una frecuencia de 3GHz.....  | 65        |
| 5.8 Resultados de aproximación de la variación de frecuencia con respecto<br>a la longitud de la fibra de sensado.....                 | 68        |
| Referencias.....   | 69        |
| <b>CAPÍTULO 6.....</b>   | <b>70</b> |
| <b>Conclusión y perspectiva.....</b>   | <b>70</b> |
| <br>   |           |
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>  | <b>71</b> |

# Capítulo 1

## Introducción general

### 1.1.- Introducción

Al igual que el hombre interactúa con los procesos de la naturaleza, modificándolos y guiándolos para su máximo provecho y beneficio, también se propone crear sistemas o arquitecturas capaces de emularle y ayudarle en la toma de decisiones y en su caso que actúe de manera correcta y automática. Estas estructuras han de ejecutar necesariamente funciones básicas como la detección o medida, el procesado o conversión y es aquí donde las funciones requieren sensores y donde se centra este trabajo. En general un sensor se compone de un elemento que genera una señal en relación con el parámetro a medir (transductor), y lo dirige hacia un canal de comunicación que transporta la señal generada hasta una unidad que analiza, mide, procesa y presenta la información que se pretende y que definitivamente relaciona el sensor con el usuario u otros sistemas externos a él [1].

De manera más ilustrativa como el análisis de una labor rutinaria de una persona para condimentar su ensalada, la prueba poniéndola en contacto con las papilas gustativas (transductor), que genera señales eléctricas enviadas a través del sistema nervioso (canal), al cerebro (unidad de procesado y decisión) de esta manera se decidirá añadir más sal, aceite, etc [1].

Entre los sensores se encuentran los “sensores electrónicos”, “sensores ópticos” y los “sensores de fibra óptica” enfocándonos en estos dos últimos, donde la magnitud a medir introduce modificaciones a la luz o la genera, según sea el caso, y ésta se transporta a través de fibra óptica y se detecta para su conversión al dominio eléctrico a través de una unidad optoelectrónica como lo es un fotodetector, que se encarga, además de procesar la señal recibida y extraer la información requerida[1].

Los avances impresionantes de la tecnología fotónica como consecuencia de las telecomunicaciones y las características de la fibra óptica han hecho que los sensores de fibra óptica se posicionen exitosamente en sectores donde los sensores electrónicos no compiten

de manera adecuada o simplemente no funcionan correctamente. Por ejemplo en entornos donde la generación de señales eléctricas es peligroso (oleoductos, centrales de producción de gas, aviones, etc.) o bien en lugares donde la temperatura ambiente es tan elevada que los sensores electrónicos no funcionan adecuadamente debido a múltiples factores ambientales como la temperatura (calor o frío), humedad, gases, entre otros que no permiten tener una medida confiable, como donde se realizan fundiciones o soldaduras.

## **1.2.- Objetivo**

El objetivo de esta tesis es demostrar que un oscilador de microondas optoelectrónico (fibra óptica) puede ser utilizado como sensor de temperatura.

### **Objetivos específicos**

- 1.- Generar diferentes señales de radiofrecuencias al calentar la fibra óptica.
- 2.- Medir las variaciones de radiofrecuencia obtenidas en la salida del fotodetector.
- 3.- Analizar, graficar y comparar los resultados obtenidos a diferentes frecuencias.

## **1.3.- Metodología**

Teóricamente, el sistema de sensado de temperatura funciona de acuerdo al sistema que se muestra en la figura 1.1.

En la figura 1.1 se observa que el láser está conectado directo al aislador con la finalidad de evitar daños por reflexión en seguida se encuentra el control de polarización cuyo objetivo es garantizar la máxima potencia de salida del modulador electro-óptico de generar más ganancia, a continuación le sigue el modulador de intensidad del tipo Mach-Zehnder, que a su vez está conectado a un Amplificador de fibra dopado con erbio, debido a que la amplificación es fija se colocó un atenuador que permite disminuir el nivel de potencia para



que el fotodetector opere dentro de los límites permitidos y no se dañe y en seguida se encuentra la fibra de sensado que se conecta directamente al fotodetector después se interconecta un divisor de potencia donde en una salida se colocaron en cascada un juego de 3 amplificadores de RF que van directos al modulador para cerrar el lazo de retroalimentación es en esta parte donde se forma el oscilador, la otra salida del divisor está conectada al analizador de espectros eléctricos, para observar el desplazamiento en frecuencia al calentar la fibra de sensado.

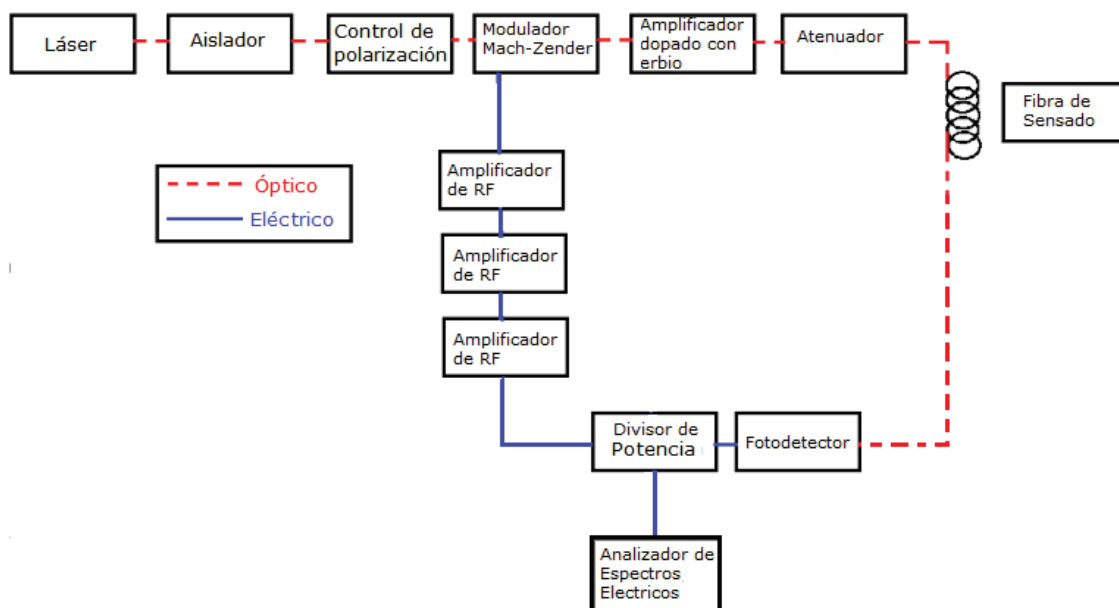


Figura 1.1 Diagrama de la estructura del sistema de sensado de temperatura.

## 1.4.- Hipótesis

En esta tesis se propone la implementación de un sistema de sensado de temperatura mediante fibra óptica, el cual emplea la técnica de oscilación optoelectrónica, lo primordial es generar un desplazamiento en frecuencia al momento de generar cambios de ambiente en este caso el aumento o disminución de la temperatura, para de esta forma poder relacionar el cambio en frecuencia con la temperatura, lo interesante es que este tipo de sensado tiene un amplio panorama hacia aplicaciones actuales, donde otros sensores no tienen capacidades

físicas para poder llevar a cabo una medición, una vez analizado el desplazamiento se genera la relación entre desplazamiento en frecuencia y temperatura.

## **1.5.- Organización de la tesis**

La propuesta de tesis está dividida básicamente en 6 secciones que se describen a continuación:

Capítulo 1. Se da una introducción breve sobre cómo está diseñado el esquema de sensado propuesto y cómo funcionan las partes básicas del sistema de sensado. Se describe el objetivo y la metodología que se usará.

Capítulo 2. Se describen aspectos importantes relacionados con sensores electrónicos desde su definición básica y funcionamiento y se detallan algunos tipos de sensores electrónicos tradicionales y sus aplicaciones.

Capítulo 3. Se describen el funcionamiento de los dispositivos ópticos y de radiofrecuencia que se utilizaron en el esquema experimental propuesto de sensado para fibra óptica. La descripción consiste en el funcionamiento básico y la acción que realizan en el esquema. Los dispositivos que se describen son amplificadores de RF, divisores de RF, fotodetectores y láseres.

Capítulo 4. Se da una introducción sobre los sensores optoelectrónicos basados en fibra óptica desde su funcionamiento hasta la aplicación que generan, en esta sección se encuentran el atenuador de fibra óptica, aislador de fibra óptica, control de polarización y el amplificador de fibra óptica dopado con erbio.

Capítulo 5. Se describe el sistema experimental propuesto en esta tesis para el sensado de temperatura, se presentan los resultados obtenidos, para determinar una relación entre el cambio de temperatura y el desplazamiento de frecuencia.

Capítulo 6. Por último, en este capítulo se presenta la conclusión sobre el desarrollo de este trabajo y los beneficios que se tiene al utilizar este tipo de sistemas de sensado así como las aplicaciones que tiene en la actualidad y como trabajo a futuro investigar otro tipo de

tecnología que podría ser integrada al esquema experimental propuesto y optimizar la adquisición de los datos.

### **Referencias:**

[1] Sensores (2010). *Clasificación de los sensores*. Recuperado de:  
<http://thelastlabproject.blogspot.mx/>

# Capítulo 2

## Sensores Electrónicos

### 2.1- Introducción a los Sensores Electrónicos

Un sensor es un dispositivo para detectar y señalar una condición de cambio. Con frecuencia, una condición de cambio, se trata de la presencia o ausencia de un objeto o material (detección discreta). También puede ser una cantidad capaz de medirse, como un cambio de distancia, tamaño, color o temperatura (detección analógica). Los sensores posibilitan la comunicación entre el mundo físico y los sistemas de medición y/o de control, tanto eléctricos como electrónicos, utilizándose extensivamente en todo tipo de procesos industriales y no industriales para propósitos de monitoreo, medición, control y procesamiento.

De acuerdo con su aplicación, un sensor puede estar formado por materiales metálicos, no metálicos, orgánicos o inorgánicos, y por fluidos, gases, plasmas o semiconductores. Al usar características especiales de esos materiales, los sensores convierten la cantidad o propiedad medida en una salida analógica o digital [1].

Desde otra perspectiva un sensor es un dispositivo eléctrico y/o mecánico que convierte magnitudes físicas (luz, magnetismo, presión, temperatura etc.) en valores medibles de dicha magnitud.

Esto se realiza en tres fases:

- Un fenómeno físico al ser medido es captado por un sensor, y muestra en su salida una señal eléctrica dependiente del valor de la variable física.
- La señal eléctrica es modificada por un sistema de acondicionamiento de señal, cuya salida es un voltaje.
- El sensor dispone de una circuitería que transforma y/o amplifica la tensión de salida, la cual pasa a un convertidor A/D, conectado a una PC. El convertidor A/D transforma la señal de tensión continua en una señal discreta [1].

## 2.2.- Características de un Sensor

Existen varias formas de clasificar a los sensores, por ejemplo se pueden clasificar por el principio físico de funcionamiento (inductivo, capacitivo, termoelectrico o resistivo etc.), por la variable física medida (temperatura, presión, posición etc. por la capacidad de generar energía (activos) o de necesitar de un circuito de excitación (pasivos).

Estas características se dividen en Estáticas y Dinámicas, que son las que determinan el tipo de sensor y su aplicación específica [2].

### 2.2.1.- Características Estáticas

Campo de medida: Rango de valores de la magnitud de entrada comprendido entre el máximo y el mínimo detectables por un sensor, con una tolerancia de error aceptable.

Resolución: Mínima diferencia entre dos valores próximos que el sensor es capaz de distinguir.

Sensibilidad: Variación de la salida producida por una variación de entrada. Pendiente de la curva de calibración. Cuanto mayor, mejor.

Linealidad: Cercanía de la curva característica a una recta especificada. Linealidad equivale a sensibilidad constante.

Saturación: No linealidad producida por disminución de sensibilidad típicamente al principio o al final del rango.

Histéresis: Diferencia entre valores de salida correspondientes a la misma entrada, según la trayectoria seguida por el sensor.

Exactitud: diferencia entre la salida real y el valor teórico de dicha salida (valor verdadero). Se suele dar en valor absoluto o relativo.

Precisión: capacidad de obtener la misma salida cuando se realizan varias lecturas de la misma entrada y en las mismas condiciones. Estima la desviación de las medidas [2].

### 2.2.2.- Características Dinámicas

La mayor parte de los sensores tienen un comportamiento dinámico similar a un sistema de primer o segundo orden, a continuación se detallan las más importantes:

Velocidad de respuesta: es la capacidad para que la señal de salida siga sin retraso las variaciones de la señal de entrada.

Respuesta en Frecuencia: es la relación entre la sensibilidad y la frecuencia cuando la entrada es una excitación senoidal, ésta se puede representar mediante un gráfico de Bode.

Estabilidad: es la desviación de salida del sensor al variar ciertos parámetros exteriores distintos del que se pretende medir [3].

### 2.3.- Parámetros Importantes en la Velocidad de Respuesta de un Sensor

En la figura 2.1 se muestran los diferentes parámetros de la velocidad de respuesta de un sensor y después se definen cada uno de ellos.

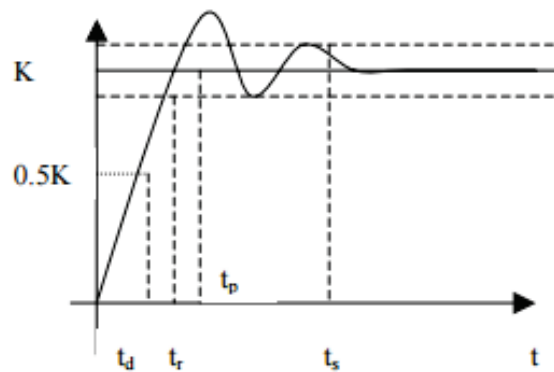


Figura 2.1 Representación gráfica de la respuesta de un sensor.

Tiempo de retardo: **td**, es el tiempo que tarda la salida del sensor en alcanzar el 50% de su valor final.

Tiempo de subida: **tr**, es el tiempo que tarda la salida del sensor hasta alcanzar su valor final.

Velocidad del sensor, es decir, lo rápido que responde ante una entrada.

Tiempo de pico: **tp**, es el tiempo que tarda la salida del sensor en alcanzar el pico máximo de su sobreoscilación.

Pico de sobreoscilación: **mp**, expresa cuanto se eleva la evolución temporal de la salida del sensor respecto de su valor final.

Tiempo de establecimiento: **ts**, el tiempo que tarda la salida del sensor en entrar en la banda del 5% alrededor del valor final y ya no vuelve a salir de ella.

Existe un proceso de calibración que consiste en realizar la comparación de la respuesta del sensor con otros que tienen una respuesta estándar conocida; de esta manera se establece la relación entre la variable medida por el sensor y su señal de salida, para tener un parámetro conocido y más exacto [4].

## **2.4.- Sensores de Luz**

### **2.4.1.- Sensores reflectivos y por intercepción**

Los sensores de objetos por reflexión están basados en el empleo de una fuente de señal luminosa (lámparas, diodos LED, diodos láser, etc.) y una celda receptora del reflejo de esta señal, que puede ser un fotodiodo, un fototransistor, LDR, incluso chips especializados, como los receptores de control remoto. Con elementos ópticos similares, es decir emisor-receptor, existen los sensores "de ranura" o mejor conocidos como "de barrera", donde se establece un haz directo entre el emisor y el receptor, con un espacio entre ellos que puede ser ocupado por un objeto [4].

### **2.4.2.- LDR (Resistor dependiente de luz)**

Un LDR es un resistor que varía su valor de resistencia eléctrica dependiendo de la cantidad de luz que incide sobre él. Se le llama, también, foto-resistor o foto-resistencia. El valor de resistencia eléctrica de un LDR es bajo cuando hay luz incidiendo en él (en algunos casos puede descender tan bajo como 50 ohms) y el valor de resistencia puede ser muy alto cuando no hay luz incidiendo directamente en el resistor (puede ser de varios megaohms) [4].

### **2.4.3.- Fotoceldas**

La conversión directa de luz en electricidad a nivel atómico se llama generación fotovoltaica. Algunos materiales presentan una propiedad conocida como efecto fotoeléctrico, que hace que absorban fotones de luz y emitan electrones. Cuando se captura a estos electrones libres emitidos, el resultado es una corriente eléctrica que puede ser utilizada como energía para alimentar circuitos. Esta misma energía se puede utilizar, obviamente, para producir la detección y medición de la luz [4].

### **2.4.4.- Fotodiodos**

El fotodiodo es un diodo semiconductor, construido con una unión PN, como muchos otros diodos que se utilizan en diversas aplicaciones, pero en este caso el semiconductor está expuesto a la luz a través de una cobertura cristalina de protección y a veces en forma de lente, y por su diseño y construcción será especialmente sensible a la incidencia de la luz visible o infrarroja. Todos los semiconductores tienen esta sensibilidad a la luz, aunque en el caso de los fotodiodos, diseñados específicamente para esto, la construcción está orientada a lograr que esta sensibilidad sea máxima [4].

