

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA



FACULTAD DE INGENIERÍA ARQUITECTURA Y DISEÑO

PROGRAMA DE POSGRADO DE MAESTRIA Y
DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA

INSTRUMENTO PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL ÍNDICE
REFRACTIVO CON INTERFERÓMETRO DE MICHELSON

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de

MAESTRO EN INGENIERÍA

Presenta:

JOSÉ MARÍA GUADALUPE ÁLVAREZ MURILLO

Ensenada, Baja California, México, Diciembre de 2012

TESIS DEFENDIDA POR

José María Guadalupe Álvarez Murillo

Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ



Dr. Horacio Luis Martínez Reyes

Director del Comité



Dr. Miguel Martínez Rosas

Miembro del Comité



Mc. Humberto Cervantes de Ávila

Miembro del Comité

Diciembre de 2012

RESUMEN de la tesis de **JOSÉ MARÍA GUADALUPE ÁLVAREZ MURILLO**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN INGENIERÍA. Ensenada, Baja California, Diciembre de 2012.

**INSTRUMENTO PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL ÍNDICE
REFRACTIVO CON INTERFERÓMETRO DE MICHELSON**

Resumen aprobado por:



Dr. Horacio Luis Martínez Reyes

Director de Tesis

Los instrumentos ópticos pueden medir una amplia gama de variables con una resolución muy fina y en ambientes donde los sistemas electrónicos o mecánicos convencionales no funcionan adecuadamente debido al ruido electromagnético y otras perturbaciones. En este trabajo se presenta el desarrollo de un sistema de automatización para un interferómetro de Michelson que resuelve el patrón de franjas de interferencia con la técnica de conteo de franjas para medir el índice de refracción.

La falta de elementos ópticos y una fuente con polarización constante no permitió implementar el arreglo de interferómetro de Michelson homodino necesario para la técnica de conteo, pero la información recaudada con todos los experimentos en diferentes arreglos ópticos fue suficiente para diseñar un algoritmo capaz de resolver el patrón de franjas a partir de señales de interferencia simuladas con circuitos electrónicos.

Palabras Clave: interferómetro de Michelson, conteo de franjas, índice de refracción.

A mis padres

Agradecimientos

A mis padres por su apoyo en esta etapa de mi vida y a mi Fabi por estar conmigo en todo momento.

A mi director de tesis Horacio Luis Martínez Reyes por compartir su conocimiento, sus consejos, apoyo y paciencia durante el desarrollo de este trabajo.

Al cuerpo académico de comunicaciones e instrumentación electrónica y a los miembros del comité de tesis Dr. Miguel Enrique Martínez Rosas y al M.C. Humberto Cervantes de Ávila, gracias por sus consejos y aportaciones durante el transcurso de la maestría.

Al instructor M.C Ricardo Núñez por compartir sus conocimientos en electrónica e instrumentación.

A mis compañeros de generación Jesús Ayala, Diego Bustillos, Ismael Capuchin, Raúl Martínez, Daniel Miranda, Luis León, Fernando Ramos, Javier Villagrana y José Villalpando por todos los momentos que compartimos en estos dos años.

A mis amigos del posgrado de óptica de CICESE Eduardo Pisano, Héctor Sánchez y Gibraham.

A todos los integrantes del laboratorio de satélites pequeños de CICESE.

A todos mis amigos de la cuadra por su apoyo.

Finalmente a la UABC por el equipo de laboratorio indispensable para los experimentos realizados y al CONACyT por apoyarme económicamente durante el posgrado.

Contenido

	Página
Resumen	i
Dedicatoria	ii
Agradecimientos	iii
Contenido	iv
Lista de Figuras	vii
Lista de Tablas	ix
I. INTRODUCCIÓN	1
I.1 Antecedentes	3
I.2 Objetivo general	4
I.3 Objetivos particulares	4
I.4 Estructura de la tesis	4
II. PROPAGACIÓN DE LA LUZ E INTERFERENCIA	6
II.1 Introducción	6
II.1.1 Ecuación de onda	7
II.1.2 Intensidad y potencia	7
II.1.3 Ondas monocromáticas	7
II.2 Propagación de la luz	8
II.2.1 Medios no conductores	8
II.2.2 Dispersión	9
II.2.3 Propagación a través de un dieléctrico	9
II.2.4 Reflexión	10
II.2.5 Refracción	11
II.3 Superposición de las ondas	12
II.3.1 Suma de ondas de la misma frecuencia	13
II.4 Naturaleza de la luz polarizada	14
II.4.1 Luz linealmente polarizada	15
II.4.2 Polarización circular	16
II.4.3 Retardadores	17
II.5 Interferencia	17
II.5.1 Consideraciones generales	17
II.5.2 Condiciones para la interferencia	19

Contenido (continuación)

	Página	
II.5.3	Coherencia temporal y espacial	20
II.5.4	Leyes de Fresnel-Arago	20
II.5.5	Interferencia de dos rayos	21
II.5.6	División de amplitud	22
II.6	El interferómetro de Michelson	22
II.6.1	Principio de funcionamiento	23
II.7	Medición de la interferencia	25
II.7.1	Fotodiodo PIN	26
II.7.2	Acondicionamiento de señal	26
III.	Técnica del conteo de franjas	28
III.1	Detección de interferencia homodino	28
III.2	Arreglos ópticos implementados	30
III.2.1	Arreglo para cambio de índice de refracción	31
III.2.2	Arreglo para cambio de longitud de camino óptico	32
III.2.3	Arreglo para alineación de polarizadores	33
III.2.4	Arreglo de estado de polarización de la fuente	34
III.3	Detector	35
III.3.1	Características del OPT101	35
III.4	Estructura de la aplicación del microcontrolador	41
III.4.1	Módulo de UART	42
III.4.2	Módulo de tarjeta multimedia (HSMCI)	44
III.4.3	Controlador de entrada y salida paralela	45
III.4.4	Módulo de Contador Temporizador	46
III.4.5	Rutinas para interfaz de usuario	47
III.5	Rutina de detección de franjas	49
III.6	Circuitos de acondicionamiento y simulación	52
III.6.1	Oscilador controlado por voltaje	52
III.6.2	Detector de cuadratura	53
III.6.3	Simulador de interferómetro homodino	53
IV.	Resultados	55
IV.1	Medición de índice de refracción	55
IV.2	Longitud de camino óptico	56
IV.3	Alineación de polarizadores	58
IV.4	Estado de polarización de la fuente	59
IV.5	Simulación de señales	60
IV.6	Señal recuperada	61

Contenido (continuación)

	Página
V. Conclusiones	63
V.1 Aportaciones	64
V.2 Trabajo futuro	65
REFERENCIAS	66
A. PIEZAS MAQUINADAS PARA ARREGLOS ÓPTICOS	67
A. CODIGO DE MATLAB PARA GRAFICAR DATOS EN FORMATO CSV	68

Lista de Figuras

Figura		Página
1	Reflexión y transmisión de ondas planas.	8
2	Frente de onda reflejado.	10
3	Refracción de ondas.	12
4	Superposición de dos ondas.	13
5	Luz linealmente polarizada.	15
6	Luz con polarización circular.	16
7	Ondas sobreponiéndose en el espacio.	19
8	Interferencia de luz polarizada.	21
9	Interferómetro de Michelson.	22
10	Arreglo conceptual del interferómetro de Michelson.	23
11	Patron de franjas de interferencia.	24
12	Absorción de fotones a nivel cuantico.	25
13	Estructura del fotodiodo PIN.	26
14	Convertidor de Corriente-Voltaje.	27
15	Interferometro de Michelson con deteccion homodina.	29
16	Detección de franjas en cuadratura.	30
17	Detección de cambio de indice de refracción con muestras de agua salada.	32
18	Detección de interferencia con perturbaciones armónicas senoidales.	33
19	Arreglo de prueba para alinear elementos polarizadores.	34
20	Arreglo de prueba para alinear elementos polarizadores.	35
21	Detector OPT101.	36
22	Responsividad normalizada.	37
23	Convertidor de corriente a voltaje con capacitor de compensación.	38

Lista de Figuras (continuación)

Figura		Página
24	Respuesta del interferometro al cambio de la longitud de camino óptico.	39
25	Respuesta del interferometro al cambio de amplitud y frecuencia. . . .	40
26	Diagrama de bloques de la aplicación.	41
27	Capa de abstracción de <i>hardware</i> CMSIS.	42
28	Diagrama de flujo del módulo de UART.	43
29	Diagrama de flujo del módulo de HSMCI.	45
30	Diagrama de flujo del módulo de control de entrada y salida paralela. .	46
31	Diagrama de flujo del módulo Contador Temporizador.	47
32	Proceso de inicialización de pantalla táctil.	49
33	Rutina de demodulación de franjas.	51
34	Circuito simulador basado en VCO.	52
35	Circuito de seleccion de cuadratura.	53
36	Circuito de seleccion de cuadratura.	54
37	Experimento de cambio de índice refractivo.	56
38	Respuesta en frecuencia del interferometro.	57
39	Prueba de alineación de polarizadores.	59
40	Prueba de polarización del laser de He-Ne.	60
41	Franjas de interferencia simuladas.	61
42	Demodulacion de patrón de franjas.	62
43	Elementos faltantes del interferómetro homodino.	65
44	Base para cubeta	67
45	Base para bocina	67

Lista de Tablas

Tabla	Página
I Características de las señales de entrada	58
II Demodulación de patrón de franjas	62

Capítulo I

INTRODUCCIÓN

La medición de parámetros o fenómenos físicos es esencial en el control de procesos y calidad de productos en la industria. Para ciertos ambientes particulares los métodos de medición no invasiva pueden mejorar la calidad de la información que se obtiene al monitorizar la variable de interés. El sector agrícola en la región tiene la necesidad de controlar la calidad del agua que utilizan para regar sus plantaciones, ya que una alteración no deseada en los diferentes elementos disueltos en el agua puede cambiar la calidad de su producto final y para evitarlo es necesario detectar oportunamente estas alteraciones.

La integración de un sistema que ayude a detectar cuando es necesario realizar alguna acción para corregir un cambio no deseado en las concentraciones de los componentes del agua de riego puede ayudar a disminuir las pérdidas de producción en campo por el cambio en la calidad del producto causados por problemas de este tipo. Un sistema que pueda medir estas características en el agua necesita poder hacer mediciones periódicas con sensores que no sean afectados por estar en contacto con el agua y que no liberen partículas en el agua que cambien la medición. Las propiedades físicas de la luz ante el cambio de densidad del medio por el que viaja pueden ser aprovechadas para cumplir con este propósito y el uso de una técnica interferométrica puede detectar alteraciones de magnitud pequeña.

En la aplicación de técnicas interferométricas es tan importante la configuración del interferómetro como la fuente de luz y el método que se utiliza para detectarla. Para obtener una medición estable es necesario utilizar componentes de bajo ruido y en algunos casos, compensar los cambios en su respuesta debidos a la temperatura o a otras perturbaciones externas. Como parte del diseño, se debe hacer un análisis de las características y especificaciones de todos los componentes que forman parte del sistema de medición.

Una vez que se tiene control sobre todos los parámetros que pueden afectar la estabilidad de la medición, la señal recuperada puede ser interpretada en dimensión y magnitud de acuerdo a la variable que se mide.

Los sistemas computacionales dedicados se utilizan en una gran cantidad de aplicaciones industriales, científicas y académicas, ya que permiten aplicar diferentes tratamientos a la señal que se recupera, que van desde almacenar la señal medida hasta realizar todo tipo de operaciones matemáticas para la interpretación de dicha señal y el control automático de procesos. Existe una gran variedad de sistemas dedicados que incorporan todo tipo de periféricos en un solo circuito integrado, lo que permite reducir la cantidad de componentes y el tiempo de desarrollo de la aplicación final.

Este trabajo presenta los avances que se consiguieron en la parte de óptica, electrónica y de procesamiento de datos, y describe los problemas que se encontraron y que pueden ser los objetivos del trabajo futuro que permita concluir la implementación del instrumento.

I.1 Antecedentes

Este trabajo surge de la necesidad del “Laboratorio de comunicaciones ópticas” de la Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño en la Universidad Autónoma de Baja California de contar con un instrumento automatizado de laboratorio para la medición de fenómenos físicos cuando se utiliza luz por medio de la interferometría ya que el laboratorio cuenta con una variedad de elementos ópticos como; espejos, divisores de haz, elementos polarizadores, mesas de montaje y fuentes de luz coherentes para implementar este tipo de arreglos. Para atender esta necesidad se optó por implementar un instrumento basado en un microcontrolador que pueda realizar la tarea de automatizar la lectura y procesamiento de datos para un interferómetro de Michelson.

El interferómetro de Michelson fue inventado por Albert Abraham Michelson en 1887 (ganador del premio nobel de física en 1907 por la real academia de ciencias “por sus instrumentos ópticos de precisión y las investigaciones que ha realizado con ayuda de éstos en los campos de la metrología de precisión y la espectroscopia”) en colaboración con Eduard Morley, que utilizaron este interferómetro en el famoso experimento Michelson-Morley [1] cuyos resultados refutaron la teoría de la existencia del éter y sirvieron como base a la formulación de la teoría de la relatividad de Einstein.

Para validar el funcionamiento del instrumento y continuar con la tendencia del “Cuerpo Académico de Comunicaciones e Instrumentación Electrónica” de atender problemas del sector agrícola, se optó por enfocar este trabajo en la medición de la concentración de sales en el agua de riego, debido a que los cambios en la salinidad afectan el desarrollo de los cultivos y la calidad de los productos finales.

I.2 Objetivo general

El objetivo de este trabajo es implementar un sistema automático para medición de concentración de sales en el agua destinada al sector agrícola, basado en el interferómetro de Michelson con procesamiento de mediciones a través de un microcontrolador.

I.3 Objetivos particulares

- Construir un arreglo óptico que permita detectar el cambio de índice de refracción.
- Implementar detectores y circuitos de acondicionamiento de señal para detectar las franjas de interferencia.
- Diseñar un algoritmo para la resolución de franjas (*fringe resolver*) que permita recuperar la señal de salida del interferómetro de Michelson.
- Implementar el algoritmo de resolución de franjas en un microcontrolador e integrarlo con los periféricos necesarios para manejar interfaces de usuario, adquisición y almacenamiento de datos.
- Integrar el sistema de automatización con el interferómetro de Michelson.

I.4 Estructura de la tesis

En el capítulo II se ofrece una perspectiva general de los conceptos relacionados con la propagación de la luz, las leyes básicas de la teoría electromagnética y la superposición de las ondas y las condiciones generales para obtener interferencia.

En el capítulo III se presentan los conceptos básicos asociados a la técnica de conteo de franjas, se describe el funcionamiento del interferómetro homodino y se exponen los diferentes arreglos ópticos que se implementaron con el fin de caracterizar la dinámica de las señales producidas por el interferómetro y las características de la electrónica utilizada para la medición de estas señales, se muestran las diferentes piezas de *firmware* que componen la aplicación del algoritmo para la resolución de franjas de franjas.

El capítulo IV muestra las mediciones de los diferentes arreglos ópticos implementados, la señal obtenida con el circuito simulador y la señal recuperada a partir de la simulación con el sistema de resolución de franjas de franjas.

El capítulo V expone las conclusiones y aportaciones, así como las recomendaciones para el trabajo futuro.

Capítulo II

PROPAGACIÓN DE LA LUZ E INTERFERENCIA

En este Capítulo se hace una descripción de las características físicas de la luz considerada desde el punto de vista de una onda electromagnética. Aunque es conocido la luz que puede ser considerada como una partícula, la información que se puede obtener al analizarla de esta manera no es útil para este trabajo. Se exponen los conceptos de propagación de la luz, la superposición e interferencia de las ondas electromagnéticas y se analizará la relación que las ondas de luz tienen al progresar a través de diferentes medios.

II.1 Introducción

La luz se describe como una función escalar conocida como función de onda que obedece a la ecuación de onda. Físicamente, la función de onda representa las componentes del campo eléctrico y magnético. En el espacio libre la luz viaja con una velocidad constante c_o , otros medios en los cuales la luz puede propagarse están caracterizados por una constante de índice de refracción $n \geq 1$ donde la luz viaja a una velocidad menor como lo muestra la ecuación 1.

$$c = \frac{c_o}{n} \tag{1}$$

II.1.1 Ecuación de onda

Una onda óptica se representa matemáticamente como función real de posición $r = (x, y, z)$ en un tiempo t denotada por $u(r, t)$, esta es la función conocida como función de onda, que satisface la ecuación de onda (ver la ecuación 2). Debido a que la función de la onda es una ecuación lineal, el principio de superposición aplica, por lo que si $u_1(r, t)$ y $u_2(r, t)$ representan ondas ópticas, entonces $u(r, t) = u_1(r, t) + u_2(r, t)$ también representa una posible onda óptica [2].

$$\nabla^2 u - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \quad (2)$$

II.1.2 Intensidad y potencia

La intensidad óptica está definida como la potencia óptica por unidad de área y es proporcional a la función de onda al cuadrado, promediado en un intervalo de tiempo considerablemente más largo que un periodo de la señal (ecuación 3).

$$I(r, t) = 2\langle u^2(r, t) \rangle \quad (3)$$

La potencia óptica está definida como la intensidad óptica que fluye por un área que es normal a la dirección de propagación de la luz (ecuación 4).

$$P(t) = \int_A I(r, t) dA \quad (4)$$

II.1.3 Ondas monocromáticas

Una onda monocromática está representada por una función de onda que tiene una dependencia armónica, una frecuencia ω definida y una dirección de propagación. Para

cualquier punto, la función de la onda puede escribirse como una representación senoidal dependiente del tiempo y la distancia (ecuación 5).

$$E_v = E_{0y} \cos\left[\omega\left(t - \frac{x}{c}\right) + \varepsilon\right] \quad (5)$$

II.2 Propagación de la luz

Existen diferentes fenómenos que afectan a las ondas de luz al viajar por diferentes medios, lo que ocasiona que la luz sea reflejada y refractada a lo largo del camino óptico como se muestra en la figura 1. Para el análisis de estos fenómenos la luz se analiza como una onda electromagnética, cuya velocidad a través del medio depende de las características eléctricas y magnéticas de dicho material.

