



UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN

CAMPUS LOMA BONITA

LICENCIATURA EN MATEMÁTICAS APLICADAS

**ESTUDIO DEL ÍNDICE DE
REFRACCIÓN DEL ALCOHOL
(ETÍLICO) POR MEDIO DEL
INTERFERÓMETRO DE MICHELSON**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**LICENCIADA EN MATEMÁTICAS
APLICADAS**

PRESENTA:

MARIJOSE PERUCINI AVENDAÑO

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. HÉCTOR HUGO SÁNCHEZ HERNÁNDEZ

LOMA BONITA, OAXACA, MÉXICO

2020



UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN

CAMPUS LOMA BONITA

LICENCIATURA EN MATEMÁTICAS APLICADAS

LA PRESENTE TESIS TITULADA “**ESTUDIO DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN DEL ALCOHOL (ETÍLICO) POR MEDIO DEL INTERFERÓMETRO DE MICHELSON**” PRESENTADA POR LA SUSTENTANTE DE LA LICENCIATURA C. **MARIJOSE PERUCINI AVENDAÑO** BAJO LA DIRECCIÓN DEL **DR. HÉCTOR HUGO SÁNCHEZ HERNÁNDEZ**, HA SIDO REVISADA Y ACEPTADA POR EL COMITÉ EXAMINADOR PARA SER DEFENDIDA EN EL EXAMEN PROFESIONAL Y OBTENER EL TÍTULO DE **LICENCIADA EN MATEMÁTICAS APLICADAS**.

DR. HÉCTOR HUGO SÁNCHEZ
HERNÁNDEZ
DIRECTOR

DR. FRANCISCO
GUTIÉRREZ ZAINOS
PRESIDENTE

DR. AGUSTIN SANTIAGO
ALVARADO
SECRETARIO

DR. MAURO SÁNCHEZ SÁNCHEZ
VOCAL



Universidad del Papaloapan

FECHA:	05 de Diciembre del 2019
ÁREA:	Vice-Rectoría Académica
OFICIO NÚMERO:	UNPA/VRA/268/2019
ASUNTO:	Autorización de Impresión de tesis.

C. Marijose Perucini Avendaño
PRESENTE:

En base al artículo 120 del reglamento de alumnos, por medio de la presente se aprueba la impresión de la tesis titulada *“Estudio del índice de refracción del alcohol (etílico) por medio del interferómetro de Michelson”* así como la programación del examen profesional bajo la dirección del Dr. Héctor Hugo Sánchez Hernández.

Sin más por el momento aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

Atentamente.
terra ubérrima, mens aperta
Bou Lo-tama, chi jí jú

MC. HÉCTOR LÓPEZ ARJONA
Vice-Rector Académico.



C.c.p. Dr. Víctor Manuel Méndez Salinas. Jefe de Carrera de la Lic. En Matemáticas Aplicadas
C.c.p. L.P. Yesenia Barrientos Arenal. Jefa del Departamento de Servicios Escolares
C.c.p. Dr. Héctor Hugo Sánchez Hernández. Director de Tesis.
C.c.p. Archivo.



UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN

Campus Loma Bonita

Oficio No. MA084-19

Loma Bonita Oaxaca a 5 de diciembre del 2019

Asunto: Asignación de sinodales de tesis

M.E. Yesenia Barrientos Arenal

Jefa del departamento de servicios escolares

PRESENTE

Por este medio le informo que la Vicerrectoría Académica, ha designado a los siguientes profesores como sinodales del examen profesional de la alumna **Marijose Perucini Avendaño**, quien defenderá su trabajo de tesis titulado *“Estudio del índice de refracción del alcohol(etílico) por medio del interferómetro de Michelson”*, para obtener el título de Licenciada en Matemáticas Aplicadas.

Titulares:

Presidente: Dr. Francisco Gutiérrez Zainos

Secretario: Dr. Agustín Santiago Alvarado

Vocal: Dr. Mauro Sánchez Sánchez

Suplentes:

Dr. Héctor Hugo Sánchez Hernández

M.C. Iván Guadalupe Mendoza Alonzo



**JEFATURA DE
CARRERA
DE MATEMÁTICAS
APLICADAS**

Sin otro particular me despido quedando a sus ordenes para cualquier aclaración.

ATENTAMENTE

Dr. Víctor Manuel Méndez Salinas

Jefe de carrera de la Lic. en Matemáticas Aplicadas

Universidad del Papaloapan

Vo.Bo.

M.C. Hector López Arjona

Vicerrector Académico

c.c.p. M.C. Héctor López Arjona. Vicerrector académico

c.c.p. M.E. Yesenia Barrientos Arenal. Jefa de servicios escolares

c.c.p. Archivo

*A Dios que ha sido el forjador de mi camino y a mi madre porque siempre confío en
mí y nunca me abandonó.*

Agradecimientos

A Dios, porque cada día bendice mi vida con la hermosa oportunidad de disfrutar a lado de las personas que quiero y de igual forma por permitirme tener una experiencia única dentro de la universidad.

A mi madre por el gran apoyo incondicional que me ha brindado en este largo tiempo y la confianza que me ha tenido desde el principio.

A mis hermanas Made, Kimy y Jheni por apoyarme en los momentos difíciles y seguir motivándome para seguir adelante y a mi sobrino Juanito por alegrarme todos los días.

Al Dr. Héctor Hugo Sánchez Hernández por aceptarme como su tesista, por aconsejarme y por compartir un poco de su conocimiento conmigo.

A mis revisores de tesis les agradezco su excelente disposición para aportar su tiempo a la lectura de este trabajo, por sus comentarios y sugerencias: Dr. Francisco Gutiérrez Zainos, Dr. Agustín Santiago Alvarado, Dr. Mauro Sánchez Sánchez y M.C. Ivan Guadalupe Mendoza Alonso.

A mis profesores de clases, Dra. Beatriz Carely, Dr. Marcelino, Dr. Víctor, Dra. Aura, Dra. Eréndira, Dr. Juan Manuel y Dr. Nobel por ser parte de este proceso de formación, por guiarme y aconsejarme.

A mis amigos y compañeros, Aarón, Catalina, Karen y a mi mejor amiga Ileri que me hicieron sentir como en casa y hacer que la estancia en la universidad fuera menos difícil, gracias por su apoyo y amistad.

Índice de figuras

2.1. Interferómetro de Michelson.	4
3.1. Representación de una onda electromagnética.	9
3.2. Campos eléctricos y magnéticos oscilando en una onda electromagnética.	9
3.3. Transmisión de una onda electromagnética a través de un polarizador.	11
3.4. Polarizadores de absorción.	12
3.5. Divisores de haz polarizado basados en birrefringencia.	12
3.6. Polarizador de película delgada.	13
3.7. Polarización paralela- p y perpendicular- s del haz incidente.	13
3.8. Efecto del retardador de media onda.	15
3.9. Efecto del retardador de un cuarto de onda.	15
3.10. Interferencia de dos ondas electromagnéticas.	16
3.11. Representación de polarización lineal.	22
3.12. Representación de polarización circular.	23
3.13. Polarización elíptica de una onda electromagnética.	24
3.14. Polarización elíptica.	25
4.1. Arreglo del interferómetro de Michelson.	28
4.2. Arreglo geométrico del interferómetro de Michelson.	28
5.1. Arreglo del interferómetro de Michelson con celda de vidrio.	34
6.1. Arreglo del interferómetro de Michelson con un controlador de temperatura y con celda.	36
6.2. Patrón de franjas con celda.	37
6.3. Datos obtenidos en la celda (alcohol etílico) variando la temperatura (utilizando un termómetro CVQ20260 con un rango de temperatura de -20 a 260 °C) en función al número de franjas.	39

6.4. Datos obtenidos en la celda (alcohol etílico) variando la temperatura (utilizando un segundo termómetro CVQ35050 con un rango de temperatura de -35 a 50 °C) en función al número de franjas.	40
6.5. Datos obtenidos en la celda (alcohol etílico) variando la temperatura (utilizando un tercer termómetro CVQ10200 con un rango de temperatura de -10 a 200 °C) en función al número de franjas.	40
6.6. Patrón de franjas a diferentes temperaturas en la celda (alcohol etílico): a) 50 °C, b) 45 °C, c) 40 °C, d) 35 °C y e) 30 °C.	42
6.7. Datos obtenidos de la media de los termómetros 1, 2 y 3.	45
6.8. Ajuste en los datos por medio de mínimos cuadrados de la media aritmética para los termómetros T1, T2 y T3.	45
6.9. Índice de refracción de los datos obtenidos de la media aritmética de los termómetros T1, T2 y T3 en función de la temperatura.	47
6.10. Índice de refracción en función de la temperatura (Elmer E. Hall).	47
6.11. Muestra de los datos teóricos (Elmer E. Hall) con los datos obtenidos de la media aritmética de los termómetros.	48

Índice de cuadros

6.1. Resultados de la celda (alcohol etílico) a diferentes temperaturas en relación al número de franjas, donde T1, T2 y T3 son los termómetros que se utilizaron y D.E es la desviación estándar de la media aritmética.	39
6.2. Ecuaciones lineales de acuerdo a un ajuste de mínimos cuadrados en los datos del termómetro 1, termómetro 2 y termómetro 3.	42
6.3. Pendientes obtenidas de las mediciones experimentales usando el ajuste de mínimos cuadrados.	42
6.4. Valores de las pendientes de acuerdo al inverso multiplicativo de la ecuación 6.2).	43
6.5. Obtención de los índices de refracción de la ecuación teórica y la experimental.	50

Resumen

En este trabajo se realizó el estudio del índice de refracción del alcohol etílico utilizando el interferómetro de Michelson. Se presenta un análisis de un modelo geométrico para la comprensión del mismo, en el arreglo experimental se utilizó un láser He-Ne de una longitud de onda de $\lambda = 633 \text{ nm}$, una celda que contiene alcohol etílico y un controlador de temperatura. Se calculó el índice de refracción del alcohol en el experimento y se muestra el modelo teórico presentado por Elmer E. Hall que describe el comportamiento del índice de refracción del alcohol etílico en función de la temperatura.

Palabras claves: Interferencia, índices de refracción, interferómetros, alcohol etílico.

Abstract

In this work the study of the refractive index of ethyl alcohol was using the Michelson interferometer. An analysis of a geometric model is presented of interferometer, in the experimental arrangement a He-Ne laser with a wavelength of $\lambda = 633 \text{ nm}$ was used, a cell containing ethyl alcohol and a controller temperature. The refractive index of alcohol in the experiment was calculated and the theoretical model presented by Elmer E. Hall is shown, which describes the behavior of the refractive index ethyl alcohol as a function of temperature.

Keywords: Interference, indice refractive, interferometer, ethyl alcohol.

Índice general

Agradecimientos	III
Índice de Figuras	V
Índice de Cuadros	VI
Resumen	VII
Abstract	VIII
1. Introducción	1
2. Antecedentes	2
2.1. Justificación	5
2.2. Objetivos	6
2.2.1. Objetivo general	6
2.2.2. Objetivos específicos	6
2.3. Hipótesis	6
3. Nociones Preliminares	7
3.1. Ondas electromagnéticas	7
3.2. El láser	10
3.3. Polarizadores	11
3.4. Tipos de polarizadores ópticos	11
3.5. Placas retardadoras	14
3.6. Interferencia	16
3.7. Polarización	20
4. Introducción a los interferómetros	26
4.1. Algunos interferómetros	26

4.2. Interferómetro de Michelson	27
5. Variación del índice de refracción en función de la temperatura	31
5.1. El índice de refracción	31
5.2. Índice de refracción en función de la temperatura	34
6. Medición del índice de refracción del alcohol (etílico) con el interferómetro de Michelson	36
7. Conclusiones	51
Bibliografía	52

Capítulo 1

Introducción

El campo de la interferometría se ha utilizado desde hace muchos años en el estudio de materiales con geometrías definidas y específicas formando un patrón de franjas, esta técnica nos ayuda a entender los problemas que se presentan en la superficie de estos materiales y así comprender las características de los mismos [12]. Existen diferentes interferómetros ópticos como el Young, Lloyd, Mash-Zender, Fabri Perot, entre otros, uno muy conocido en la literatura y que se implementará en este trabajo, es el interferómetro de Michelson [9]. A través de las franjas de interferencia que se presentan y con un desplazamiento micrométrico en el arreglo, se modifica el patrón de franjas, para pequeños desplazamientos existen cambios en las franjas de interferencia. Por lo que, a través de este patrón de interferencia se pueden medir desplazamientos en nanómetros, así como el índice de refracción de un material modificando las condiciones en el montaje dado [9].

Existen equipos mecánicos para la medición del índice de refracción de ciertos materiales, sin embargo con el uso del interferómetro de Michelson se pueden hacer mediciones del orden de nanómetros y con mayor precisión. Actualmente se realizan mediciones de índice de refracción bajo otras técnicas tales como la elipsometría. Utilizando el interferómetro de Michelson, se pueden determinar índices de refracción observando los cambios de este al variar la temperatura del medio cuyo índice se calcula, además cuando el material existente es radiado con algún tipo de energía de la cual no se conoce su comportamiento entonces su índice de refracción esta cambiando por lo que es importante estudiar su comportamiento (ver [6] y [18]).

Capítulo 2

Antecedentes

Las primeras bases teóricas de la propagación de ondas electromagnéticas fueron descritas por James Clerk Maxwell, en un documento dirigido a la Royal Society, titulado una teoría dinámica del campo electromagnético. Maxwell explicó que la energía en una onda electromagnética se divide por igual entre los campos eléctricos y magnéticos que son perpendiculares entre sí. Ambos campos oscilan en forma perpendicular a la dirección de propagación de la onda [2].

A diferencia de las ondas mecánicas, las ondas electromagnéticas se propagan por el espacio sin necesidad de un medio, pudiendo por lo tanto propagarse en el vacío [9]. Esto es debido a que las ondas electromagnéticas son producidas por las oscilaciones de un campo eléctrico, en relación con un campo magnético asociado.

Después de la postulación de la teoría de emisión de Newton en el año de 1672, se descubrieron los fenómenos de interferencia y difracción, lo cual acabó desechando la teoría corpuscular. A partir de estos fenómenos, Christian Huygens estableció su teoría ondulatoria, con la cual fue posible explicar los fenómenos de reflexión, refracción, interferencia y difracción [9].

La interferencia es un fenómeno relativo a todas las ondas, no solo a las ondas electromagnéticas como la luz, las ondas mecánicas también interfieren, de modo que es una situación general inherente a la naturaleza ondulatoria [12]. Cuando dos o más ondas armónicas se superponen, lo mismo sean ondas en la superficie del agua, ondas sonoras

en el aire u ondas luminosas, ellas interfieren. La interferencia de las ondas luminosas se basa en que los campos eléctricos y magnéticos de ambas ondas son magnitudes vectoriales y por lo tanto se pueden sumar. La onda electromagnética resultante es una onda con nuevos valores de los dos campos [9].