### **2.4.5.- Fototransistores**

Los fototransistores no son muy diferentes de un transistor normal, es decir, están compuestos por el mismo material semiconductor, tienen dos uniones y las mismas tres conexiones externas: colector, base y emisor. Por supuesto, siendo un elemento sensible a la luz, la primera diferencia evidente es en su encapsulamiento, que posee una ventana o es totalmente transparente, para dejar que la luz ingrese hasta las uniones de la pastilla semiconductor y produzca el efecto fotoeléctrico [4].



#### **2.4.6.- CCD y Cámaras de Video**

La abreviatura CCD viene del inglés Charge-Coupled Device, Dispositivo Acoplado por Carga. El CCD es un circuito integrado. La característica principal de este circuito es que posee una matriz de celdas con sensibilidad a la luz alineadas en una disposición físico-eléctrica que permite "empaquetar" en una superficie pequeña un enorme número de elementos sensibles y manejar esa gran cantidad de información de imagen (para llevarla al exterior del microcircuito) de una manera relativamente sencilla, sin necesidad de grandes recursos de conexiones y de circuitos de control [5].

#### **2.5.- Sensores de Proximidad**

Se basan en la detección de objetos próximos antes del contacto para evitar un objeto. De igual manera son sensores de posición en un cierto rango de panorama que detectan todo/nada y que informan de la existencia o no de un objeto ante el sensor [5].

##### **2.5.1.- Sensores Inductivos**

Se basan en la modificación de un campo magnético por presencia de objetos metálicos. Consiste en una bobina situada junto a un imán permanente. En condiciones estáticas no hay ningún movimiento en las líneas de flujo y no se induce ninguna corriente en la bobina. Cuando un objeto metálico penetra en el campo del imán o lo abandona, el cambio resultante en las líneas de flujo induce un impulso de corriente, cuya amplitud es proporcional a la velocidad del cambio del flujo. La forma de onda de la tensión a la salida de la bobina proporciona un medio para detectar la proximidad de un objeto [5].

##### **2.5.2.- Sensores de Efecto Hall**

De igual manera se basan en la modificación de un campo magnético por presencia de objetos metálicos. El efecto Hall relaciona la tensión entre dos puntos de un material conductor o semiconductor con un campo magnético a través de un material.

Detección por un sensor de efecto Hall en conjunción con un imán permanente.

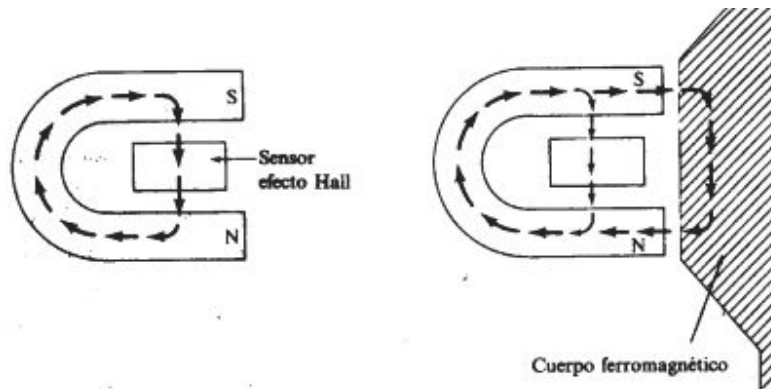


Figura 2.2 Representación del funcionamiento del sensor Hall

En ausencia de material el sensor de efecto Hall detecta un campo magnético intenso. Cuando el material se aproxima al sensor el campo magnético se debilita en el sensor debido a la curvatura de las líneas de campo a través del material [6].

### 2.5.3.- Sensores Capacitivos

Se basan en la modificación de la capacidad de un condensador por presencia de objetos sólidos.

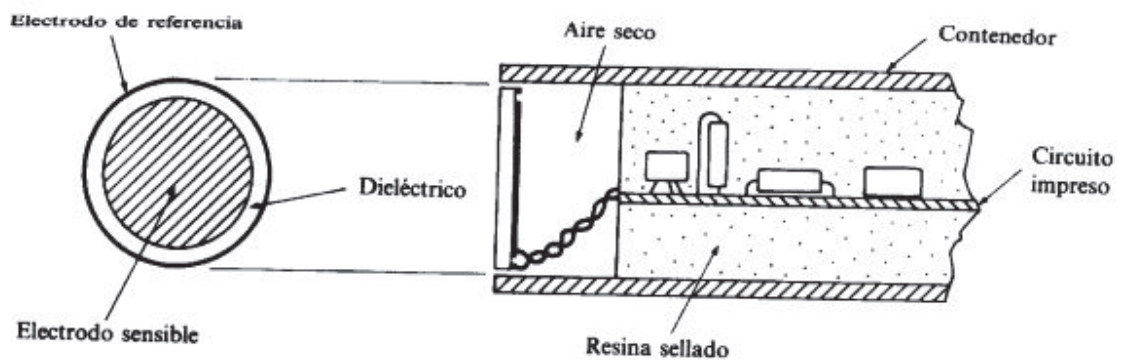


Figura 2.3 Representación de la estructura de un sensor capacitivo

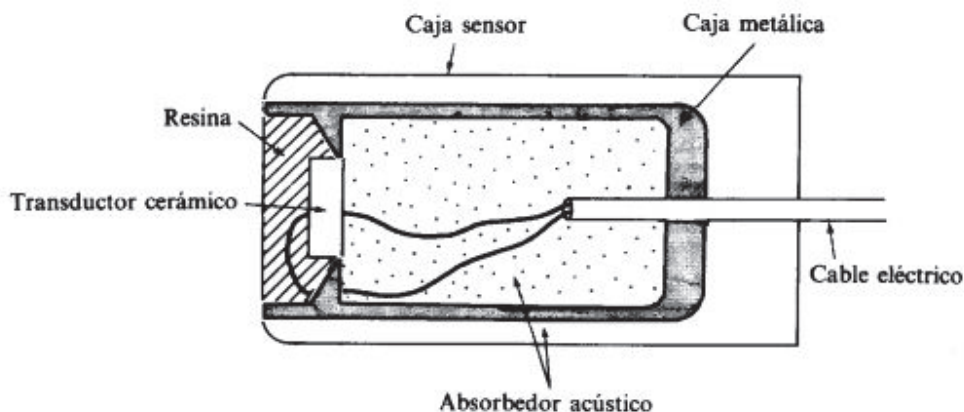
El elemento sensor es un condensador constituido por un electrodo sensible y un electrodo de referencia separados por un dieléctrico, una cavidad de aire seco para aislar y un conjunto de circuitos electrónicos.

Utilizado como medidor de desplazamiento, se consigue haciendo que el desplazamiento a medir provoque un desplazamiento en algún componente del condensador, cambio en su capacidad. El elemento capacitivo es parte de un circuito que es excitado de manera continua por una forma de onda senoidal de referencia. Un cambio en la capacidad, genera un desplazamiento de fase entre la señal de referencia y una señal obtenida a partir del elemento capacitivo. El desplazamiento de fase es proporcional al cambio de capacidad, este cambio se utiliza para detección de proximidad [6].

- La capacidad varía con la distancia a la que está el objeto.
- La capacidad depende del material objeto de detección.

#### 2.5.4.- Sensores de Ultrasonidos

Se basan en la modificación de la distancia de objetos mediante la detección de ecos de ultrasonidos. Las ondas ultrasónicas tienen la capacidad de que cuando viajan por un medio cualquiera son reflejadas si encuentran en su camino una discontinuidad o algún elemento extraño. La reflexión de la onda es debida a la diferencia de impedancias acústicas entre el medio y el objeto. El tiempo de espera entre el envío de la onda ultrasónica hasta su recepción se denomina tiempo de eco, y es utilizado para determinar la distancia al objeto [6].



*Figura 2.4 Representación de un sensor de ultrasonido*

El elemento básico es un transductor electro acústico, de tipo cerámico piezoeléctrico. La capa de resina protege al transductor contra la humedad, polvo y otros factores ambientales.

Como los absorbedores acústicos, se utilizan para amortiguar rápidamente la energía acústica, para detectar objetos a pequeñas distancias, ya que el mismo transductor se utiliza como emisor y como receptor.

Tienen muchos problemas: ángulo de incidencia de la onda sobre el objeto, temperatura: induce cambios en la densidad del aire como el cambio en la velocidad de propagación de la onda, aire, superficie del objeto, distancia mínima detectada, la forma de onda es cónica y solo detecta objetos dentro del cono del ultrasonido, falsos ecos, etc.

### 2.5.5.- Sensores Ópticos de Proximidad

Se basan en un Emisor de luz por diodo LED + recepción por un fotodiodo.

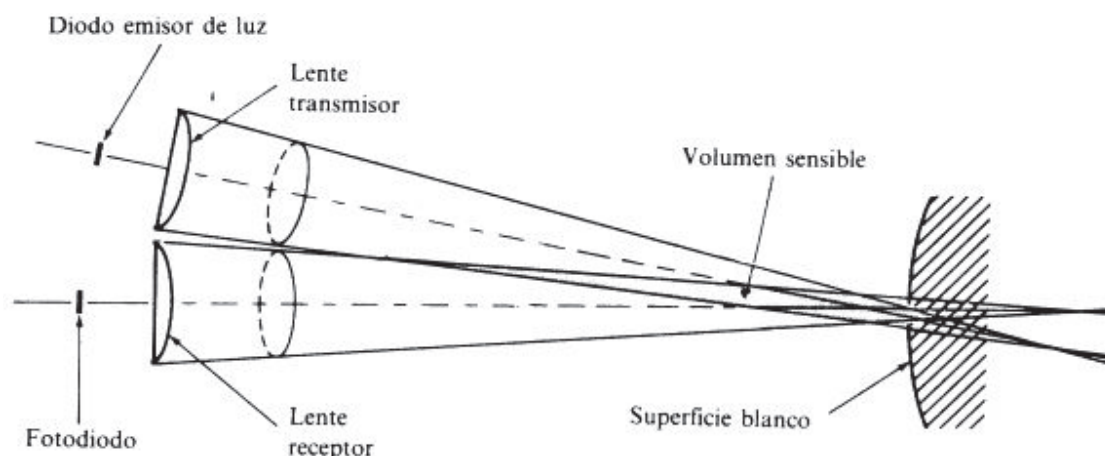


Figura 2.5 Representación del funcionamiento de un sensor óptico

Los conos de luz formados en la figura 2.5, enfocando la fuente y el detector en el mismo plano intersectan en un volumen largo. Este volumen define el campo de operación del sensor, puesto que una superficie reflectora que intersecta ese volumen se ilumina por la fuente y es vista simultáneamente por el receptor. Sensor con salida binaria: un objeto se detecta cuando se recibe una intensidad de luz superior a un umbral preestablecido. Algunas de las deficiencias son: Alineación precisa y Alta calidad del emisor: porque la energía se pierde con la distancia. [7]

## 2.6.- Sensores de Temperatura

Entre los sensores más comunes empleados para medir temperatura con instrumentación electrónica se tienen: RTD, termistores, sensores de circuito integrado (IC) y termocuplas.

### 2.6.1.-Detector de Resistencia Metálica (RTD)

El detector de resistencia metálica RTD, es uno de los sensores más precisos de temperatura. Se caracteriza por su excelente estabilidad, usualmente es utilizado para medir temperaturas de 0 °C a 450 °C. La resistencia metálica es de alambres finos o de películas de metales. Su resistencia varía en forma directamente proporcional con la temperatura. Ellas son fabricadas de metales como cobre, plata, oro, tungsteno y níquel, no obstante el platino es el material más comúnmente usado. El platino presenta una excelente estabilidad y la más alta resistividad con respecto a los otros metales [7].

Entre las desventajas de las RTD de platino (Pt100) se pueden mencionar: (1) su alto costo, por lo que hacer instrumentación con ellas es caro; (2) debido a su baja resistencia (100  $\Omega$  a 0 °C) y sensibilidad (0.4  $\Omega/^\circ\text{C}$ ), los alambres de conexión es uno de los principales problemas, la vía para minimizarlo es usar el esquema de medición con 4 alambres; (3) en el sistema de medición con 4 alambres, dos alambres llevan y traen la corriente proveniente de una fuente de corriente constante y otros dos alambres se emplean para la conexión del instrumento de medición de voltaje, convertidor A/D en un sistema de adquisición de datos por computadora; (4) la corriente de excitación constante produce una disipación de potencia en la RTD, lo cual le genera calentamiento que incrementa adicionalmente su temperatura que no es posible de detectar cuando se hace la medición de temperatura, una forma de reducir este error usar una corriente de excitación lo más pequeña posible. [8]

### 2.6.2.-Termistor

Un termistor es un semiconductor hecho de dos óxidos metálicos unidos dentro de una pequeña bola, disco u otra forma y recubierto con epóxido o vidrio. Hay dos clases de

termistores los que presentan un coeficiente negativo de temperatura (CNT), cuya resistencia disminuye con la temperatura y coeficiente positivo con la temperatura (CPT) cuya resistencia aumenta con la temperatura. Los termistores CNT son los más usados para medición de temperatura. Valores comunes de termistores son 2252  $\Omega$ , 5000  $\Omega$  y 10000  $\Omega$ . Un termistor de 5000  $\Omega$  tiene aproximadamente una sensibilidad de 200  $\Omega/^{\circ}\text{C}$  a la temperatura ambiente, comparada con 0.4  $\Omega/^{\circ}\text{C}$  de la Pt100, la sensibilidad del termistor es bastante más alta. Los termistores se pueden emplear para medir temperaturas hasta de 300  $^{\circ}\text{C}$ . Debido a que los termistores tienen una resistencia alta, la resistencia de los conductores que llevan la corriente no afecta la exactitud de las mediciones. Mediciones con dos alambres es adecuado en circuitos con termistores. Ya que la resistencia es bastante alta, la corriente de excitación debe ser pequeña para evitar el auto calentamiento que afecte la exactitud de la medición [8].

### **2.6.3.-Sensor de Circuito Integrado (IC)**

Los sensores de circuito integrado se fundamentan en la característica de la unión PN de los semiconductores. Están formados por circuitos integrados sobre un chip, el cual presenta una salida lineal y proporcional a la temperatura. Se consiguen sensores IC que presentan salidas en voltaje analógico y en forma digital. Por estar hechos a base de silicio, su rango de temperatura está limitado aproximadamente a los 150  $^{\circ}\text{C}$ . Una de las principales ventajas de los sensores IC es su fácil interface. Entre las desventajas se tienen: el limitado rango de temperatura, la necesidad de alimentación y el auto calentamiento [8].

### **2.6.4.-Termocuplas**

El funcionamiento de una termocupla se basa en el principio físico de la unión de dos alambres de metales diferentes que produce una diferencia de potencial en los dos extremos que no se encuentran en contacto que es función de la temperatura a la cual se encuentra la unión. Este principio se llama efecto Seebeck, en memoria a Thomas Seebeck quien lo descubrió en 1821. El voltaje producido en la unión es no lineal con respecto a la temperatura, bastante pequeño (del orden de los milivolts). Varios tipos de termocuplas existen. Estos se

identifican mediante letras mayúsculas que indican su composición de acuerdo a las convenciones establecidas por el American National Standards Institute (ANSI). Por ejemplo una termocupla tipo J está hecha de la unión de cobre-constantan donde el constantan es una aleación de metales. Una diferencia fundamental entre los sensores de temperatura mencionados anteriormente y la termocupla es la necesidad que se tiene de una referencia para hacer mediciones absolutas con ella. [8]

## Referencias:

- [1] Sensores (2010). *Clasificación de los sensores*. Recuperado de: <http://thelastlabproject.blogspot.mx/>
- [2] Descripción de Sensores (2010). *Características de los sensores*. Recuperado de <http://www.isa.cie.uva.es/>
- [3] SISCODE (WIKI) (2015). *Sensor*. Recuperado de <http://siscode.com/>
- [4] Sensores fundamentos tipos y características (sf). *Sensores y tipos de sensores*. Recuperado de: <http://cmapspublic2.ihmc.us/>
- [5] Automatización industrial. (2001). *Sensores y Detectores*. Recuperado de: <http://materias.fi.uba.ar/>
- [6] Balcells J., Romeral, J.L. (2005). *Autómatas Programables*. Recuperado de: <http://isa.uniovi.es/>
- [7] Sensores e Instrumentación. (2003). *Técnicas de instrumentación de sensores*. Recuperado de <http://ocw.usal.es/>
- [8] Sensores. (s.f.). *Sensores de temperatura*. Recuperado de <http://www.unet.edu.ve/>



# Capítulo 3

## Dispositivos de Radiofrecuencia (RF) y Ópticos

### 3.1.- Amplificadores de Potencia para RF

Un amplificador es un dispositivo capaz de incrementar la potencia de una señal. Estos dispositivos y muchos otros suelen presentar capacitancias parasitas a altas frecuencias y muchos otros parámetros que obligan a que el amplificador no sea estable o que la amplitud no sea muy buena.