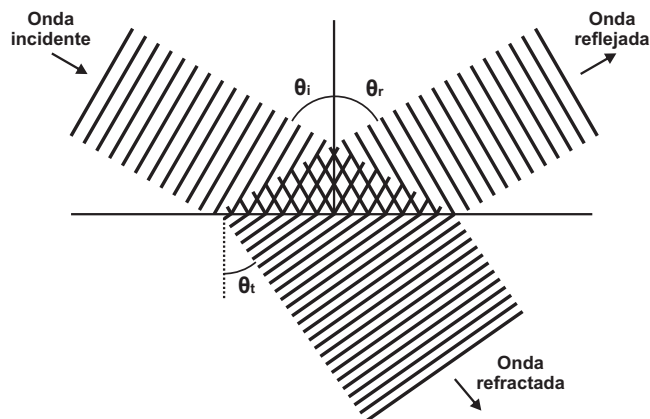


Figura 1. Reflexión y transmisión de ondas planas.

II.2.1 Medios no conductores

El efecto de introducir un medio dieléctrico isotrópico homogéneo donde una onda electromagnética se propaga, es cambiar la velocidad de fase. La razón de cambio entre

la velocidad de la onda en el vacío y en el medio dieléctrico es conocida como índice de refracción absoluto n (ver la ecuación 6).

$$n \equiv \frac{c}{v} = \sqrt{\frac{\epsilon\mu}{\epsilon_0\mu_0}} \quad (6)$$

II.2.2 Dispersión

Cuando un medio dieléctrico es sometido a un campo eléctrico este responde haciendo resonar sus moléculas, donde la oscilación del material depende de la longitud de onda. Estos materiales oscilan a la frecuencia de la luz incidente, siempre y cuando ésta no se encuentre cerca de la frecuencia de resonancia del material. Para longitudes de onda lejanas a la frecuencia de resonancia el material responde con poca oscilación y absorción, esto hace que refracte la onda con cierto ángulo después de pasar por el material. En cambio para longitudes de onda cercanas a sus frecuencias características responde con una gran oscilación y la energía de la onda se pierde en forma de vibración mecánica y calor comportándose como un material opaco.

II.2.3 Propagación a través de un dieléctrico

Si se considera una onda electromagnética incidiendo sobre un dieléctrico, ésta llevará al medio a una oscilación forzada y se irradiará o esparcirá la energía en forma de ondas electromagnéticas de la misma naturaleza de la onda incidente, esto es lo que da lugar a la onda refractada. A las frecuencias de las ondas electromagnéticas ópticas, las oscilaciones del medio dieléctrico tienen un retraso con respecto a la onda incidente. Cuando la onda se mueve a través del medio, el número de crestas que llegan al dieléctrico en un periodo de tiempo debe ser el mismo que las que se propagan en él. Esto indica que

la frecuencia debe ser la misma en el dieléctrico y en el vacío, aunque la longitud de onda y la rapidez pueden ser diferentes.

II.2.4 Reflexión

Si se considera un frente de onda plano incidiendo sobre una superficie lisa y plana de un medio óptico denso y si se asume que el medio circundante tiene una densidad diferente. A medida que el frente de onda interactúa con la superficie (debido a que la longitud de onda es mayor a la separación de las moléculas de la superficie) las ondas son transmitidas de nuevo al medio incidente y avanzan juntas en una dirección como un rayo reflejado bien definido. La dirección del rayo reflejado está determinada por la diferencia de fase entre los átomos del medio que dispersan la luz. En la figura 2 se aprecia que la línea \overline{AC} se une a lo largo del frente de onda incidente, mientras que la línea \overline{BD} se une a lo largo del frente de onda reflejado. Se puede ver que las ondas emitidas en A arriban a C en fase con las ondas emitidas en D que a su vez es estimulada por B, por lo tanto $\overline{AC} = \overline{BD}$, entonces los dos triángulos formados poseen una hipotenusa común (ver ecuación 7).

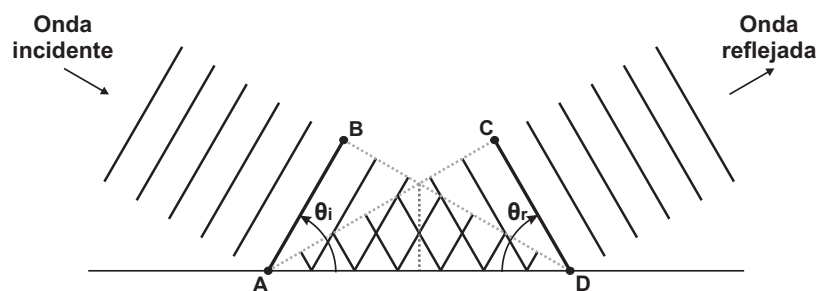


Figura 2. Frente de onda reflejado.

$$\frac{\sin \theta_i}{BD} = \frac{\sin \theta_r}{AC} \quad (7)$$

Todas las ondas viajan por el medio incidente a la misma velocidad v_i , al tiempo que el frente de onda incidente recorre la distancia del punto B al D, el frente de onda reflejado recorre la misma distancia del punto A al C, entonces se tiene que $\overline{BD} = v_i \nabla t = \overline{AC}$. Por lo que de la ecuación 7 se tiene que el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión, y por lo tanto a la ecuación 8 se le conoce como ley de reflexión.

$$\theta_i = \theta_r \quad (8)$$

II.2.5 Refracción

Tratándolo de una manera clásica, cada molécula energizada en una interfaz radia ondas que se expanden a la velocidad de la luz. Esto se puede imaginar como una segunda onda combinada, que es un reflejo no disperso de la primer onda. Es bien sabido que usualmente la onda transmitida se propaga con una velocidad $v_t < c$. Esto se debe esencialmente a que los átomos de la interfaz generan ondas dispersas en el medio que se combinan como una onda transmitida lenta.

En la figura 3 se muestra; que como resultado de este cambio en la velocidad de la onda transmitida, el frente se curva al propagarse por el medio. Se puede ver que el tiempo que toma ir del punto B al punto D en el frente de onda, que se transmite a una velocidad v_i , la porción transmitida que viaja a velocidad v_t de ese mismo frente de onda ha viajado del punto A al punto E. Si $v_t < v_i$ y $\overline{AE} < \overline{BD}$, entonces el frente de onda se extiende de D a E con un ángulo θ_t . Se puede ver que se forman dos triángulos ABD y AED que comparten la hipotenusa AD.

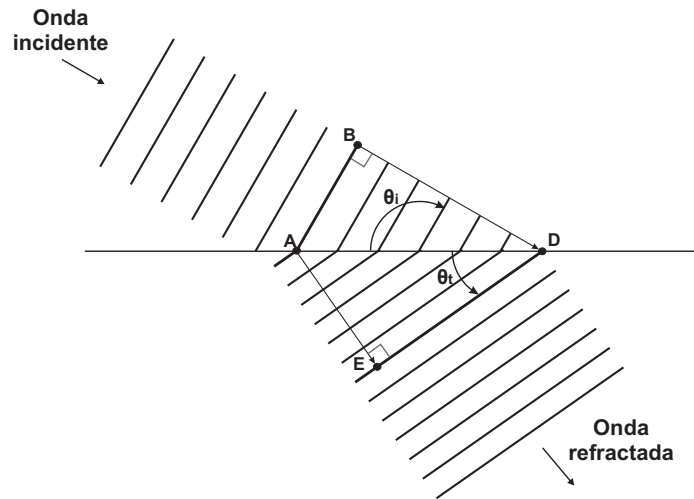


Figura 3. Refracción de ondas.

$$\frac{\sin \theta_i}{\overline{BD}} = \frac{\sin \theta_t}{\overline{AE}} \quad (9)$$

Donde $\overline{BD} = v_i \nabla t$ y $\overline{AE} = v_t \nabla t$, al multiplicar ambos lados por c y sabiendo que $n_i = c/v_i$ y $n_t = c/v_t$, la ecuación 9 se convierte en la ecuación 10, que es conocida como la ley de refracción de Snell.

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t \quad (10)$$

II.3 Superposición de las ondas

Cuando dos o más ondas se superponen en la misma región del espacio, estas se superponen y continúan viajando en esa misma dirección como se muestra en la figura 4. Las circunstancias específicas que gobiernan esta superposición son las que determinan el resultado final. En el proyecto interesa analizar únicamente los casos en que las perturbaciones analizadas debidas a la combinación de las ondas cumplan con el principio de

superposición, por lo que se dejará de lado el estudio de comportamientos no lineales. Las propiedades particulares de cada onda como amplitud, fase y frecuencia, afectan la forma de la perturbación compuesta [3].

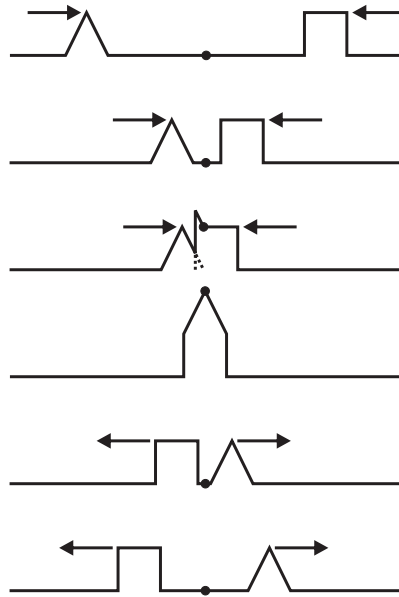


Figura 4. Superposición de dos ondas.

II.3.1 Suma de ondas de la misma frecuencia

Existen diferentes maneras de sumar dos o más ondas que se superponen cuando tienen la misma longitud de onda, cada una de ellas puede usarse en diferentes situaciones particulares y para cada una de ellas se puede utilizar la que resulte más adecuada. Una forma de escribir la solución de la ecuación diferencial de onda se muestra en la ecuación 11, donde E_0 es la amplitud del armónico que se propaga a lo largo del eje x para este caso.

$$E(x, t) = E_0 \sin[\omega t + \alpha(x, \varepsilon)] \quad (11)$$

Si se hace la suposición de tener dos de esas ondas E_1 y E_2 superponiéndose en el espacio

$$E_1 = E_{01} \sin[\omega t + \alpha_1]$$

y

$$E_2 = E_{02} \sin[\omega t + \alpha_2]$$

Después de sumar y desarrollar las ecuaciones se obtiene la ecuación 12 que es una onda compuesta de la misma frecuencia pero de amplitud y fase diferentes. La densidad de flujo $E_0^2 = E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02} \cos(\alpha_2 - \alpha_1)$ claramente no es igual a la simple suma de las densidades de las componentes, existe una contribución adicional de $2E_1E_2 \cos(\alpha_2 - \alpha_1)$ es conocido como término de interferencia y el factor crucial es la diferencia de fase entre E_1 y E_2 .

La amplitud máxima se da cuando la diferencia de fase es un múltiplo par de π , mientras que para los múltiplos impares se tiene un mínimo. Para el primer caso las ondas están en fase, mientras que en el segundo caso se encuentran 180° fuera de fase, donde la diferencia de fase puede darse por una diferencia en el camino óptico que recorre cada una de las ondas.

$$E = E_0 \sin[\omega t + \alpha] \tag{12}$$

II.4 Naturaleza de la luz polarizada

La luz puede ser tratada como una onda electromagnética transversal. Cuando se habla de luz linealmente polarizada, se entiende como luz con un campo eléctrico variante en

el tiempo y con un plano de orientación constante. Para este caso, el campo eléctrico se analiza en un plano de vibración donde se encuentran definidas las componentes del campo eléctrico \vec{E} y la dirección de propagación \vec{k} .

II.4.1 Luz linealmente polarizada

Si se consideran dos ondas armónicas linealmente polarizadas y de la misma frecuencia, propagándose en la misma región y además son ortogonales entre si, la onda resultante (ver ecuación 13) tendrá una amplitud controlada por la contribución de los campos eléctricos. Cualquier onda linealmente polarizada puede descomponerse entonces en dos componentes ortogonales.

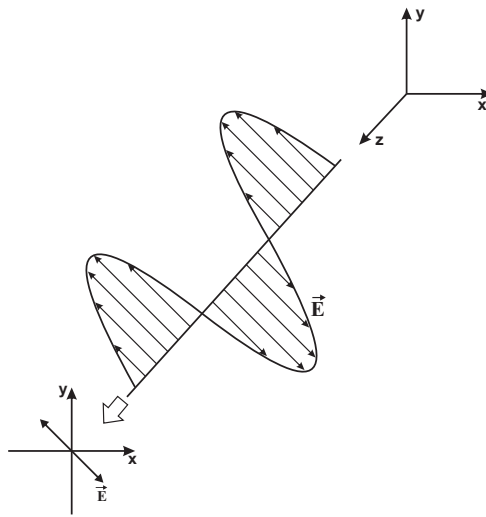


Figura 5. Luz linealmente polarizada.

$$\vec{E} = (\hat{i}E_{0x} + \hat{j}E_{0y}) \cos(kz - \omega t) \quad (13)$$

II.4.2 Polarización circular

Cuando los dos campos eléctricos tienen amplitudes iguales, pero su diferencia de fase relativa ε es $-\pi/2$ para cualquier múltiplo entero de 2π . De la ecuación 14 se puede ver que la amplitud del campo E_0 es constante pero la dirección del campo varía con el tiempo y no está restringida a un solo plano, esta onda rotará en el sentido de las manecillas del reloj a una frecuencia ω como se ilustra en la figura 6. Para el caso en el que la diferencia de fase sea $\pi/2$ para cualquier múltiplo entero de 2π , el campo eléctrico tendrá la misma amplitud pero rotará en contra de las manecillas del reloj como lo muestra la ecuación 15.

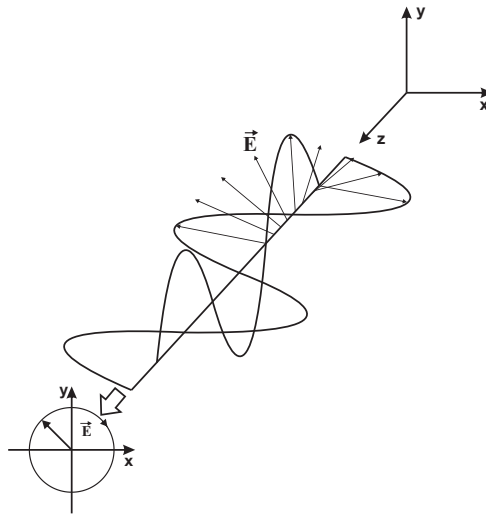


Figura 6. Luz con polarización circular.

$$\mathbf{E} = E_0[\hat{\mathbf{i}} \cos(kz - \omega t) + \hat{\mathbf{j}} \sin(kz - \omega t)] \quad (14)$$

$$\mathbf{E} = E_0[\hat{\mathbf{i}} \cos(kz - \omega t) - \hat{\mathbf{j}} \sin(kz - \omega t)] \quad (15)$$

II.4.3 Retardadores

Se trata de una clase de elementos ópticos que cambian la polarización de la onda incidente, al hacer que uno de los dos estados P coherentes constitutivos sea retrasado en fase con respecto al otro en una cantidad predeterminada que es una fracción de la longitud de onda del rayo incidente. Al salir del retardador la fase de las dos componentes es diferente y por lo tanto el estado de polarización también es diferente. Un retardador puede convertir todo estado de polarización en cualquier otro.

II.5 Interferencia

La intensidad de un campo eléctrico resultante \mathbf{E} en un punto donde dos o más ondas se superponen es igual a la suma vectorial de las contribuciones de cada una de las perturbaciones individuales, esto obedece al principio de superposición. La interferencia óptica puede considerarse como la interacción de dos o más ondas que producen una irradiancia resultante que proviene de la suma de las irradiancias que la componen. En seguida se exponen algunas de las condiciones necesarias para que se dé el fenómeno de la interferencia.

II.5.1 Consideraciones generales

En este trabajo se desarrollan problemas donde muchos de los aspectos de la superposición de ondas escalares son aplicables para el análisis de ondas que interfieren. Sin embargo, las ecuaciones de interferencia básicas están delimitadas a ciertas condiciones y problemas específicos bajo los cuales el tratamiento escalar es aplicable y tiene un significado práctico.

Si se consideran dos fuentes puntuales monocromáticas S_1 y S_2 de la misma longitud de onda, donde la emisión se efectúa en un medio homogéneo y que la separación de las fuentes puntuales es mucho mayor a la longitud de onda de las mismas (como se ilustra en la figura 7). Si se coloca el punto de observación P lo suficientemente lejos para que el frente de onda en ese punto pueda considerarse plano y se toma en cuenta únicamente la irradiancia relativa dentro del mismo medio $I = \langle \mathbf{E}^2 \rangle$ donde, $\mathbf{E}^2 = \mathbf{E} \cdot \mathbf{E}$, es el cuadrado del promedio de la magnitud de la intensidad del campo eléctrico.