En 1802 el físico inglés Thomas Young realizó los primeros experimentos sobre la interferencia de la luz, en los cuales estimó la longitud de onda de la radiación luminosa. Young observó la interferencia partiendo la luz incoherente en dos haces de luz [4]. A pesar de que Newton había convencido al mundo científico de que la luz era solo partículas, Young quiso poner a prueba esa teoría. Por lo que cubrió una ventana dejando un pequeño agujero, y con un espejo desvió el de luz que incidía a través de la ventana e interpuso una carta de costado, de no más de dos milímetros de espesor, partiendo el haz en dos. Como resultado se proyectaron unas sombras de bandas luminosas y oscuras sobre una pantalla. Este patrón de sombras solo podía ser explicado si los dos haces interactúan como si fuesen ondas [15].

Posteriormente, en el siglo XIX Malus realizó varios experimentos para verificar aspectos de la teoría ondulatoria de Huygens. En 1808 descubrió por casualidad el efecto que tenía la incidencia de un haz de luz sobre cristales de espato de Islandia, pudiendo constatar la existencia de dos polos, razón por la cual, denominó a este haz: luz polarizada. Su descubrimiento fue publicado en 1809 y enseguida desarrolló una teoría de la doble refracción de la luz en cristales que publicó en 1810 [9].

Arago y Fresnel, estudiaron el fenómeno que manifiesta la luz polarizada. Comprobaron que dos haces polarizados ubicados en un mismo plano se interfieren, pero en cambio no lo hacen, si se encuentran perpendicularmente [9]. Esto les indujo a pensar que en un haz polarizado debe ocurrir algo en la dirección perpendicular a la propagación. Por lo cual implicaron que tenía que ser la propia vibración luminosa y en su modelo ondulatorio consideraron a la luz como una onda transversal.

Cuando Clerk Maxwell escribió a D.P. Todd en 1879, le preguntó por la posibilidad de medir la velocidad del sistema solar a través del éter mediante la observación de los eclipses de las lunas de Júpiter. Roemer había utilizado las mediciones de los tiempos de eclipse, para obtener el valor de la velocidad de la luz. Maxwell llegó a la conclu-

sión de que los efectos que buscaba eran demasiado pequeños para poder medirse. En 1878, Michelson había hecho una excelente medida de la velocidad de la luz a la edad de 25 años, y pensó que se podría medir la detección del movimiento a través del éter [9].

Michelson procedió a inventar un nuevo instrumento con una precisión muy superior a la que se había llegado hasta esa fecha, ese instrumento es ahora universalmente conocido como el interferómetro de Michelson (ver figura 2.1) [9].

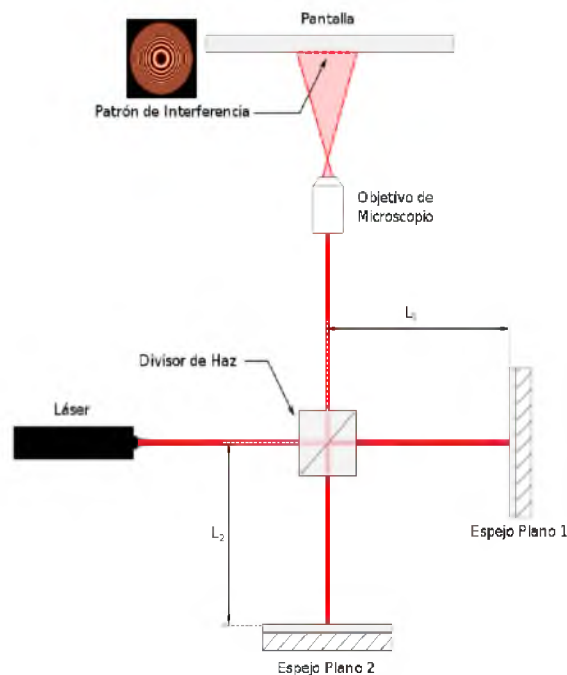


Figura 2.1: Interferómetro de Michelson.

El interferómetro de Michelson (ver [2], [11], [12], [15] y [19]) es históricamente importante por el uso que le dieron Michelson y Morley en 1887 para proporcionar evidencia experimental contra la teoría del inercial de luminíferos. Michelson posteriormente utilizó el interferómetro para medir la longitud del medidor estándar en términos de la longitud de onda de una línea espectral atómica. En 1907 se convirtió en el primer ciudadano de EE. UU. en recibir el Premio Nobel de Física, por sus instrumentos de precisión óptico y las investigaciones espectroscópicas y metrológicas llevadas a cabo por su ayuda.

En general, existen dos clases de interferómetros:

- Los interferómetros de división de frente de onda, como el interferómetro de rendijas de Young, en el que se usan dos o más aberturas para seleccionar diferentes partes de un frente de onda extendido. La radiación de estas aberturas se combinan para formar un patrón de interferencia [8].
- Los interferómetros de división de amplitud utilizan un espejo parcialmente reflectante (divisor de haz) para dividir un haz de luz entrante en dos haces. Estos haces pueden combinarse utilizando el mismo divisor de haz (interferómetro de Michelson) o se puede usar un combinador de haz separado (interferómetro de Mach-Zehnder) [8].

El interferómetro de Michelson también se ha utilizado para proporcionar evidencia de la teoría especial de la relatividad, para detectar y medir el efecto de marea de la luna en la Tierra y para proporcionar un estándar sustituto para el medidor en términos de la longitud de onda de la luz, también se ha ocupado para la medición de ondas gravitacionales [9].

Hacia fines del siglo XIX, este interferómetro se utilizaba con fuentes luminosas de descarga en gases, con un filtro y una pequeña rendija. En particular, para el experimento de Michelson y Morley, se utilizó la luz proveniente de alguna estrella. Actualmente se puede montar uno de estos interferómetros utilizando un láser [9].

2.1. Justificación

En este trabajo se realiza la medición del índice de refracción del alcohol (etílico) al variar su temperatura empleando el patrón de interferencia cambiante que produce el interferómetro de Michelson del cual se conoce la longitud de onda y el estado de polarización de la fuente de luz láser. La medición se realiza variando la temperatura de una celda que contiene el alcohol colocada en uno de los brazos del interferómetro. El arreglo interferométrico es altamente sensible y produce un patrón de anillos de interferencia cambiante debido a las variaciones del índice de refracción del alcohol que se producen al variar su temperatura. De acuerdo a lo anterior, está técnica de medición es relevante en comparación con otros instrumentos electrónicos o mecánicos que solo llegan a medir en micras. El conocer el cambio del índice de refracción en el alcohol en función de los cambios de la temperatura es importante, para la aplicación de productos

en la industria como disolventes orgánicos más comunes, puesto que se puede cambiar en el aspecto de calidad del producto.

2.2. **Objetivos**

2.2.1. **Objetivo general**

Estudiar el cambio del índice de refracción en el alcohol (etílico) en función de la temperatura mediante el análisis del comportamiento del patrón de franjas de interferencia utilizando el interferómetro de Michelson.

2.2.2. **Objetivos específicos**

- Desarrollar el estudio geométrico del interferómetro de Michelson introduciendo una celda en uno de los brazos de este arreglo.
- Analizar el comportamiento del alcohol, así como los cambios de su índice de refracción en función de la temperatura.
- Medir los cambios del índice de refracción de la muestra del alcohol por medio del patrón de franjas de interferencia del interferómetro.
- Analizar el comportamiento del índice de refracción en función de los cambios de temperatura del fluido.
- Comparar el modelo teórico con los resultados experimentales obtenidos de la muestra e interpretar.

2.3. **Hipótesis**

Si en el interferómetro se introduce un cuerpo u objeto en uno de los brazos, se induce un cambio en la longitud del camino óptico, este comportamiento puede modificar un patrón de franjas, además si existe un cambio de temperatura en el cuerpo u objeto existe un cambio en el índice de refracción de la muestra, por lo que se producirá desplazamientos de estas franjas de interferencia.

Capítulo 3

Nociones Preliminares

3.1. Ondas electromagnéticas

Las ondas electromagnéticas son ondas que se forman a partir de campos eléctricos y campos magnéticos, que se propagan en el espacio transportando la energía, estos campos se propagan en la misma dirección pero en planos ortogonales [9].

El concepto de una onda electromagnética fue postulado por James C. Maxwell, utilizando las leyes experimentales de Coulomb, Faraday, Ampere y también sus propias concepciones, construyó un conjunto de ecuaciones que resume los conocimientos sobre el electromagnetismo. Las cuales son consideradas como ecuaciones de Maxwell y fueron ellas las que posibilitaron la existencia de las ondas electromagnéticas [16].

Las ondas electromagnéticas se propagan en el vacío, a la velocidad de la luz, es decir, cerca de $300,000 \text{ km/s}$ y en la superficie terrestre con una velocidad aproximada a esta, se puede decir que las comunicaciones con satélites, ondas de celular y la luz se basan en el comportamiento de ondas electromagnéticas.

Se puede clasificar y ordenar las ondas electromagnéticas de acuerdo a sus diferentes longitudes de onda y frecuencias; a esta clasificación se le llama “el espectro electromagnético”. El espectro electromagnético se extiende desde la radiación de menor longitud de onda (rayos gamma, rayos X), hasta las de mayor longitud de onda (ondas de radio) [16].

La energía electromagnética en una particular longitud de onda λ tiene una frecuencia f asociada y una energía de fotón E . El espectro electromagnético puede ser expresado igualmente en cualquiera de esos términos. Por lo tanto, las ondas electromagnéticas de alta frecuencia tienen una longitud de onda corta y mucha energía mientras que las ondas de baja frecuencia tienen grandes longitudes de onda y poca energía [16].

El espectro electromagnético de la luz visible, cubre el rango de 380 nanómetros a 780 nanómetros, aproximadamente. Mientras más corta es la longitud de onda de luz visible, el color está más cerca del ultravioleta. A mayor longitud de onda, es decir menor frecuencia, el color se acerca al infrarrojo [13].

Antes de examinar como se representa la ecuación de una onda electromagnética se debe de saber como esta constituida, con esto se quiere decir que la frecuencia (f) de una onda es la medida del número de oscilaciones que sus campos eléctricos y magnéticos realizan durante un segundo, y esta determinada en Hertz (Hz). La frecuencia de una onda se determina en el instante que oscila y no cambia durante la propagación, aunque pase por diferentes medios. La velocidad de propagación de una onda electromagnética depende del entorno en donde se transmite y se mide en metros por segundo [7].

También posee un periodo que se define como el tiempo necesario para completar una vibración, es decir, para obtener una oscilación completa. El periodo se describe como el reciproco de la frecuencia ($T = 1/f$) y su unidad de medida son los segundos (s), además tiene una fase que es una medida de la diferencia de tiempo entre dos ondas [9].

De igual manera una onda adquiere características tales como: crestas, valles, amplitud (A) y longitud de onda (λ) (ver figura 3.1).

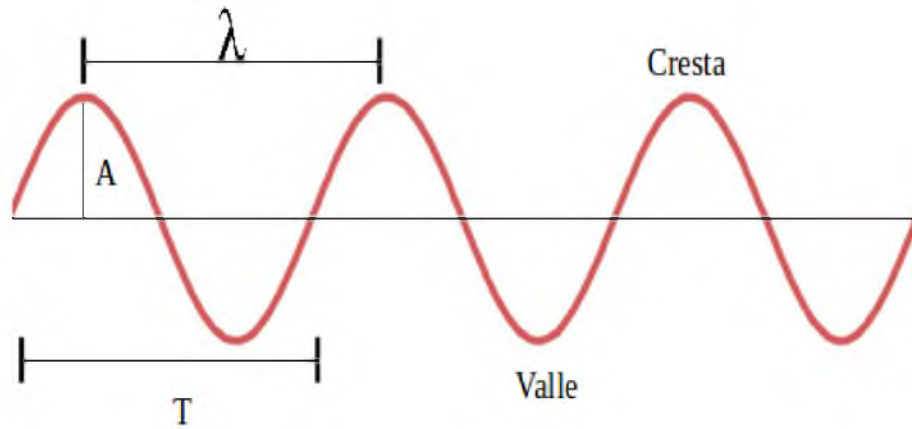


Figura 3.1: Representación de una onda electromagnética.

Por otro lado, una onda electromagnética armónica se representa matemáticamente por las siguientes ecuaciones:

$$\vec{E} = E_0 \cos(kx - \omega t) \quad (3.1)$$

y además

$$\vec{B} = B_0 \cos(kx - \omega t - \phi) \quad (3.2)$$

Donde \vec{E} representa el campo eléctrico vectorial y \vec{B} es el campo magnético vectorial, así E_0 y B_0 son las amplitudes del campo eléctrico y el campo magnético del haz respectivamente, k representa el vector de onda, x representa la posición de la misma, ω es la frecuencia del haz emitido por la fuente y ϕ es la fase que presenta.

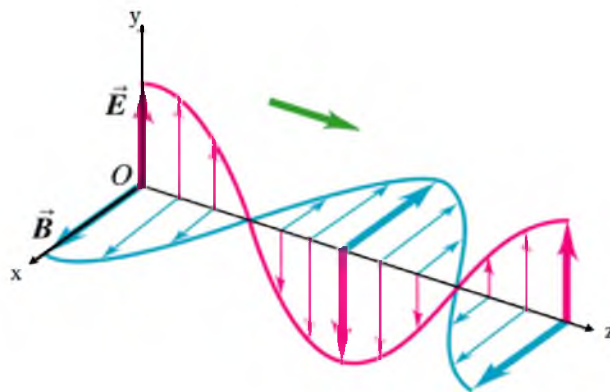


Figura 3.2: Campos eléctricos y magnéticos oscilando en una onda electromagnética.

3.2. El láser

El término láser es un acrónimo que significa “amplificación de luz por emisión estimulada de radiación”, es decir, el láser es un dispositivo que produce y amplifica la luz de una forma casi imposible de obtener por cualquier otro medio (ver [1] y [3]).

El láser es un dispositivo que produce un haz de luz cuasimonocromática, con alta coherencia temporal y espacial. La coherencia espacial tiene que ver con el comportamiento en el tiempo que presentan las diferencias de fase de las ondas que conforman el haz de luz. Por otra parte, si en un punto del espacio por donde transita el haz de luz se determina la diferencia de fase para los instantes inicial y final de un intervalo de tiempo fijo, y esta diferencia se conserva constante en el tiempo, se define la coherencia temporal [17].

El láser cuenta con tres características: coherencia, amplitud y fase.

Las principales propiedades de una emisión láser son:

- **Monocromaticidad:** El haz emitido por el sistema presenta una longitud de onda con una dispersión o ancho de banda muy reducido (nm).
- **Gran coherencia:** Para algunos sistemas las longitudes de coherencia son del orden de kilómetros.
- **Intensidad:** La emisión de luz de un láser presenta una intensidad mayor que la de cualquier otra fuente de luz monocromática (mW).
- **Estrechez:** Además de tener un ancho angular del haz muy pequeño, este presenta una reducción de divergencia, esto determina su alto grado de direccionalidad.
- **Estado de polarización:** Existen láseres polarizados y parcialmente polarizados, las polarizaciones que se pueden presentar son lineales, circulares y elípticas.

Existen diferentes clasificaciones de láseres como por ejemplo [17]:

- Semiconductores (diodos láser, láser de punto cuántico, entre otros).
- Gas (láser de Helio-Neón, láser de dióxido de Carbono, entre otros).