Los amplificadores de RF son sencillamente dispositivos en los que se tienen en cuenta parámetros como buena eficiencia, linealidad, ganancia y que presenten mínima distorsión que incrementan proporcionalmente con la potencia y que influyen en la respuesta del mismo con el tiempo, estos dispositivos son importantes para poder analizar sistemas de radiofrecuencia principalmente donde existe modulación y demodulación y utilizarlos a más grande escala.

Estos amplificadores por lo general son comercializados con transistores FET como su componente activo, los transistores BJT pueden ser usados, pero se prefieren los FET por su alta impedancia de entrada, lo que mejora mucho la sensibilidad del circuito. Un ejemplo claro es que estos amplificadores de potencia de RF son las últimas etapas activas antes de la antena de transmisión. Suministran toda la amplificación de potencia necesaria para radiar la señal de RF al espacio [1].

### 3.2.- Funciones de los Amplificadores de RF

El amplificador de radiofrecuencia, cumple dos funciones:

- 1.) Incrementar la potencia de la portadora generada por el oscilador.
- 2.) Servir como amplificador que a su vez tiene la capacidad de aislar para asegurar que el oscilador no sea afectado por variaciones de tensión o impedancia en las etapas de potencia.

Existen etapas amplificadoras de RF, estas etapas consisten en circuitos basados en transistores que amplifican la señal de RF a un nivel suficientemente elevado para operar a la etapa subsecuente del algún sistema.

Las etapas de amplificación más comunes son de dos tipos:

Los amplificadores de voltaje y los amplificadores de potencia. Los amplificadores de voltaje preceden a los amplificadores de potencia y generalmente sirven para un doble propósito:

Aíslan o amortiguan la fuente de RF del amplificador de poder para impedir que el último cargue al primero.

Suministran una amplificación de voltaje para operar el amplificador de potencia. Generalmente los amplificadores de voltaje operan como amplificadores de clase A debido a que la linealidad es un factor importante en el propósito para el que sirven. [2]

### 3.3.- Características de un Amplificador RF.

Los amplificadores de RF son de alta ganancia, bajo ruido y sintonizado, que, cuando se usan, es la primera etapa activa que encuentra la señal recibida. Los objetivos primarios de una etapa de RF son selectividad, amplificación y sensibilidad, siendo estas mismas sus características:

- **Amplificación:** por ejemplo la señal que llega a una antena por lo general es muy baja, para esto, la amplificación es necesaria, este amplificador debe tener características muy bajas de ruido y debe estar sintonizado para aceptar solo las frecuencias de la portadora y la de las bandas laterales, para eliminar las interferencias de otras estaciones y para minimizar el ruido de entrada.
- **Selectividad:** Este parámetro mide la capacidad de un receptor en diferenciar entre las señales deseadas y las otras, entre aceptar una determinada banda de frecuencias y rechazar otras. Por ejemplo en AM a cada estación se le asigna un ancho de banda de 10KHz. Para que un receptor seleccione solo aquellas frecuencias asignadas a un solo canal, debe limitar su ancho de banda a 10KHz. Si el ancho de banda es mayor o menor a 10KHz las va a rechazar.

- **Sensibilidad:** La sensibilidad de un receptor es el nivel mínimo de la señal de RF que se puede detectar a la entrada del receptor y producir una señal útil de información. El rango de sensibilidad de un receptor varía desde los milivolts para receptores de bajo costo hasta la región de los nanovolts para unidades muy sofisticadas. En general se usa la relación de señal a ruido y la potencia de la señal a la salida del audio, para determinar la calidad de una señal recibida y determinar si es útil.

En definitiva las características de un amplificador RF esencialmente se puede decir que son:

- Bajo ruido.
- Ganancia de moderada a alta.
- Baja distorsión por intermodulación y armónica (tener operación lineal).
- Selectividad moderada.
- Alta relación de rechazo de frecuencia imagen. [2]

### 3.4.- Partes de un Amplificador de RF

- **Puerto de entrada y salida:** estos son la impedancia de entrada, que es la impedancia del generador, la cual tiene un valor típico de  $Z_s=50\Omega$ ; y la impedancia de salida, que es representada por la impedancia de la carga, en la cual también se utiliza un valor de  $Z_L=50\Omega$ .
- **Redes de adaptación:** estas redes se encargan de convertir (adaptar) una impedancia específica a otra y por lo general son sin pérdidas, es decir, no tiene elementos disipativos. En el caso de la red de adaptación de salida (OMN, por sus siglas en inglés) se convierte una impedancia que se observa en la salida del transistor a la impedancia de la carga. En los amplificadores de múltiples etapas existen redes de adaptación las cuales adaptan la salida con la entrada de los transistores.
- **Transistor:** Los amplificadores lineales (pequeña señal) utilizan un transistor operando en modo lineal (modo activo para BJT, saturación para FET), a bajas frecuencias se utiliza el modelo de pequeña señal, pero en frecuencias de RF y microondas aparecen elementos parásitos que hacen más complejo el análisis con este modelo, por esta razón se utilizan los parámetros S del transistor que permiten un análisis más simple y exacto.

- **Red de polarización:** se encarga de mantener fijo el punto de operación en DC del transistor. La red de polarización puede ser activa o pasiva, es importante mencionar que los parámetros S del transistor están en función del punto de operación en DC, y por lo tanto, los parámetros S son válidos solamente para las condiciones de polarización en los cuales fueron medidos. Es por esta razón que la red de polarización debe mantener fijo el punto de operación en DC. [3]

### 3.5.- Divisores de Potencia para RF

Se llama divisor de potencia a un dispositivo que reparte la potencia que recibe a su entrada entre n salidas, habitualmente, de forma equitativa.

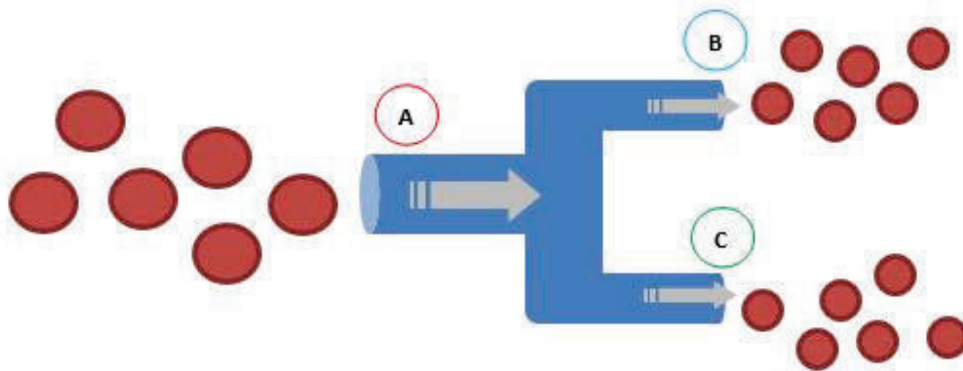
Los divisores de potencia se emplean en radiofrecuencia y microondas, comunicaciones ópticas, etc., para enviar a varios dispositivos la potencia recibida por un solo puerto manteniendo las impedancias adaptadas para tener un bajo nivel de potencia reflejada.

Dependiendo de la aplicación su realización tecnológica varía, pudiendo ser transformadores para aplicaciones de RF, circuitos microstrip para microondas y circuitos en fibra óptica.

Divisor, como su nombre lo indica, divide. En la naturaleza podemos ver un ejemplo de divisor en un río que tiene un obstáculo y se divide en dos. En este caso, parte del agua continúa por un camino y otra parte por otro camino.

En el caso de divisores de RF, en lugar de agua, es la señal de RF que se divide - en ese caso la señal de entrada es dividida: la forma permanece inalterada, pero la potencia está dividida. Por esta razón, los divisores de RF son conocidos como Splitters de Potencia de RF.

En la siguiente figura, vemos un ejemplo simple de un divisor. La señal (representada por los grandes círculos rojos) entra a través de un lado (A) y sale de los otros lados (B) y (C) [4].



*Figura 3.1 Funcionamiento del divisor de frecuencia*

Pero los divisores no sólo dividen por 2 salidas. Por ejemplo tenemos un divisor con 4 salidas. En este caso, cada salida será  $1/4$  de la intensidad de la señal original (Recordamos que los separadores siempre dividen 'igualmente' la señal de entrada entre todas las salidas).

Uno de los puntos más importantes cuando se trata de divisores de RF es la pérdida de inserción, es decir, la pérdida que hemos añadido al sistema cuando insertamos tales elementos. Cuanto mayor sea la pérdida de entrada en el sistema, menor parte de la señal llegará a su destino, lo cual es malo.

Así que cuando hablamos de un splitter de 4 salidas tendrá  $1/4$  de intensidad de la señal original en cada salida y estamos desconociendo la pérdida insertando el componente en otro dispositivo, y teniendo en cuenta solamente la pérdida resultante de la división de la señal (cuya magnitud es mucho más grande).

Otra información importante sobre divisores de potencia de RF (divisores) trata de aislamiento, es decir, una señal no debe interferir con el otro. Para ello, es importante conocer las características de la construcción.

Su construcción puede ser mediante el uso de resistencias o transformadores, siendo esto último usado en ejemplos como el de arriba.

Por ahora, todo divisor de RF se compone de elementos pasivos, es decir, no necesita alimentación.

Sin embargo también no se analizó otros aspectos tales como diferentes frecuencias o tecnologías [5].

### **3.6.- Fotodetectores**

Un Fotodetector o receptor óptico convierte la señal óptica proveniente de la fibra óptica en la señal eléctrica y recupera los datos transmitidos. Su elemento de entrada es el fotodetector, que convierte la luz en corriente eléctrica por medio del efecto fotoeléctrico. Los receptores ópticos, en general, deben tener alta sensibilidad, respuesta rápida, bajos niveles de ruido, bajo costo y una alta confiabilidad. En el caso de sistemas de fibra óptica. El área fotosensible del fotodetector debe ser comparable con el núcleo de una fibra. Los requisitos antes mencionados son satisfechos de una mejor manera por detectores fabricados con base en materiales semiconductores.

El proceso fundamental detrás de la fotodetección es la absorción óptica. Para tales efectos, participan conceptos básicos tales como la responsividad de un detector, su eficiencia cuántica y ancho de banda, los cuales son parámetros comunes en todos los fotodetectores. [6]

Un fotodetector es un dispositivo que convierte una señal de luz a una señal eléctrica de voltaje o corriente. En muchos fotodetectores tales como fotodiodos y fotoconductores esta conversión es típicamente lograda por la creación de pares electrón-huecos, por la absorción de fotones, esto es, la creación de electrones en la banda de conducción y huecos en la banda de valencia.

El fotodetector es un dispositivo esencial en el bloque receptor de un sistema de comunicaciones ya que recibe una señal óptica y la convierte en señal eléctrica. Una vez que la señal se encuentra en el dominio eléctrico, pasa por etapas posteriores de amplificación y demodulación con las cuales se logra recuperar una versión similar de la información originalmente transmitida. [7]

### 3.6.1.-Eficiencia Cuántica y Responsividad

No todos los fotones incidentes son absorbidos y crean pares electrón-hueco, que pueden dar lugar a una fotocorriente. La eficiencia del proceso de conversión de fotones a pares electrón-hueco es conocida como eficiencia cuántica  $\eta$  del fotodetector que se define como:

$$\eta = \frac{\left(\frac{I_{ph}}{e}\right)}{\left(\frac{P_0}{h\nu}\right)} \quad (3.1)$$

Donde  $I_{ph}$  es la fotocorriente debida al flujo de electrones por segundo en las terminales del fotodiodo. El número de electrones colectados por segundo es  $I_{ph}/e$ , donde  $e$  es la carga del electrón. Si  $P_0$  es la potencia óptica incidente entonces el número de fotones incidentes por segundo es  $P_0/h\nu$ .

La responsividad ( $R$ ) de un fotodetector está dada en términos de la fotocorriente generada ( $I_{ph}$ ) por la potencia óptica incidente ( $P_0$ ) de una determinada longitud de onda:

$$R = \frac{I_{ph}}{P_0} \quad (3.2)$$

De la definición de  $\eta$ , se puede escribir como:

$$R = \eta \left(\frac{e}{h\nu}\right) = \eta \left(\frac{e\lambda}{hc}\right) \quad (3.3)$$

Donde  $\eta$  depende de la longitud de onda [8].

En la figura 3.2 se observa la estructura del fotodetector y las partes que lo componen de igual manera se puede observar como la luz incide sobre el semiconductor para poder ser convertida en una señal eléctrica.

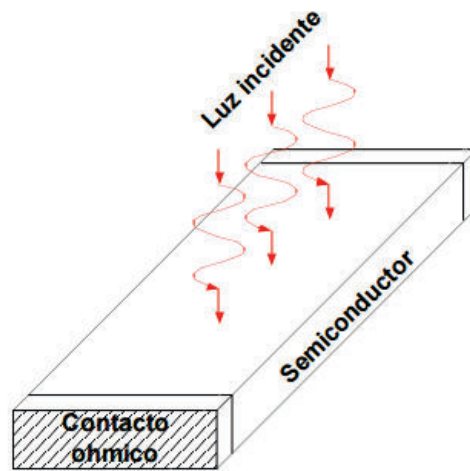


Figura 3.2 Funcionamiento del fotodetector

### 3.7.- Láseres

La palabra láser es un acrónimo de las palabras inglesas: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, es decir, amplificación de luz mediante emisión estimulada de radiación. Realmente representa el nombre de un dispositivo cuántico, que sirve para generar ondas electromagnéticas de la gama óptica. Tiene un antecedente inmediato en el acrónimo máser, correspondiente a Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation, con el que, en 1950, Townes, Gordon y Zeigev designaron el primer oscilador en la gama milimétrica construido por ellos. El láser proporciona una forma de emisión de radiación luminosa de características especiales. La radiación láser es monocromática (una sola longitud de onda), posee una gran direccionalidad (escasa divergencia) y puede concentrar un elevado número de fotones en fase en áreas muy pequeñas. Estas características han permitido una gran diversidad de aplicaciones en el campo de la tecnología actual y, en concreto, en la medicina [9].

#### 3.7.1- Características físicas de la Emisión Laser

Para la emisión de luz visible a partir de un foco, debe comunicarse a éste una energía (térmica, eléctrica, química, etc.) que excite sus átomos. Generalmente se producirá una desexcitación inmediata con emisión continua de radiaciones, que: a) son heterocromáticas (de distinta longitud de onda), b) no son coherentes (no se encuentran en fase), y c) se



propagan en todas las direcciones del espacio. La radiación láser posee todas las propiedades de la luz; sin embargo, se caracteriza por ser: monocromática (todos sus fotones tienen igual longitud de onda), coherente (todos los fotones se encuentran en fase temporal y espacial) y direccional (el haz de radiación presenta escasa divergencia, fruto de las dos características anteriores). La principal utilidad práctica de la radiación láser reside en que concentra un gran número de fotones por unidad de superficie [9].

Monocromaticidad es la buena definición de la frecuencia de la luz emitida, esto es, la monocromaticidad, es una de las principales características de la radiación láser. Permite aprovechar las características físicas y biológicas que posee la radiación de una longitud de onda determinada. Actualmente, existen láseres que emiten en el visible, infrarrojo, ultravioleta e, incluso, en la banda espectral de los rayos X. Algunos láseres, como los de colorantes, permiten sintonizar la emisión dentro de una gama de frecuencias [9].

Coherencia es en contraposición a la radiación luminosa convencional, de componentes desorganizados o incoherentes, la radiación coherente es aquella en la que todos sus fotones están en fase. Al coincidir en una misma dirección de propagación, los estados vibracionales se suman. El resultado es un efecto de amplificación en la intensidad luminosa emitida, característica de la radiación láser. Antes del advenimiento del láser, para obtener una luz coherente se utilizaban haces estrechamente colimados, mediante aperturas diminutas denominadas pin-hole, de una luz lo más monocromática posible. Generalmente se utilizaban lámparas de sodio, que emiten un doblete de longitudes de onda casi idénticas (589.0 y 589.6 nanómetros), con el inconveniente de que la colimación mediante pin-hole limita seriamente la potencia de salida del haz. Sin embargo, esta restricción no tiene lugar con el láser, cuya intensidad se encuentra amplificada, lo que le proporciona su brillantez característica [10].

Direccionalidad es la disposición de una cavidad resonante, uno de los más importantes requisitos técnicos en la construcción de los sistemas láser, proporciona otra de las características de esta radiación, su escasa divergencia. Dado que sólo se amplifican los fotones emitidos en el sentido de un eje del material emisor, la radiación resultante posee una

marcada direccionalidad de emisión, lo cual la hace idónea para diversas aplicaciones prácticas, en las que se requiere precisión en la iluminación.