Si se desarrolla la ecuación y se toma el promedio en el tiempo de ambos lados, la irradiancia queda como sigue.

$$\mathbf{E}^2 = (\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2) \cdot (\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2)$$

$$\mathbf{E}^2 = \mathbf{E}_1^2 + \mathbf{E}_2^2 + 2\mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2$$

$$I = I_1 + I_2 + I_{12}$$

Donde $I_{12} = \sqrt{I_1 I_2} \cos \delta$, la irradiancia total queda como la ecuación 16. En varios puntos del espacio la irradiancia total puede tomar valores menores, mayores o iguales a $I_1 + I_2$ con dependencia del valor de δ , obteniendo un máximo para múltiplos pares de π , cuando las dos perturbaciones están en fase y un mínimo para múltiplos impares de π cuando las dos perturbaciones están 180° fuera de fase.

$$I = I_1 + I_2 + \sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \tag{16}$$

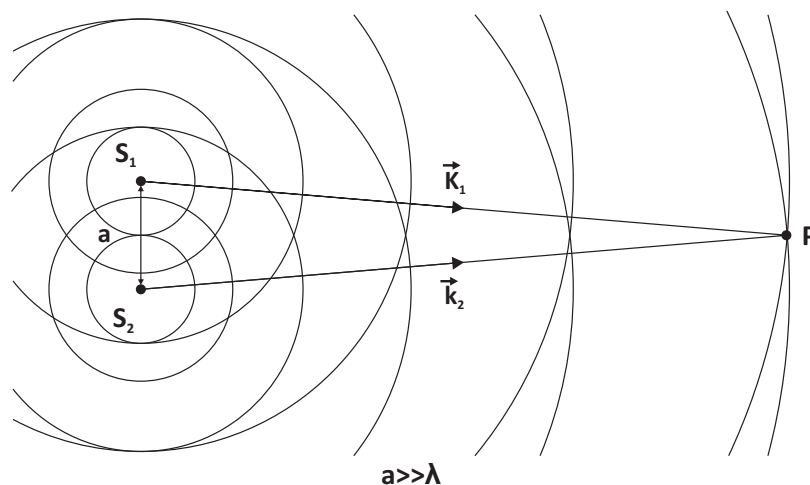


Figura 7. Ondas sobreponiéndose en el espacio.

II.5.2 Condiciones para la interferencia

Para que dos ondas que interfieren produzcan un patrón de interferencia estable, ambas deben tener una longitud de onda muy cercana, de lo contrario, el patrón producido variará rápidamente con una diferencia de fase dependiente del tiempo, esto causará que I_{12} se promedie a cero durante el intervalo de detección. Aun si las fuentes emiten luz con un ancho de banda grande pueden producir patrones que no son tan extensos ni tan bien definidos como en el caso de luz monocromática.

Los patrones más claros se obtienen cuando las ondas que están interfiriendo tienen amplitudes cercanas, donde las regiones de franjas de obscuridad corresponden a interferencia destructiva completa y las de luz a interferencia constructiva, bajo estas condiciones se obtiene el máximo contraste. Para que estos patrones puedan ser observados es necesario que las fuentes no se encuentren en fase. Un patrón de interferencia será fácilmente observable mientras la diferencia de fase se mantenga constante.

II.5.3 Coherencia temporal y espacial

La naturaleza de la emisión de fuentes cuasimonocromáticas produce luz como una mezcla de trenes de ondas. Durante ciertos periodos de tiempo del orden de nano segundos el campo oscila suavemente antes de que cambie su fase lo que hace que no pueda predecirse para seguir oscilando por otro periodo de tiempo. Este intervalo se conoce como coherencia temporal y este es un parámetro estrechamente ligado con la pureza espectral de la fuente.

II.5.4 Leyes de Fresnel-Arago

Cualquier estado de polarización se puede sintetizar en dos estados ortogonales. Existen muchos casos prácticos en los que dos haces son casi paralelos y donde la teoría escalar puede aplicarse, para el caso de la figura 8(a) se muestra un caso en el cual los estados de polarización ortogonales de la onda se superponen y generan patrones de interferencia independientes. En las figuras 8(b) y 8(c) se muestra la superposición de ondas coherentes linealmente polarizadas. En la figura 8(b) los vectores ópticos son paralelos y aun cuando los haces no lo sean la interferencia se produce. En la figura 8(c) los vectores ópticos son ortogonales y para este caso aunque los haces sean paralelos la interferencia no se produce. Como resultado de los estudios de Fresnel y Arago para las condiciones en las cuales la interferencia de luz polarizada ocurre son las siguientes:

1. Dos estados de polarización coherentes ortogonales no pueden interferir en el sentido de que $I_{12} = 0$ y no se produce patrón de interferencia.
2. Dos estados de polarización coherentes y paralelos interfieren de la misma forma que la luz natural.

3. Dos estados de polarización constitutivos de una onda de luz natural no pueden interferir aunque se giraran para alinearlos, debido a que los estados de polarización son incoherentes.

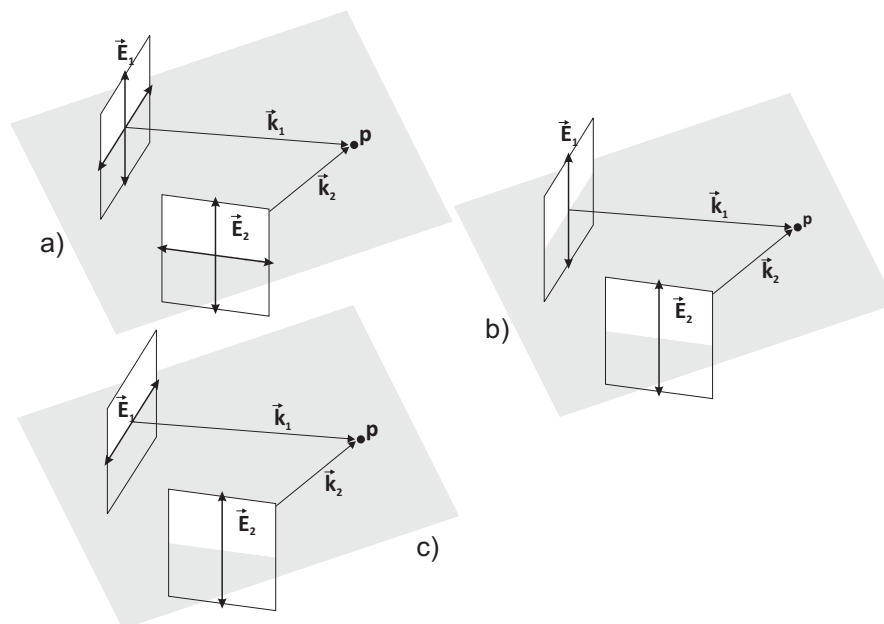


Figura 8. Interferencia de luz polarizada.

II.5.5 Interferencia de dos rayos

Una de las aplicaciones principales de la interferencia es hacer mediciones y para esto es necesario un arreglo óptico en el cual dos rayos que viajan por caminos separados se unan para generar un patrón de interferencia. Los dos rayos que interfieren deben en principio tener la misma longitud de onda y la manera más fácil de cumplir con esta condición es que los dos rayos se obtengan de la misma fuente. Las técnicas comúnmente usadas son la división de frente de onda y la división de amplitud, esta segunda técnica es la que se utiliza para el interferómetro de Michelson.

II.5.6 División de amplitud

En esta técnica dos rayos se derivan del mismo frente de onda, y por medio de dispositivos como un plato transparente recubierto de una película parcialmente reflectante que transmite una parte del rayo y refleja otra. La interferencia se obtiene al hacer que de alguna manera los dos rayos se reúnan de nuevo en un detector, siempre y cuando la coherencia no haya sido afectada.

II.6 El interferómetro de Michelson

En el interferómetro de Michelson, cuya configuración se muestra en la figura 9, se utiliza una fuente de luz S que es dividida por un divisor de haz B en partes casi iguales, después es reflejada desde dos espejos M_1 y M_2 hacia el mismo punto B donde son recombinados para después seguir su trayectoria hasta el punto de observación O [4]. La reflexión del divisor de haz B genera una imagen del espejo M_2 en M'_2 , el patrón de interferencia observado en O es el mismo que se produce en la capa de aire entre M_1 y M'_2 .

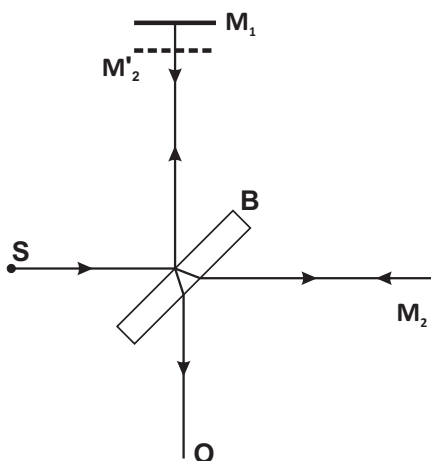


Figura 9. Interferómetro de Michelson.

II.6.1 Principio de funcionamiento

Para entender cómo se forman las franjas en el interferómetro de Michelson, este puede representarse en un arreglo donde los componentes se acomodan en línea recta, como la figura 10 y se representan como superficies matemáticas. En la posición del detector, podrán verse simultáneamente los espejos M_1 y M_2 junto con la fuente Σ en el divisor de haz y la posición de cada uno de los elementos depende de su distancia relativa con respecto a O . Las superficies Σ_1 y Σ_2 representan las imágenes de la fuente Σ en los espejos M_1 y M_2 respectivamente. Si se considera un punto S sobre la fuente emitiendo luz en todas direcciones, esta se reflejará en M_2 y M_1' , si estos se observan desde el detector, los dos rayos reflejados parecerán provenir de S_1 y S_2 . Como se puede ver en la figura 10, la diferencia de camino óptico de los dos rayos es cercana a $2d \cos \theta$ que se traduce en una diferencia de fase de $K_0 2d \cos \theta$.

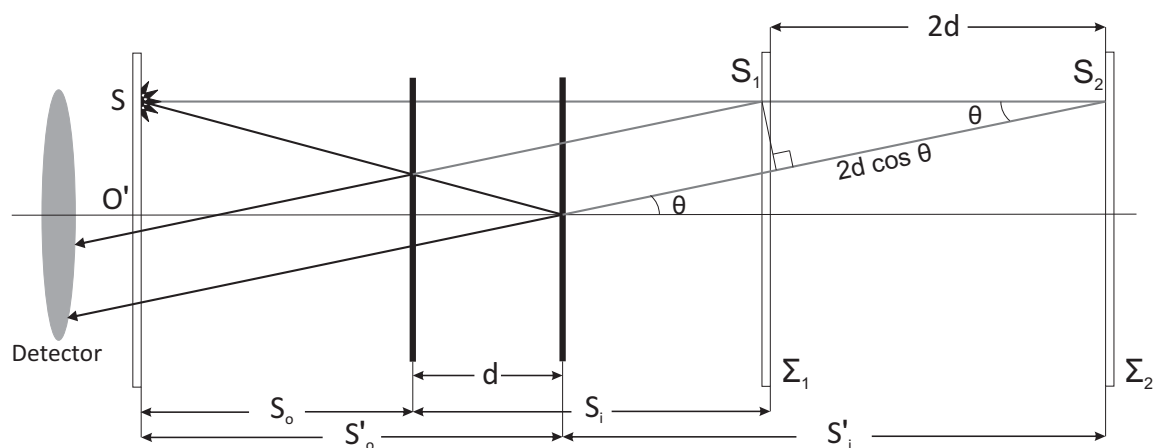


Figura 10. Arreglo conceptual del interferómetro de Michelson.

Un patrón de interferencia consiste generalmente en una formación de anillos o franjas brillantes y oscuras alternadas, de acuerdo con la ecuación 17 donde m es un número entero, cuando M_2 se acerca a M'_1 , d decrece y el $\cos \theta$ aumenta mientras que θ disminuye. La figura 11, muestra el patrón de franjas que puede ser generado por un interferómetro de Michelson.

$$2d \cos \theta = m\lambda_0 \quad (17)$$

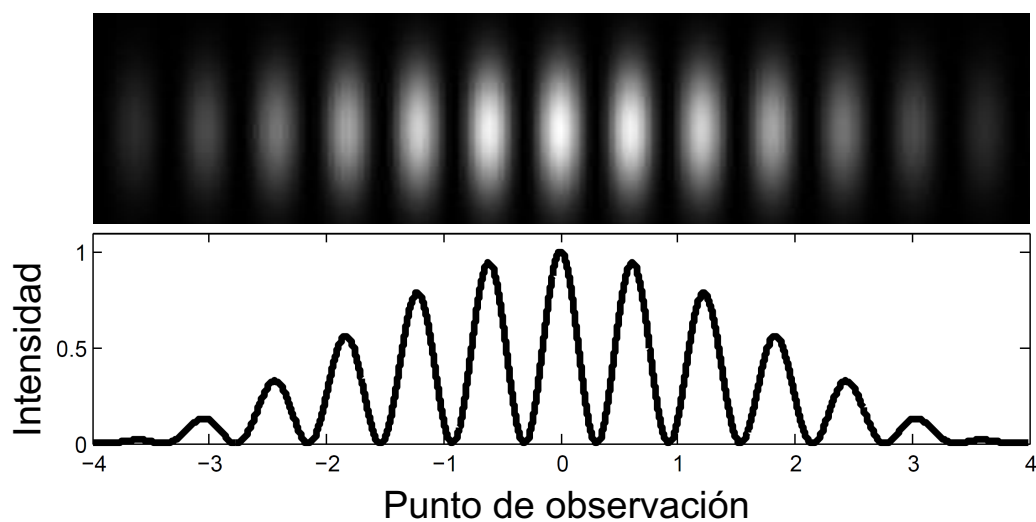


Figura 11. Patrón de franjas de interferencia.

II.7 Medición de la interferencia

Para facilitar la interpretación del patrón de interferencia es necesario utilizar detectores ópticos de un material semiconductor, que generalmente funcionan como un transductor de luz que proporciona una corriente eléctrica como respuesta de la radiación óptica incidente en la superficie del detector, este proceso de transducción implica la transformación de los fotones incidentes en movimiento de electrones en el material. El principio de absorción de energía óptica por parte de los electrones es conocido como efecto fotoeléctrico y las características de absorción están relacionadas con las características a nivel atómico del material y con la longitud de onda de la luz aplicada como se muestra en la figura 12 [2].

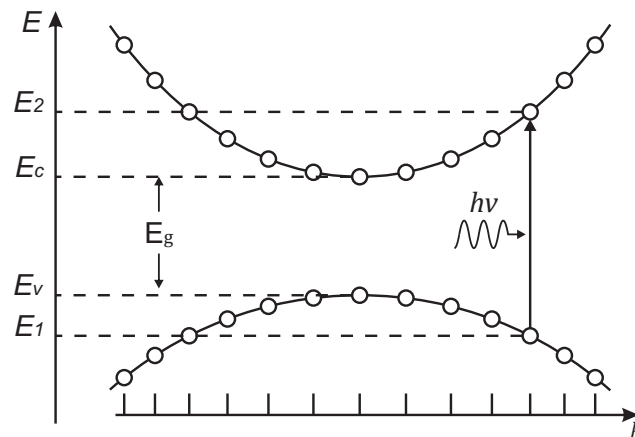


Figura 12. Absorción de fotones a nivel cuantico.

Los dispositivos más utilizados en la medición de patrones de interferencia son los dispositivos CCD o CMOS para captura de imágenes y los fotodiodos PIN. En seguida se expone el funcionamiento e instrumentación del fotodiodo PIN. Los arreglos CCD y CMOS no se utilizaran en el desarrollo de este trabajo de tesis.

II.7.1 Fotodiodo PIN

El fotodiodo PIN está compuesto de tres capas de material semiconductor, donde la capa intermedia es de un material intrínseco y las externas de material tipo P y tipo N, esta estructura incrementa el alcance espectral y ensancha la región de agotamiento que reduce la capacitancia de la unión y acelera la respuesta. La región de agotamiento ensanchada también permite que el material absorba una mayor cantidad de luz, lo que mejora su eficiencia, como se muestra en la figura 13.

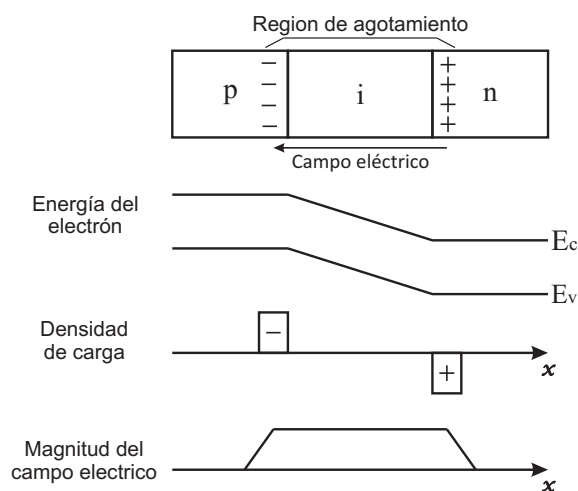


Figura 13. Estructura del fotodiodo PIN.