- Estado sólido (láser neodimio-YAG, láser de rubí, entre otros).
- Colorante o líquidos (láser de colorante).

3.3. Polarizadores

Un polarizador es un aparato óptico cuya energía de entrada es la luz natural y cuya salida es alguna forma de onda polarizada, dependiendo de la luz de salida se puede tener polarización circular o elíptica [13].

Los polarizadores lineales transmiten únicamente la componente de la onda incidente según una dirección característica del dispositivo llamada eje de polarización. La onda emergente queda así polarizada linealmente según dicho plano como se muestra en la figura 3.3.

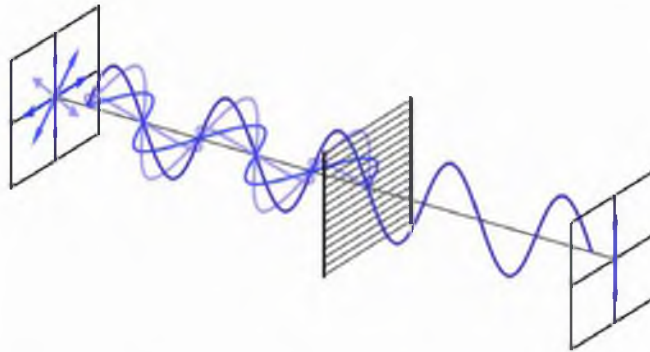


Figura 3.3: Transmisión de una onda electromagnética a través de un polarizador.

3.4. Tipos de polarizadores ópticos

- **Polarizadores de absorción**

Para aplicaciones de baja potencia, los filtros Polaroid (hojas de polarización) se utilizan a menudo. La luz en una dirección de polarización a lo largo de las cadenas se absorbe fuertemente, mientras que la absorción es débil para la luz con una dirección de polarización perpendicular a estas. Un tipo más moderno de polarizador absorbente se basa en nanopartículas de plata o cobre incrustadas

en una placa de vidrio delgado [20]. Los filtros de absorción solo pueden manejar potencias ópticas bastante limitadas, ya que la potencia absorbida se convierte en calor y la hoja se puede dañar fácilmente al sobre calentarla.

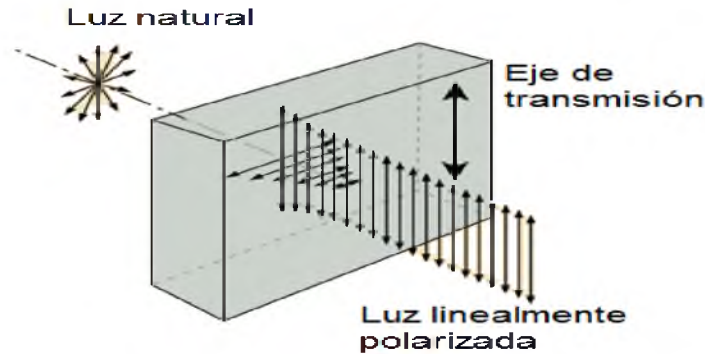


Figura 3.4: Polarizadores de absorción.

■ Divisores de haz polarizado basados en birrefringencia

Los polarizadores pueden manejar potencias ópticas mucho más altas donde la luz con el estado de polarización “rechazada” no se absorbe, sino que solo se envía a otra dirección. El tipo más común de divisores de haz polarizantes realiza la birrefringencia de un material cristalino transparente como el cuarzo (SiO_2), la calcita ($CaCO_3$), vanadato de itrio (YVO_4), borato de beta bario (BBO) o fluoruro de magnesio (MgF_2) [9].

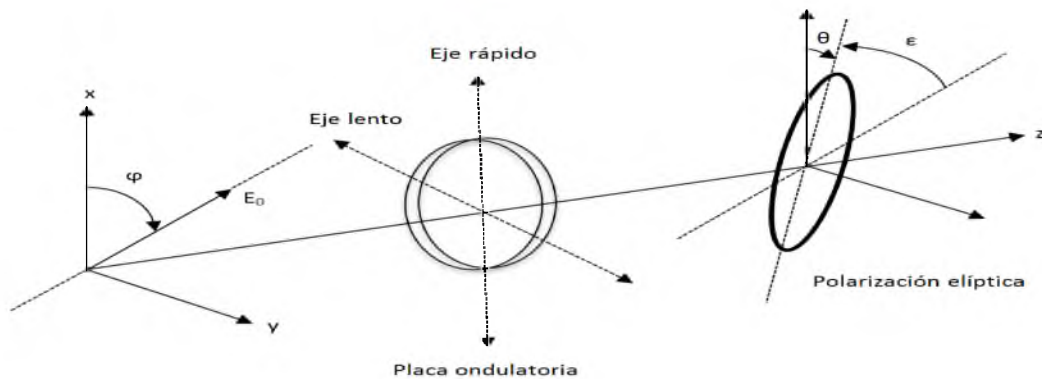


Figura 3.5: Divisores de haz polarizado basados en birrefringencia.

■ Polarizadores de película delgada

Hay diferentes tipos de polarizadores de película delgada. Los polarizadores de placa de película delgada consisten en un recubrimiento dieléctrico en algún

sustrato de vidrio. Una ventaja de los polarizadores de película delgada es que pueden fabricarse con dimensiones bastante grandes, lo que es más difícil con los polarizadores cristalinos (birrefringentes).



Figura 3.6: Polarizador de película delgada.

■ Los Polarizadores de rejilla de alambre

Los polarizadores de rejilla de alambre se fabrican con tiras metálicas muy estrechas (sub-longitud de onda) en un sustrato de vidrio (utilizando una técnica llamada litográfica) o en una disposición independiente (para longitudes de onda más largas). Tales dispositivos reflejan la luz polarizada s , mientras que la luz polarizada p se transmite (ver figura 3.7) [12].

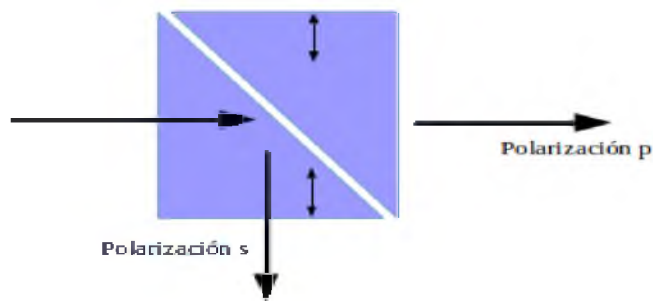


Figura 3.7: Polarización paralela- p y perpendicular- s del haz incidente.

Aplicaciones de polarizadores ópticos

Los polarizadores tienen muchas aplicaciones diferentes, como por ejemplo, las gafas de sol polarizadas y los filtros fotográficos pueden ayudar a suprimir los reflejos de la luz solar. Un polarizador dentro de un resonador láser puede forzar al láser a emitir luz polarizada linealmente. La combinación de una placa de ondas $\lambda/2$ y un polarizador puede actuar como un atenuador óptico variable: al girar la placa de ondas, la dirección de polarización gira y, por lo tanto, la transmisión en el polarizador. Los aisladores de Faraday generalmente contienen dos polarizadores alrededor de un rotador de Faraday. Los interferómetros a menudo contienen divisores de haz polarizantes [5].

3.5. Placas retardadoras

Las láminas retardadoras están formadas por materiales birrefringentes (por ejemplo, la calcita y el cuarzo), generalmente medios cristalinos anisótropos. Las láminas retardadoras están diseñadas para funcionar con luz que tiene algún estado de polarización.

En los medios anisótropos, en determinadas condiciones de incidencia de la luz (por ejemplo, si el eje óptico está en el plano de incidencia e incide formando un cierto ángulo con el mismo) se produce separación de las direcciones de vibración paralela y perpendicular al plano de incidencia (ondas ordinaria y extraordinaria) en el interior del medio, lo que ocasiona el fenómeno de la doble imagen o birrefringencia [12].

Las placas retardadoras introducen un desfase adicional fijo entre las componentes de la luz según dos direcciones características del dispositivo, llamadas respectivamente ejes rápido y lento. Modifican así el estado de polarización del haz emergente con respecto al incidente; esta modificación depende tanto del retardo introducido como de la orientación del retardador con respecto al haz [13].

Los retardadores más habituales son las láminas de $\lambda/4$, que introducen un desfase de $\pi/2$ para una determinada longitud de onda como se muestra en las figuras 3.8 y 3.9. Si la luz incide vibrando según el eje óptico de la lámina (una de las líneas neutras) ésta se comporta como si fuera un medio homogéneo e isótropo con índice de refracción.

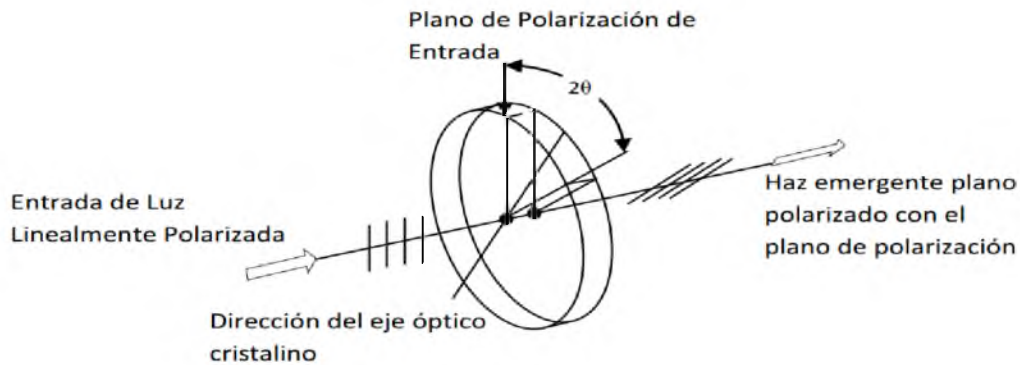


Figura 3.8: Efecto del retardador de media onda.

Si sobre una lámina $\lambda/4$ incide luz natural, a la salida se obtiene luz natural, puesto que el desfase introducido entre las componentes ordinaria y extraordinaria no afecta al resto de direcciones de vibración de la luz incidente. Si sobre una lámina $\lambda/4$ incide luz linealmente polarizada, el resultado depende de la dirección de vibración incidente como se muestra en la figura 3.9. Si sobre una lámina $\lambda/4$ incide luz elípticamente polarizada, el resultado emergente depende también de la orientación de los ejes de la elipse incidente [9].

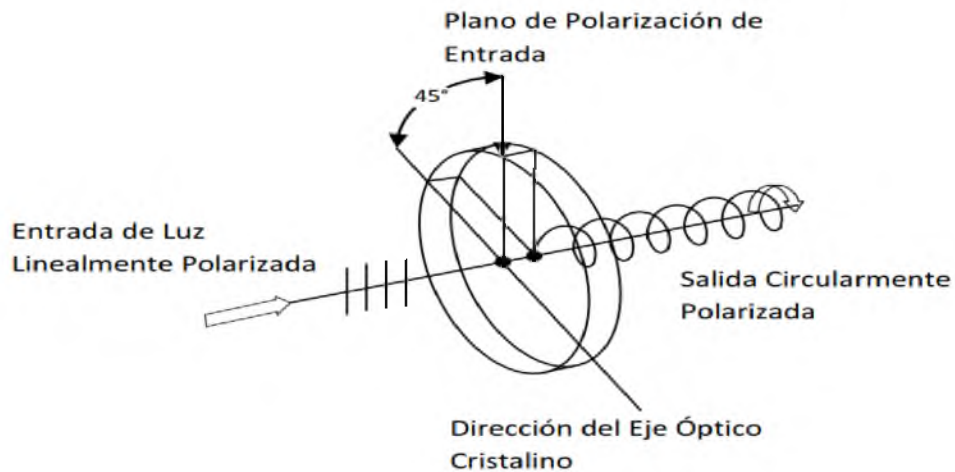


Figura 3.9: Efecto del retardador de un cuarto de onda.

Los retardadores se ajustan trabajando con el eje óptico perpendicular al plano de incidencia, para no producir doble imagen bajo incidencia normal. En estas condiciones, ambas componentes obedecen la ley de la refracción de Snell al propagarse por el interior de la lámina, por lo que ésta sólo introduce desfase entre ellas y no las separa.

3.6. Interferencia

Todas las ondas electromagnéticas, incluyendo la luz, se propagan en el vacío a la misma velocidad, dada por la siguiente ecuación:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (3.3)$$

donde ϵ_0 es la permitividad del espacio, μ_0 es la permeabilidad del espacio y c es la velocidad de la luz en el vacío. Si el medio es transparente la luz viaja de un medio a otro, su frecuencia no cambia, se refracta porque la velocidad de la luz es diferente en los dos medios, de esta manera el índice de refracción, n , de un medio se define como la razón c/v .

$$n = \frac{c}{v} \quad (3.4)$$

Donde v es la velocidad de la luz en el medio. Por lo que el índice de refracción es un número adimensional que es mayor que o igual a 1 porque v siempre es menor que c . Más aún, n es igual a uno para el vacío.

El fenómeno de interferencia ocurre cuando dos o más ondas electromagnéticas coinciden en el espacio y en el tiempo (ver figura 3.10) [9].

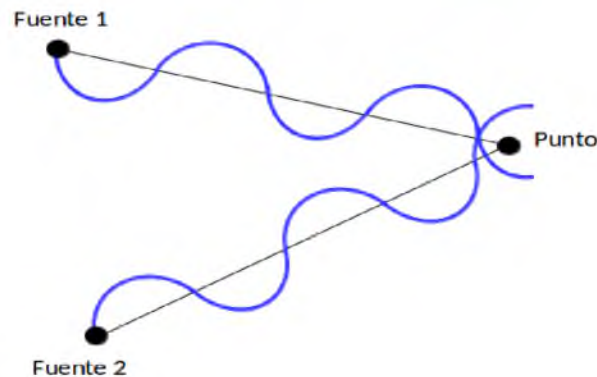


Figura 3.10: Interferencia de dos ondas electromagnéticas.

La interferencia puede producirse con toda clase de ondas, no sólo ondas de luz. Las ondas de radio interfieren entre sí cuando rebotan en los edificios de las ciudades, con lo que la señal se distorsiona. Cuando se construye una sala de conciertos hay que tener en cuenta la interferencia entre ondas de sonido, para que una interferencia destructiva no haga que en algunas zonas de la sala no puedan oírse los sonidos emitidos desde el

escenario. Arrojando objetos al agua estancada se puede observar la interferencia de ondas de agua, que es constructiva en algunos puntos y destructiva en otros.

La interferometría se basa en el fenómeno de la interferencia que se produce cuando dos ondas luminosas se superponen [9]. Si dos haces deben de interferir para producir una distribución estable, sus frecuencias deben de ser iguales.

Muchas distribuciones similares monocromáticas superpuestas producirán una distribución de luz blanca, que no será nítida como una distribución cuasimonocromática, sin embargo, la luz blanca producirá interferencia observable [9].

Se conocen dos tipos de interferencias:

- **Constructiva:** Se produce cuando las ondas chocan o se superponen en fases, obteniendo una onda resultante de mayor amplitud que las ondas iniciales.
- **Destructiva:** Es la superposición de ondas desfasadas, obteniendo una onda resultante de menor amplitud o nula que las ondas iniciales.