Si sobre un electrón en un estado excitado incide una radiación de energía el átomo es estimulado a emitir un fotón de la misma frecuencia y fase. Este es el proceso de emisión estimulada y al sumarse ambas radiaciones (el incidente y la emitida) tiene lugar la amplificación de la radiación. La emisión estimulada se puede producir en condiciones normales pero es un efecto muy pequeño porque hay pocos átomos en estado excitado. [10]

### **3.7.2- Caracterización de un Haz Láser**

Podemos caracterizar un haz laser por los siguientes aspectos:

- Longitud de onda de emisión
- Duración de la emisión, que puede ser continua o pulsada
- Potencia o energía de salida
- Diámetro del haz
- Divergencia

Para comprender el funcionamiento debemos considerar los elementos básicos de los que consta un láser:

El sistema de bombeo: encargado de suministrar energía al material que va a producir la emisión estimulada siendo los más comunes:

- a) Bombeo óptico
- b) Bombeo por descarga eléctrica

El medio activo: en el cual se producirá la emisión estimulada de radiación.

La cavidad óptica: que es el recinto donde se amplificara la radiación. [11]

### 3.7.3- Tipos de Láseres

Los diferentes tipos de láseres se clasifican atendiendo a la naturaleza de su medio activo:

Láseres de medio activo gaseoso: láseres de He-Ne, de CO<sub>2</sub>, de N<sub>2</sub>.

Láseres de estado sólido: cuyo medio activo consiste en un cristal dopado artificialmente con iones de otro material.

Láseres de semiconductores: el medio activo está constituido por un diodo con una elevada concentración de impurezas.

Láseres de colorantes: el medio activo generalmente es una solución alcohólica de sustancias orgánicas (colorantes). [12]

## Referencias:

- [1] Laquidara, Aníbal. (2013). *Amplificadores de RF*. Libro digital editorial Mc.pherson  
Recuperado de: <http://www.ing.unlp.edu.ar/>
- [2] García Pérez Javier. (1999). *Amplificadores de Potencia para RF*. Tesis presentada en la Universidad Autónoma Metropolitana. Disponible en: <http://148.206.53.84/tesiuami/UAM1118.pdf>
- [3] Apuntes de Amplificadores. (2006). *Amplificadores de RF sintonizados*. Recuperado de: <http://materias.fi.uba.ar/>
- [4] TELECOM HALL (2013). ¿Qué es un splitter o combinador? Recuperado de <http://www.telecomhall.com/es>
- [5] REDISLOGAR (2011). *Combinadores y acopladores direccionales*. Recuperado de: <http://www.redislogar.com/>
- [6] Fotodetectores (s.f). *Tesis presentada en la universidad de sonora*. Recuperado de <http://tesis.uson.mx/>
- [7] Fotodetectores (2007). *Conceptos básicos de sensores*. Recuperado de <http://www.ptolomeo.unam.mx/>
- [8] Laboratorio de Fotodetectores (2006). *Definiciones básicas en fotodetectores*. Recuperado de <http://materias.df.uba.ar/>
- [9] Velázquez López Ángel Jesús (2003). *Tesis presentada en la universidad tecnológica de la mixteca*. Recuperado de <http://jupiter.utm.mx/>
- [10] M. Martínez Morillo y F. Sendra Portero (2008). *Láser concepto e introducción*. Recuperado de <http://www.sld.cu/>
- [11] Gómez González E. Libro digital editorial Mc.Millan (2008). *Fuentes de Luz y Emisión Láser*. Recuperado de <http://laplace.us.es/>
- [12] Malacara Hernández Zacarías (2010). *El láser fundamentos y aplicaciones*. Recuperado de <http://www.cimat.mx/>

## Capítulo 4

### Sensores Óptoelectrónicos Basados en Fibra Óptica

#### 4.1.- Oscilador de Radiofrecuencia

Un oscilador es un circuito electrónico capaz de convertir energía de corriente continua en corriente alterna con una frecuencia determinada. Existen varios tipos de osciladores que, en lo general, se conocen por el nombre de su inventor (Hartley, Colpitts, Clapp etc...). En la figura 2.1, se muestra el esquema general de un circuito oscilador, el cual está compuesto por un amplificador con ganancia A y un lazo de retroalimentación de ganancia B.

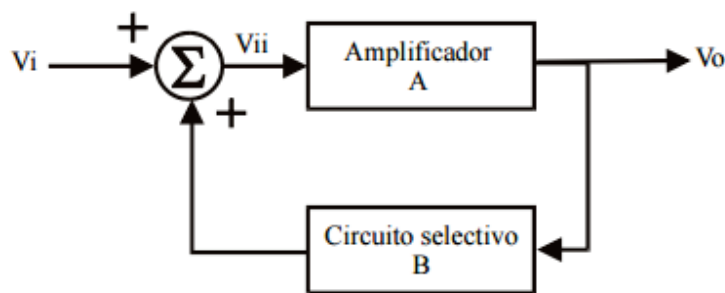


Figura 4.1 Esquema básico de un oscilador de radiofrecuencia

La ganancia de voltaje  $\frac{V_o}{V_i}$  está dada por:

$$A_r(j\omega) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{A(j\omega)}{1 - A(j\omega)B(j\omega)} \quad (4.1)$$

En este caso,  $\omega$  representa la frecuencia. Si a una frecuencia  $\omega = \omega_0$ , la ganancia de lazo  $A(j\omega)B(j\omega)$  es igual a la unidad, se deduce de la ecuación (4.1) que  $A_r(j\omega)$  será infinita. Esto significa que a esta frecuencia  $\omega_0$ , la señal de salida es finita, cuando no existe ninguna señal de entrada. Así, la condición para que el circuito de la figura 4.1 proporcione oscilaciones a frecuencias  $\omega_0$ , es

$$1 - A(j\omega_0)B(j\omega_0) = 0 \quad \text{ó} \quad A(j\omega_0)B(j\omega_0) = 1 \quad (4.2)$$

Esto significa que si se analiza el circuito de la figura 4.1, la señal de entrada tiene que ser igual a cero [1].

## 4.2.- Oscilador Optoelectrónico

Un oscilador optoelectrónico, como el que se ilustra en la figura 4.2, es capaz de generar señales de microondas hasta de 20 GHz con gran estabilidad, limitada por la velocidad de respuesta del modulador y del fotodetector.

La luz del puerto de salida del modulador electroóptico es fotodetectado, amplificado, filtrado y retroalimentado hacia los electrodos de microondas del modulador. Si el modulador es polarizado apropiadamente y la ganancia de lazo abierto en la retroalimentación se elige adecuadamente, entonces una oscilación optoelectrónica se generará en la salida del modulador Mach-Zehnder y una señal de RF en el puerto de salida del acoplador se obtiene simultáneamente [1].

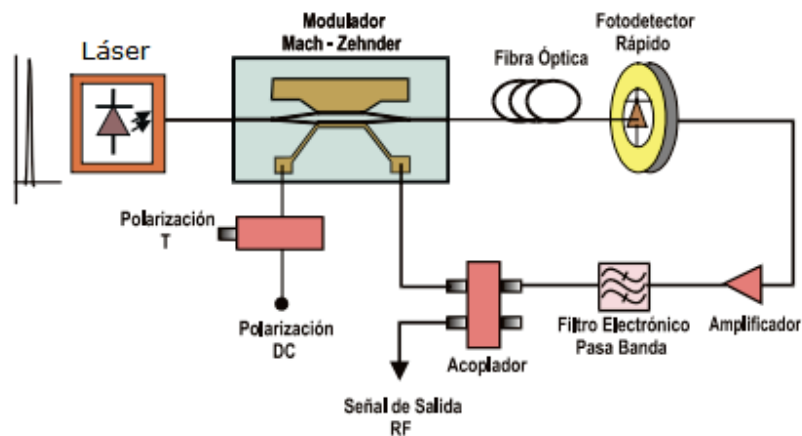


Figura 4.2 Esquema de un oscilador optoelectrónico

El modulador optoelectrónico tiene un ancho de banda de 20GHz y un voltaje de media onda  $V_{\pi}$  de 6 V, el amplificador tiene un ancho de banda de 14GHz una potencia de 30dB y una frecuencia central de 7GHz [1].

### 4.3.- Aislador Óptico

Los aisladores ópticos son dispositivos que transmiten la luz en una única dirección. Éstos son muy importantes en los sistemas de comunicaciones ópticos para evitar que las reflexiones de las señales alcancen a otros dispositivos y puedan dañarlos, como por ejemplo a los láseres [2].

La figura 4.3 muestra un esquema con el funcionamiento de este dispositivo. Como se observa la luz puede entrar al dispositivo tanto por la derecha como por la izquierda. La luz de entrada no está polarizada por lo que al encontrarse el primer polarizador sólo pasará la polarización vertical. Luego, el rotador de Faraday gira  $45^\circ$  a la derecha la polarización de la luz que lo atraviese independientemente de la polarización de ésta. El segundo polarizador transmite la luz cuya polarización esté  $45^\circ$  desplazada hacia derecha respecto de la vertical. Como este es el caso la luz sale del aislador. Si se considera el caso de que la señal entre por la derecha del aislador óptico, como se ve esta no saldrá por el otro extremo ya que el polarizador número 1 transmite la luz polarizada verticalmente y la señal llega a éste con polarización horizontal, por lo que queda bloqueada [2].

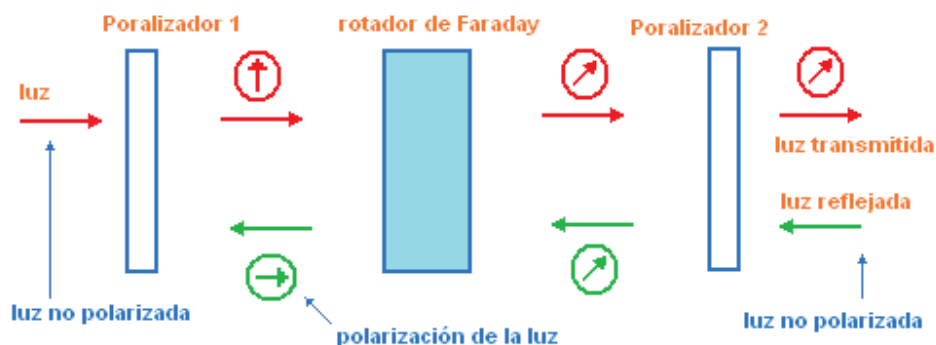


Figura 4.3 Funcionamiento del aislador óptico

Este esquema provoca muchas pérdidas en la señal de entrada pues sólo transmite la luz que este polarizada verticalmente a su entrada, lo cual es muy difícil de controlar. Para ello surge

otro esquema, que se muestra en la figura 4.4 que es un esquema de aislador óptico independiente de la polarización de la señal de entrada [3].

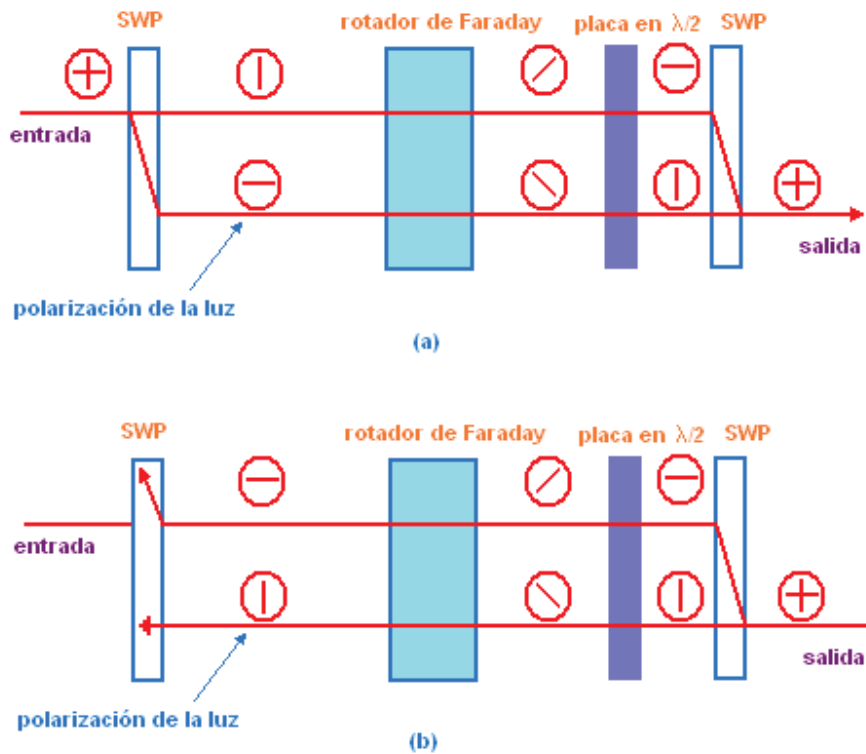


Figura 4.4 Esquemas de funcionamiento del aislador óptico

Cuando la luz atraviesa en SWP, Spatial Walk-off Polarizador, este envía cada polarización por un camino distinto, en este caso no desvía la polarización vertical y desvía unos grados hacia la derecha la polarización horizontal. En el caso (a), tras ser separadas las dos polarizaciones y atravesar el rotador de Faraday, que gira  $45^\circ$  hacia derecha la polarización de la señal que lo atraviesa, las dos polarizaciones atraviesan una lámina en  $\lambda/2$ . Este componente, a diferencia del rotador de Faraday, rota la polarización de la señal  $45^\circ$  pero el sentido de rotación depende del sentido de propagación de la señal. Finalmente al alcanzar el último SWP ambas polarizaciones se combinan a la salida del aislador. A lo contrario, cuando una señal reflejada entra al aislador por la salida de este, gracias al SWP las dos polarizaciones son desviadas sin alcanzar el otro extremo y por tanto la reflexión es bloqueada [4].



El aislador óptico juega un rol importante en la estabilidad de sistemas ópticos de comunicaciones, al eliminar las reflexiones de cada dispositivo. Además es usado en arreglos de fibra óptica para proteger a la fuente láser de haces de luz reflejada que desestabilizan su emisión [5].

Tiene una pérdida de inserción de 1 dB y de 25 dB de retorno. Se utiliza en amplificadores ópticos y láser en aplicaciones analógicas. Consiste en un rotador de polarización de Faraday de 45 grados. La señal de retorno rota 90 grados y se encuentra en contrafase (polarización de la onda) [6].

Parámetros característicos:

- Pérdidas de inserción (típicas de 1dB)
- Aislamiento (entre 40 y 50 dB)
- Dispersión por modo de polarización

#### **4.4.- Atenuador de Fibra Óptica**

Actúa mediante un movimiento mecánico o con materiales de absorción. Son fijos (de 5, 10, 15 o 20 dB) o variables. En este caso el valor de atenuación puede ser ajustado a mano.

Como componente pasivo que produce una atenuación controlada de la señal en una línea de transmisión de fibra óptica [7].

Parámetros característicos:

- Reflectancia (-40 dB)
- Pérdidas dependientes de la polarización
- Longitud de onda de operación
- Atenuación incremental (en variables)

Un atenuador permite obtener una pérdida controlada y específica de nivel de señal donde los niveles de potencia son excesivos. Su principio de funcionamiento está basado en la atenuación de la fibra con un control sobre el dopaje de la misma y la polarización insensitiva

de ésta. Su construcción permite una elevada confiabilidad y estabilidad en diversas condiciones de operación y diferentes longitudes de onda.

El uso de los atenuadores, ayuda a optimizar el funcionamiento de los equipos ópticos, ya que proporcionan estabilidad y una señal más clara de la transmisión. Un atenuador óptico es un elemento importante en un enlace óptico, dependiendo de las aplicaciones, los atenuadores también ayudan a delimitar y atenuar la cantidad de luz que pasa a través de él en un nivel exacto, adecuándose a las necesidades de su proyecto para tener la mejor señal de comunicación controlada [8].

Los atenuadores ópticos son los componentes pasivos que pueden reducir la energía óptica que se propaga a través de una fibra óptica. Existen 2 categorías de atenuadores, los fijos y variables[8].

#### **4.4.1 Atenuadores Fijos**

Consiste en reducir una energía óptica por una cantidad fija de atenuación, sin embargo, son a menudo indeseables pues los valores disponibles en el comercio de la atenuación, aproximan solamente la atenuación exacta requerida y/o se requieren de diversos atenuadores fijos valorados [9].

#### **4.4.2 Atenuadores variables (VOA)**

Cuando no se sabe el nivel de atenuación que se necesita, se utilizan atenuadores variables, los cuales ayudan a determinar de manera precisa el valor de atenuación que requiere el equipo receptor.

Al contrario de los atenuadores fijos, los atenuadores variable (VOA) tienen la capacidad de atenuar una señal óptica por una cantidad variada de atenuación. Un atenuador óptico variable es un dispositivo diseñado para atenuar una intensidad o un nivel de señal de entrada de manera controlada, para producir una señal óptica de salida con diversas intensidades de atenuación. Los atenuadores ópticos variables se forman comúnmente de una estructura de bloqueo entre una guía de onda de entrada y una guía de onda de salida.