II.7.2 Acondicionamiento de señal

En general resulta necesario acondicionar y amplificar la señal que entrega el fotodiodo "PIN" en forma de corriente eléctrica a una magnitud proporcional en voltaje que es más fácil de manejar con el microcontrolador. La literatura dice que una de las maneras eficientes de hacerlo es por medio de un operador analógico en configuración de convertidor de corriente a voltaje, conocido también como amplificador de transimpedancia que se muestra en el diagrama de la figura 14. Para un caso ideal el circuito de la

figura reduce el voltaje en el fotodiodo y su capacitancia a cero. La ganancia del operador analógico fuerza a sus dos entradas a tener el mismo voltaje presentando una tierra virtual (voltaje igual a cero) a la corriente de salida del fotodiodo y una impedancia infinita a la entrada del operador analógico. La ganancia de lazo abierto del amplificador, amplifica el voltaje de entrada y lo dirige hacia la resistencia de retroalimentación R_f con el voltaje de salida V_o . Esto desvía la corriente del fotodiodo fuera de la entrada del amplificador hacia R_f , restableciendo el cero virtual a la entrada del amplificador y en el proceso el amplificador desarrolla una salida de voltaje igual a la corriente del fotodiodo multiplicada por la resistencia de retroalimentación [5].

$$V_o = I_s R_f \quad (18)$$

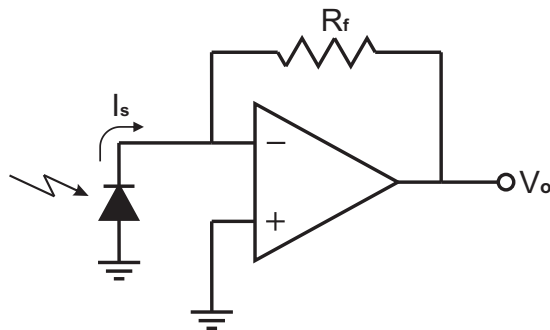


Figura 14. Convertidor de Corriente-Voltaje.

Capítulo III

Técnica del conteo de franjas

Este capítulo presenta la configuración del interferómetro de Michelson que se implementó para medir el patrón de interferencia en base a la técnica del conteo de franjas, la electrónica que se utilizó para la adquisición de las franjas y la estructura del *firmware* desarrollado para el microcontrolador SAM3U de Atmel que cumple la función de recuperar la señal del patrón de franjas y proporcionar una interfaz de usuario para controlar la adquisición de los datos.

III.1 Detección de interferencia homodino

La interferometría es ampliamente utilizada para la medición de desplazamiento o cualquier variable que a lo largo de un camino óptico puede ser interpretada como un desplazamiento. Estas aplicaciones requieren la detección de las franjas de interferencia y para el sistema implementado en este trabajo la medición de la diferencia de camino óptico se realizó en base a la técnica de conteo de franjas. Esta técnica requiere detectar la dirección en la que se mueven las franjas ya que tiene una relación con la dirección del desplazamiento o las variaciones de amplitud de la variable que se mide.

El interferómetro de Michelson básico tiene como principal desventaja que no es posible conocer si la diferencia de camino óptico es positiva o negativa. El método de detección homodina permite conocer la dirección del movimiento. La figura 15 muestra un interferómetro con luz coherente linealmente polarizada como fuente, el rayo es

dividido por un divisor de haz polarizado en dos componentes polarizadas a 0° y 90° , después la polarización de los haces reflejados es cambiada por una placa retardadora de $\lambda/4$ y al colocar polarizadores a 0° y 45° después de dividir el haz resultante se obtienen dos señales idénticas con una diferencia de fase de 90° , esto permite que al hacer la detección de las señales en cuadratura se puede conocer en qué sentido se mueve el patrón de interferencia.

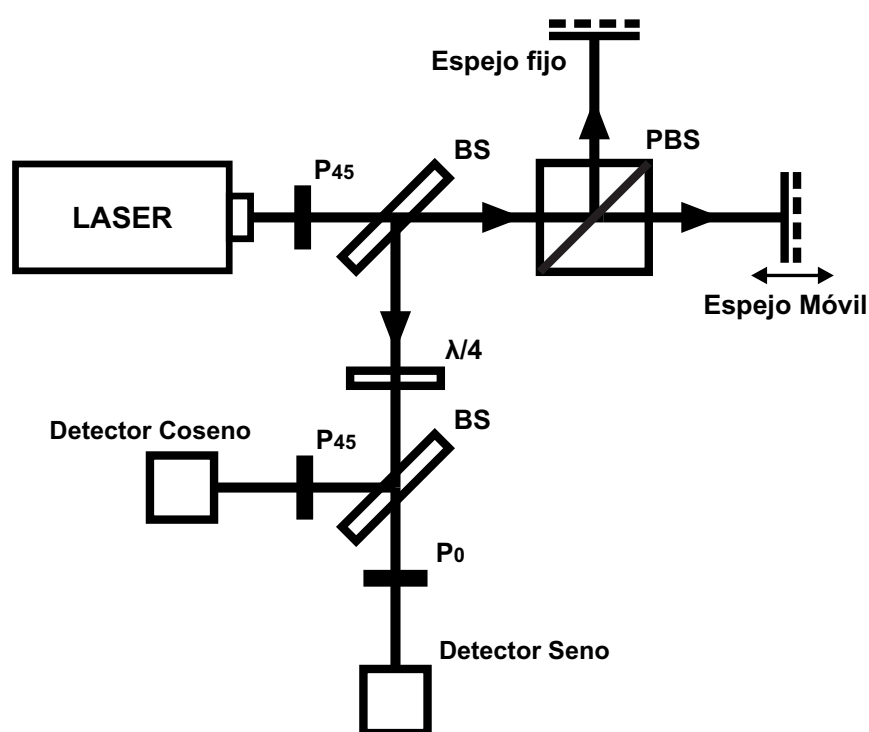


Figura 15. Interferómetro de Michelson con detección homodina.

Si se comparan las señales obtenidas contra una línea de tiempo, se puede conocer la magnitud del desplazamiento y al comparar las señales una contra otra cuando la diferencia de camino óptico cambia cada una de las franjas traza una elipse que se mueve a favor o en contra de las manecillas del reloj de acuerdo con la dirección del movimiento del patrón de interferencia, donde cada revolución de la elipse indica el

paso de una franja por el detector por lo que al calcular el ángulo en la elipse a medida que cambia la diferencia de camino óptico es posible detectar finamente cada una de las franjas y obtener mejor resolución [6].

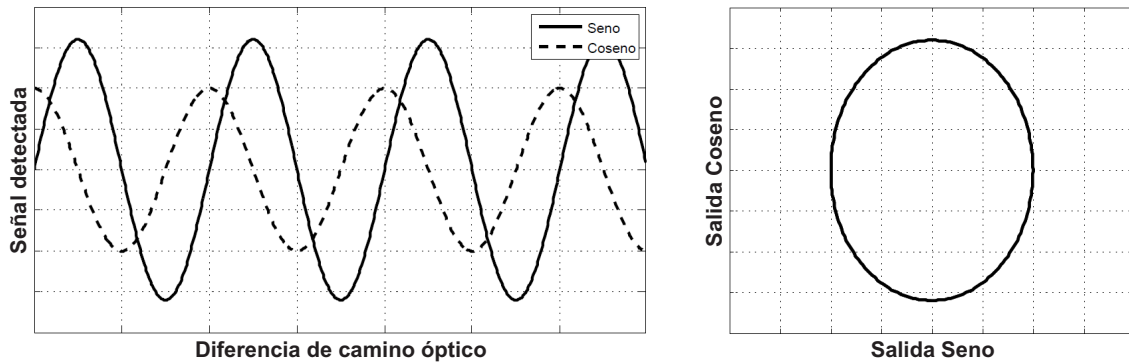


Figura 16. Detección de franjas en cuadratura.

III.2 Arreglos ópticos implementados

Durante el desarrollo de este trabajo se implementaron diferentes arreglos ópticos para probar algunos conceptos y entender el funcionamiento de los elementos del sistema con el fin de entender la dinámica de los arreglos interferométricos. La información fue necesaria para diseñar la electrónica y rutinas del microcontrolador encargadas de procesar adecuadamente los datos y poder obtener la información deseada a partir de la señal medida. A continuación se exponen y describen cada uno de los arreglos ópticos implementados con los elementos disponibles en el laboratorio de comunicaciones ópticas. Los resultados obtenidos en cada uno de los experimentos realizados se mostrarán en el siguiente capítulo.

III.2.1 Arreglo para cambio de índice de refracción

Uno de los intereses principales de este trabajo es poder medir el cambio de índice de refracción de una sustancia translúcida, ya que esto permite inferir indirectamente cambios físicos o químicos de la muestra como son cambios de temperatura y densidad, procesos químicos como fermentación y oxidación, además de detección de algún compuesto particular. Con el fin de probar el concepto se implementó un experimento cuyo esquema se muestra en la figura 17, donde se pueden colocar muestras de diferentes líquidos en cubetas de acrílico colocándolas en bases para la mesa óptica hechas a medida. Para el experimento de laboratorio la cubeta se llenó con soluciones de agua destilada con sal a diferentes concentraciones y se hizo una serie de mediciones con estas muestras para ver la respuesta del interferómetro.

El arreglo implementado no utiliza la técnica de conteo de franjas ya que el objetivo inicial es únicamente conocer el comportamiento del interferómetro con las cubetas de acrílico y las diferentes muestras de agua con sal. Los resultados obtenidos son de utilidad para saber si la nitidez del patrón de interferencia se conserva o si se torna demasiado difuso después de pasar por la muestra, además de conocer los efectos de la temperatura y el rango dinámico que se puede alcanzar. Esto permitiría continuar con arreglos más complejos como los reportados en la literatura y comparar los resultados [7].

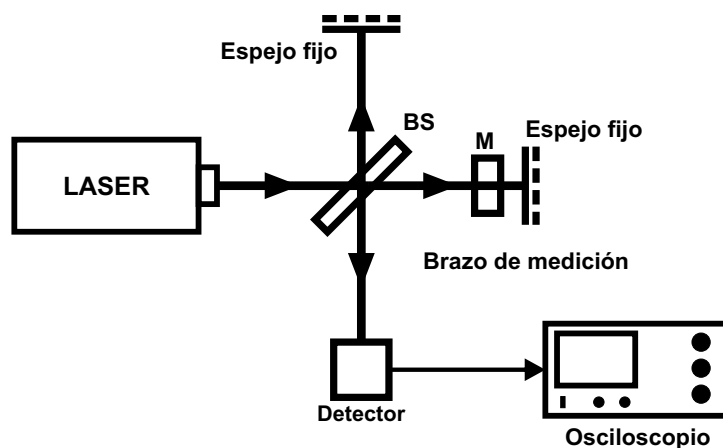


Figura 17. Detección de cambio de índice de refracción con muestras de agua salada.

III.2.2 Arreglo para cambio de longitud de camino óptico

El siguiente arreglo (mostrado en la figura 18) se implementó con el objetivo de caracterizar el funcionamiento del interferómetro de Michelson cuando la longitud de camino óptico cambia bajo condiciones controladas. Para analizar la respuesta del interferómetro ante perturbaciones en el brazo de medición, se eliminó la cubeta de agua con sal y se empotró el espejo con bases construidas a medida en una bocina en la que se inyectan diferentes señales que pasan al espejo en forma de vibración mecánica para inducir perturbaciones controladas al sistema y analizar su respuesta.

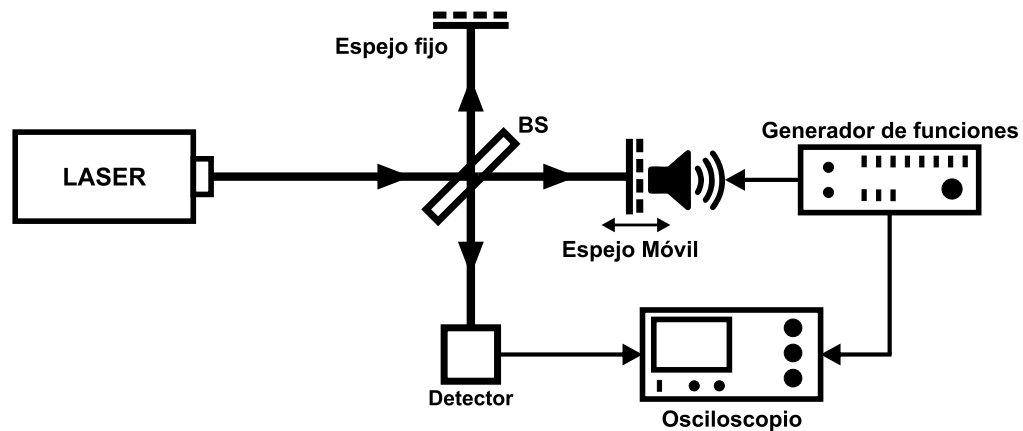


Figura 18. Detección de interferencia con perturbaciones armónicas senoidales.

III.2.3 Arreglo para alineación de polarizadores

La generación de señales ópticas en cuadratura requiere el uso de elementos polarizadores que permiten separar la fuente de luz en dos componentes de polarización distinta, donde la diferencia de fase es controlada por el ángulo de los elementos polarizadores que se colocan antes el detector en cada punto de observación.

Debido a que en el laboratorio de comunicaciones ópticas los elementos polarizadores no cuentan con la graduación que indica el eje de polarización, se implementó el siguiente arreglo de prueba que se muestra en la figura 19 para conocer y graduar manualmente estos elementos. Una prueba sencilla para encontrar el eje de polarización del polarizador lineal y la placa de $\lambda/4$ es colocarlos a 0 y 45 grados respectivamente. Esto se consigue cuando se giran los elementos hasta conseguir que la señal que refleja el espejo sea completamente eliminada.

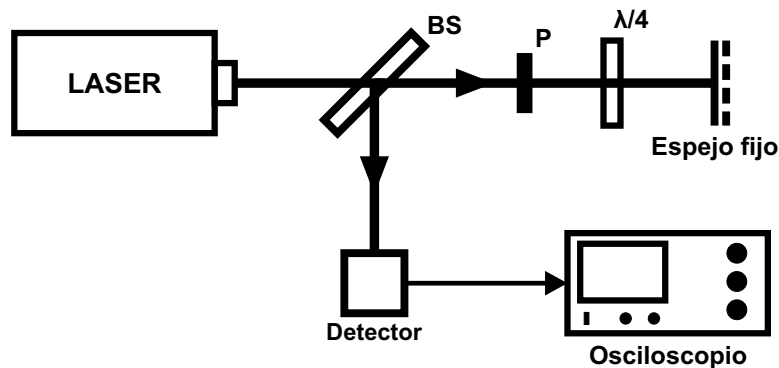


Figura 19. Arreglo de prueba para alinear elementos polarizadores.

III.2.4 Arreglo de estado de polarización de la fuente

El siguiente arreglo que se ilustra en la figura 20, tiene como objetivo probar de una manera sencilla el estado de polarización con que emite el láser de helio-neón del laboratorio de comunicaciones ópticas. Al hacer que el haz que emite el láser pase por un polarizador lineal ajustado en una posición fija, debido a que el polarizador lineal sólo permite el paso de la luz que coincide con su eje de transmisión, si el estado de polarización de la fuente cambia, la cantidad de luz transmitida cambiará también, de otra manera si el estado de polarización de la fuente se mantiene constante, la luz transmitida permanecerá constante. El experimento consiste en colocar uno de los polarizadores en una posición fija, mientras que el otro se gira poco a poco desde 0 a 90 grados para analizar cómo cambia la señal de salida con respecto a la referencia en función del giro del polarizador.

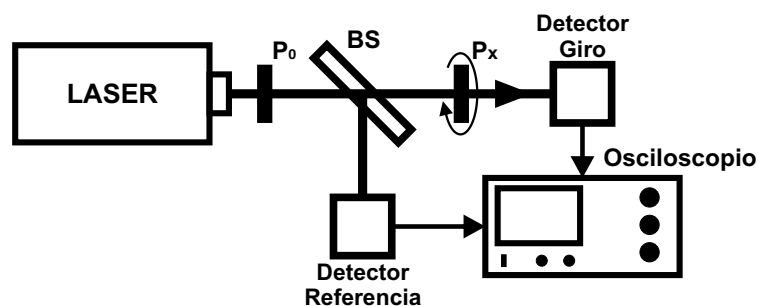


Figura 20. Arreglo de prueba para alinear elementos polarizadores.

III.3 Detector

Existe una amplia gama de detectores que generalmente se basan en detectar la intensidad de la luz que incide y que es dependiente de la cantidad de luz que se irradia y de la longitud de onda de la misma. Como se mencionó en el capítulo anterior, para el desarrollo de los experimentos se utilizó un detector basado en un fotodiodo, ya que permite reducir la complejidad de la electrónica y el algoritmo que se debe implementar para la resolución de franjas. Tras revisar diferentes detectores se eligió el fotodetector OPT101 de Burr-Brown que integra un fotodiodo y el acondicionamiento de señal con un operador analógico en configuración de convertidor de corriente a voltaje (la figura 21 lo muestra), esto permite reducir la cantidad de componentes y la complejidad del sistema.

III.3.1 Características del OPT101

El fotodetector convierte la corriente del diodo en un voltaje, que de acuerdo a la ecuación 18, es igual a dicha corriente multiplicada por la resistencia de retroalimentación del convertidor de corriente a voltaje más un voltaje de aproximadamente 7.5mV introducido para la operación de una sola fuente. La corriente generada por

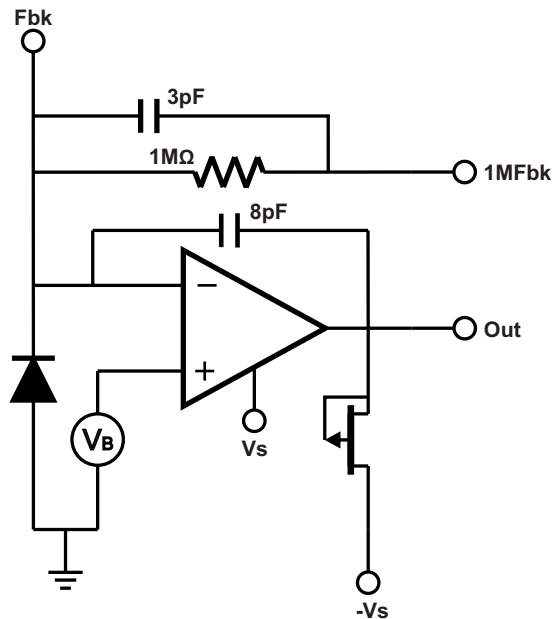


Figura 21. Detector OPT101.

el fotodiodo está relacionada con la longitud de onda y la potencia óptica que incide en la superficie de detección. La figura 22 muestra la curva de responsividad normalizada donde se puede ver que a la longitud de onda de 633.8nm la responsividad es de aproximadamente 0.43A/W.