Para poder observar la distribución de franjas de interferencia, los haces no tienen que estar en fase uno con el otro. Si los haces permanecen constantes puede existir una diferencia inicial. Se dice que un haz de luz es coherente si todas las ondas emitidas tienen la misma longitud de onda y la misma orientación.

Así que, la intensidad del campo eléctrico resultante \vec{E} de la onda en un punto en el espacio donde dos o más ondas de luz se superponen, es igual a la suma vectorial de las perturbaciones constitutivas individuales.

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots; \quad \vec{E} = \sum_1^{\infty} \vec{E}_i \quad (3.5)$$

Por lo tanto, la interferencia óptica equivale a la interacción de dos o más ondas de luz que producen una irradiancia resultante que se desvía de la suma de las irradiancias componentes [8].

La perturbación óptica del campo eléctrico $\vec{\mathbf{E}}$, varía en el tiempo a una velocidad promedio de $5,4 \times 10^{14} Hz$, de tal forma que el campo real resulta ser una cantidad poco práctica de medir [2].

La cantidad de luz que ilumina una superficie se le llama irradiancia (I) y es proporcional al cuadrado de la amplitud del campo eléctrico, es decir, la irradiancia es la cantidad promedio de energía que incide por unidad de área en la unidad de tiempo sobre una superficie. Las unidades en que se mide son las unidades radiométricas y es en W/m^2 .

$$I = c\epsilon_0 \left\langle \vec{\mathbf{E}}^2 \right\rangle_T \quad (3.6)$$

Donde T es el promedio del tiempo.

La interferencia óptica resulta de la interacción de dos o más ondas de luz que producen una irradiancia resultante que resulta de la suma de las irradiancias componentes.

Si se considera las irradiancias relativas en el mismo medio, se podrá dejar a un lado las constantes. Entonces la ecuación 3.6 queda:

$$I = \left\langle \vec{\mathbf{E}}^2 \right\rangle_T \quad (3.7)$$

$$\vec{\mathbf{E}}^2 = \vec{\mathbf{E}} * \vec{\mathbf{E}} \quad (3.8)$$

$$\vec{\mathbf{E}}^2 = (\vec{\mathbf{E}}_1 + \vec{\mathbf{E}}_2) * (\vec{\mathbf{E}}_1 + \vec{\mathbf{E}}_2) \quad (3.9)$$

$$\vec{\mathbf{E}}^2 = \vec{\mathbf{E}}_1^2 + \vec{\mathbf{E}}_2^2 + 2\vec{\mathbf{E}}_1 \cdot \vec{\mathbf{E}}_2 \quad (3.10)$$

Tomando el promedio temporal en ambos lados. La irradiancia queda de la siguiente forma:

$$I = I_1 + I_2 + I_{12} \quad (3.11)$$

donde:

$$I_1 = \langle \vec{\mathbf{E}}_1^2 \rangle_T \quad (3.12)$$

$$I_2 = \langle \vec{\mathbf{E}}_2^2 \rangle_T \quad (3.13)$$

$$I_{12} = 2 \langle \vec{\mathbf{E}}_1 * \vec{\mathbf{E}}_2 \rangle_T \quad (3.14)$$

La ecuación 3.14 se le conoce como *Término de interferencia*, donde:

$$\vec{\mathbf{E}}_1(\vec{\mathbf{r}}, t) = E_{01} \cos(\vec{\mathbf{k}}_1 \cdot \vec{\mathbf{r}} - \omega t + \epsilon_1) \quad (3.15)$$

$$\vec{\mathbf{E}}_2(\vec{\mathbf{r}}, t) = E_{02} \cos(\vec{\mathbf{k}}_2 \cdot \vec{\mathbf{r}} - \omega t + \epsilon_2) \quad (3.16)$$

E_{01} y E_{02} son las amplitudes del campo eléctrico y están en la misma dirección.

Para determinar la irradiancia, recordemos que el promedio temporal de una función es la integral de esa función, calculada en un intervalo de 0 a T donde $T = 2\pi$. De tal forma que:

$$I_{12} = 2 \langle \vec{\mathbf{E}}_1 * \vec{\mathbf{E}}_2 \rangle_T = E_{01} E_{02} \cos(\delta) \quad (3.17)$$

donde $\delta = (\vec{\mathbf{k}}_1 \cdot \vec{\mathbf{r}} - \vec{\mathbf{k}}_2 \cdot \vec{\mathbf{r}} + \epsilon_1 - \epsilon_2)$ es la diferencia de fase resultante de la combinación de una diferencia de longitud de camino y del ángulo inicial.

Análogamente $\langle \cos(\omega t) \rangle_T = \frac{1}{2}$, por lo tanto:

$$I_1 = \langle \vec{\mathbf{E}}_1^2 \rangle_T = \frac{E_{01}^2}{2} \quad (3.18)$$

$$I_2 = \langle \vec{\mathbf{E}}_2^2 \rangle_T = \frac{E_{02}^2}{2} \quad (3.19)$$

El término de interferencia y la irradiancia quedan expresadas de la forma:

$$I = I_1 + I_2 + \sqrt{I_1 I_2} \cos(\delta) \quad (3.20)$$

Dependiendo de la irradiancia resultante en varios puntos del espacio, esta puede ser mayor, menor o igual a $I_1 + I_2$.

3.7. Polarización

La historia de la polarización de la luz comenzó con el físico, médico y matemático danés, Erasmus Bartholinus, quien en 1669 descubrió el fenómeno de la doble refracción del cristal de calcita. Christian Huygens el físico y astrónomo holandés interpretó la doble refracción suponiendo que en el cristal se encontraba, además de una onda esférica primaria, una onda elipsoidal secundaria. Fue en el curso de esta investigación que Huygens hizo el descubrimiento fundamental de la polarización en 1690, esto es, que cada uno de los dos haces que surgen de la refracción por la calcita se puede extinguir pasándolo a través de un segundo cristal del mismo material, si este último cristal se gira alrededor de la dirección del haz [10]. Étienne Louis Malus el ingeniero francés descubrió la polarización de la luz por reflexión, en una tarde en 1808, observó el reflejo de la luz solar directa desde un cristal de ventana a través de un cristal de calcita y descubrió que las dos imágenes obtenidas por doble refracción variaban en intensidades relativas a medida que el cristal giraba sobre la línea de visión [14].

La luz es una onda electromagnética, y el campo eléctrico de esta onda oscila perpendicularmente a la dirección de propagación, esta es llamada no polarizada si la dirección del campo eléctrico fluctúa aleatoriamente en el tiempo. Muchas fuentes de luz comunes, como la luz solar, la iluminación halógena, los focos LED y las bombillas incandescentes producen luz no polarizada. Ahora, si la dirección del campo eléctrico tiene una dirección específica, es llamada luz polarizada. Como ejemplo, la fuente más común de luz polarizada es un láser [1].

Así de esta manera, dependiendo de la orientación del campo eléctrico, se puede clasificar la luz en tres tipos de polarizaciones:

Polarización lineal

La polarización lineal se define como polarización de una onda electromagnética en la cual el vector eléctrico en un punto fijo en el espacio permanece apuntando en una dirección fija, aunque varía en magnitud. Hay dos formas de polarización lineal: vertical, donde el campo eléctrico es perpendicular a la superficie de la Tierra, y horizontal, donde el campo eléctrico es paralelo a la superficie de la Tierra. Ambas direcciones se pueden utilizar simultáneamente en la misma frecuencia.

La luz linealmente polarizada se obtiene cuando la componente- x y la componente- y del vector del campo eléctrico se encuentran en fase, conservando constante su dirección y cambiando únicamente su magnitud y sentido. El vector de campo eléctrico se encuentra vibrando según una única dirección, equivalente a una superposición de ondas luminosas de la misma frecuencia con vectores perpendiculares, desfasados en $\theta = 0$ o $\theta = \pi$ radianes (ver figura [3.11](#)).

Se puede representar las dos perturbaciones ópticas ortogonales en la forma:

$$\vec{\mathbf{E}}_x(z, t) = \hat{i}E_{0x} \cos(kz - \omega t) \quad (3.21)$$

$$\vec{\mathbf{E}}_y(z, t) = \hat{j}E_{0y} \cos(kz - \omega t + \epsilon) \quad (3.22)$$

donde \hat{i} y \hat{j} son vectores unitarios en dirección a los ejes, k es el número de onda en la propagación, ω es la frecuencia angular, t es el tiempo, ϵ es la diferencia de fase relativa entre las dos ondas, ambas viajando en la dirección z [\[9\]](#).

La perturbación óptica resultante es la suma vectorial de estas dos perturbaciones ópticas, es decir:

$$\vec{\mathbf{E}}(z, t) = \vec{\mathbf{E}}_x(z, t) + \vec{\mathbf{E}}_y(z, t) \quad (3.23)$$

Si ϵ es cero o un múltiplo de $\pm 2\pi$, se dice que las ondas están en fase. En ese caso la

ecuación (3.23) queda como:

$$\vec{E} = ((\hat{i}E_{0x} + \hat{j}E_{0y}) \cos(kz - \omega t)) \quad (3.24)$$

La ecuación (3.24) representa la dirección de polarización del campo eléctrico para una polarización lineal. La onda resultante tiene como consecuencia una amplitud fija igual a $(\hat{i}E_{0x} + \hat{j}E_{0y})$, es decir, también es linealmente polarizada.

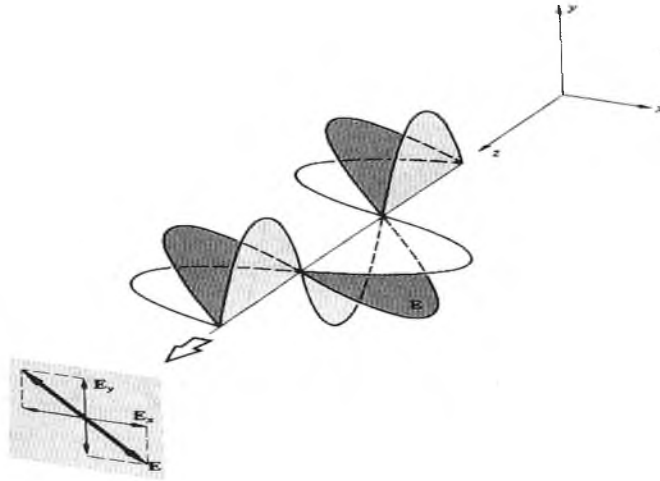


Figura 3.11: Representación de polarización lineal.

Polarización circular

La polarización circular se origina cuando dos ondas constitutivas tienen igual amplitud ($E_{0x} = E_{0y} = E_0$) y además, su diferencia de fase relativa es $\epsilon = -\pi/2 + 2m\pi$ (ver figura (3.12) donde $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ [9]). Por lo tanto:

$$\vec{E}_x(z, t) = \hat{i}E_0 \cos(kz - \omega t) \quad (3.25)$$

$$\vec{E}_y(z, t) = \hat{j}E_0 \sin(kz - \omega t) \quad (3.26)$$

La onda resultante se toma al sumar las ondas de las ecuaciones (3.25) y (3.26), se obtiene:

$$\vec{E} = E_0(\hat{i} \cos(kz - \omega t) + \hat{j} \sin(kz - \omega t)) \quad (3.27)$$

De la ecuación 3.27 se deduce que la amplitud de la onda resultante es constante, pero su dirección cambia con el tiempo.

Esta onda puede estar polarizada hacia la derecha o la izquierda. Es a la derecha cuando el vector campo eléctrico gira a la derecha con respecto a un observador que ve venir la onda. De manera contraria, si gira a la izquierda, se dice que está polarizada circularmente hacia la izquierda. Los nombres sólo hacen referencia a la dirección en la que el campo eléctrico rota mientras la onda se propaga.

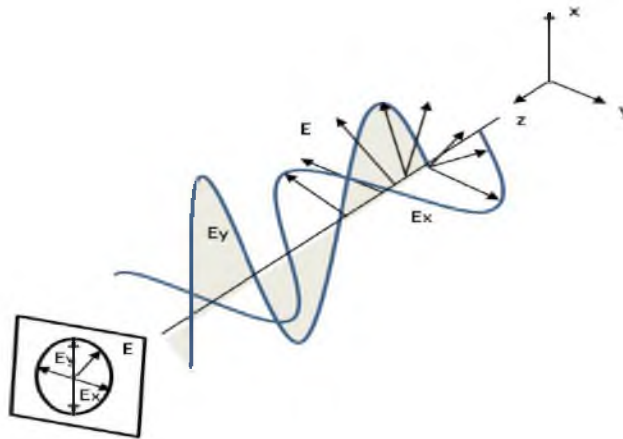


Figura 3.12: Representación de polarización circular.

Polarización elíptica

La polarización lineal y la polarización circular se consideran casos especiales de la polarización elíptica. En este caso la magnitud del vector del campo eléctrico \vec{E} gira cambiando su magnitud, por consiguiente, la resultante es una elipse en un plano fijo perpendicular a k (ver figura 3.13). Se recuerda que:

$$\vec{E}_x = E_{0x} \cos(kz - \omega t) \quad (3.28)$$

$$\vec{E}_y = E_{0y} \cos(kz - \omega t + \epsilon) \quad (3.29)$$

donde E_{0x} y E_{0y} son las amplitudes de las ondas, k es el número de onda en la propagación, ω es la frecuencia angular, t es el tiempo, ϵ es la diferencia de fase relativa

entre las dos ondas, ambas viajando en la dirección z [9].

De (3.28) y (3.29),

$$\frac{\vec{\mathbf{E}}_x}{E_{0x}} = \cos(kz - \omega t) \quad (3.30)$$

$$\frac{\vec{\mathbf{E}}_y}{E_{0y}} = \cos(kz - \omega t + \epsilon) \quad (3.31)$$

Aplicando la identidad trigonométrica $\sin^2 a + \cos^2 a = 1$ se obtiene:

$$\sin(kz - \omega t) = \left(1 - \left(\frac{\vec{\mathbf{E}}_x}{E_{0x}} \right)^2 \right)^{1/2} \quad (3.32)$$

Tomando en cuenta la ecuación (3.29) y utilizando la identidad trigonométrica $\cos(a + b) = \cos(a)\cos(b) - \sin(a)\sin(b)$ y después de una manipulación de las ecuaciones, se llega:

$$\frac{\vec{\mathbf{E}}_y}{E_{0y}} = \cos(kz - \omega t) \cos(\epsilon) - \sin(kz - \omega t) \sin(\epsilon) \quad (3.33)$$

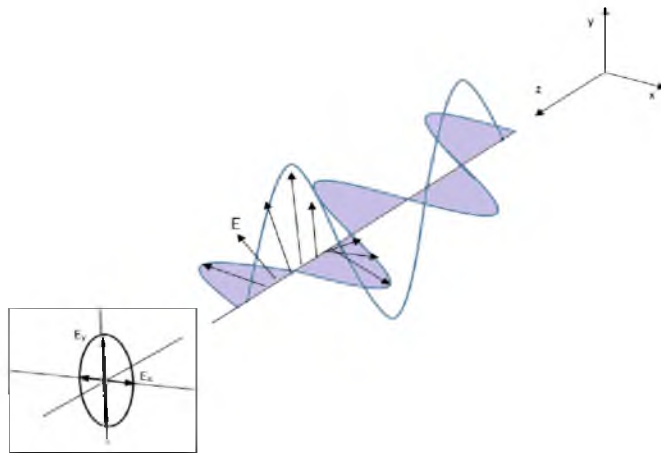


Figura 3.13: Polarización elíptica de una onda electromagnética.