Los atenuadores para fibra óptica son dispositivos para disminuir el nivel de una señal, ofrecen una cubierta ionizada que reduce la intensidad de señal mientras que pasa a través del atenuador. Este método de atenuación permite un mejor rendimiento en comparación a los empalmes atenuados o de fibras compensadas, que funcionan absorbiendo la señal. El atenuador es un excelente dispositivo de polarización, se aplica para obtener una mejor calidad de señal con la capacidad de regular altas señales y ser estable. Su diseño de tipo hembra/macho, permite conectarse directamente al equipo receptor, proporcionando valores estables sin afectar la longitud de onda de la señal. Existen atenuadores que su gama de atenuación va de 1dB hasta 40dB [10].

#### **4.5.- Control de Polarización**

Para diversas aplicaciones es necesario contar con señales ópticas cuyo estado de polarización sea controlable, entre ellas la de un interferómetro. Los controladores de polarización permiten modificar el estado de polarización de una señal desde su entrada a su salida. Existen básicamente dos tipos de controladores de polarización. Los controladores de fibras enrolladas (también llamados de oreja de murciélago), utilizan el efecto de birrefringencia que surge en una fibra al curvarla. Para ello se dispone la fibra enrollada en anillos de manera de curvarla uniformemente. La birrefringencia produce un retardo de la onda en un plano de polarización, cuya magnitud es proporcional al largo de la fibra enrollada y es inversamente proporcional al radio de curvatura de la misma [10].

Generalmente, y como en la Figura 4.5 se dispone de 3 anillos de fibra enrollada con un retardo establecido de  $\lambda/2$  en el del medio y de  $\lambda/4$  en los otros.

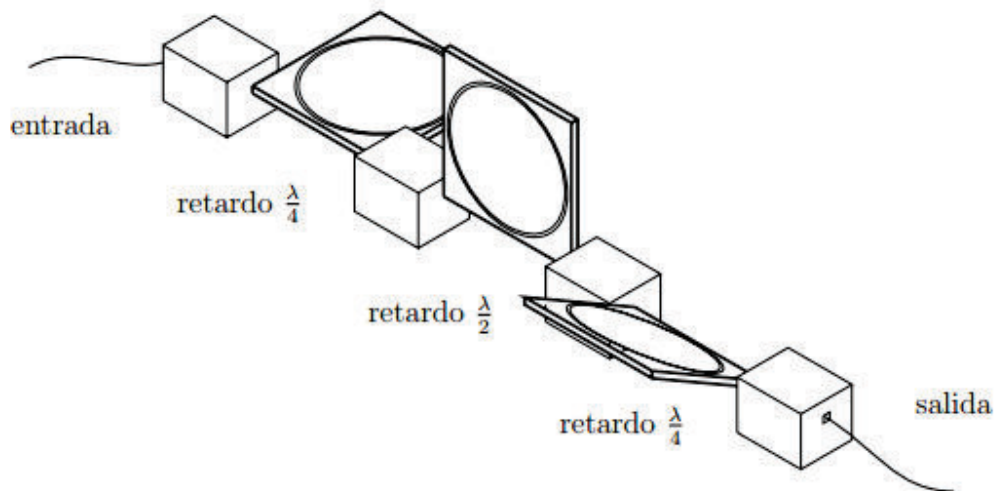


Figura 4.5 Estructura de un controlador de polarización

Estos anillos se pueden girar en torno al eje común de la fibra de entrada y de salida, de manera que cada retardo se aplique a un plano ajustable de polarización. De esta manera se puede convertir el estado de polarización de entrada en cualquier estado de polarización de salida. Por supuesto, el retardo introducido en cada anillo es dependiente de la longitud de onda de la señal. Se debe cuidar que el radio de curvatura no sea demasiado pequeño, ya que podría registrarse pérdidas muy grandes. También se puede obtener controladores de polarización mediante un dispositivo que permita aplicar una presión transversal a una fibra, por medio de un piezoeléctrico por ejemplo, haciéndola birrefringente. Hay algunas que usan sólo un tramo de fibra cuya presión se puede variar y también se puede rotar, y hay otras que ocupan más de una sección cuya presión es ajustable en distintas direcciones sin poderse rotar. En ambos esquemas se logra cualquier transformación del estado de polarización [11].

#### 4.6.- Amplificador de Fibra Dopado con Erblio (EDFA)

Los amplificadores ópticos operan haciendo uso sólo de fotones, sin necesitar la interacción de electrones. De esta forma no es necesario colocar amplificadores optoelectrónicos entre tramos de fibra, los amplificadores ópticos consiguen una amplificación lineal de la señal óptica en determinados tramos de longitudes de onda. El amplificador óptico proporciona una solución más simple al problema de la atenuación y puede ser usado independientemente del tipo de modulación y del ancho de banda, además es un dispositivo bidireccional y

permite el trabajo en sistemas con multiplexación de longitud de onda. Particularizando en sistemas monomodo donde la dispersión temporal es pequeña, la simple amplificación es suficiente para un enlace de fibra, sin embargo, para sistemas con dispersiones elevadas puede que la amplificación no sea suficiente y se necesite la regeneración de la señal y en este caso ya será necesario el interfaz optoelectrónico [11].

Los amplificadores ópticos han resultado tener más utilidades como repetidores lineales y su estudio se basa en preamplificadores de recepción, como compuertas lógicas ópticas, conformadores de pulsos y direccionadores [11].

Los dos sistemas más utilizados para amplificación óptica son los basados en láseres de semiconductor que utilizan la generación estimulada por la luz que deseamos amplificar y los basados en fibra [12].

En los últimos años la fibra óptica es el medio de transmisión más importante para las comunicaciones de alta velocidad, tanto digital como analógica. Y en la década de los 90, paralelamente a la creciente necesidad de aumentar el ancho de banda disponible aparecieron los amplificadores ópticos, los cuales dieron paso a las comunicaciones como se conocen hoy en día. [12]

Sus características insuperables en comparación con otros medios de transmisión, son:

- Gran ancho de banda ( $\sim 23$  THz).
- Baja atenuación ( $\sim 0.23$  dB/km en 1550 nm).
- Máxima ganancia en la región de 1.55  $\mu\text{m}$  (que dio paso a la utilización de la infraestructura ya instalada alrededor del mundo).
- Operación en la tercera ventana.
- Elevada ganancia y bajo ruido.
- Transparencia a las longitudes de onda.
- Independencia a la polarización.

Un amplificador óptico es capaz de amplificar un conjunto de longitudes de onda (WDM, wavelength division multiplexing)

El amplificador de fibra dopada más común es el EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) que se basa en el dopaje con Erblio de una fibra óptica [12].

Algunas características típicas de los EDFAs comerciales son:

- Frecuencia de operación: bandas C y L (aprox. de 1530 a 1605 nm).
- Para el funcionamiento en banda S (1480 nm) son necesarios otros dopantes.
- Baja figura de ruido (típicamente entre 3-6 dB)
- Ganancia entre (15-40 dB)
- Baja sensibilidad al estado de polarización de la luz de entrada
- Máxima potencia de salida: 14 - 25 dBm
- Ganancia interna: 25 - 50 dB
- Variación de la ganancia: +/- 0,5 dB
- Longitud de fibra dopada: 10 - 60 m para EDFAs de banda C y 50 - 300 m para los de banda L
- Número de láseres de bombeo: 1 - 6
- Longitud de onda de bombeo: 980 nm o 1480 nm
- Ruido predominante: ASE (Amplified Spontaneous Emission)

A continuación se muestra en la Tabla 4.1 ciertas características importantes relacionadas con el amplificador de fibra óptica dopado con erbio.

| <b>Característica</b>        | <b>EDFA</b>  |
|------------------------------|--|
| Amplificación de Banda       | Las bandas "C" y "L" (alrededor de 1550nm); no trabajan en el rango de 1300nm.                                     |
| Ganancia                     | 20db o más dependiendo de la concentración de los iones, la longitud de la fibra y la configuración de las bombas. |
| Potencia de saturación       | Depende de la ganancia y las constantes del material.  |
| Ruido                        | Amplifica el ruido.  |
| Longitud de onda de la bomba | 980 nm. Ó 1480 nm.   |
| Número de amplificadores     | Alrededor de 6.  |
| Espaciamiento                | 80 a 100 Km.   |

*Tabla 4.1 Características del amplificador dopado con erbio*

El EDFA es el amplificador de fibra dopada más empleado en la actualidad, ya que es posible amplificar señales en la tercera ventana (1550nm). El motivo puede deducirse del diagrama de niveles del erbio [12].

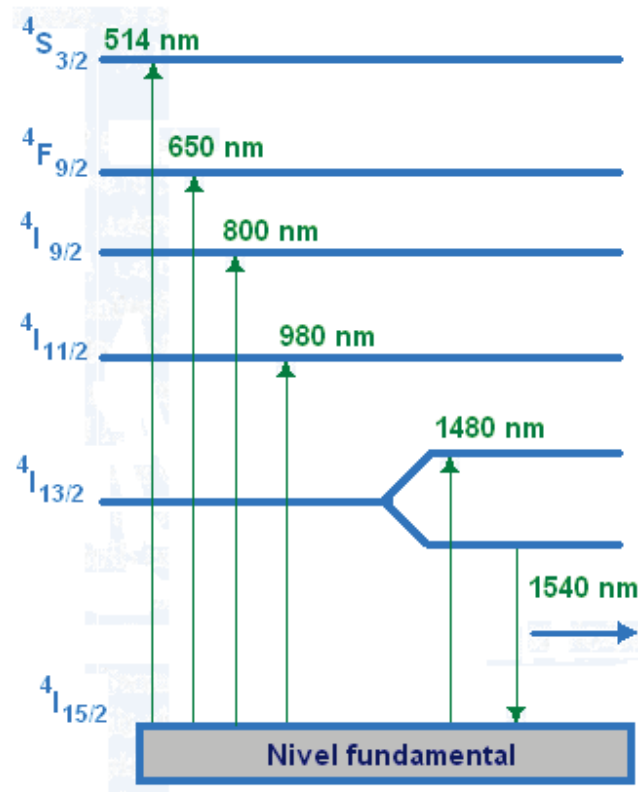


Figura 4.6 Diagrama de los niveles del Erblio

En la figura 4.6 se puede ver el diagrama de niveles de energía del erbio que la transición entre los niveles  $^4I_{13/2}$  y  $^4I_{15/2}$  corresponde a una longitud de onda comprendida entre 1530nm y 1560nm aprox. Luego al provocar una inversión de población entre dichos niveles se puede amplificar señales en la tercera ventana. El primer nivel excitado,  $^4I_{13/2}$ , desde el que las frecuencias de transición corresponden con la tercera ventana, tiene un tiempo de vida medio de 10ms, mientras que en los dos superiores es de 0.001ms, por lo que el nivel  $^4I_{13/2}$  es un estado metaestable. Por lo tanto todo ion que llegue a estos niveles por medio del bombeo terminara cayendo al nivel  $^4I_{13/2}$  por emisión espontánea, y a su vez cara al nivel fundamental por emisión estimulada, produciéndose así la amplificación [13].

Al dopar con iones de erbio el núcleo de una fibra óptica se provoca un ensanchamiento de las bandas de transición. Esto a su vez provoca un ensanchamiento considerable del rango de longitudes de onda que pueden ser amplificadas. Este efecto puede mejorarse añadiendo al núcleo, aluminio y óxido de germanio [14].



Las dos longitudes de onda de bombeo más adecuadas son 1480nm (mediante un diodo láser de InGaAsP) y 980nm (mediante un diodo láser de InGaAs). El empleo de una u otra longitud de onda depende de ciertas características del proceso de absorción en cada uno de estos niveles, derivadas de los diferentes tipos de ruido al que pueden originarse, de la disponibilidad de las fuentes de bombeo o de la saturación de ganancia. El bombeo a 1480nm supone un amplificador más ruidoso pero más inmune a la saturación de ganancia. Mientras que el bombeo a 980nm proporciona un amplificador con prestaciones de ruido excelentes pero es más proclive a la saturación de ganancia. En ambos casos es posible obtener ganancias entre 30 y 50 dB. [14]

### Esquema básico del EDFA

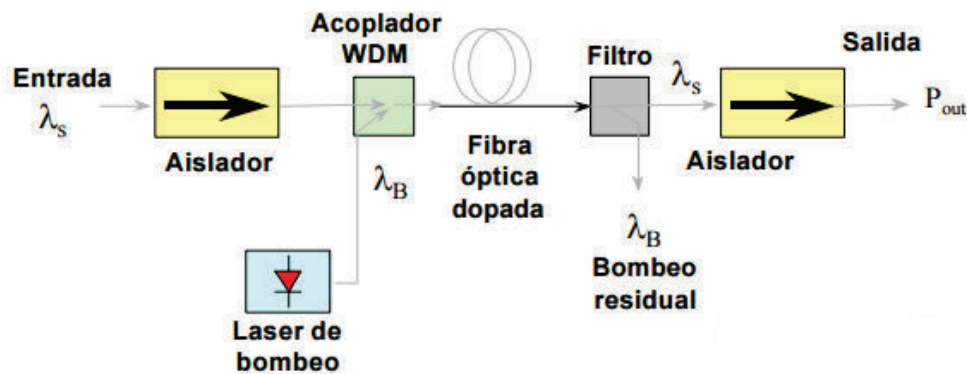


Figura 4.7 Estructura de un EDFA

En la figura 4.7 se puede observar el esquema de cómo está compuesto un EDFA y cuáles son los componentes que lo integran para poder llevar a cabo esta amplificación.

## Referencias:

- [1] García Juárez Alejandro (2005). *Generación de microondas por heterodinaje óptico y su utilización como portadoras de información en telecomunicaciones de radiofrecuencia y fibra óptica*. Tesis de doctorado presentada en el Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica (INAOE).
- [2] García Argos (2000). *Elementos ópticos*. Recuperado de <http://garciaargos.com/>
- [3] J.Gowar. (1993). *Optical Communication Systems, Second Edition*. Prentice Hall.
- [4] LIBERTAD DIGITAL (2011). *Desarrollo de un aislador óptico*. Recuperado de: <http://www.libertaddigital.com/>
- [5] Ayala D. Cesar, Tentori S. Diana (2009). *Caracterización de un aislador óptico de fibra insensible al estado de polarización*. Recuperado de: <http://www.redalyc.org/>
- [6] Componentes ópticos pasivos (s.f). Recuperado de : <http://www.spw.cl/>
- [7] Aislador óptico y Circulador (s.f). Recuperado de : <http://nemesis.tel.uva.es/>
- [8] Toledo Álvarez José Ángel (1991). *Análisis y fabricación de acopladores con fibras ópticas para sistemas de comunicaciones*. Recuperado de: <http://www.cenidet.edu.mx/>
- [9] CMATIC (2016). *Atenuadores de fibra óptica*. Recuperado de: <http://www.cmatic.net/>
- [10] ADECOMM (2000). *Atenuadores opticos*. Recuperado de: <http://www.adecomm.com/>
- [11] FIBREMEX (2016). *Uso del atenuador de fibra óptica*. Recuperado de: <http://fibremex.com/>
- [12] Vio Lagos Cristobal Tomas. (2012). *Interferometro infrarrojo heterodino de bajo costo basado en fibra óptica para la astronomia*. Recuperado de: [http://repositorio.uchile.cl/tesis/uchile/2012/cf-vio\\_cl/pdfAmont/cf-vio\\_cl.pdf](http://repositorio.uchile.cl/tesis/uchile/2012/cf-vio_cl/pdfAmont/cf-vio_cl.pdf)
- [13] Tutorial de comunicaciones ópticas (2006). *Tipos de amplificadores*. Recuperado de: <http://nemesis.tel.uva.es/>

[14] Guion de amplificadores ópticos (2006). *Tipos de amplificadores*. Recuperado de:  
<http://www.tfo.upm.es/>

# Capítulo 5

## Modulador de Intensidad Optoelectrónico como Oscilador de Microondas para el Sensado de Temperatura: Teoría y Resultados

### 5.1.- Introducción al Modulador

Las figuras 5.1(a) y (b) ilustran las estructuras fundamentales de los primeros moduladores electro-ópticos (EOM), los cuales son conocidos como moduladores de volumen o de óptica masiva. Estos EOM poseen anchos de banda de aproximadamente de 200 MHz. La figura 5.1(a) corresponde al caso donde la modulación de la luz se realiza mediante la aplicación de un campo eléctrico de manera longitudinal, es decir, la luz se propaga en forma paralela en dirección al campo eléctrico aplicado. La figura 5.1 (b) corresponde al caso en el cual la modulación es orientada de manera perpendicular al campo eléctrico aplicado.