Ancho de banda

Existen tres límites de respuesta que definen el ancho de banda que puede alcanzar el convertidor de corriente a voltaje, el cual está limitado por las capacitancias parásitas, la anchura de banda del operador analógico y la compensación de fase. Un elemento de vital importancia para mantener la estabilidad en frecuencia del circuito es el capacitor de retroalimentación C_f ya que el cero introducido agrega un adelanto de fase que contrarresta la atenuación de la capacitancia parásita de entrada en altas frecuencias.

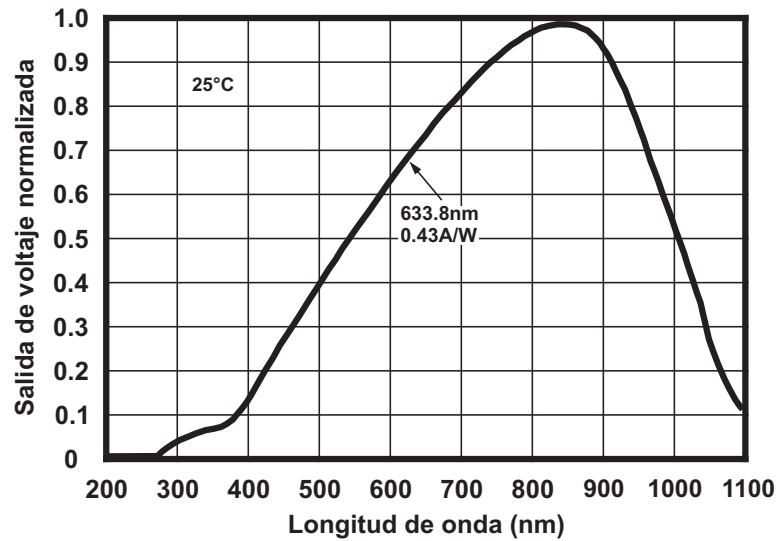


Figura 22. Responsividad normalizada.

La figura 23 muestra el circuito equivalente para el cálculo del capacitor de retroalimentación y el factor de compensación β .

$$\beta = \frac{1 + R_f C_f S}{1 + R_f (C_i + C_f) S} \quad (19)$$

donde:

$$C_i = C_D + C_{id} + C_{icm}$$

$$C_f = (C_c/2)[1 + \sqrt{1 + 4C_i/C_c}]$$

$$C_c = 1/2\pi R_f C_f$$

Ruido

Las componentes básicas del ruido en el convertidor de corriente a voltaje provienen de la resistencia de retroalimentación y del ruido de corriente y voltaje de entrada. A medida que se incrementa el valor de la resistencia de retroalimentación pasa de

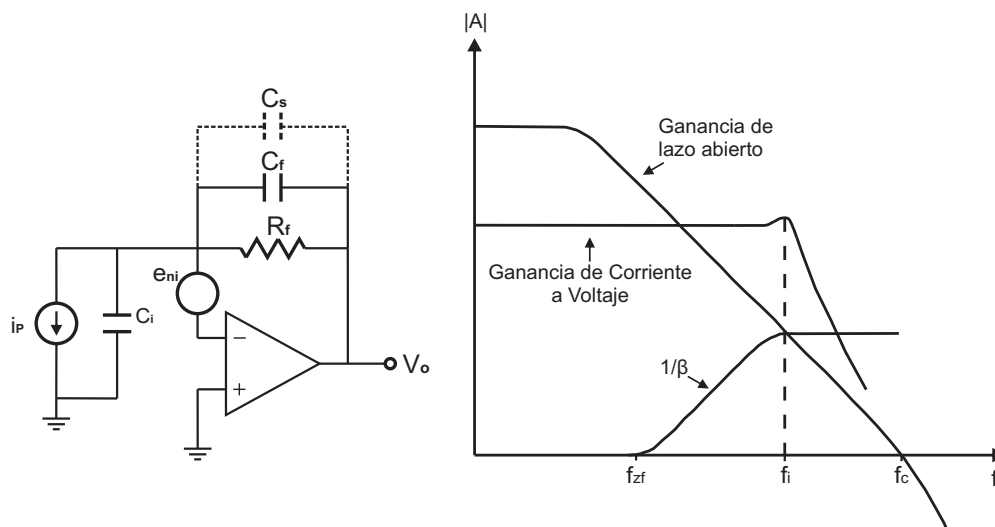


Figura 23. Convertidor de corriente a voltaje con capacitor de compensación.

tener como fuente principal el amplificador, posteriormente la resistencia y después una combinación de los dos. El ruido que aparece en la entrada del amplificador debido a la capacitancia de entrada que se retroalimenta por medio de la resistencia R_f , puede reducirse al agregar el capacitor de retroalimentación C_f el nivel de ruido se ve reducido por un factor de $1 + C_i/(C_f + C_s)$.

Características de detección

Para probar el funcionamiento del fotodiodo con el interferómetro de Michelson se montó el arreglo básico como el mostrado en la figura 9 y se colocó el fotodiodo en el punto de observación. La figura 24 muestra la señal que se obtuvo después de inducir una vibración senoidal en el brazo de medición del interferómetro. Al analizar la respuesta ante el movimiento periódico; se puede ver que existe una dependencia entre la dirección y velocidad del movimiento del espejo con la dirección y velocidad del movimiento de las franjas, esto genera una modulación de la señal que afecta la diferencia de camino óptico en forma de un tren de pulsos con características particulares.

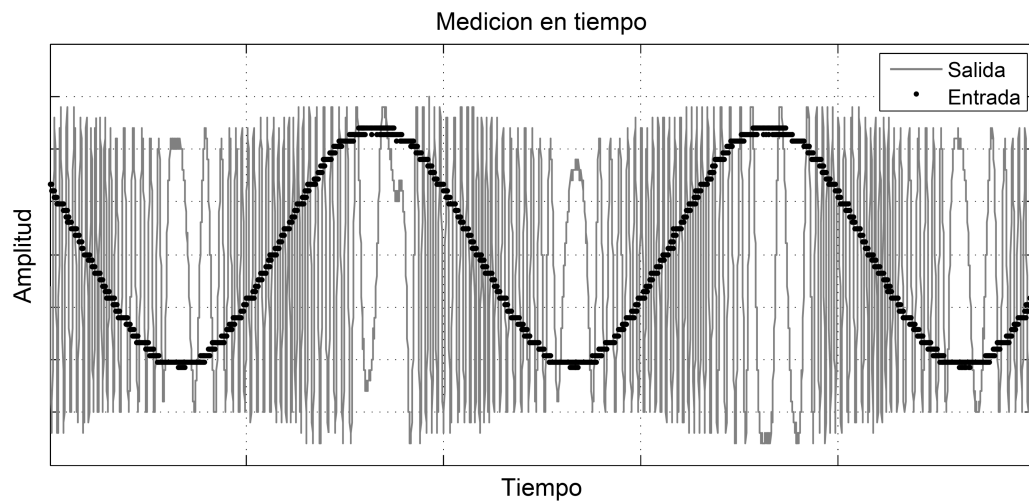


Figura 24. Respuesta del interferómetro al cambio de la longitud de camino óptico.

- Aumento de amplitud: Aumenta la cantidad de pulsos por ciclo y el periodo de los ciclos se mantiene (ver figura 25 a).
- Aumento de frecuencia: Disminuye el periodo de los ciclos pero la cantidad de pulsos por ciclo se mantiene (ver figura 25 b).

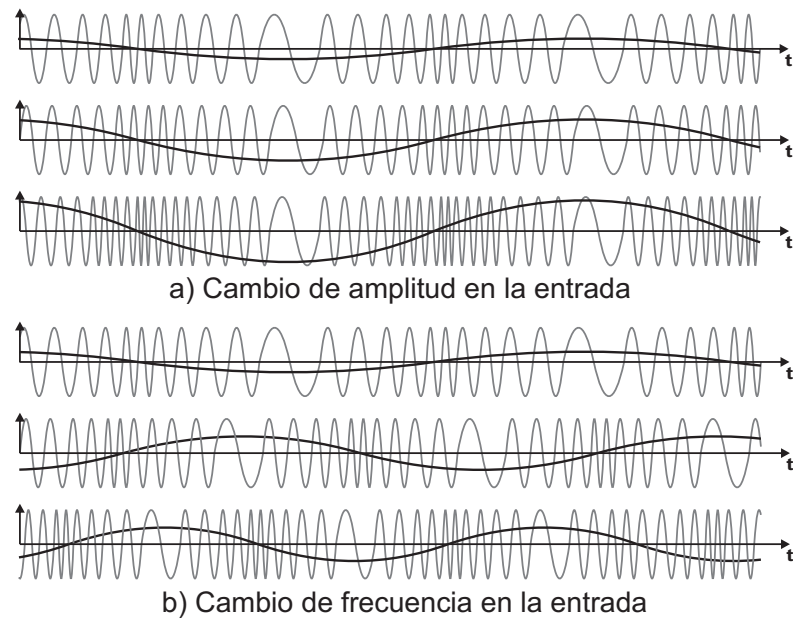


Figura 25. Respuesta del interferómetro al cambio de amplitud y frecuencia.

Al utilizar la técnica de conteo de franjas es posible demodular la señal de tren de pulsos con la que responde el interferómetro de Michelson, para esto debe implementarse un algoritmo que pueda diferenciar el sentido en el que los pulsos se mueven y hacer el conteo ascendente o descendente en relación a la dirección, además de asignar de manera precisa la línea de tiempo al conteo de pulsos. Una vez contados los pulsos y asignada la línea de tiempo, se puede determinar la diferencia de camino óptico a medida que se modifica de acuerdo con la ecuación 20 [8], esta indica que cada franja corresponde a un desplazamiento de 316.4nm para el láser de He-Ne.

$$d = n\lambda/2 \quad (20)$$

III.4 Estructura de la aplicación del microcontrolador

En seguida se describe la aplicación desarrollada para el microcontrolador de Atmel SAM3U4E [9] en la tarjeta de evaluación SAM3U-EK para realizar tareas como el conteo de franjas, almacenamiento de datos e interfaz de usuario. Los manejadores de cada uno de los periféricos y las rutinas de la aplicación están en lenguaje C con funciones del estándar ANSI [10]. La figura 26 muestra el diagrama de bloques de los módulos y funciones implementadas.

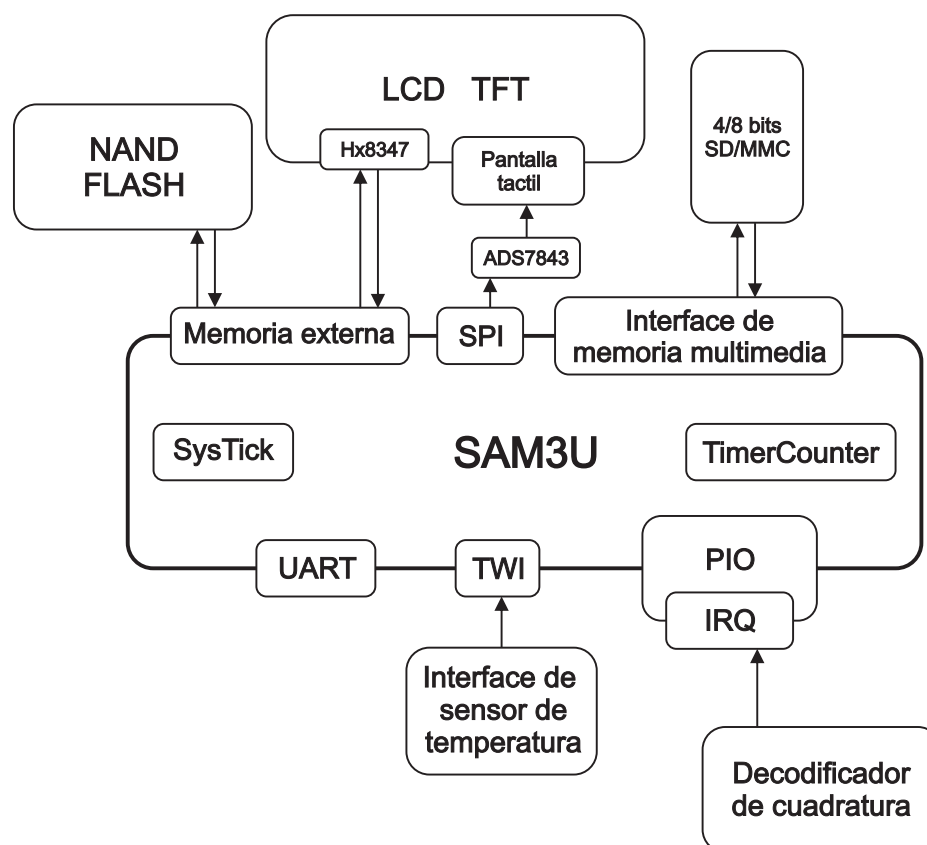


Figura 26. Diagrama de bloques de la aplicación.

La capa de abstracción de *hardware* que soporta cada una de las funciones y rutinas de la aplicación es el textitEstándar de Interface de Software de Microcontroladores ARM Cortex (CMSIS por sus siglas en inglés), se muestra en la figura 27 y define los requerimientos básicos para la portabilidad y reutilización del código entre plataformas ARM por medio de la consistencia de las interfaces de *software* y definiciones estandarizadas para registros y periféricos.

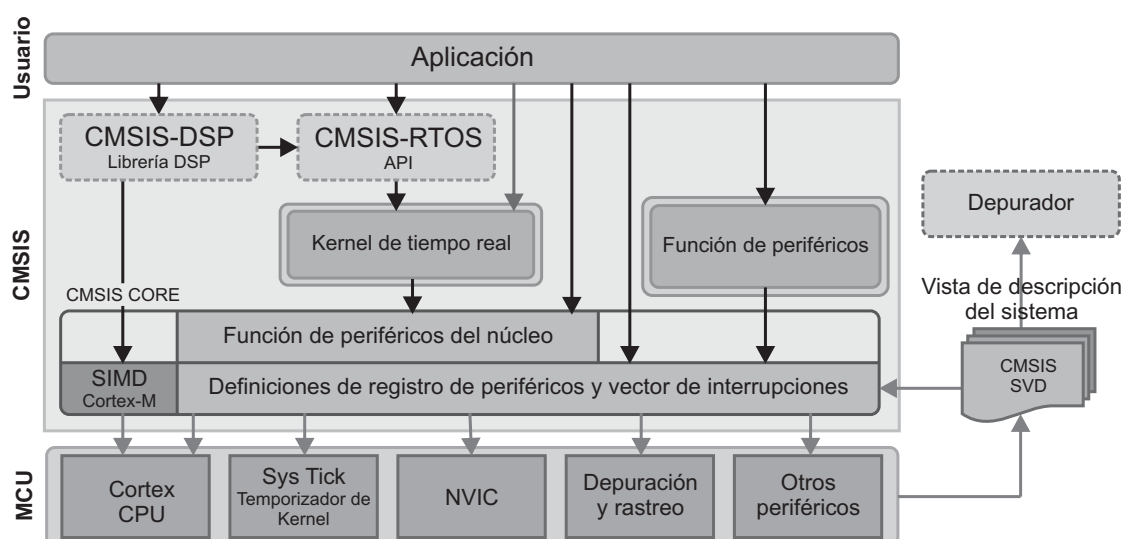


Figura 27. Capa de abstracción de *hardware* CMSIS.

III.4.1 Módulo de UART

El módulo de UART puede ser utilizado como interfaz de comunicación y rastreo, los modos de recepción y transmisión de datos operan independientemente en modo asíncrono con soporte de caracteres de 8 bits y hacen uso del vector de interrupciones además de tener un generador de *baudrate* común, el diagrama de flujo del módulo se muestra en la figura 28. La transmisión y recepción de caracteres se hace a través de registros especializados y un registro para ver el estado del canal que sirve para

controlar cuando es que los registros de transmisión y recepción tienen datos válidos disponibles para llenar el *buffer* de salida o entrada según sea el caso.