Finalmente, utilizando las ecuaciones (3.28), (3.32) y (3.33) y reordenando términos, se tiene:

$$\left(\frac{\vec{\mathbf{E}}_y}{E_{0y}}\right)^2 + \left(\frac{\vec{\mathbf{E}}_x}{E_{0x}}\right)^2 - 2\left(\frac{\vec{\mathbf{E}}_x}{E_{0x}}\right)\left(\frac{\vec{\mathbf{E}}_y}{E_{0y}}\right)\cos(\epsilon) = \sin^2\epsilon \quad (3.34)$$

que es la ecuación de una elipse rotada a un ángulo α (ver figura 3.14) por lo que:

$$\tan 2\alpha = \frac{2E_{0x}E_{0y}\cos\epsilon}{E_{0x}^2 - E_{0y}^2} \quad (3.35)$$

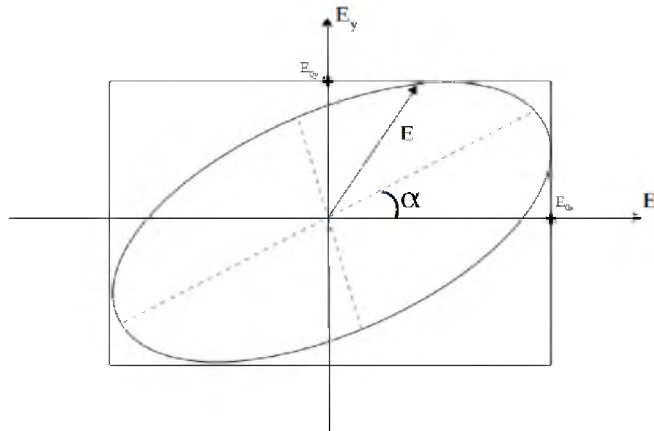


Figura 3.14: Polarización elíptica.

Capítulo 4

Introducción a los interferómetros

4.1. Algunos interferómetros

Existen muchos instrumentos que producen interferencias ópticas, estos instrumentos están agrupados bajo el nombre genérico de *interferómetros*.

Los interferómetros se clasifican en dos grupos según la forma en que producen las fuentes virtuales:

- **División de frente de onda**

Los interferómetros de división de frente de onda resuelven el problema de la coherencia de las fuentes de luz para generar interferencia, sin embargo, no se conocen fuentes de luz independientes y separadas, además de los láseres, lo suficientemente coherentes como para generar interferencia. Se usan porciones del frente de onda primario, bien sea directamente como fuentes secundarias virtuales o en combinación con otros dispositivos ópticos.

Uno de los interferómetros más conocidos de división de frente de onda es el famoso experimento de Young. El espejo doble y prisma de Fresnel es otro ejemplo de esta clase de interferómetro al igual que el interferómetro de Lloyd [\[9\]](#).

■ **División de amplitud**

Los interferómetros de división de amplitud utilizan un espejo parcialmente reflejante (divisor de haz) para dividir un haz de luz entrante en dos haces. Estos haces pueden combinarse utilizando el mismo divisor de haz o se puede usar una combinación de haz separado, es decir, el haz primario se divide en dos haces secundarios, los cuales viajan por diferentes caminos antes de recombinarse e interferir.

Algunos de los interferómetros que funcionan de acuerdo a este principio son: el interferómetro de Mash-Zender, Sagnac, Fabri Perot y el más conocido e históricamente importante de todos los interferómetros de división de amplitud es el interferómetro de Michelson [9].

4.2. Interferómetro de Michelson

El interferómetro de Michelson es uno de los instrumentos de interferencia más conocido, tanto por sus múltiples aplicaciones como por su comprensión en el desarrollo del entendimiento del mundo físico. Michelson y Morlen en 1881 le dieron un uso importante para poner en evidencia la inconsistencia de la teoría del éter. Este hecho contribuyó al desarrollo de la teoría de la relatividad. Además el interferómetro de Michelson es utilizado actualmente como una técnica de medición de longitudes de onda, medir distancias muy pequeñas o índices de refracción de distintos medios.

Por lo que se refiere, el interferómetro de Michelson está compuesto principalmente por un láser, un cubo divisor O semitransparente, dos espejos M_1 y M_2 que tienen una película de aluminio delante de ellos y un detector el cual recibirá la señal de las interferencias como se muestra en la figura 4.1.

El divisor de haz O divide la onda en dos: una parte se direcciona hacia M_1 y la otra a M_2 . Las dos ondas se reflejarán en los espejos M_1 y M_2 donde regresan al divisor del haz el cual al pasar las dos ondas nuevamente este divisor hace que se vuelvan a unir, cuando estas ondas se unen, producen una interferencia.

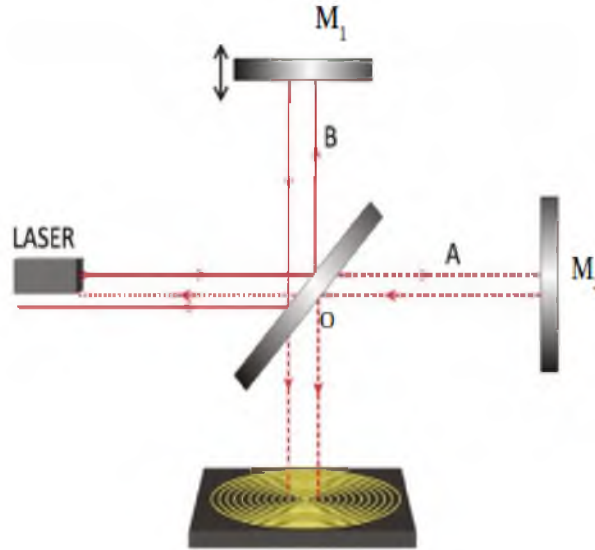


Figura 4.1: Arreglo del interferómetro de Michelson.

Para entender cómo se forman las franjas, se hace referencia al esquema mostrado en la figura 4.2. Si un observador coloca su ojo en la posición del detector vera simultáneamente ambos espejos M_1 y M_2 junto con la fuente Σ en el divisor. Las superficies Σ_1 y Σ_2 son las imágenes de Σ en los espejos M_1 y M_2 respectivamente. De igual manera, el ojo puede detectar que los dos haces provienen de fuentes diferentes. Por lo tanto, S_1 y S_2 son fuentes virtuales distintas, como puede verse en la figura la diferencia del camino óptico es de casi $2d \cos \theta$ que representa un desfase de $k_0 2d \cos \theta$ [9].

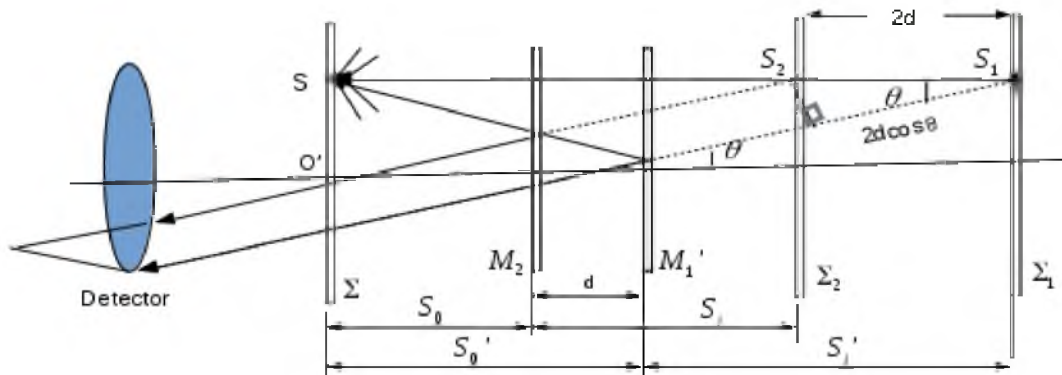


Figura 4.2: Arreglo geométrico del interferómetro de Michelson.

Hay que mencionar, además que existe un término adicional de fase debido a que la onda que atraviesa el brazo OM_2 es reflejada internamente en el divisor del haz, mientras que

la onda OM_1 es reflejada externamente en O . Si el divisor del haz es simplemente una placa de vidrio sin recubrimiento, el desfase relativo procedente de las dos reflexiones será de π radianes. Habrá interferencia destructiva cuando:

$$2d \cos \theta_m = m\lambda_0, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (4.1)$$

donde m es un valor entero. La dependencia de θ_m con respecto a λ_0 en la ecuación anterior nos dice que si se usa una fuente que contenga un número dado de componentes de frecuencia, cada componente genera un sistema propio franjas.

Un patrón de interferencia de luz cuasimonocromática consiste típicamente en un número grande de anillos brillantes y oscuros, alternados. Un anillo en particular corresponde a un orden fijo m . Conforme M_2 se mueve hacia M'_1 , d decrece y de acuerdo a la ecuación 4.1 $\cos \theta_m$ aumenta y θ_m por tanto decrece. Luego los anillos se comprimen hacia el centro, con el orden mayor desapareciendo siempre y cuando d decrezca por $\lambda_0/2$. Cada anillo restante se ensancha a medida que las franjas van desapareciendo en el centro hasta que únicamente unas pocas llenen toda la pantalla. Cuando se haya alcanzado $d = 0$, la franja central se habrá expandido, llenando totalmente el campo de visión. Con un desfase de π , resultante de la reflexión en el divisor del haz, toda la pantalla será un mínimo de interferencia. Si se mueve M_2 aún más, las franjas reaparecerán en el centro y se moverán hacia afuera.

La construcción de la figura 4.2 representa una posible configuración en donde se considera únicamente pares de haces paralelos emergentes. Puesto que estos haces no llegan a cruzarse, no pueden formar una imagen sin una lente condensadora de alguna clase. De hecho, esa lente es generalmente el ojo del observador enfocado al infinito. Las franjas resultantes de igual inclinación ($\theta_m = \text{constante}$) localizadas en el infinito, son también franjas de Haidinger [9].

Se considera ahora, cuando los espejos del interferómetro están inclinados el uno respecto al otro formando un ángulo pequeño, es decir, cuando M_1 y M_2 no son totalmente perpendiculares, se observan franjas de Fizeau. La cuña de aire formada entre M_2 y M'_1 producen una distribución de franjas rectas y paralelas. Los haces interfieren y parecen divergir de un punto situado tras los espejos. El ojo, por lo tanto, tiene que enfocar sobre ese punto para poder observar estas franjas localizadas. Puede demos-

trarse analíticamente que con ajustes apropiados en la orientación de los espejos M_1 y M_2 , pueden producirse franjas rectas, circulares, elípticas, parabólicas o hiperbólicas [9].

Es evidente que el interferómetro de Michelson se puede usar para hacer medidas de longitud muy precisas. Cuando el espejo móvil es desplazado en $\lambda_0/2$, cada franja se moverá a la posición previamente ocupada por una franja adyacente. Por tanto, únicamente se necesita contar el número de franjas N , que pasan por cierto punto de referencia, para determinar la distancia recorrida Δd por el espejo móvil, así se tiene:

$$\Delta d = N \left(\frac{\lambda_0}{2} \right) \quad (4.2)$$

Capítulo 5

Variación del índice de refracción en función de la temperatura

5.1. El índice de refracción

La velocidad de la luz es una magnitud finita que tiene distinto valor según el medio en el que se propague. En el vacío es donde la luz viaja a mayor velocidad. En cualquier otro medio esta velocidad es menor. Un medio por el que se pueda propagar una onda electromagnética se caracteriza por su índice de refracción, n .

El índice de refracción no solo es útil en campos relacionados con la óptica; es una métrica utilizada en productos farmacéuticos, producción de alimentos y otras industrias químicas para controlar la pureza del producto final [9].

A lo largo del tiempo, las mediciones del índice de refracción se han realizado con refractómetros e interferómetros. Los refractómetros como el Abbe, Pulfrich, Hilger-Chance y Pfund se basan en el ángulo crítico de la reflexión interna total [18]. Los interferómetros como el Jamin y el Rayleigh utilizan la interferencia de la luz blanca [18].

Así mismo el índice de refracción de un medio determina no solo la velocidad de fase de la luz, sino también la refracción, la reflexión y la difracción que se producen en el límite del medio. Ahora bien, en 1621, Willebrord Snell descubrió la relación sinusoidal entre el ángulo de incidencia y el ángulo de refracción cuando un rayo de luz pasa de un

medio óptico a otro. En 1821, Augustin Jean Fresnel presentó las leyes que nos permiten calcular la intensidad de la luz polarizada reflejada y refractada en el límite entre dos medios con diferentes índices refractivos.

Se considera al índice de refracción, n como un parámetro propio de cada medio que indica el comportamiento de la luz al atravesarlo. Además, el índice de refracción de una sustancia depende de la longitud de onda λ que incida en esa sustancia; por eso hay que especificar la luz que se está utilizando para medirla.

Por lo que el índice de refracción puede proporcionarnos información sobre el comportamiento de la luz y las propiedades ópticas de los medios. Así, cuando la luz pasa a través de los diferentes medios, su velocidad disminuye al aumentar el índice de refracción de estos medios, y siempre es menor que la velocidad de la luz en el vacío, de esta manera el índice de refracción de los medios es mayor que la unidad [2]. De manera análoga en la mayoría de los medios, el índice de refracción disminuye al aumentar la temperatura [6].

El índice de refracción surge cuando el proceso de absorción y emisión adelanta o retrasa las fases de los fotones dispersados, aún cuando ellos se propagan a una velocidad c [9] y es representado de la forma:

$$n = \frac{c}{v} \quad (5.1)$$

donde c es la velocidad de la luz en el vacío y v la velocidad de la luz en el medio.

Generalmente se utiliza la velocidad de la luz (c en el vacío) como medio de referencia para cualquier materia, aunque durante la historia se han utilizado otras referencias, como la velocidad de la luz en el aire. De modo que en el caso de la luz se puede representar de acuerdo a la literatura como:

$$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (5.2)$$

donde ϵ_r es la permitividad relativa del material, y μ_r es su permeabilidad electromagnética relativa. Para la mayoría de los materiales, μ_r es muy cercano a 1 en frecuencias

ópticas, es decir, luz visible, aunque n es aproximadamente $\sqrt{\epsilon_r}$ [2].

Por lo que el índice de refracción de un compuesto es la relación entre el seno del ángulo de incidencia y el de refracción que experimenta un rayo de luz cuando pasa de un medio a otro de diferente densidad; este cambio se debe a la distinta velocidad de la luz en cada medio [9].

Hay que mencionar, además que el índice de refracción varía dependiendo de la longitud de onda de la luz y de la temperatura, éste se expresa como [8]:

$$n(T, M) \tag{5.3}$$

donde:

- n es el índice de refracción,
- T es la temperatura en grados centígrados,
- M es el material.