Finalmente, la figura 5.1(c) corresponde a un EOM construido en óptica integrada, el cual mejora sustancialmente su ancho de banda, alcanzado valores de 100 GHz. En todos los casos el material utilizado para su fabricación es birrefringente, como el niobato de litio ( $\text{LiNbO}_3$ ) o tantalio de litio ( $\text{LiTaO}_3$ ). [1]

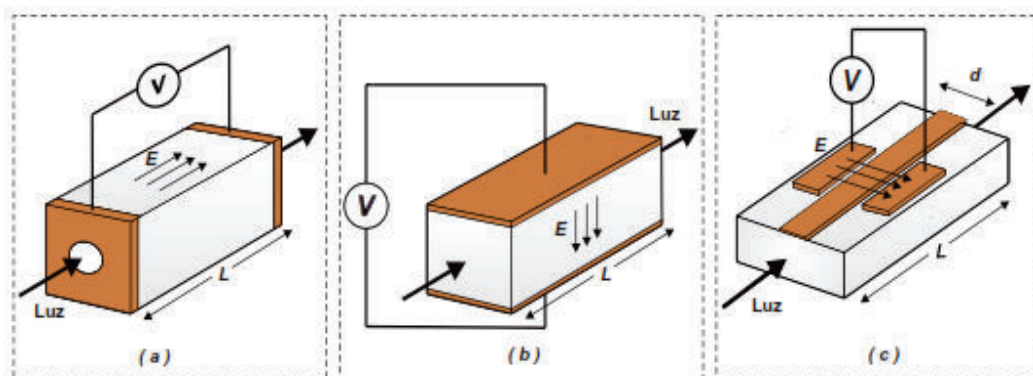
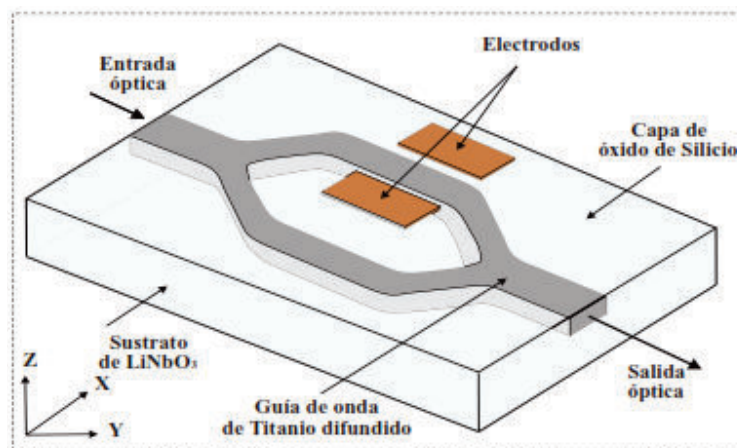


Figura 5.1 Estructuras fundamentales de los Moduladores de Intensidad del tipo Mach-Zender

## 5.2.- Modulador de Intensidad Mach-Zender de Óptica Integrada

La figura 5.2 muestra que un modulador de intensidad tipo Mach-Zender (MZI) de intensidad contiene guías de onda en forma de dos "Y" encontradas. La primera bifurcación divide el haz luminoso en dos ondas con potencias ópticas idénticas para seguir por trayectorias diferentes las cuales son:

Paralelas, rectilíneas y de la misma longitud. Al aplicar un campo eléctrico por medio de los electrodos de RF, se permite la modificación del índice de refracción de uno de los brazos por efecto electro-óptico, permitiendo desfasar una onda óptica con respecto a la otra mediante el efecto Pockels. Finalmente, el resultado a la salida del MZI de intensidad es una modulación de la amplitud de la onda óptica debido a la interferencia de la recombinación de los dos haces ópticos.



*Figura 5.2 Estructura de un MZI de óptica integrada*

Debido a que el  $\text{LiNbO}_3$  presenta un alto coeficiente electro-óptico ( $r_{33}= 30.8 \text{ pm/V}$  y  $r_{42}= 28 \text{ pm/V}$ ) y una alta transparencia óptica para longitudes de onda localizadas en el visible e infrarrojo cercano del espectro electromagnético (EM). Además, sus características térmicas, químicas y mecánicas son estables, y es compatible con la tecnología convencional de fabricación de circuitos integrados. Actualmente, los EOMs más utilizados son MZI de intensidad y los de fase con velocidades de transferencia de datos por arriba de los 10 Gbit/seg. [1]

### 5.3.- Principio de Operación de un MZI

En esta sección se muestran las ecuaciones que rigen el principio de operación de un MZI de intensidad, de corte Z y propagación en Y. Las figuras 5.3 (a) y (b) ilustran un MZI donde los electrodos de RF están colocados de tal forma que un electrodo queda por encima de una guía de onda. Aquí  $l$  es la longitud de los electrodos y  $d$  la separación entre ellos, de tal manera que el campo eléctrico está en función del voltaje aplicado ( $E = V/d$ ) y está dirigido en la dirección Z. Sea  $E_i(t)$  una onda óptica dada por la siguiente expresión:

$$E_i(t) = A_0 e^{j\omega_0 t} \quad (5.1)$$

Donde  $A_0$  es la amplitud, y  $\omega_0$  es la frecuencia óptica angular.

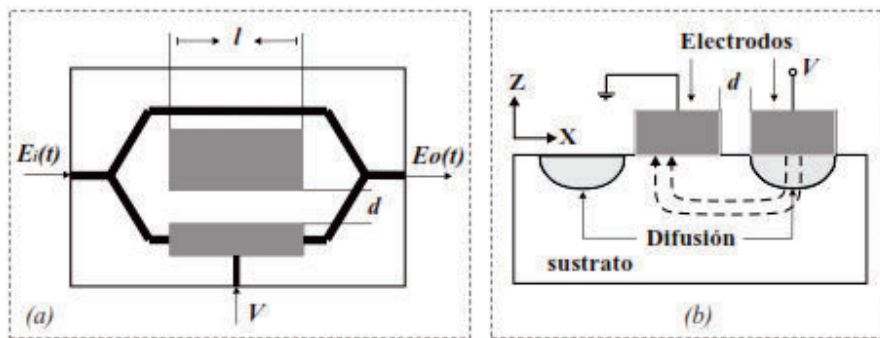


Figura 5.3 Principio de operación de un MZI

La onda incidente, después de pasar por la primera Y, es separada en dos ondas; la onda que viaja por la guía bajo el electrodo sufre un factor de desfase  $\phi_m$  en relación a la otra debido a la aplicación de un campo eléctrico. Posteriormente, en la segunda Y las dos ondas se vuelven a recombinar y ahora su amplitud es determinada por la siguiente relación:

$$E_0(t) = \frac{1}{2} A_0 e^{j\omega_0 t} + \frac{1}{2} A_0 e^{j(\omega_0 t + \phi_m)} \quad (5.2)$$

En términos de intensidad óptica, la ecuación se puede reescribir como:

$$I(t) = E_0(t) * E_0^*(t) \quad (5.3)$$

O bien:

$$I(\phi_m) = \frac{I_0}{4} (2 + 2\cos\phi_m) = \frac{I_0}{2} (1 + \cos\phi_m) \quad (5.4)$$

La intensidad se puede expresar en función del voltaje aplicado: [1]

$$I(V) = \frac{I_0}{2} \left[ 1 + \cos\left(\pi \left(\frac{V}{V_\pi}\right)\right) \right] \quad (5.5)$$

#### 5.4.- Esquema de Configuración para el Sensado de Temperatura

Los sensores de fibra óptica se han investigado durante muchos años debido a sus inmensas ventajas en comparación con los tradicionales sensores electrónicos, entre las principales se encuentran: ligereza, simplicidad, alta sensibilidad, facilidad de fotodetección y además son muy compactos, tienen resistencia a la corrosión química e inmunidad a interferencias electromagnéticas [2].

La figura 5.4 se muestra la configuración de los dispositivos tanto ópticos como eléctricos para poder llevar a cabo el sensado de temperatura propuesto. Primeramente como fuente de luz óptica se optó por utilizar un láser monomodo con una potencia de 2 mW, este dispositivo óptico además tiene la función de variar la temperatura a la que se encuentra trabajando el láser, se determinó en posicionar a una temperatura ambiente fija alrededor de 25 grados centígrados en el láser con la ayuda de una placa interna que nos permite variar la temperatura de trabajo del láser.

Después de configurar la fuente óptica se colocó un aislador óptico con la finalidad de evitar posibles reflexiones de luz por mala inserción del haz y que pudieran dañar la fuente óptica y por tal motivo asegurar la protección del láser.

Después que el haz del láser se ha propagado a través del aislador, se conectó un control de polarización para poder tener control sobre los estados de polarización de la luz y tener más variabilidad al momento de medir los desplazamientos de señales de microondas para el análisis del sensado de temperatura.

Al pasar por el control de polarización sigue una parte fundamental en la configuración lo que sería el modulador cuya función es realizar una modulación de la amplitud de la onda óptica debido a la interferencia de la recombinación de los dos haces ópticos.

A la salida del modulador se conectó un amplificador de fibra óptica dopado con Erblio (EDFA), para generar mayor ganancia, no obstante la peculiaridad es que son muy buenos amplificadores por tal motivo se colocó un atenuador de fibra óptica el cual se puede manipular manualmente para tener un control de la potencia.

Después de pasar por el atenuador sigue la parte principal del oscilador optoelectrónico el cual es la fibra óptica como sensor de temperatura, este sensor tiene contacto físico con la variable térmica en este caso la temperatura, es aquí donde se realiza el cambio de índice de refracción de la fibra óptica. Debido al aumento o disminución de la temperatura existen variaciones en el periodo por lo que habrá un cambio, en la frecuencia ya que se encuentran ligados, esto genera los cambios en frecuencia que se están buscando.

Al salir la luz de la etapa de sensado se detecta y se convierte en una señal eléctrica por medio de un fotodetector. Ahora la señal cambió de óptica a eléctrica y el siguiente dispositivo que se conecta es un divisor, el cual tiene la función de dividir en partes iguales la potencia de la señal. Una parte se conecta al modulador con una serie de amplificadores para generar el producto de ganancias y generar las oscilaciones y su retroalimentación, en algunos casos se le conoce como técnica de interrogación, ya que se encuentra en constante comunicación con la parte de sensado y se tiene un análisis de los cambios que sucedieron.

El otro extremo del divisor se conecta en un analizador de espectros eléctricos (ESA), donde se lleva a cabo la visualización de la señal, en este caso las frecuencias que se generaron, para poder de esta manera analizarlas y estudiar su comportamiento al momento de realizar cambios de temperatura en la parte del sensado. Finalmente se obtienen los datos y graficas



que permiten caracterizar a detalle cómo están relacionados el cambio de temperatura con la frecuencia.

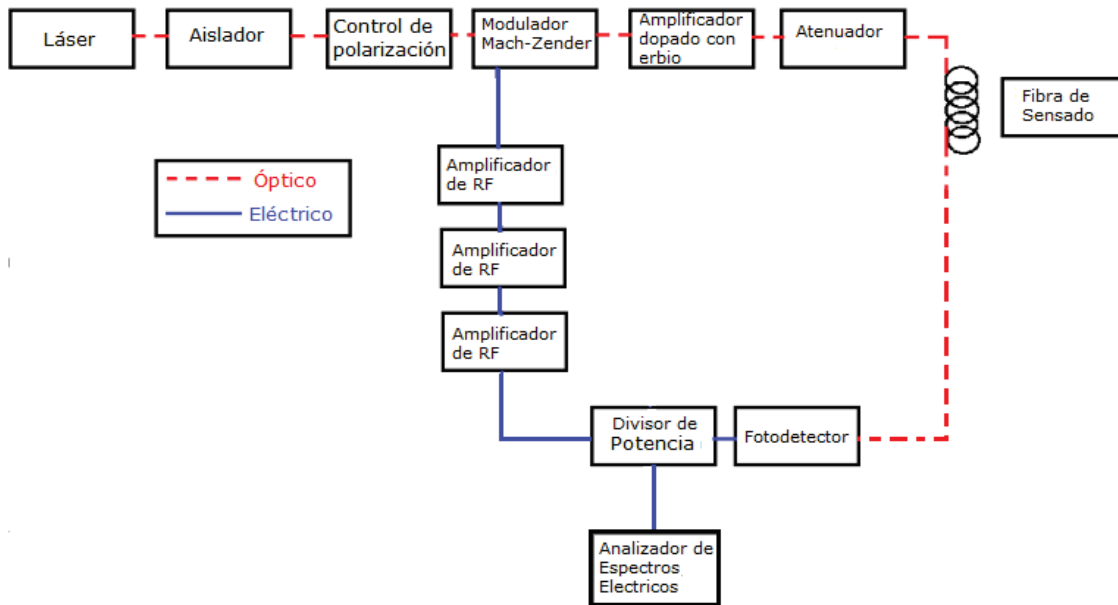
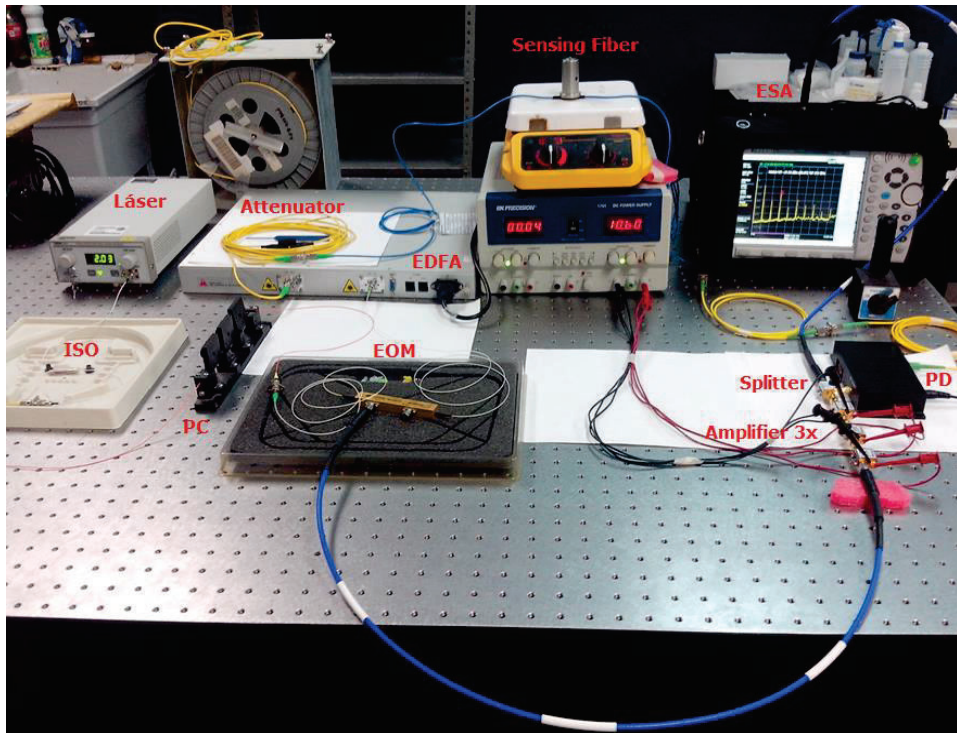


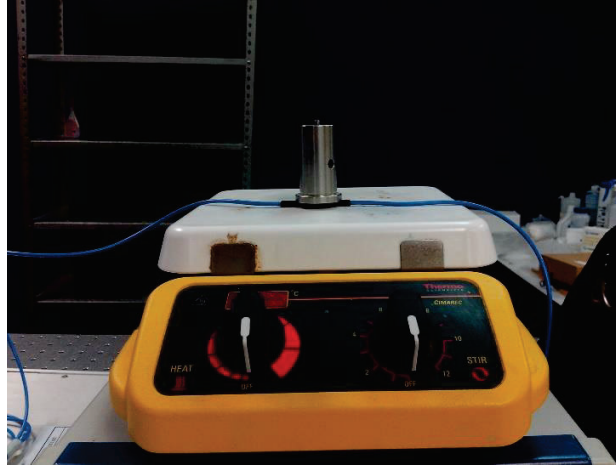
Figura 5.4 Diagrama de conexión del sistema de sensado

En la figura 5.5 se muestra una fotografía del esquema de configuración experimental que se armó en el laboratorio. Se pueden apreciar todos los dispositivos tanto ópticos como eléctricos para llevar a cabo el análisis de temperatura con su variación en frecuencia.