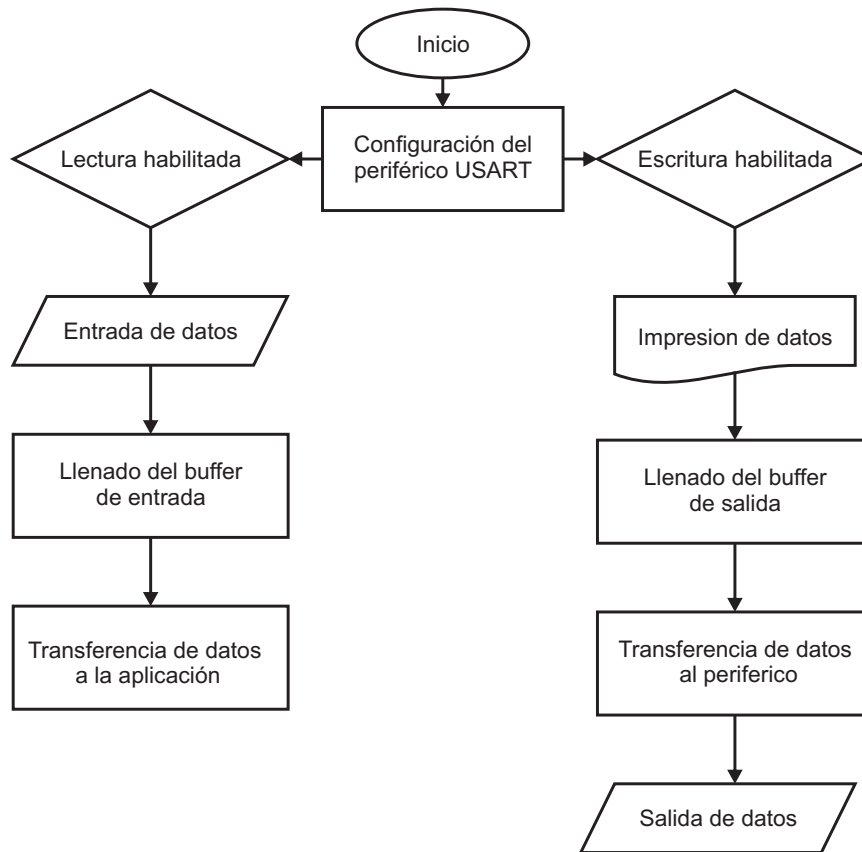


Figura 28. Diagrama de flujo del módulo de UART.

III.4.2 Módulo de tarjeta multimedia (HSMCI)

Este módulo contiene registros de comando, respuesta, datos, contadores de tiempo de espera y lógica de detección de errores que maneja automáticamente la transmisión de datos y la recepción de las respuestas asociadas a ellos lo que minimiza la intervención del procesador. El diagrama de flujo del módulo HSMCI se muestra en la figura 29. Después de que la tarjeta es inicializada el protocolo multimedia hace una representación de los mensajes transferidos en cada uno de los siguientes casos.

- Comando: Un comando es un mensaje que inicia una operación y se transfiere desde el módulo hacia la tarjeta.
- Respuesta: La respuesta es un mensaje que se envía desde la tarjeta hacia el módulo como respuesta a un comando previamente recibido.
- Datos: Los datos pueden ser transferidos desde la tarjeta al módulo o viceversa a través de la línea de datos.

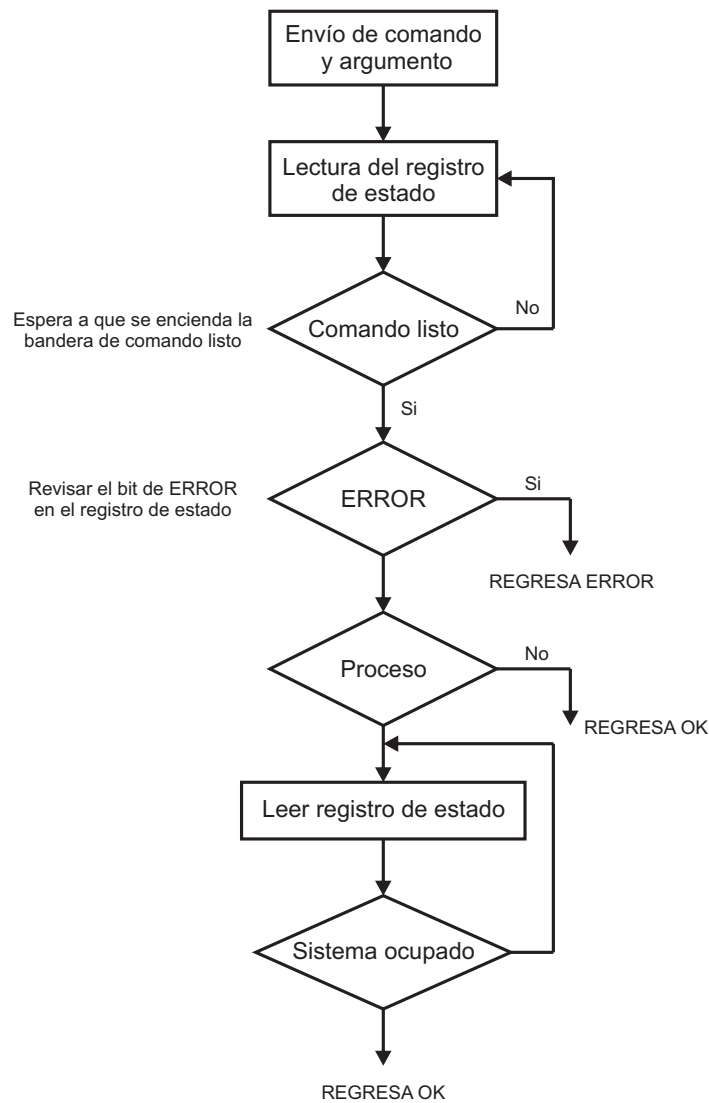


Figura 29. Diagrama de flujo del módulo de HSMCI.

III.4.3 Controlador de entrada y salida paralela

Este controlador maneja hasta 32 líneas de entrada y salida que pueden ser utilizadas como entradas y salidas de propósito general o asignadas funciones de un periférico integrado, las líneas multiplexadas para uno o más periféricos deben ser configuradas cuidadosamente para evitar el mal funcionamiento o los conflictos entre ellos. El periférico

está conectado a una de las fuentes del controlador del vector de interrupciones, que pueden generarse en cualquiera de las líneas del periférico siempre y cuando se encuentre asignada su interrupción al vector de interrupciones y el reloj del controlador de entrada y salida paralela este habilitado (ver figura 30).

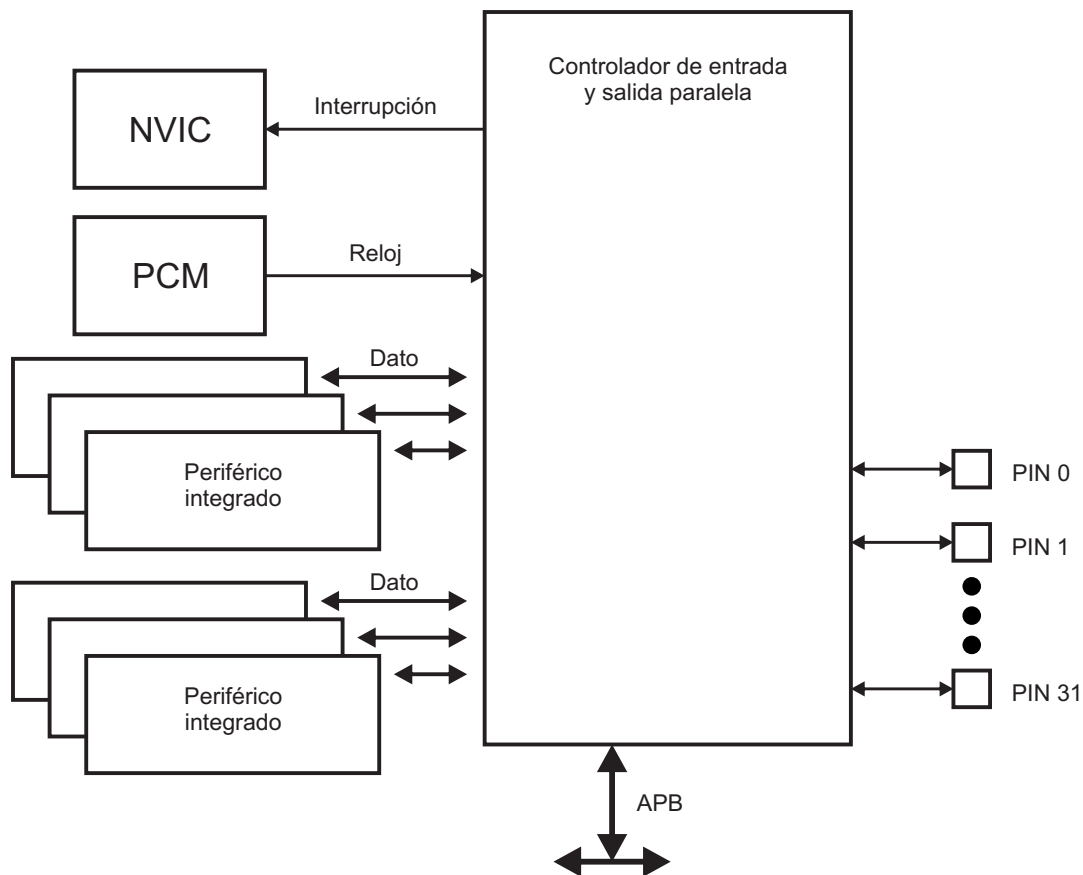


Figura 30. Diagrama de flujo del módulo de control de entrada y salida paralela.

III.4.4 Módulo de Contador Temporizador

El Contador Temporizador es un temporizador de 16 bits que puede ser programado para cumplir una gran variedad de funciones, entre ellas el retraso de tiempo que se implementó en la aplicación para generar la base de tiempo que se requiere para

demodular la señal que proviene del interferómetro de Michelson. Con esta base de tiempo se genera un vector que se adjunta a los datos que se muestrean en tiempo real.

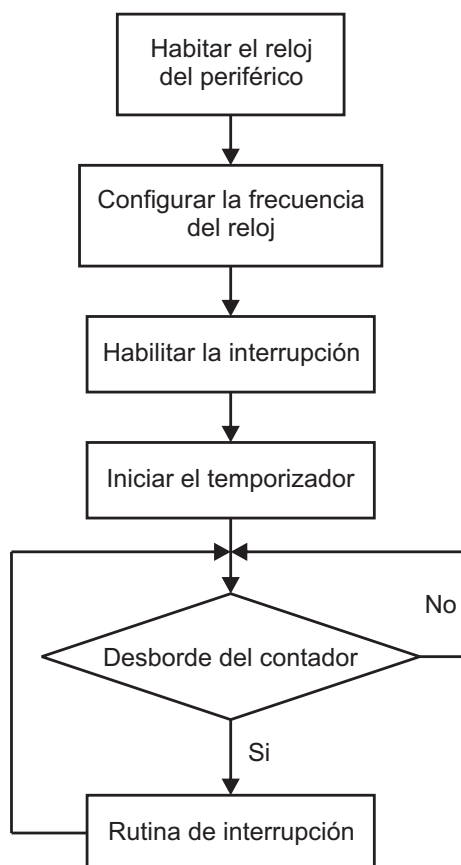


Figura 31. Diagrama de flujo del módulo Contador Temporizador.

III.4.5 Rutinas para interfaz de usuario

Una parte importante de la aplicación es la manera en que el usuario puede interactuar con ella y operar el sistema por medio de una interfaz de amigable. La tarjeta de desarrollo SAM3U-EK integra en su *hardware* un sistema de LCD con pantalla táctil que es ideal para implementar diferentes opciones de operación, ya que para hacerlo únicamente es necesario agregar las rutinas a los módulos del LCD y pantalla táctil para

eliminar la necesidad de modificar el *hardware* con el fin de agregar nuevas funciones. En seguida se describe el funcionamiento de los módulos de LCD y pantalla táctil.

Módulo de LCD

El módulo de LCD contiene todas las funciones necesarias para inicializar el periférico que se encarga de manejar el visualizador de cristal líquido y las demás bibliotecas y rutinas que se utilizan para encender un pixel de una posición particular con un color determinado, estas rutinas son la base de la aplicación que permite dibujar caracteres y figuras rectangulares en cualquier posición que se indique de manera automática. Este conjunto de funciones hacen más sencillo desplegar datos y desarrollar interfaces de usuario.

Módulo de pantalla táctil

Este módulo se encarga de poner en funcionamiento el *hardware* que maneja la pantalla táctil y también se encarga de relacionar los objetos que se dibujan en el LCD y que son definidos como sensibles al tacto para generar la interrupción adecuada una vez que la pantalla táctil es presionada sobre el área definida como sensible a la interrupción. La inicialización de este periférico se muestra en la figura 32.

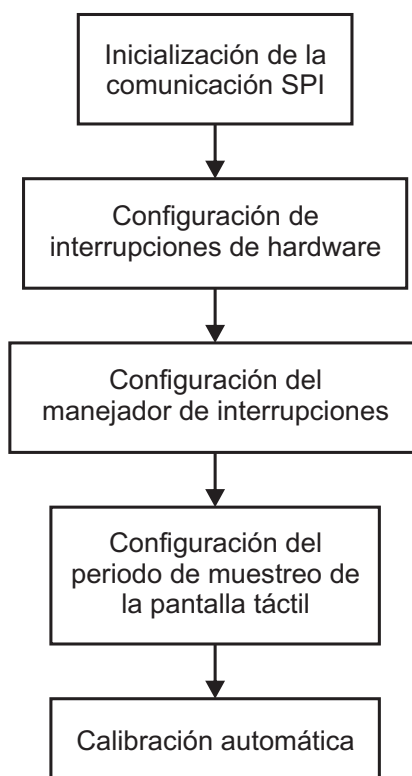


Figura 32. Proceso de inicialización de pantalla táctil.

III.5 Rutina de detección de franjas

Se implementó una rutina principal que integra todos los módulos de la aplicación (mostrada en la figura 33) que se encarga de poner en funcionamiento cada uno de los periféricos necesarios para operar el sistema y llevar a cabo la lectura y demodulación de la señal del interferómetro de Michelson. La rutina comienza con la inicialización de los periféricos e interrupciones que la aplicación requiere para funcionar como el UART, SysTick, interrupciones de propósito general, Timer Counter, LCD y pantalla táctil. Después de que todos los periféricos se han inicializado correctamente se ejecuta el lazo que adquiere, demodula y almacena los datos en la memoria SD que se describe

a continuación:

- Calibración automática de LCD y pantalla táctil.
- Montaje de la memoria SD.
- Creación el archivo de datos separados por comas.
- Captura de datos y línea de tiempo en el *buffer*.
- Escritura de los datos del *buffer* en la memoria con formato de valores separados por comas.
- Desmontaje de la memoria.

El archivo de valores separados por comas está formado por dos columnas de datos, la primera es la línea de tiempo con la que se muestrearon los datos mientras que la segunda contiene los datos que se muestrearon en esa línea de tiempo. Los datos que se obtienen al muestrear la señal son almacenados en un *buffer* de datos que se escribe cada vez que se presenta una interrupción del temporizador, los datos dejan de muestrearse una vez que el arreglo se llena para después imprimir los datos del arreglo en el archivo de valores separados por comas o CSV por sus siglas en inglés. Este formato está formalizado en la especificación RFC 4180 [11].

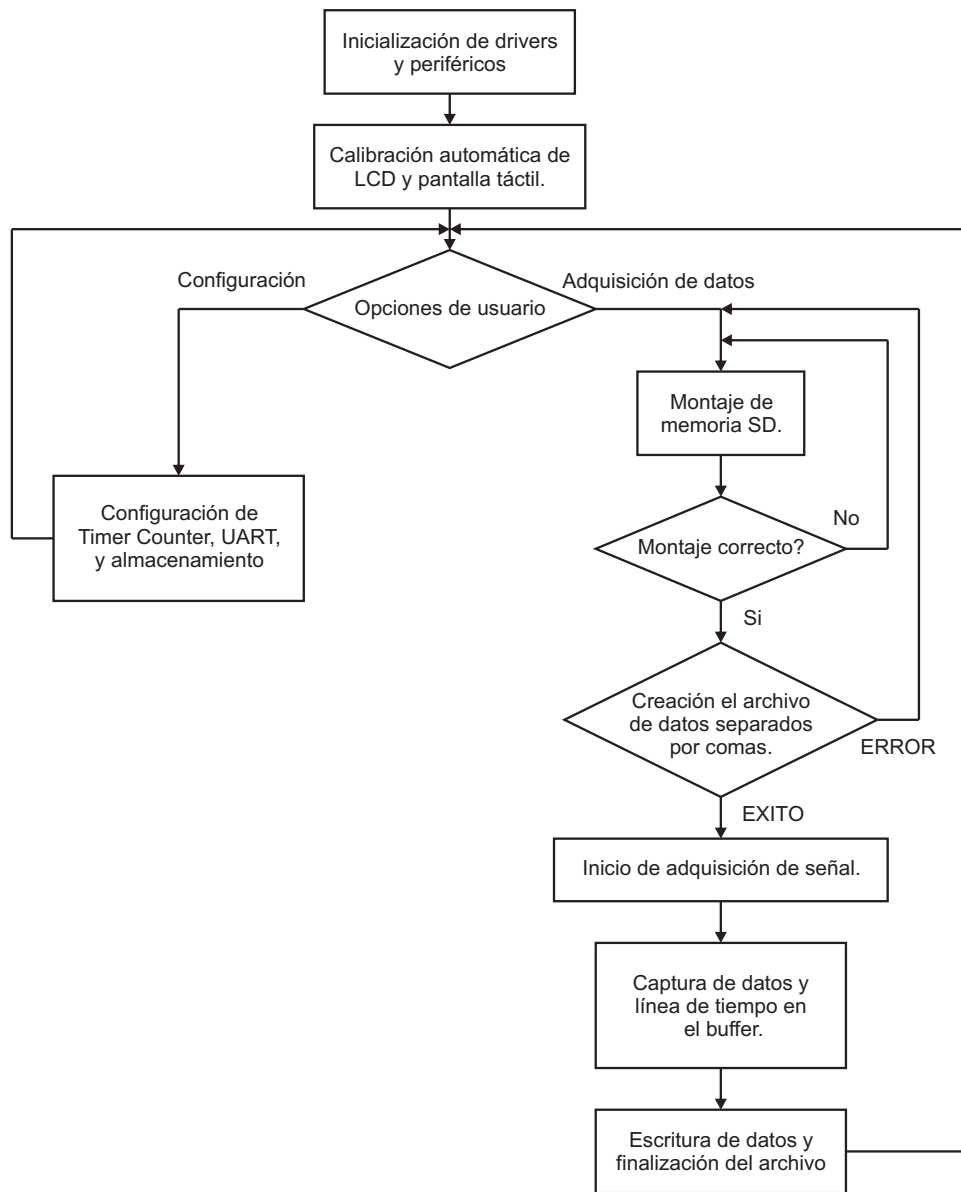


Figura 33. Rutina de demodulación de franjas.