Como se menciono antes, si la luz pasa por un medio y después a otro, la frecuencia no cambia, pero la longitud de la onda si, y se hace más pequeña cuando el medio tiene menor velocidad de propagación, o mayor índice de refracción, así que se puede expresar de la siguiente manera:

$$f_0 = \frac{v}{\lambda_0} \tag{5.4}$$

$$f_1 = \frac{c}{\lambda_1} \tag{5.5}$$

donde f_0 y f_1 son las frecuencias de la luz en el medio y en el vacío respectivamente. Como la frecuencia no cambia al atravesar un medio se puede decir que las ecuaciones [5.4] y [5.5] son las mismas y se pueden escribir de la siguiente forma:

$$\frac{v}{\lambda_0} = \frac{c}{\lambda_1} \tag{5.6}$$

5.2. Índice de refracción en función de la temperatura

Donde λ_0 y λ_1 son las longitudes de onda en el vacío y en el medio, de acuerdo a la ecuación 5.1 y tomando en cuenta la ecuación 5.6 el índice de refracción puede representarse como:

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\lambda_1}{\lambda_0} \quad (5.7)$$

5.2. Índice de refracción en función de la temperatura

Tomando en cuenta si en el interferómetro se introduce una celda que contenga el alcohol (etílico) a medir y que se encuentre entre el divisor del haz y un espejo, a su vez, esta celda presenta cambios de temperatura controlada bajo un dispositivo electrónico, el haz de luz en el interferómetro atravesara esta celda y como resultado se obtendrá un patrón de franjas en la pantalla para una temperatura dada. Ahora, se puede decir que el patrón de franjas que se muestra en la pantalla cambia de acuerdo a la variación de la temperatura, que es inducida en la celda 6.

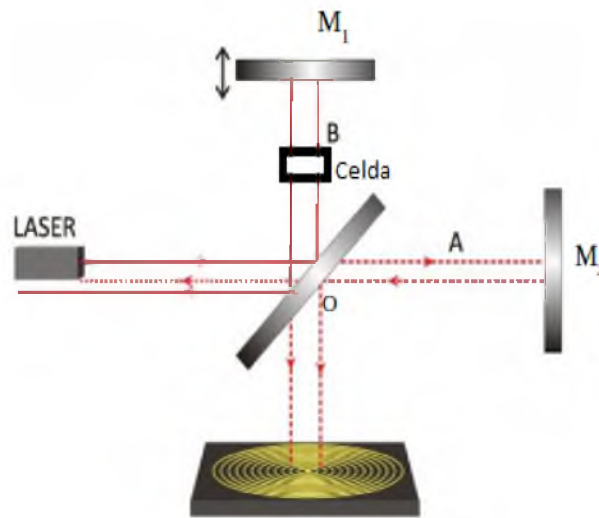


Figura 5.1: Arreglo del interferómetro de Michelson con celda de vidrio.

5.2. Índice de refracción en función de la temperatura

De acuerdo a lo anterior, se puede representar a la longitud de la celda en función del número de franjas que se presenta (ver figura 5.1), que es de la forma 9:

$$\Delta L = \frac{N\lambda_1}{2} \quad (5.8)$$

De esta manera, se puede decir que el índice de refracción en función de la temperatura esta descrito de acuerdo a la ecuación siguiente:

$$\frac{\Delta n}{\Delta T} = \frac{N_1\lambda_1/2\Delta L - N_0\lambda_1/2\Delta L}{T_1 - T_0} \quad (5.9)$$

Finalmente, reacomodando términos de la ecuación 5.9, se obtiene:

$$\frac{\Delta n}{\Delta T} = \frac{\Delta N}{\Delta T} * \frac{\lambda_1}{2\Delta L} \quad (5.10)$$

donde:

- Δn es el cambio en el índice de refracción $\Delta n = n_1 - n_0$,
- ΔT es el cambio de la temperatura $\Delta T = T_1 - T_0$,
- ΔN es el cambio del número de franjas del interferómetro $\Delta N = N_1 - N_0$,
- λ es la longitud de onda del haz láser,
- ΔL es el espesor de la celda de vidrio.

La dependencia del índice de refracción, n , de la temperatura, T , es importante en el diseño óptico donde los sistemas deben operar a una temperatura inconstante o a temperaturas extremas.

Capítulo 6

Medición del índice de refracción del alcohol (etílico) con el interferómetro de Michelson

Se realizaron mediciones de temperatura en el alcohol (etílico), así como también, se alinearon los espejos M_1 y M_2 en el interferómetro de Michelson, se utilizó una fuente de luz láser He-Ne con una longitud de onda (λ) de 633 nm . Además se colocó en uno de los brazos del interferómetro un controlador de temperatura para la celda de vidrio que contiene el fluido (ver figura [6.1](#)).

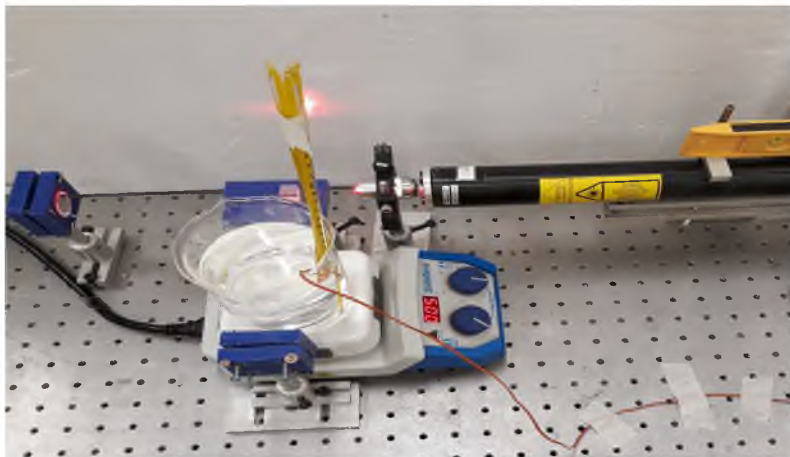


Figura 6.1: Arreglo del interferómetro de Michelson con un controlador de temperatura y con celda.

Una vez estabilizado el sistema se comenzó a controlar la temperatura de la muestra para observar el patrón de franjas y ver el cambio que se presenta (ver figura 6.2). Por lo que se utilizaron tres termómetros diferentes para tomar la medición de la temperatura del alcohol, como se muestra en la figura 6.1.

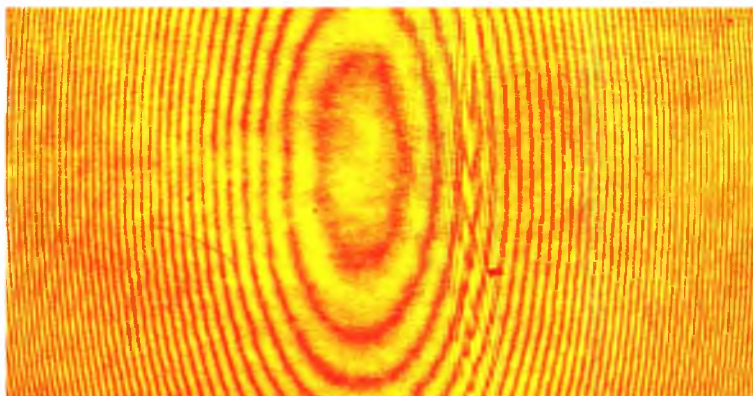


Figura 6.2: Patrón de franjas con celda.

Se tomó una temperatura máxima en el controlador de $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ y a partir de esta temperatura se fue disminuyendo en intervalos de $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, si se elevaba la temperatura por arriba de los $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el controlador, se observaba que el patrón de franjas oscilaba debido a los cambios internos que se presentaban en el alcohol y además se evaporaba el alcohol, puesto que se tomo la temperatura de $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la cual no había disminución del fluido en la celda. Por otra parte, al variar la temperatura de la celda se observo cambios en el desplazamiento del patrón de franjas y se procedió a realizar el conteo de las mismas. Hay que mencionar, que para ciertas temperaturas controladas el patrón de franjas comenzaba a estabilizarse, así que el conteo de franjas fue seleccionado por medio de un máximo o un mínimo presentado en el patrón de interferencia, simultáneamente se mostraban cambios en la celda debido a los cambios de la temperatura.

En el cuadro 6.1 se muestran los resultados obtenidos en el experimento una vez que se empezó a variar la temperatura en la celda (que contiene el alcohol etílico), de modo que se observo una dependencia del número de franjas en relación a la variación de la temperatura, es decir, para una temperatura menor existe mayor corrimiento de franjas, por el otro lado, si se presenta una temperatura mayor las franjas presentan menor corrimiento, para nuestro caso.

Controlador de temperatura	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	Media de T1, T2 y T3 (°C)	D.E	Número de franjas
50	34	32	34	33.33	0.3868	0
	33	31	33.8	32.6	0.2309	24
	33	31	33.8	32.6	0.2309	36
	32	30.8	33.8	32.2	0.1154	50
	32	30.5	33	31.83	0.0981	59
	32	30.5	33	31.83	0.981	69
	32	30.2	33	31.73	0.1558	81
	32	30	32.8	31.6	0.2309	92
	31	30	32.5	31.16	0.0923	105
45	31	30	32	31	0	105
	31	29.5	32	30.83	0.0981	122
	30	29.3	32	30.43	0.2482	130
	30	29	32	30.33	0.1905	138
	30	29	31.8	30.26	0.1501	149
	29	29	31.5	29.83	0.4792	155
	29	29	31	29.66	0.381	162
	29	28.8	31	29.6	0.3464	171
	28.5	28.5	31	29.33	0.1905	180
40	29	28.5	31	29.5	0.2886	180
	29	28	30	29	0	191
	28	27.9	30	28.63	0.3637	202
	28	27.5	30	28.5	0.2886	217
	28	27.2	29.9	28.36	0.2078	225
	28	27	29	28	0	234
	27	27	29	27.66	0.3810	243
	27	26.5	29	27.5	0.2886	253
	27	26.2	29	27.4	0.2309	283
35	27	26	28.5	27.16	0.0923	283
	26	26	28	26.66	0.3810	295
	26	26	28	26.66	0.3810	304
	26	25.5	28	26.5	0.2886	310
	26	25	27.5	26.16	0.0923	318
	26	25	27	26	0	329
	25	25	27	25.66	0.3810	335
	25	24.8	27	25.6	0.3464	343
	24.5	24.6	26.5	25.2	0.4041	352

Controlador de temperatura	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	Media de T1, T2 y T3 (°C)	D.E	Número de franjas
30	25	24	26	25	0	352
	24	24	26	24.66	0.3810	361
	24	24	26	24.66	0.3810	365
	24	23.9	26	24.63	0.3637	370
	24	23.8	26	24.6	0.3464	375
	24	23.5	26	24.5	0.2886	379
	24	23.5	26	24.5	0.2886	382
	24	23.2	26	24.4	0.2309	384
	24	23	26	24.33	0.1905	387

Cuadro 6.1: Resultados de la celda (alcohol etílico) a diferentes temperaturas en relación al número de franjas, donde T1, T2 y T3 son los termómetros que se utilizaron y D.E es la desviación estándar de la media aritmética.

Las figuras 6.3, 6.4 y 6.5 muestran los datos que se obtuvieron de los termómetros variando la temperatura en función del número de franjas. Se observó que para un intervalo de temperaturas entre 32 °C y 34 °C los desplazamientos de las franjas eran muy lentos, sin embargo para temperaturas alrededor de 23 °C a 26 °C según las mediciones de los termómetros obtuvieron mayor desplazamiento de franjas.

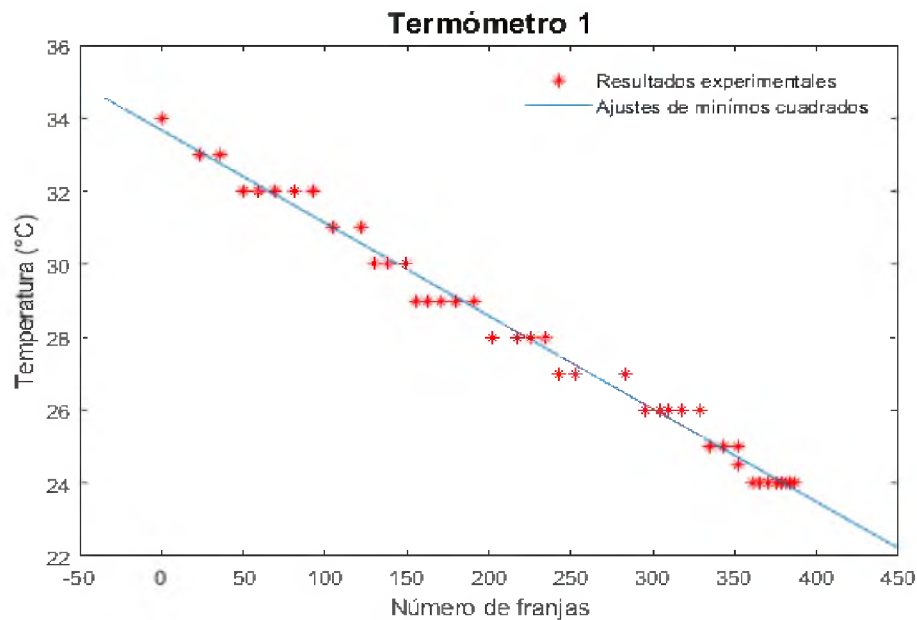


Figura 6.3: Datos obtenidos en la celda (alcohol etílico) variando la temperatura (utilizando un termómetro CVQ20260 con un rango de temperatura de -20 a 260 °C) en función al número de franjas..

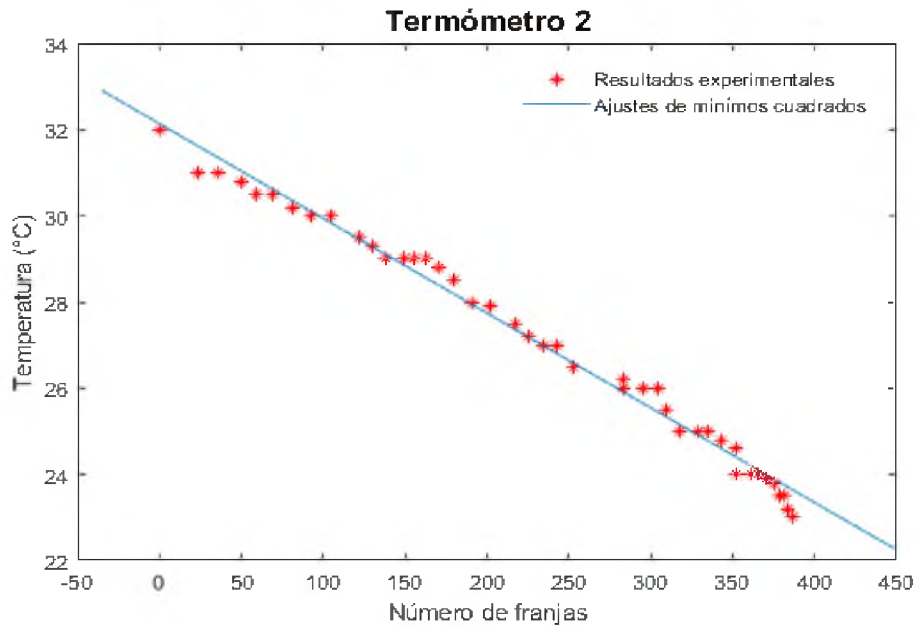


Figura 6.4: Datos obtenidos en la celda (alcohol etílico) variando la temperatura (utilizando un segundo termómetro CVQ35050 con un rango de temperatura de -35 a 50 °C) en función al número de franjas.