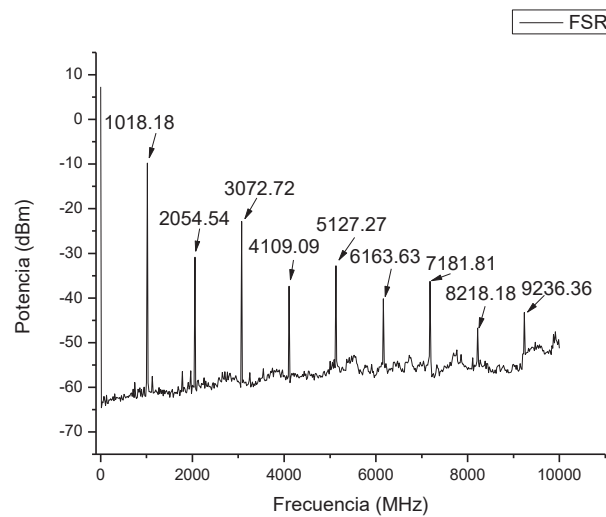
*Figura 5.5 Esquema real del sistema de sensado*

Para la parte del sensado de temperatura se utilizó una placa de calentamiento controlado como la que se ilustra en la figura 5.6. La temperatura inicialmente se fijó en 40°C y posteriormente se aumentaba gradualmente en cambios de 5°C y se logró observar que la frecuencia de la señal de microondas se iba desplazando gradualmente. Cabe mencionar que se utilizó un peso adicional en una forma de cilindro para que el sensor hiciera contacto con la superficie de la plancha y de esta forma se transmitiera el calor de forma uniforme.



*Figura 5.6 Aplicación y sensado de temperatura*

En figura 5.7 se muestran las frecuencias armónicas que se generaron con el oscilador de microondas. Cabe resaltar que este espectro fue medido después de haber filtrado el Free Spectrum Range (FSR) con el control de polarización antes de calentar al sensor de fibra óptica. Se puede observar que prácticamente se generaban frecuencias consecutivas en 1GHz, 2GHz, 3GHz y así sucesivamente hasta los 9GHz con ciertas variaciones pero muy fijas lo cual nos ayuda al momento de comenzar a calentar la parte del sensado.



*Figura 5.7 Free Spectrum Range (FSR)*

El FSR del oscilador optoelectrónico está dado por la siguiente ecuación:

$$w = \frac{c}{nL} = \frac{c}{n(L_1 + L_2)} \quad (5.6)$$

Donde  $c$  es la velocidad de la luz,  $n$  es el índice de refracción de la fibra óptica y  $L=L_1+L_2$  es la longitud total del lazo del oscilador en el cual  $L_1$  es la longitud de la fibra de sensado y  $L_2$  es la longitud de la otra parte del lazo.

La relación entre el cambio del FSR  $\Delta w$  y la variación de la fibra de sensado  $\Delta T$  se puede derivar como:

$$\Delta w = \frac{\left( -c \left( \left( \frac{dn}{dT} \right) L_1 \right) + \left( \left( \frac{dL_1}{dT} \right) n \right) \right)}{(n^2(L_1 + L_2)^2)} \Delta T \quad (5.7)$$

Donde  $dn/dT \approx 0.811 \times 10^{-5}/^\circ C$  que es coeficiente termo-óptico de la fibra de sensado y  $dL_1/dT \approx 5.5 \times 10^{-7}/^\circ C$  que es el coeficiente de termo-expansión de la fibra de sensado así como la longitud de la fibra de sensado  $L_1$  es mucho más grande que  $n$  podemos considerar que  $(dn/dT) L_1 \gg (dL_1/dT)n$

Así que obtenemos la siguiente ecuación:

$$\Delta w = \frac{\left( -c \left( \left( \frac{dn}{dT} \right) L_1 \right) \right)}{(n^2(L_1 + L_2)^2)} \Delta T \quad (5.8)$$

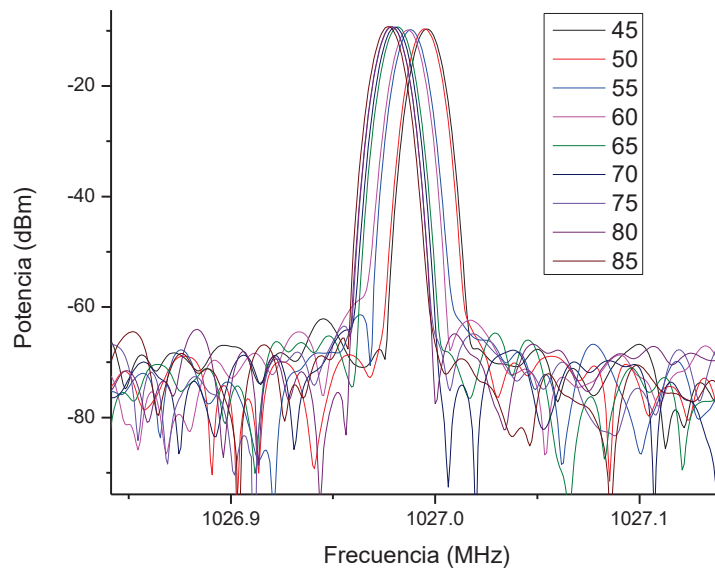
Si  $L_1 \gg L_2$  entonces la ecuación puede ser simplificada a:

$$\Delta w = \frac{C}{L_1} \Delta T \quad (5.9)$$

Donde  $C$  es una constante, entonces podemos observar que  $\Delta w$  es directamente proporcional a la variación de la temperatura  $\Delta T$  e inversamente proporcional a  $L_1$  [2].

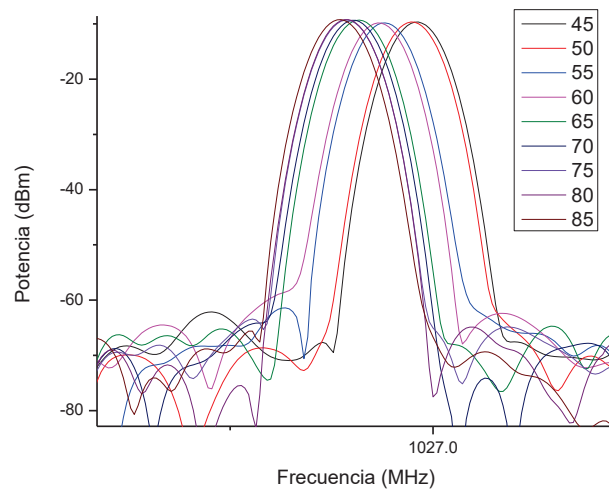
### 5.5.- Resultados del Análisis a una Frecuencia de 1GHz

En la siguiente figura se muestran los resultados obtenidos para una frecuencia de 1GHz con aumentos de 5°C. En donde se puede observar que al aumentar la temperatura la frecuencia tiene cierto desplazamiento con una tendencia a disminuir como se muestra en la gráfica.



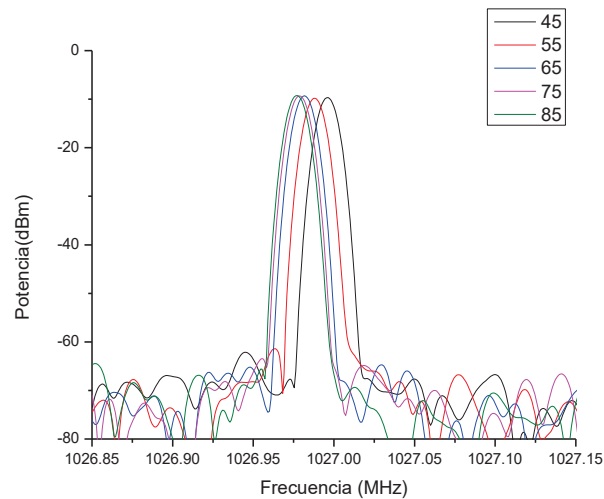
*Figura 5.8 Resultados a una frecuencia de 1GHz*

En la figura 5.9 se muestra la misma gráfica con cierta amplificación para poder observar más detalladamente como es el desplazamiento que tiene esta frecuencia al aumento de temperatura cabe mencionar que las condiciones en que se realizaron las pruebas de medición tienen que ser a una temperatura ambiente sin efectos de otros tipos de aparatos para la climatización como lo son aires acondicionados o cualquier tipo de ventilación.



*Figura 5.9 Acercamiento (Zoom) a los resultados en 1GHz*

En la siguiente figura 5.10 se muestra la gráfica con unos datos que tienen espaciamiento de 10 grados centígrados para poder observar con claridad cómo se genera ese desplazamiento.



*Figura 5.10 Resultados obtenidos a 1 GHz con espaciamiento de 10 grados*

En la figura 5.11 se ilustra una gráfica que muestra cómo es el desplazamiento de cada dato que se iba registrando. Como se puede observar la frecuencia tiene una tendencia a disminuir conforme se va aumentando la temperatura de igual manera el desplazamiento entre cada

dato es del orden de los KHz y no es muy grande pero suficiente para generar registros donde se tiene una variación. Al inicio tiene unos cambios variantes pero de los 65 grados hasta los 85 muestra una linealidad muy constante pero de igual manera se genera un desplazamiento que es lo importante que suceda al momento de aplicar temperatura.

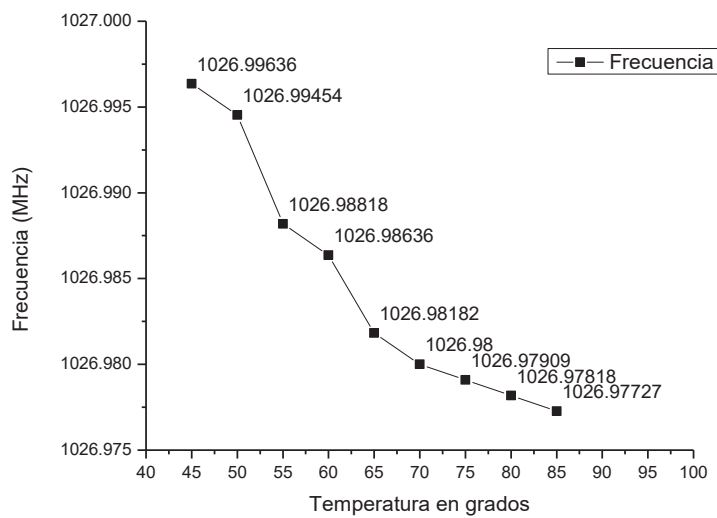
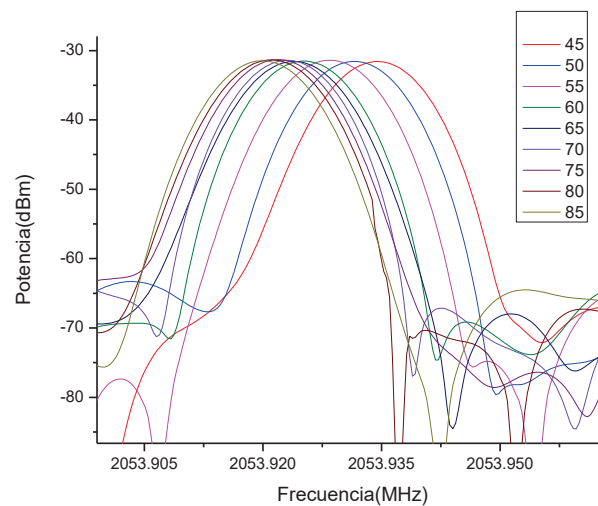


Figura 5.11 Resultados a 1 GHz al aumentar la temperatura 5 grados

## 5.6.- Resultados del análisis a una Frecuencia de 2GHz

En la figura 5.12 se muestra una gráfica donde se observan los resultados para una frecuencia de 2GHz perteneciente al FSR que anteriormente se mostró. De igual manera se hizo el registro de datos con espaciamentos de 5°C grados centígrados cada uno. Se puede observar que de igual manera la frecuencia tiene un desplazamiento que tiende a disminuir al momento que se aumenta la temperatura, algo importante es que la potencia es variable entre cada frecuencia analizada y eso se puede observar en el FSR donde se encuentran en conjunto estas frecuencias.



*Figura 5.12 Resultados a una frecuencia de 2GHz*

En la figura 5.13 se muestra una gráfica que muestra con cierta ampliación lo que son estas especies de campanas donde se puede observar claramente como es el desplazamiento en frecuencia entre cada dato registrado. De igual manera como se ha observado anteriormente, se tiene una disminución en la frecuencia al momento de aumentar la temperatura. Cabe mencionar que cada dato registrado se adquirió con un cierto tiempo de estabilización de temperatura de aproximadamente 3 minutos entre registro para que la temperatura llegara exactamente al valor seleccionado.



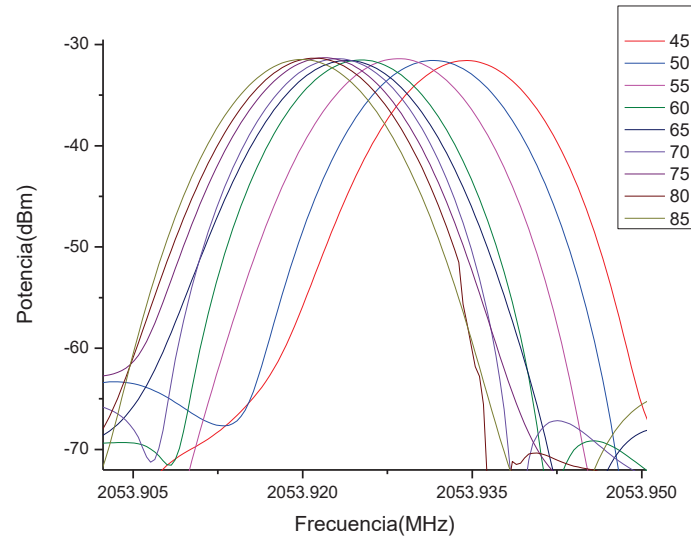


Figura 5.13 Acercamiento (Zoom) a los resultados en 2GHz

En la figura 5.14 se muestran los datos registrados con un espaciado de  $10^{\circ}\text{C}$  se observa con mayor claridad el desplazamiento que tiene esta frecuencia y como disminuye con el incremento de la temperatura. Es notoria la variación que existe lo cual nos dice que el sensor está respondiendo a los cambios de temperatura.

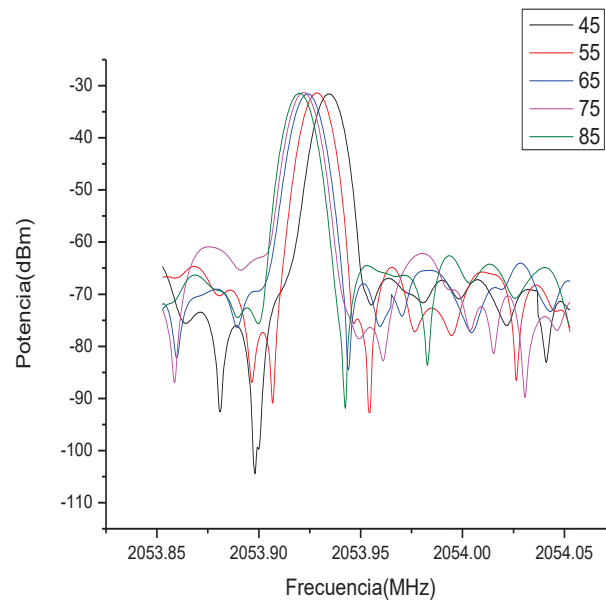


Figura 5.14 Resultados obtenidos a 2 GHz con espaciado de 10 grados

En la figura 5.15 se pueden observar los cambios numéricos que esta frecuencia de 2GHz experimentó al momento de variar en forma ascendente a la temperatura. Estos cambios como se han presentado son del orden de KHz, pero marcan una diferencia significativa al momento de su comparación. En esta gráfica se pueden observar unas variaciones al inicio no muy constantes. A partir desde los 60 grados y hasta los 85 existe una pendiente que parece tener variaciones muy similares a los casos anteriores.

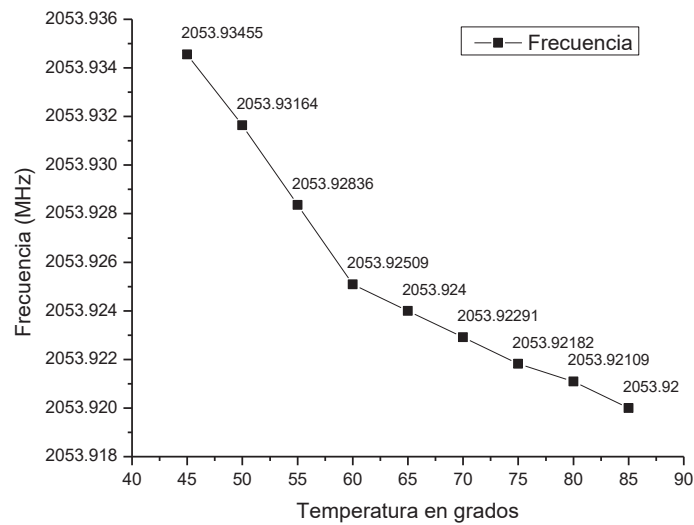
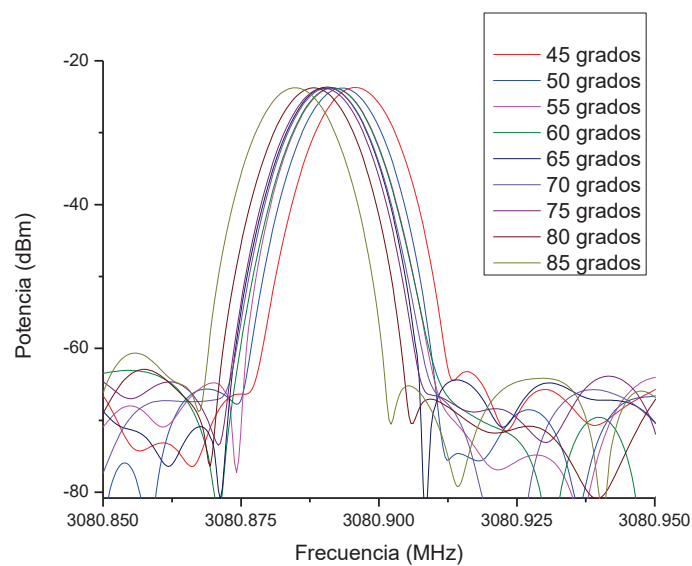


Figura 5.15 Resultados a 2 GHz al aumentar la temperatura 5 grados

### 5.7.- Resultados del análisis a una Frecuencia de 3GHz

En la figura 5.16 se muestran los resultados obtenidos para una frecuencia de 3GHz donde se puede observar claramente cómo es el desplazamiento de la frecuencia al momento de aumentar la temperatura, como ya se ha demostrado en graficas anteriores la frecuencia tiende a disminuir. Se tomaron datos con espaciamientos de 5 grados desde los 40 hasta los 85 grados centígrados, como se puede apreciar su potencia se encuentra alrededor de los 24 dBm y es constante.