III.6 Circuitos de acondicionamiento y simulación

Se diseñaron e implementaron para simular la dinámica del interferómetro de Michelson y para acondicionar esta señal con el fin de facilitar su adquisición. Aunque el circuito de simulación únicamente puede simular la dinámica del interferómetro para armónicos senoidales de baja frecuencia, es suficiente para probar las rutinas de demodulación y entender el comportamiento del interferómetro ante perturbaciones de diferentes amplitudes y frecuencias.

III.6.1 Oscilador controlado por voltaje

Cuando una alteración en la diferencia de camino óptico se presenta en el brazo de medición del interferómetro este responde modulando la señal que genera la alteración en forma de un tren de pulsos a medida que las franjas de interferencia pasan frente al detector. De la figura 24 se puede ver que esta respuesta es similar a la de un oscilador controlado por voltaje. La figura 34 muestra el oscilador controlado por voltaje que se implementó para simular el comportamiento del interferómetro.

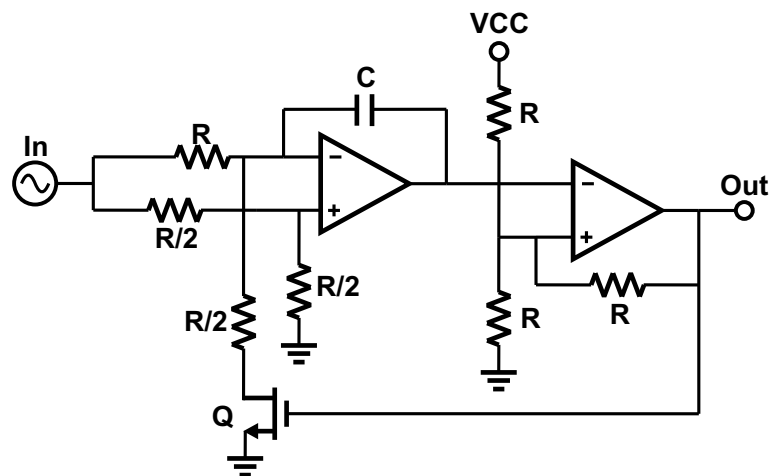


Figura 34. Circuito simulador basado en VCO.

III.6.2 Detector de cuadratura

El detector de cuadratura es un circuito que permite conocer la dirección en la que se mueven los pulsos. Cuando una señal en cuadratura es inyectada en las entradas A y B del circuito, este permite el paso a la señal que está adelantada por su respectiva salida mientras que la otra es puesta en bajo. El cambio de dirección y la magnitud con que la señal se mueve es detectado al contar por separado los pulsos de cada una de las salidas del circuito. La figura 35 muestra el diagrama esquemático y la tabla de verdad.

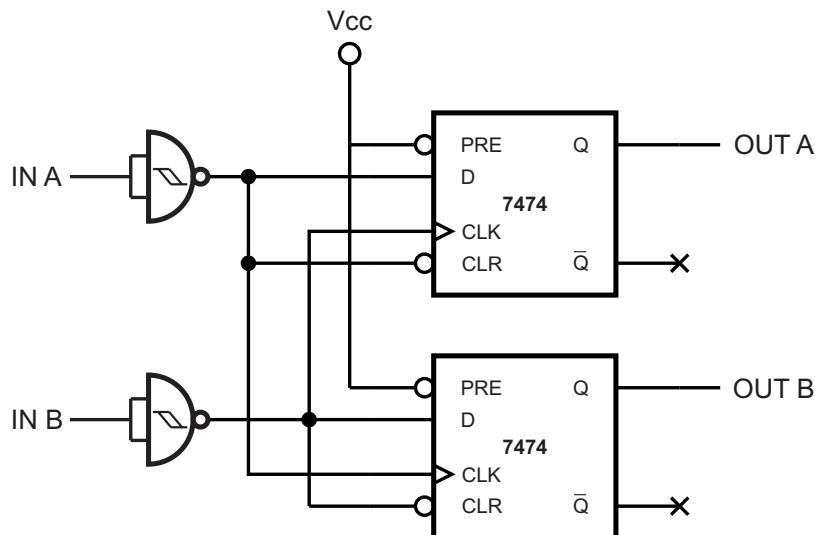


Figura 35. Circuito de seleccion de cuadratura.

III.6.3 Simulador de interferómetro homodino

El sistema de simulación que se muestra en la figura 36 fue implementado para hacer más sencillas las pruebas y depuración de las rutinas de demodulación implementadas en el microcontrolador. Las señales en cuadratura que simulan la dinámica del interferómetro de Michelson son inyectadas en las entradas de interrupción externa como

si estas salieran de los sensores ópticos del interferómetro homodino. La variedad de señales que se pueden simular son limitadas pero es más que suficiente para probar el funcionamiento de la demodulación ya que aunque las señales no tengan la misma dinámica, estas son de la misma naturaleza, lo que hace que para el sistema de demodulación sea transparente la fuente de donde provienen las señales en cuadratura.

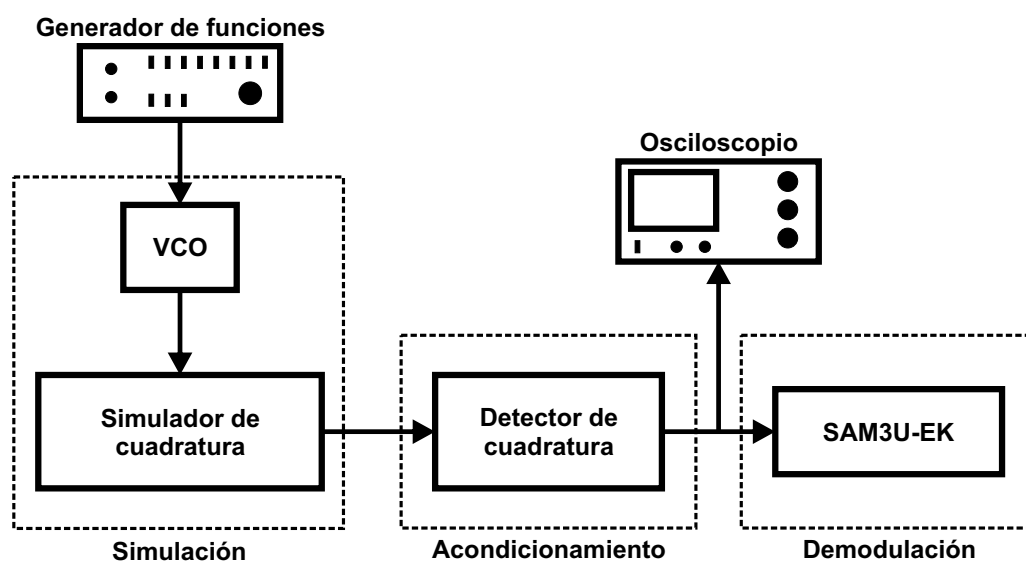


Figura 36. Circuito de seleccion de cuadratura.

Capítulo IV

Resultados

Este capítulo presenta los resultados obtenidos de los experimentos realizados en el laboratorio con los arreglos ópticos, la electrónica de simulación y el sistema de demodulación implementado en la tarjeta de desarrollo SAM3U-EK. Primero se exponen los resultados obtenidos de los diferentes arreglos ópticos implementados y el postprocesamiento realizado a los datos capturados con el osciloscopio para analizar con ayuda de rutinas escritas en lenguaje *Matlab* las señales en el dominio de la frecuencia y observar los errores inducidos al momento de medir la señal, ya que estos parámetros se utilizaron al momento de implementar las rutinas de demodulación y los circuitos de acondicionamiento de señal.

Posteriormente se muestran los resultados obtenidos con la tarjeta de desarrollo y el algoritmo de demodulación con señales simuladas donde se puede ver que el sistema recupera eficazmente la señal enmascarada en el patrón de franjas de interferencia. Finalmente, se discute porque no fue posible utilizar el interferómetro de Michelson junto con la tarjeta de desarrollo.

IV.1 Medición de índice de refracción

El experimento de índice de refracción presentó problemas ya que no fue posible obtener mediciones estables con el arreglo implementado, el movimiento de las franjas debido a perturbaciones externas no permitió identificar si el índice de refracción cambiaba ante

diferentes concentraciones de sal en el agua destilada.

En la figura 37 se muestran las variaciones del índice de refracción en función del tiempo obtenidas en el laboratorio donde se muestran las perturbaciones mencionadas.

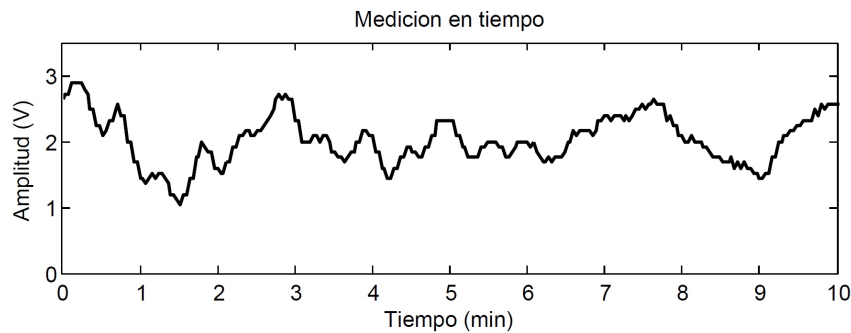


Figura 37. Experimento de cambio de índice refractivo.

IV.2 Longitud de camino óptico

Para caracterizar el comportamiento del interferómetro ante las perturbaciones en el brazo de medición que alteran la longitud de camino óptico, se realizaron varios experimentos con modificaciones a la frecuencia y la amplitud del armónico senoidal que se inyectaba en la bocina. Las características de detección de la sección 3.1 describen la respuesta en el tiempo del interferómetro. En seguida se muestran las gráficas de respuesta en frecuencia de los datos capturados con el osciloscopio y procesados con *matlab*. La figura 38(a) muestra la respuesta en frecuencia del interferómetro ante el cambio de amplitud mientras que la figura 38(b) muestra el comportamiento ante el cambio de frecuencia.

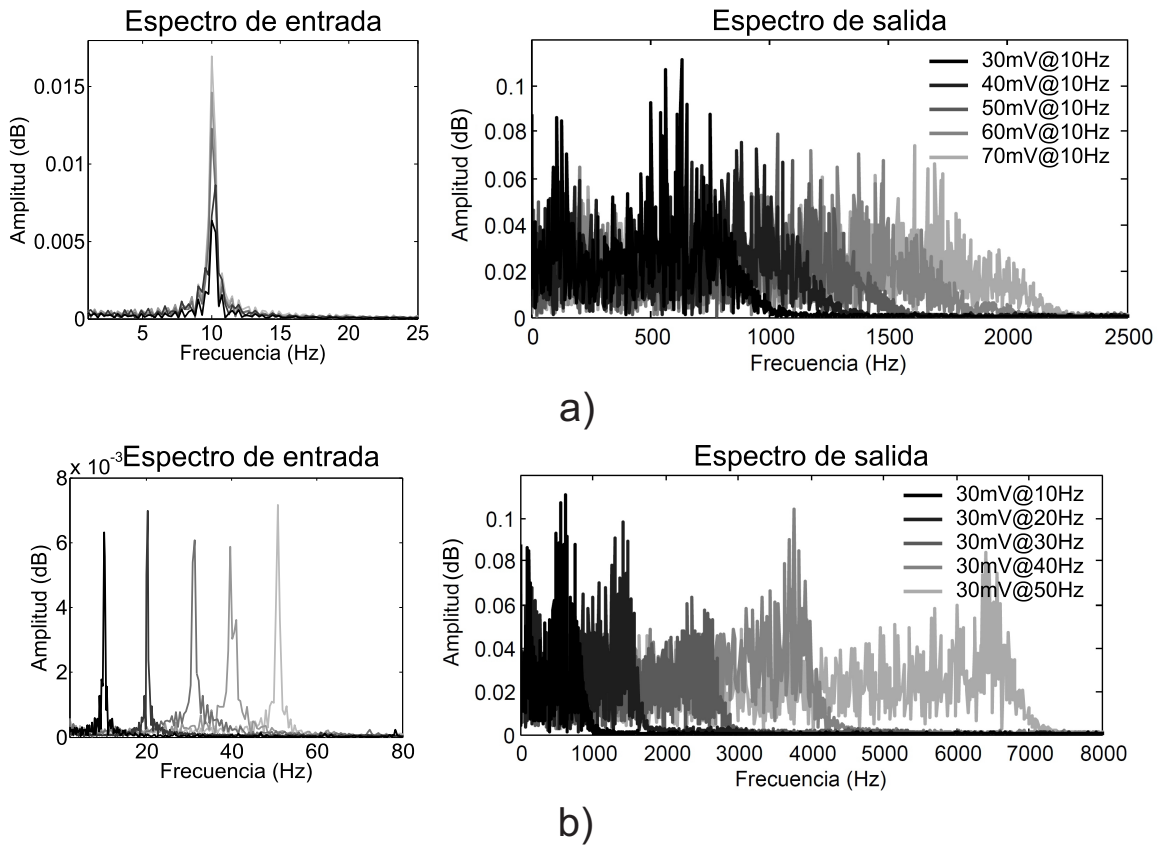


Figura 38. Respuesta en frecuencia del interferometro.

La tabla I muestra las características de las señales de entrada que se usaron en el experimento. La energía de las señales se obtuvo por medio del teorema de Parseval mostrado en la ecuación 21 (se utilizó *Matlab* para el calculo de la integral numérica).

$$\int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} |f(\omega)|^2 d\omega \quad (21)$$

Tabla I. Características de las señales de entrada

Señales de entrada					
Entrada (a)			Entrada (b)		
Magnitud dBV	Energía	Frecuencia Hz	Magnitud dBV	Energía	Frecuencia Hz
3.798	0.0608	10	3.798	0.0608	10
5.215	0.1231	10	4.186	0.066	20
7.37	0.1895	10	3.626	0.0637	30
8.778	0.2688	10	3.508	0.0657	40
10.19	0.3616	10	4.291	0.0675	50

Es importante tomar en cuenta que la respuesta en frecuencia del interferómetro está encima de los dos órdenes de magnitud de la frecuencia de la perturbación de entrada por lo que es importante tener una noción de con qué rapidez se altera la longitud de camino óptico para ajustar la frecuencia de muestreo adecuada. En base a los resultados observados en este experimento se diseñó un algoritmo para recuperar la señal de perturbación de entrada a partir de la señal de respuesta medida. Los resultados que se obtienen después de aplicar el procesamiento a los datos se muestran en la sección IV.6

IV.3 Alineación de polarizadores

El procedimiento para alinear los elementos polarizadores fue: colocar el polarizador lineal en una posición fija que se marcó como cero y después girar la placa de $\lambda/4$ para buscar su eje de polarización y ponerlo a 45 grados con respecto al polarizador lineal.

Sin embargo, no fue posible encontrar las posiciones adecuadas, ya que después de girar la placa de $\lambda/4$ lentamente hasta regresar a la posición inicial no fue posible eliminar la señal reflejada por el espejo que llegaba al detector. La figura 39 muestra la respuesta obtenida con este arreglo.

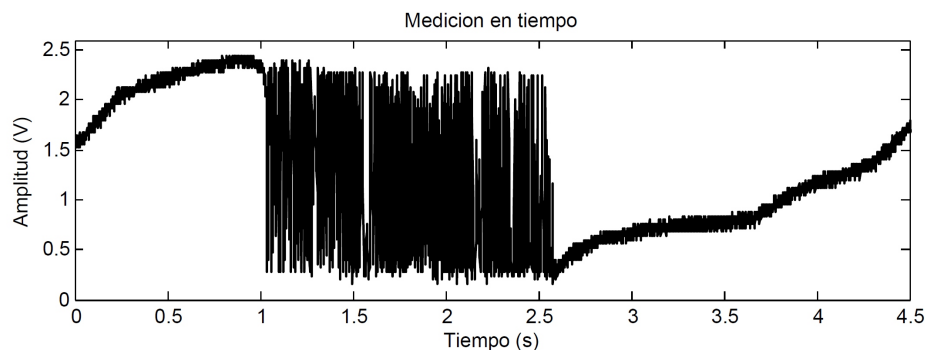


Figura 39. Prueba de alineación de polarizadores.

Después de varios intentos y para descartar el mal funcionamiento de alguno de los elementos polarizadores o de la fuente se implementó un arreglo sencillo para ver el comportamiento del estado de polarización de la fuente, lo cual se describe a continuación.

IV.4 Estado de polarización de la fuente

Este experimento no permite conocer cuál es el estado de polarización de la fuente, pero es más que suficiente para determinar que este no se mantiene estable y que cambia periódicamente con el tiempo (la figura 40 lo muestra). Debido a que no se cuenta con una base graduada para girar el polarizador en el arreglo, no fue posible registrar datos que mostraran una tendencia, pero fue evidente que a medida que el ángulo del polarizador cambiaba de 0 a 90 grados con respecto al polarizador de referencia la señal

de salida paso de tener la misma amplitud que en la referencia a los 0 grados a quedar eliminada en la posición de 90 grados, pero la variación periodica de la pontencia nunca se eliminó.