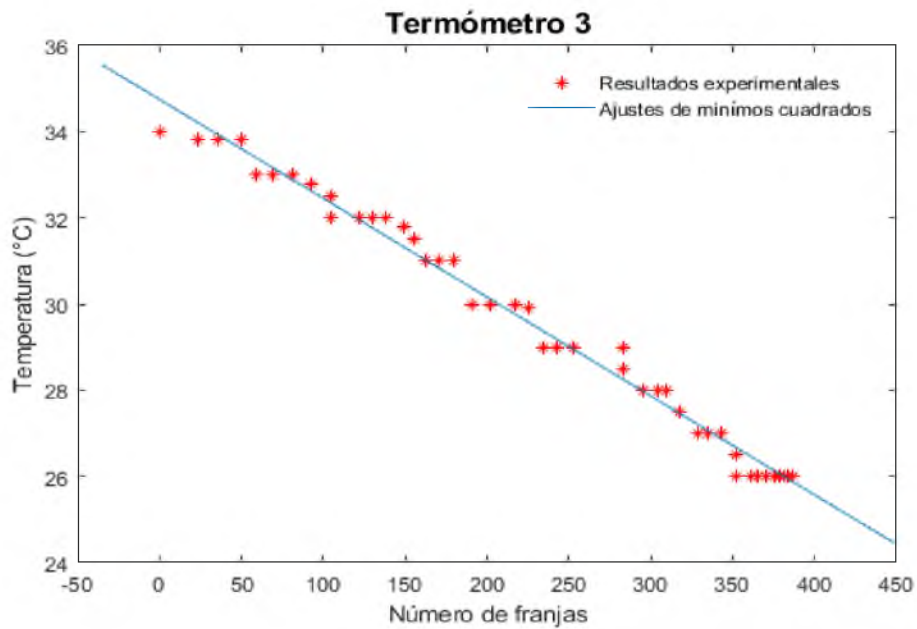
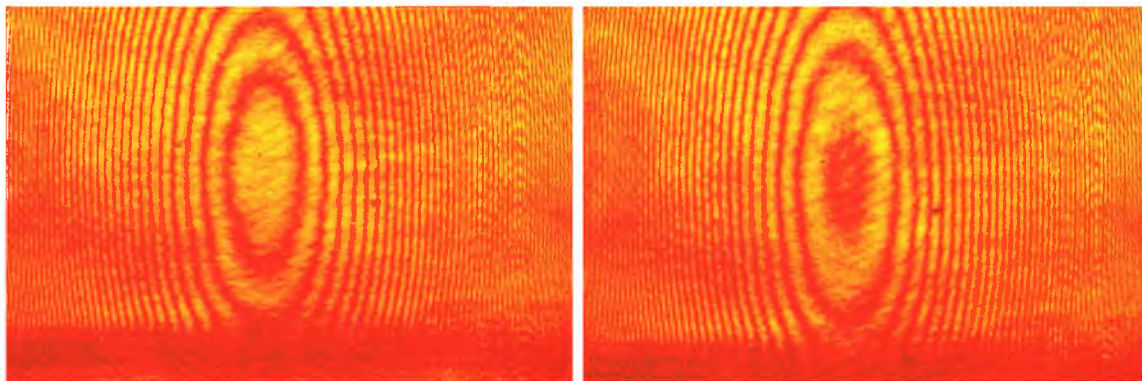


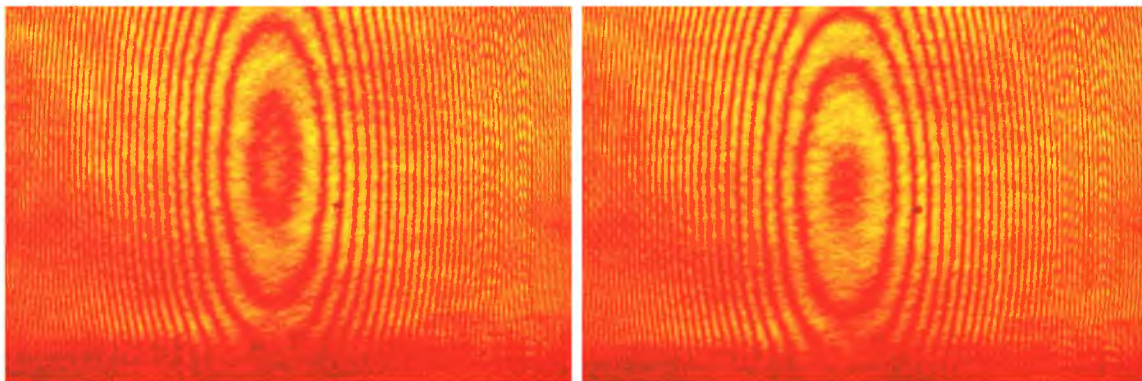
Figura 6.5: Datos obtenidos en la celda (alcohol etílico) variando la temperatura (utilizando un tercer termómetro CVQ10200 con un rango de temperatura de -10 a 200 °C) en función al número de franjas.

La figura 6.6 muestra el patrón de franjas que se obtuvo al variar la temperatura de la celda, en el experimento se mostraban oscilaciones del patrón de franjas conforme se descendía la temperatura, así de este modo, para diferentes temperaturas se muestran que los máximos y mínimos de los patrones cambian de acuerdo a cada temperatura, aunque el ancho de cada patrón de franjas no es muy visible si se llega a observar en cada una de las imágenes mostradas, estas imágenes son tomadas cuando la temperatura fue estabilizada para cada una de ellas, es decir, $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $45\text{ }^{\circ}\text{C}$, $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $30\text{ }^{\circ}\text{C}$.



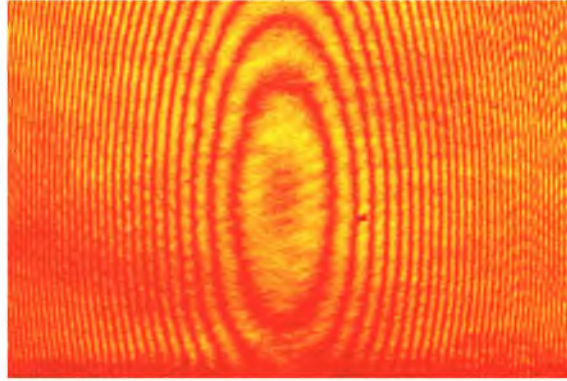
(a)

(b)



(c)

(d)



(e)

Figura 6.6: Patrón de franjas a diferentes temperaturas en la celda (alcohol etílico): a) 50 °C, b) 45 °C, c) 40 °C, d) 35 °C y e) 30 °C.

Tomando en cuenta cada una de las mediciones de los termómetros y considerando que se le aplico un método de ajuste lineal utilizando el software de matlab, cuyo resultado muestran las ecuaciones representativas para cada uno de los termómetros, como se muestra en el cuadro 6.2:

Termómetro 1	$y = -0,0255x + 33,6710$
Termómetro 2	$y = -0,0220x + 32,1371$
Termómetro 3	$y = -0,0229x + 33,7485$

Cuadro 6.2: Ecuaciones lineales de acuerdo a un ajuste de mínimos cuadrados en los datos del termómetro 1, termómetro 2 y termómetro 3.

De acuerdo al cuadro anterior, se obtuvieron diferentes pendientes para cada una de las ecuaciones, es decir:

Pendiente del termómetro 1	$m_{ter1} = -0,0255$
Pendiente del termómetro 2	$m_{ter2} = -0,0220$
Pendiente del termómetro 3	$m_{ter3} = -0,0229$

Cuadro 6.3: Pendientes obtenidas de las mediciones experimentales usando el ajuste de mínimos cuadrados.

Ahora, de acuerdo a la ecuación 5.10 y reordenando términos la función se puede expresar en términos del índice de refracción donde se obtiene:

$$\Delta n = \left(\frac{\Delta N}{\Delta T} \right) * \frac{\lambda_1}{2\Delta L} * \Delta T \quad (6.1)$$

La ecuación 6.1 se puede tomar como una ecuación lineal en el cual el termino $\Delta N/\Delta T$

representa la pendiente, esto es:

$$m = \frac{\Delta N}{\Delta T} \quad (6.2)$$

Asumiendo que las pendientes obtenidas del cuadro 6.3 tienen que corresponder de acuerdo a la ecuación 6.2, entonces los valores de las pendientes serán de la siguiente forma:

Pendiente del termómetro 1	$m_{ter1} = -39,216$
Pendiente del termómetro 2	$m_{ter2} = -45,455$
Pendiente del termómetro 3	$m_{ter3} = -43,668$

Cuadro 6.4: Valores de las pendientes de acuerdo al inverso multiplicativo de la ecuación 6.2

Una vez obtenidas estas pendientes y tomando en cuenta que los valores para la longitud de onda que se ocupó en la medición del experimento es de $\lambda = 633nm$, la medición de la celda es $\Delta L = 0,0975m$ y ΔT representa la diferencia de las temperaturas inicial y final. En este trabajo se obtuvo la medición del termómetro 1, la temperatura inicial que se obtuvo fue de $T_1 = 34^\circ C$, de esta manera variando la temperatura y obteniendo su mínimo se llegó hasta $T_f = 24^\circ C$, luego para el termómetro 2, la temperatura inicial es de $T_1 = 32^\circ C$, así variando esta temperatura se llega hasta el mínimo de $T_f = 23^\circ C$ y finalmente para el termómetro 3 se obtuvo una temperatura inicial de $T_1 = 34^\circ C$, de manera que, la temperatura final a la que se alcanza es de $T_f = 26^\circ C$. Por otra parte, en la literatura se encuentra que el alcohol etílico a una temperatura de $24^\circ C$ tiene un índice de refracción de $n = 1,3588$ [6], entonces si se considera en la ecuación 6.1, que $\Delta n = n_2 - n_1$, siendo $n_1 = 1,3588$ y $T_i = 24^\circ C$; y tomando en cuenta los valores de máximos y mínimos de las temperaturas obtenidas en el experimento queda de la forma siguiente:

para el termómetro 1

$$n_2 - n_1 = (-39,216) * \frac{633 \times 10^{-9}m}{2(0,0975m)} * (T_f - T_i) \quad (6.3)$$

$$n_2 = -0,1273 \times 10^{-3} * (T_f - 24^\circ C) + 1,3588 \quad (6.4)$$

para el termómetro 2

$$n_2 - n_1 = (-45,455) * \frac{633 \times 10^{-9}m}{2(0,0975m)} * (T_f - T_i) \quad (6.5)$$

$$n_2 = -0,1475 \times 10^{-3} * (T_f - 24^\circ C) + 1,3588 \quad (6.6)$$

para el termómetro 3

$$n_2 - n_1 = (-43,668) * \frac{633 \times 10^{-9}m}{2(0,0975m)} * (T_f - T_i) \quad (6.7)$$

$$n_2 = -0,1417 \times 10^{-3} * (T_f - 24^\circ C) + 1,3588 \quad (6.8)$$

Considerando las temperaturas obtenidas por los diferentes termómetros en el experimento, se calculo la media aritmética correspondiente, y luego se pudo obtener la desviación estándar de estos datos, así para observar el margen de error en el cual oscilan las mediciones (ver cuadro [6.1](#)). Es así que la figura [6.7](#) muestra el resultado de la media aritmética de los tres termómetros (T1, T2 y T3) del alcohol etílico con respecto al número de franjas. Se puede mencionar que hay una diferencia entre cada medición de temperatura de los termómetros, esto es, porque los termómetros que se utilizaron tenían escalas de 2 (grados de medición) y la precisión del ojo humano no es muy exacta.

La figura [6.8](#) muestra los datos que se obtuvieron al calcular la media aritmética de la temperatura de los tres termómetros que se utilizaron a la cual se le aplico un método de ajuste lineal, cuyo resultado muestra la siguiente ecuación representativa:

$$y = -0,0234x + 33,5100 \quad (6.9)$$

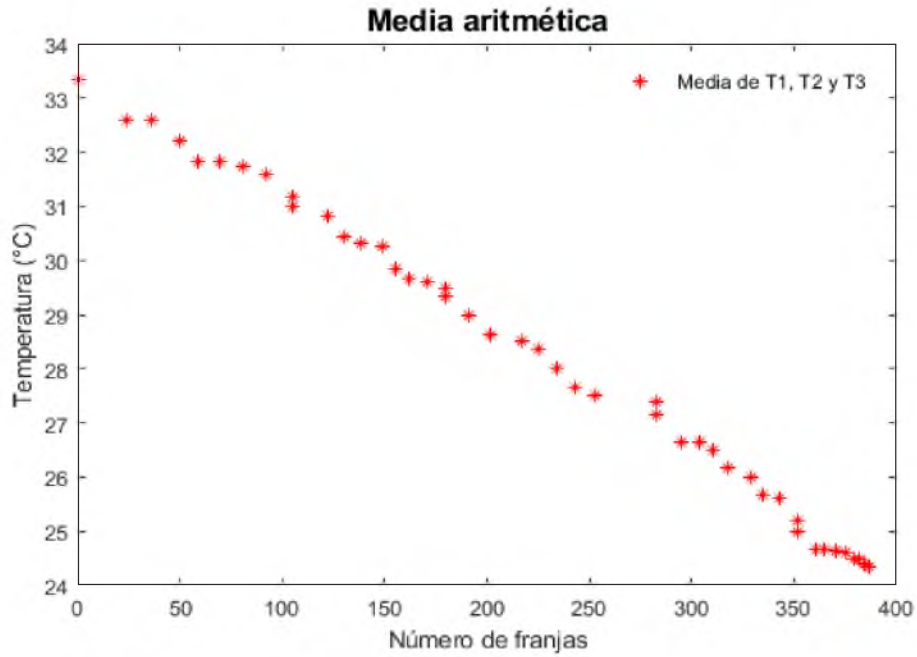


Figura 6.7: Datos obtenidos de la media de los termómetros 1, 2 y 3.