*Figura 5.16 Resultados a una frecuencia de 3GHz*

En la figura 5.17 se muestra una ampliación de igual manera al segmento en forma de campana o cresta para observar con más detalle cómo es la variación de la frecuencia al momento de inducir temperatura, de igual manera los datos registrados van desde los 40 grados hasta los 85 grados centígrados, donde podemos apreciar ese desplazamiento constante de manera más clara y un poco más uniforme.

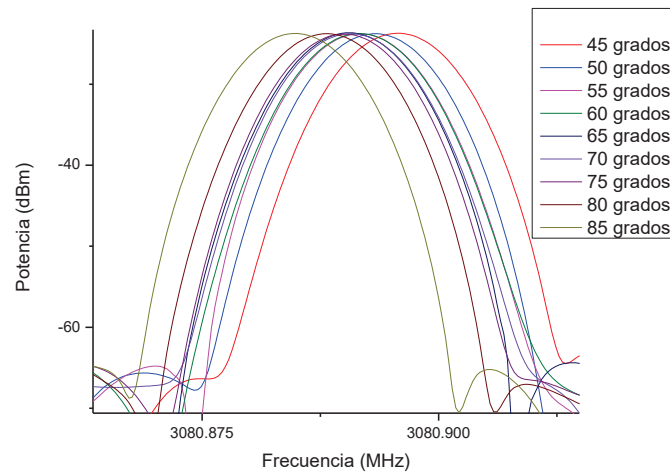


Figura 5.17 Acercamiento (Zoom) a los resultados en 3GHz

En la figura 5.18 se observan las curvas registradas correspondientes a señales de microondas con frecuencia de 3 GHz. El espaciamiento es de  $10^{\circ}\text{C}$  para hacer más notorio el desplazamiento. Como se puede apreciar la frecuencia genera cierta disminución en todos los casos analizados al variar su temperatura. Esto quiere decir que en la parte del sensado se genera un cambio en el índice de refracción que permite generar un periodo más largo y por lo tanto una disminución de la frecuencia.

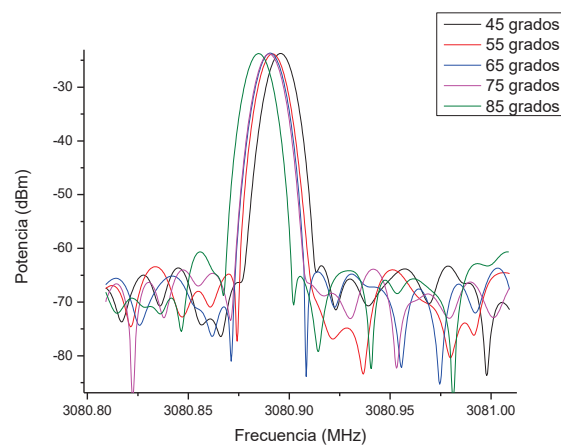


Figura 5.18 Resultados obtenidos a 3 GHz con espaciamiento de 10 grados

En la figura 5.19 se pueden observar los desplazamientos numéricos que tuvo esta frecuencia de 3 GHz los cuales son un poco más constantes con variaciones no tan grandes en el orden de los KHz. Se puede observar una linealidad desde los 55 grados hasta los 85 grados centígrados.

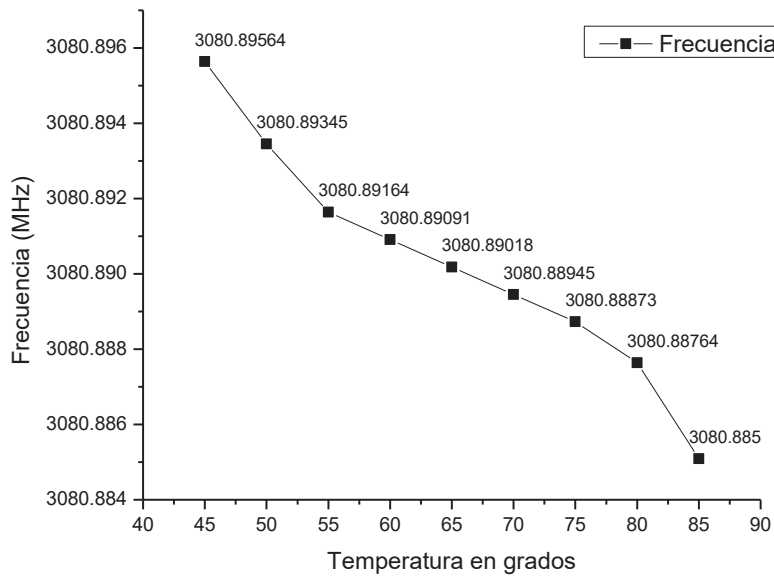


Figura 5.19 Resultados a 3 GHz al aumentar la temperatura 5 grados

### 5.8.- Resultados de aproximación de la variación de frecuencia con respecto a la longitud de la fibra de sensado.

En la figura 5.20 se muestra la aproximación de una manera gráfica de cómo sería la variación del cambio de la frecuencia al aumentar la longitud de sensado de la fibra. Se realizó esta prueba para una frecuencia de 3GHz, y se obtuvo un resultado en KHz similar a los resultados obtenidos del cambio en frecuencia que se observan en la figura 5.19, cabe mencionar que es una aproximación y que existen varios factores que no lo hacen del todo exacto, mas sin embargo se encuentran en un rango de aproximación razonable. La ecuación que nos determina esta variación es: [3]

$$\Delta f = \frac{\left(-c \left(\frac{dn}{dT}\right) L_1\right)}{\left(n^2(L_1 + L_2)^2\right)} \times \left\{ \left[ \frac{f(L_1 + L_2)n}{c} \right] + 1 \right\} \Delta T \quad (5.10)$$

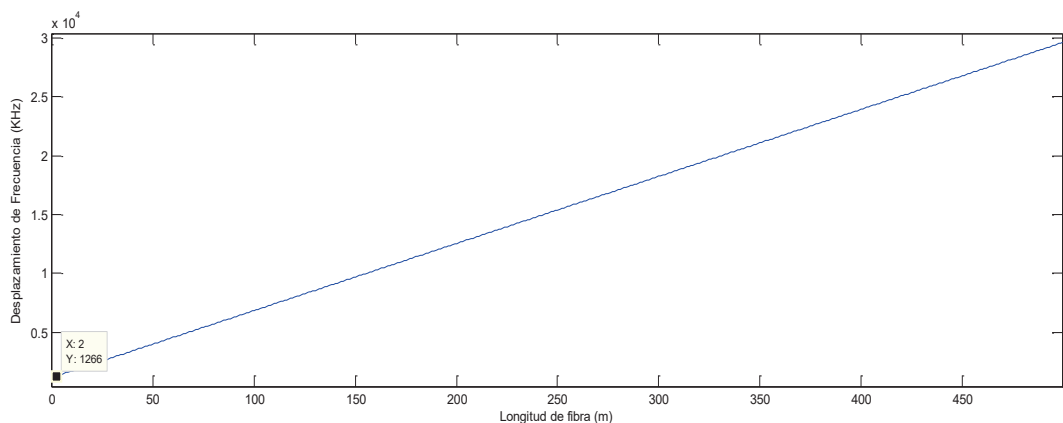


Figura 5.20 Aproximación de movimiento en frecuencia respecto a la longitud de sensado en forma lineal

Tanto en la figura 5.20 como en la figura 5.21 se puede observar que para 2mts de longitud de fibra de sensado que aproximadamente se contaba en el área de trabajo, se tiene una variación en frecuencia de 1.266KHz, la figura 5.21 proviene de la ecuación 5.10 en forma logarítmica y se observa cómo es el desplazamiento de la frecuencia.

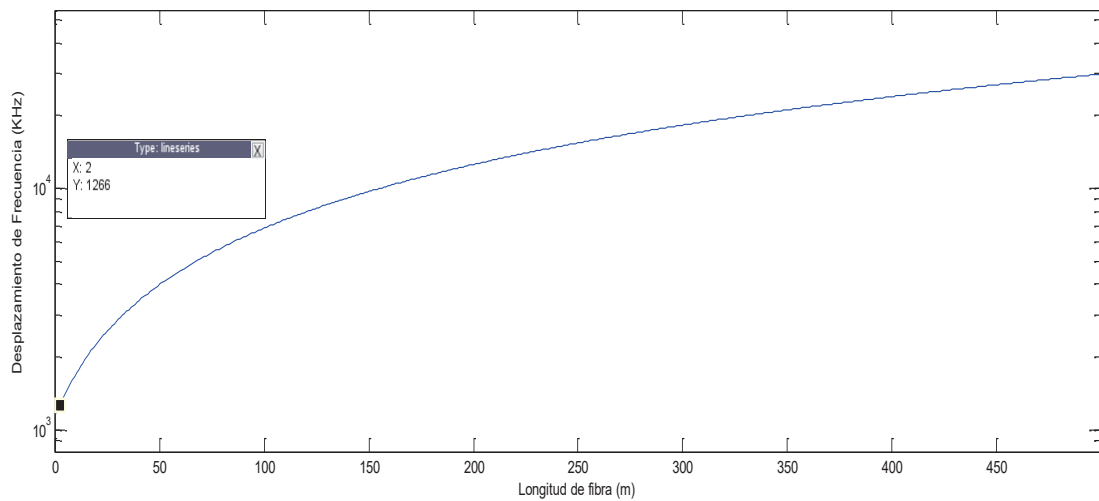


Figura 5.21 Aproximación de movimiento en frecuencia respecto a la longitud de sensado en forma logarítmica

## Referencias:

- [1] Baylon Fuentes Antonio. (2011). *El modulador de intensidad Mach-Zender de óptica integrada*. Tesis de maestría presentada en el INAOE.
- [2] Shiwei Zhang, Hao Chen, and Hongyan Fu. (2015). *Fiber-optic Temperature sensor using an Optoelectronic Oscillator*. Artículo de: 14th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON).
- [3] Hao Chen, Shiwei Zhang, Hongyan Fu, Hanqing Li, Dan Zhang, and Nan Chen (2016). Fiber-optic temperature sensor interrogation technique based on an optoelectronic oscillator. Artículo de: *Opt. Eng.* 55(3), 031107 (Oct 06, 2015).

# Capítulo 6

## Conclusión y perspectiva

Los sistemas de sensado desde su creación hasta la actualidad han revolucionado completamente las técnicas de monitoreo de información, ya que su funcionamiento se basa principalmente en detectar alguna variante o un cambio en una señal o magnitud física la cual es procesada en cierto sistema y se nos presenta de manera gráfica o numérica, para después tomar una decisión que afecte al objeto o sistema que generó esa variación en un principio. En la actualidad los sistemas de sensado de cualquier tipo son utilizados a diario hasta se podría decir que sin su funcionamiento muchos avances, aplicaciones y objetos tecnológicos de hoy en día no existirían. Tan así es su importancia que día a día se siguen desarrollando diferentes dispositivos de detección, técnicas y sistemas, para seguir obteniendo aplicaciones de cualquier tipo en cualquier disciplina.

Este trabajo se enfocó en una cierta área la de sensado de temperatura y utilizó a un sistema en el cual se combinaron dispositivos ópticos y eléctricos como medios de detección, transmisión, amplificación, etc. El funcionamiento principal de este sistema fue el detectar una variación de incremento o descenso de temperatura en la parte de sensado la cual debido a la acción del sensor generó un cambio en el índice de refracción de la fibra óptica lo cual fue acompañado de un retraso en el periodo y por consecuente al tener cierto retraso se tuvo una variación en la frecuencia, que es lo que nos indicó cuando existe una variación en temperatura. Como parte importante a destacar las ventajas que tiene este tipo de sistemas y el gran panorama de aplicaciones como tiende a ser más preciso, resistente a los ambientes donde el clima es extremoso, hace que su transmisión sea más fácil y veloz ya que por la fibra óptica y sus características lo hace posible, la parte donde se observaban los cambios en frecuencia en el ESA mostró si la temperatura aumentaba o disminuía, son varias las aplicaciones que abarcan varios sectores industriales y de igual forma de investigación, como trabajo a futuro se implementaría otro dispositivo como el convertidor de frecuencia a voltaje en el cual ya se podría utilizar un microcontrolador que realizara la adquisición de la señal y que la convierta y la presente en una pantalla LCD o una computadora para su constante monitoreo.



## Índice de Figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1.1 Diagrama de la estructura del sistema de sensado de temperatura .....                                  | 6  |
| Figura 2.1 Representación gráfica de la respuesta de un sensor .....  | 12 |
| Figura 2.2 Representación del funcionamiento del sensor Hall.....   | 15 |
| Figura 2.3 Representación de la estructura de un sensor capacitivo.....   | 16 |
| Figura 2.4 Representación de un sensor de ultrasonido .....   | 17 |
| Figura 2.5 Representación del funcionamiento de un sensor óptico.....   | 18 |
| Figura 3.1 Funcionamiento del divisor de frecuencia.....  | 26 |
| Figura 3.2 Funcionamiento del fotodetector .....  | 29 |
| Figura 4.1 Esquema básico de un oscilador de radiofrecuencia .....  | 34 |
| Figura 4.2 Esquema de un oscilador optoelectrónico .....  | 35 |
| Figura 4.3 Funcionamiento del aislador óptico.....  | 36 |
| Figura 4.4 Esquemas de funcionamiento del aislador óptico.....  | 37 |
| Figura 4.5 Estructura de un controlador de polarización .....   | 41 |
| Figura 4.6 Diagrama de los niveles del erbio.....   | 45 |
| Figura 4.7 Estructura de un EDFA.....   | 46 |
| Figura 5.1 Estructuras fundamentales de los MZI .....   | 49 |
| Figura 5.2 Estructura de un MZI de óptica integrada .....   | 50 |
| Figura 5.3 Principio de operación de un MZI .....   | 51 |
| Figura 5.4 Diagrama de conexión del sistema de sensado.....   | 54 |
| Figura 5.5 Esquema real del sistema de sensado .....  | 55 |
| Figura 5.6 Aplicación y sensado de temperatura .....  | 56 |
| Figura 5.7 Free Spectrum Range (FSR).....   | 56 |
| Figura 5.8 Resultados a una frecuencia de 1GHz .....  | 58 |
| Figura 5.9 Acercamiento (Zoom) a los resultados en 1GHz.....  | 59 |
| Figura 5.10 Resultados obtenidos a 1 GHz con espaciamento de 5 grados.....  | 59 |
| Figura 5.11 Resultados a 1 GHz al aumentar la temperatura 5 grados .....  | 60 |
| Figura 5.12 Resultados a una frecuencia de 2GHz .....   | 61 |
| Figura 5.13 Acercamiento (Zoom) a los resultados en 2GHz.....   | 62 |
| Figura 5.14 Resultados obtenidos a 2 GHz con espaciamento de 5 grados.....  | 62 |
| Figura 5.15 Resultados a 2 GHz al aumentar la temperatura 5 grados .....  | 63 |
| Figura 5.16 Resultados a una frecuencia de 3GHz .....   | 64 |
| Figura 5.17 Acercamiento (Zoom) a los resultados en 3GHz.....   | 65 |
| Figura 5.18 Resultados obtenidos a 3 GHz con espaciamento de 5 grados.....  | 65 |
| Figura 5.19 Resultados a 3 GHz al aumentar la temperatura 5 grados .....  | 66 |
| Figura 5.20 Aproximación de movimiento en frecuencia respecto a la longitud de sensado en forma lineal.....       | 67 |
| Figura 5.21 Aproximación de movimiento en frecuencia respecto a la longitud de sensado en forma logarítmica ..... | 69 |