Esto impide utilizar el laser de He-Ne del laboratorio de comunicaciones ópticas en experimentos que requieren luz polarizada como es el caso del interferómetro homodino para la detección de la dirección del movimiento de franjas. Se puede concluir que los demás elementos ópticos del laboratorio funcionan correctamente y que de contar con una fuente con estado de polarización fijo podría implementarse un interferómetro homodino con el material disponible en el laboratorio.

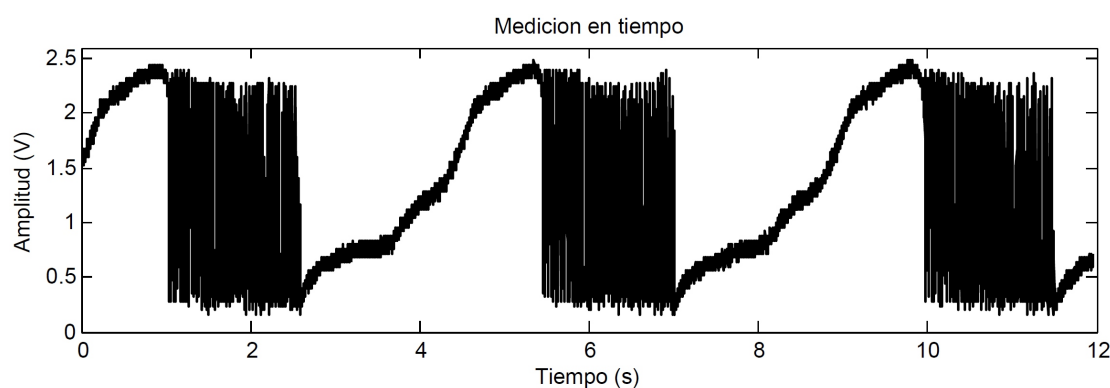


Figura 40. Prueba de polarización del laser de He-Ne.

IV.5 Simulación de señales

La figura 41 muestra la forma de las señales simuladas con el sistema de la figura 36, se puede ver que la señal de las franjas simuladas cambia de sentido cíclicamente. La forma de onda fue acondicionada para convertirla en pulsos cuadrados compatibles con señales del tipo TTL, esto asegura que cada pulsos se detecte en el flanco de subida.

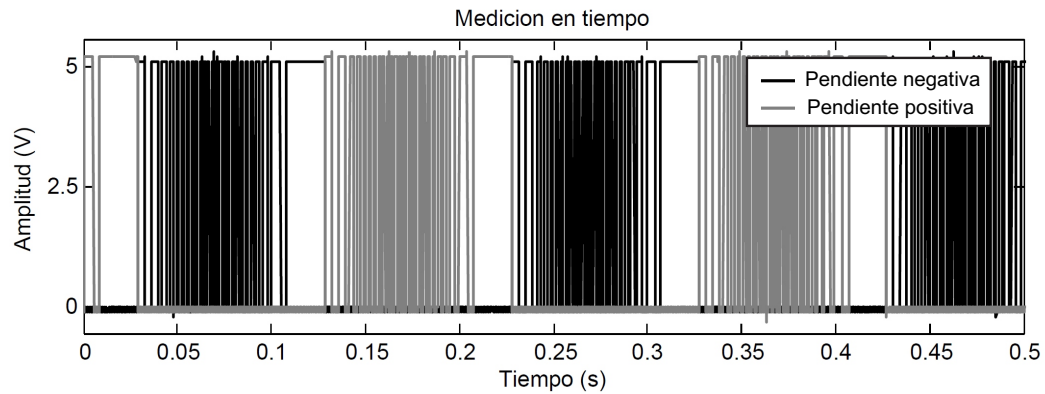


Figura 41. Franjas de interferencia simuladas.

IV.6 Señal recuperada

Después de muestrear una señal de la naturaleza de la figura 25, el sistema de demodulación recuperó la forma de onda de la señal que perturbaría la longitud de camino óptico y le asigna la magnitud adecuada.

En seguida se presenta el procedimiento para realizar el experimento con el sistema de la figura 36:

- Se enciende el equipo necesario para hacer la medición.
- Se enciende la tarjeta de desarrollo SAM3U-EK.
- Se fija la amplitud y frecuencia de la señal de simulación.
- Se pone en funcionamiento el algoritmo de muestreo y demodulación con la interfaz de usuario de pantalla táctil de la tarjeta SAM3U-EK.

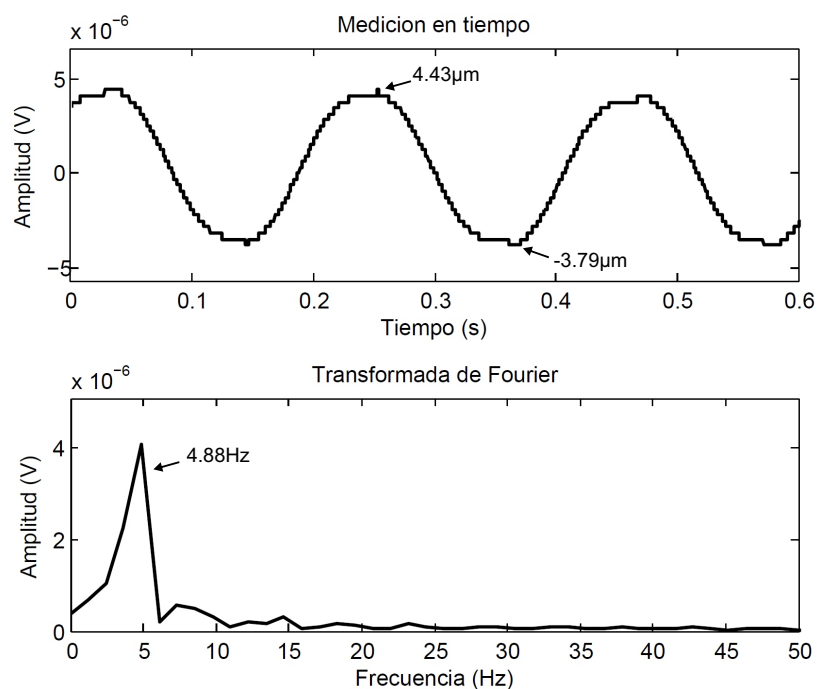


Figura 42. Demodulacion de patrón de franjas.

De la medición del experimento de simulación postprocesado con *Matlab* se obtuvieron los datos que se muestran en la tabla II, que describen las características de la señal recuperada con el algoritmo.

Tabla II. Demodulación de patrón de franjas

Velocidad de muestreo	Muestras	Distancia por franja	Δ MAX	Δ MIN
10KHz	6120	316.4nm	$4.43\mu\text{m}$	$-3.79\mu\text{m}$

Capítulo V

Conclusiones

Aunque no fue posible implementar el interferómetro de Michelson homodino debido a la falta de componentes, la información obtenida de todo el conjunto de arreglos ópticos con los que se experimentó fue suficiente para desarrollar e integrar un equipo que cumple con la tarea de recuperar la señal un patrón de interferencia por el método de conteo de franjas y almacenar los datos para poder procesarlos posteriormente, se opera por medio de una pantalla táctil con una interfaz gráfica que puede modificarse de acuerdo a las necesidades de la aplicación y tiene la flexibilidad de modificar los parámetros de operación del sistema en tiempo real sin necesidad de reprogramar el sistema.

El código desarrollado cumple con el estándar ANSI C y puede ser portado a otros sistemas de la familia SAM de Atmel.

Los sensores ópticos y la etapa de acondicionamiento de señal funcionaron adecuadamente ya que se distingue de manera eficaz el paso de las franjas sin introducir distorsión ni ruido al mismo tiempo que elimina las señales de modo común.

En teoría cuando el sistema tenga como entrada la señal de un interferómetro homodino éste podrá resolver el patrón de franjas y extraer los datos. El sistema puede ser de utilidad en diversos proyectos del cuerpo académico y para estudiantes que cursen materias relacionadas con óptica.

V.1 Aportaciones

La aportación principal de este trabajo fue el desarrollo del código base para el microcontrolador y el algoritmo de demodulación para la técnica de conteo de franjas. Por otra parte la investigación realizada permitió encontrar las fallas que impidieron implementar el interferómetro homodino y enlistar los elementos necesarios para hacer que funcione correctamente.

En seguida se enlistan y describen los componentes que impidieron implementar el interferómetro homodino (mostrado en la figura 43 donde se remarcan los componentes faltantes) y que hicieron necesario implementar los circuitos de simulación para validar el funcionamiento desarrollado con las señales esperadas.

- Láser con polarización fija a 633.8 nm.
- Si el láser no tiene cavidad aislada, se requiere un aislador para las reflexiones.
- Divisor de haz no polarizado.
- Bases graduadas para girar polarizadores y placas retardadoras.

Se construyeron bases para las cubetas de acrílico y las bases para la montura de la bocina con el espejo y también se adquirió un divisor de haz polarizado a 633.8nm que será de utilidad para la implementación del interferómetro homodino una vez que se consiga el láser.

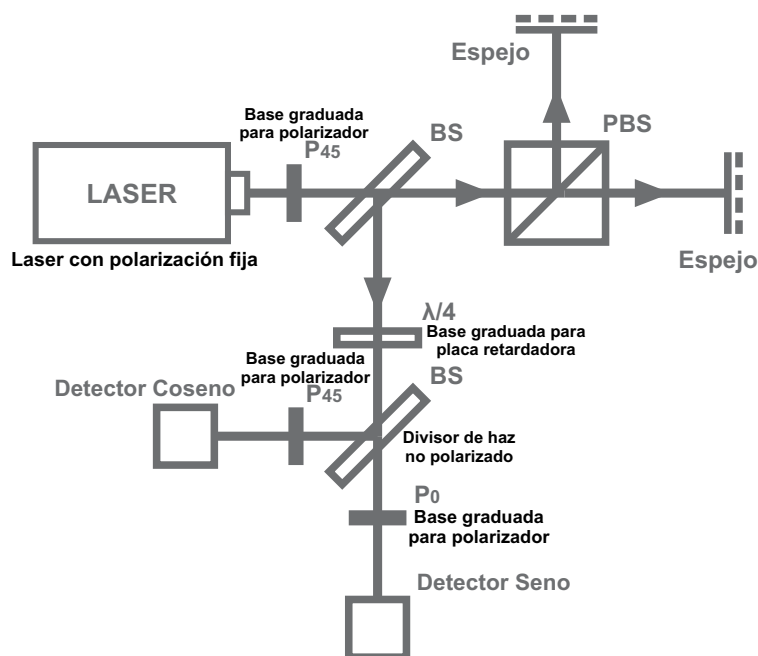


Figura 43. Elementos faltantes del interferómetro homodino.

V.2 Trabajo futuro

- Implementar el interferómetro de Michelson homodino.
- Diseñar e implementar los arreglos mecánicos y electrónicos para el brazo de medición que permitan hacer pruebas de índice de refracción.
- Construir una estructura metálica para el interferómetro homodino que permita armarlo sin necesidad de la mesa óptica.
- Probar el funcionamiento del sistema fuera del laboratorio.

Referencias

- [1] Albert A. Michelson and Edward W. Morley. Relative motion of the earth and the luminiferous ether. *American Journal of Science*, 34(203):333–345, 1887.
- [2] Bahaa E. A. Saleh and Malvin Carl Teich. *Fundamentals of Photonics*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1st edition, 1991.
- [3] Eugene Hecht. *Optics*. Addison Wesley, 4th edition, August 2001.
- [4] P. Hariharan. *Basis of Interferometry*. Academic Press, San Diego, 2nd edition, 2007.
- [5] Jerald Graeme. *Photodiode Amplifiers Op Amp Solutions*. McGraw-Hill, West 19th Street New York, 10011, 1st edition, 1996.
- [6] Mark A. Zummerge, Jonathan Berger, and Matthew A. Dzieciuch. Resolving quadrature fringes in real time. *Applied Optics*, 43(4):771–775, 2004.
- [7] Y. Ishihara, Y. Takahashi, T. Sugiyama, and A. Araya. Basic experiments on measurement of salinity using a heterodyne michelson interferometer. *OCEANS*, pages 1–5, September 2010.
- [8] J. G. Velásquez-Aguilar, D. Mayorga-Cruz, and A. Zamudio-Lara. Real-time displacement measurement using fpga and interferometry. *Electronics and Photonics*, pages 266–269, 2006.
- [9] Y. Joseph. *The definitive guide to the ARM Cortex-M3*. Newnes, Burlington MA, 2nd edition, 2010.
- [10] Brian W. Kernighan. *The C programming language*. Prentice Hall, Inc, West 19th Street New York, 10011, 2nd edition, 1988.
- [11] Cvs, comma separated values, rfc 4180, October 2005.

Apéndice A

PIEZAS MAQUINADAS PARA ARREGLOS ÓPTICOS

Base maquinada para cubetas de cuarzo, utilizada en experimentos de medición de índice de refracción.

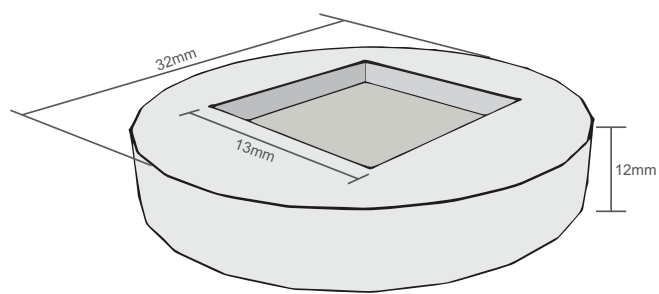


Figura 44. Base para cubeta

Base maquinada para el montaje de la bocina utilizada en experimentos de medición del cambio de longitud de camino óptico.

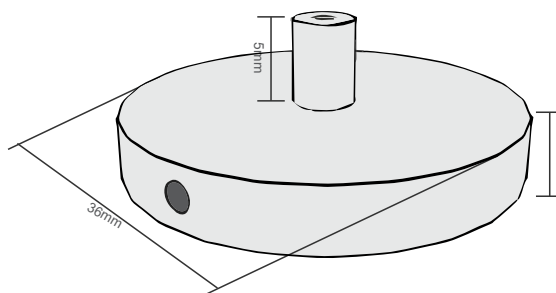


Figura 45. Base para bocina

Apéndice A

CODIGO DE MATLAB PARA GRAFICAR DATOS EN FORMATO CSV

```

%*****
%
% *****
%          Universidad Autonoma de Baja California
% *****
%
%          Facultad de Ingenieria Arquitectura y Diseño
%
%          Cuerpo Academico de Comunicaciones e Instrumentacion Electronica
%
% Escrito por: Jose Maria Guadalupe Alvarez Murillo
% Fecha: 12/6/2011
%
%*****

% Lee un archivo CSV y grafica los datos en linea de tiempo y su
% transformada de Fourier

[File,Path] = uigetfile('*.csv','Select the CSV'); % Abre el cuadro de para adquirir archivos
Pth=strcat(Path,File); % Almacena la ruta del archivo seleccionado
file = csvread(Pth, 2, 0); % Lee el archivo CSV
time = csvread(Pth, 2, 0, [2,0,(length(file)+1),0]); % Lee la Linea de tiempo del archivo
chA = csvread(Pth, 2, 1, [2,1,(length(file)+1),1]); % Lee datos del canal A
chB = csvread(Pth, 2, 2, [2,2,(length(file)+1),2]); % Lee datos del canal B
% Agregar canales aqui

time = time';
Ts = time(2) - time(1); % Calcula el tiempo de muestreo
time = (0:Ts:(length(time)*Ts) - Ts); % Genera el vector de tiempo

```

```

N = length(time); % Calcula la longitud del vector de tiempo

chA = chA';
chB = chB';
chA = chA - median(chA);
chB = chB - median(chB);
channelRelation = chA - chB;
StdDvt = std(channelRelation);

NFFT = 2\^nextpow2(N);

% Calcula las transformadas de Fourier del canal A y B
ffchA = fft(chA,NFFT)/N;
ffchB = fft(chB,NFFT)/N;

% Genera la linea de frecuencia
f = (1/(Ts*2))*linspace(0,1,NFFT/2);

% Grafica los canales en el dominio del tiempo
scrsz = get(0,'ScreenSize');
figure('Position',[scrsz(3)/2 scrsz(2)/2 scrsz(3)/2 scrsz(4)/3])
hold on
    plot(time,chA,'Color',[0, 0, 0],'LineWidth',1.2)
    plot(time,chB,'Color',[0.1, 0.1, 0.9],'LineWidth',1.2)
    % Agregar canales aqui

    ylim([min(chA)*1.5 max(chA)*1.5])
    box on
    xlabel('Tiempo (s)');
    ylabel('Amplitud (V)');
    title('Medicion en tiempo');
    saveas(gcf,'Time', 'bmp');
hold off

% Grafica los canales en el dominio de la frecuencia
scrsz = get(0,'ScreenSize');
figure('Position',[scrsz(3)/2 scrsz(2)/2 scrsz(3)/2 scrsz(4)/3])

```

```
hold on
    plot(f,abs(ffchA(1:NFFT/2)),'Color',[0, 0, 0],'LineWidth',1.2)
    plot(f,abs(ffchB(1:NFFT/2)),'Color',[0.1, 0.1, 0.9],'LineWidth',1.2)
    % Agregar canales aqui

hold on
box on
xlim([0 (1/(2*Ts))])
ylim([0 abs((max(ffchA)*2.5))])
xlabel('Frecuencia (Hz)');
ylabel('Amplitud (dB)');
title('Transformada de Fourier');
saveas(gcf,'FFT', 'bmp');
hold off
```