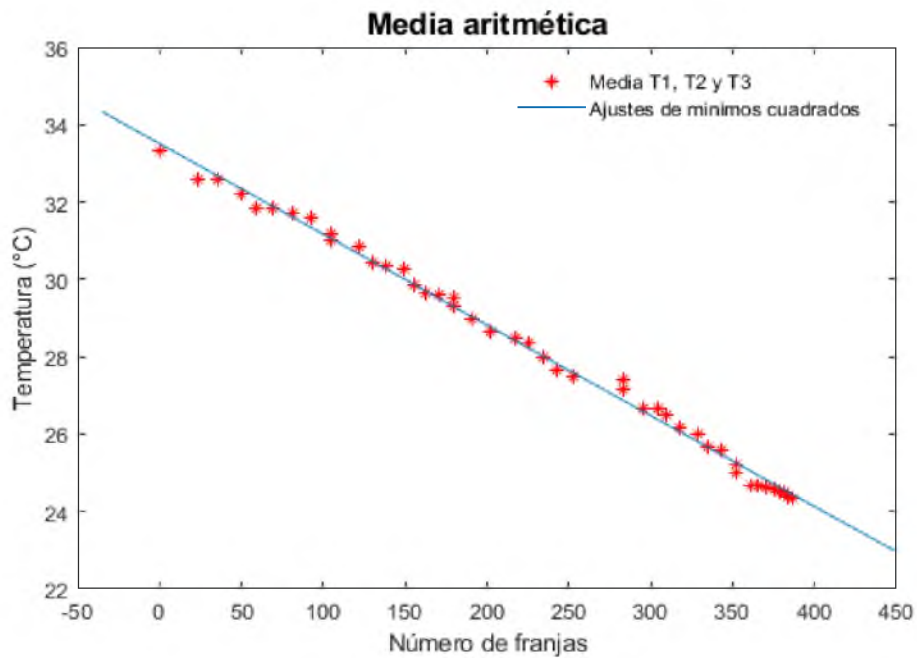


Figura 6.8: Ajuste en los datos por medio de mínimos cuadrados de la media aritmética para los termómetros T1, T2 y T3.

De acuerdo a la ecuación [6.9](#) se obtuvo su pendiente, esto es:

$$m_{media} = -0,0234 \quad (6.10)$$

La pendiente obtenida debe de corresponder de acuerdo a la ecuación [6.2](#), entonces tomando el inverso multiplicativo de la ecuación [6.10](#) la pendiente queda de la forma:

$$m_{media} = -42,7350 \quad (6.11)$$

La media de las temperaturas se obtuvo a una temperatura inicial de $T_1 = 33,33^\circ C$, variando la temperatura y obteniendo su mínimo se llega hasta $T_f = 24,33^\circ C$, teniendo en cuenta estos valores y sustituyendo en la ecuación [6.1](#) tenemos que:

$$n_2 - n_1 = (-42,7350) * \frac{633 \times 10^{-9} m}{2(0,0975)} * (T_f - 24^\circ C) \quad (6.12)$$

$$n_2 = -0,1387 \times 10^{-3} * (T_f - 24^\circ C) + 1,3588 \quad (6.13)$$

La figura [6.9](#) muestra los datos que se obtuvieron al variar la temperatura de la ecuación [6.13](#), en la cual se muestra una dependencia del índice de refracción con la temperatura, es decir, entre mayor es la temperatura en el alcohol, el índice de refracción es menor y entre menor sea la temperatura, mayor es el índice de refracción del alcohol. Ahora, en la literatura se encuentra muy poca información del alcohol etílico para diferentes temperaturas [\[6\]](#), sin embargo, si se encuentra información para diferentes concentraciones en mezcla con el alcohol etílico, entonces una de las fuentes de mayor información del alcohol etílico puro, lo publica el autor Elmer E. Hall [\[6\]](#), La ecuación que muestra este autor esta escrita en la ecuación [6.14](#) donde su gráfica presenta el cambio del índice de refracción en función de la temperatura y que esta representada en la figura [6.10](#).

$$n = 1,36250 - 10^{-6}[404(T - 15) + 0,22(T - 15)^2 + 0,0025(T - 15)^3] \quad (6.14)$$

T es la temperatura a la cual se quiere medir el alcohol donde su rango esta entre $15^\circ C$ y $70^\circ C$, para este trabajo se realizaron las mediciones no mayores de $50^\circ C$ en el experimento y se llego a una temperatura ambiente en el laboratorio de $24^\circ C$.

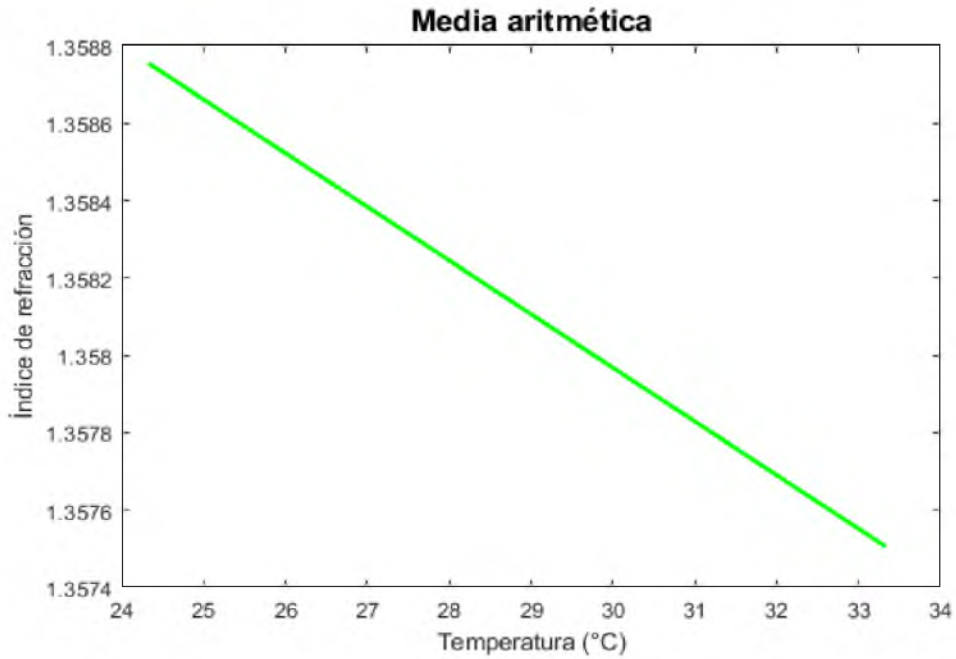


Figura 6.9: Índice de refracción de los datos obtenidos de la media aritmética de los termómetros T1, T2 y T3 en función de la temperatura.

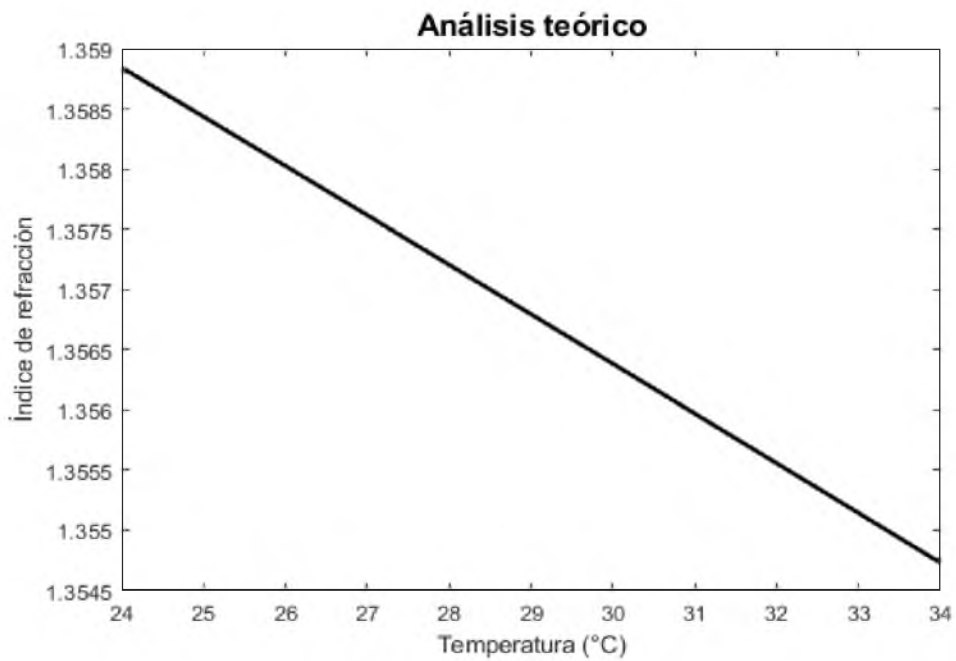


Figura 6.10: Índice de refracción en función de la temperatura (Elmer E. Hall).

La figura 6.11 muestra los datos que se obtuvieron experimentalmente y los datos que se encuentran en la literatura de acuerdo a [6], se puede observar que se presenta un comportamiento similar en ambas funciones puesto que el índice de refracción del alcohol etílico decae conforme la temperatura va aumentando.

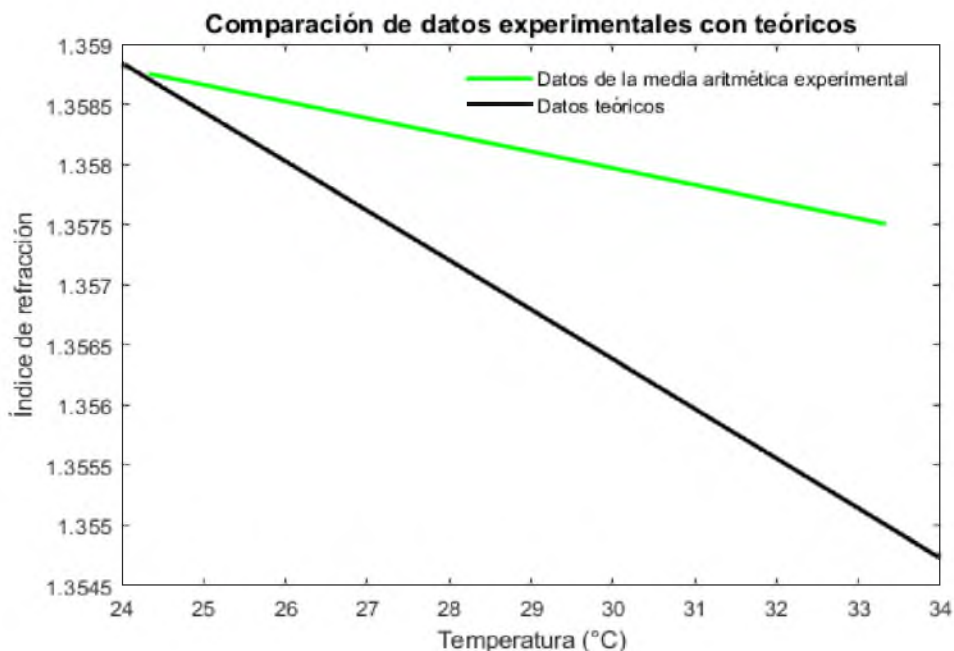


Figura 6.11: Muestra de los datos teóricos (Elmer E. Hall) con los datos obtenidos de la media aritmética de los termómetros.

En el cuadro 6.5 se muestran los índices de refracción obtenidos de la ecuación 6.13 que se obtuvo experimentalmente en función de la temperatura y además se muestra la ecuación teórica 6.14, que se representan en la figura 6.11. Por lo que se calculo su desviación estándar para observar la diferencia entre estas dos mediciones. Hay que mencionar, que al hacer esta medición entre la teórica propuesta por Elmer E. Hall y la experimental que se obtuvo en este trabajo, se presentan diferentes pendientes de acuerdo a la figura 6.11, este comportamiento de la pendiente del trabajo que se llevo acabo en esta tesis, se debe tomar en cuenta que al realizar las mediciones experimentales en el laboratorio no se contaba con un ambiente controlado y los termómetros que se utilizaron eran graduados con escalas comparativamente grandes donde existe margen de error.

Temperatura (°C)	Medición teórica	Medición experimental	D.E
33.33	1.3550	1.3575	0.00176
32.6	1.3553	1.3576	0.00162
32.6	1.3553	1.3576	0.00162
32.2	1.3555	1.3577	0.00155
31.83	1.3556	1.3577	0.00148
31.83	1.3556	1.3577	0.00148
31.73	1.3557	1.3577	0.00141
31.6	1.3557	1.3577	0.00141
31.16	1.3559	1.3578	0.00134
31	1.3560	1.3578	0.00127
30.83	1.3560	1.3579	0.00134
30.43	1.3562	1.3579	0.00120
30.33	1.3562	1.3579	0.00120
30.26	1.3563	1.3579	0.00113
29.83	1.3565	1.3580	0.00106
29.66	1.3565	1.3580	0.00106
29.6	1.3565	1.3580	0.00106
29.33	1.3567	1.3581	0.00098
29.5	1.3566	1.3580	0.00098
29	1.3568	1.3581	0.00091
28.63	1.3569	1.3582	0.00091
28.5	1.3570	1.3582	0.00084
28.36	1.3571	1.3582	0.00077
28	1.3572	1.3582	0.00070
27.66	1.3573	1.3583	0.00070
27.5	1.3574	1.3583	0.00063
27.4	1.3575	1.3583	0.00056
27.16	1.3576	1.3584	0.00056
26.66	1.3578	1.3584	0.00042
26.66	1.3578	1.3584	0.00042
26.5	1.3578	1.3585	0.00049
26.16	1.3580	1.3585	0.00035
26	1.3580	1.3585	0.00035
25.66	1.3582	1.3586	0.00028
25.6	1.3582	1.3586	0.00028
25.2	1.3584	1.3586	0.00014

Temperatura (°C)	Medición teórica	Medición experimental	D.E
25	1.3584	1.3587	0.00021
24.66	1.3586	1.3587	0.00007
24.66	1.3586	1.3587	0.00007
24.63	1.3586	1.3587	0.00007
24.6	1.3586	1.3587	0.00007
24.5	1.3586	1.3587	0.00007
24.5	1.3586	1.3587	0.00007
24.4	1.3587	1.3587	0
24.33	1.3587	1.3588	0.00007

Cuadro 6.5: Obtención de los índices de refracción de la ecuación teórica y la experimental.

Habría que decir también, que de acuerdo a las mediciones obtenidas de los termómetros 1, 2, 3 del cuadro [6.1](#) presentan diferentes temperaturas, considerando que solo se quiere obtener una temperatura dada para poder comprender el comportamiento del alcohol etílico en función de la temperatura. Se tomó la media aritmética de los tres termómetros que se utilizaron, de esta manera se presenta en el cuadro [6.5](#) repetibilidad. Otro rasgo, se tomó esa repetibilidad en los resultados que se obtuvieron, porque presentan diferentes números de franjas, y de acuerdo a lo mencionado anteriormente la escala de los termómetros no es la misma, así que se presenta un margen de error entre cada medición de cada termómetro, no obstante, el comportamiento que se muestra en la figura [6.13](#) del índice de refracción del alcohol etílico, se puede decir que es satisfactorio y que se cumple con el objetivo propuesto en este trabajo.

Capítulo 7

Conclusiones

- Se desarrolló el estudio geométrico del comportamiento del interferómetro de Michelson introduciendo un cuerpo u objeto en uno de los brazos.
- Se llevó a cabo el análisis del cambio de la temperatura del alcohol etílico donde se observó un desplazamiento de 78 franjas en promedio en relación para cada temperatura.
- Se muestra el comportamiento del índice de refracción del alcohol con la temperatura, a partir de los resultados experimentales obtenidos se observa que existe un cambio muy lento del índice de refracción de acuerdo al cuadro [6.5](#), además se presenta los valores del índice de refracción en función de la temperatura de acuerdo al modelo teórico presentado por Elmer E. Hall.
- Se obtuvieron los datos experimentales del índice de refracción del alcohol, además se gráfico el modelo teórico propuesto por Elmer E. Hall donde el comportamiento de ambas gráficas decaen de acuerdo al cambio de la temperatura.
- El interferómetro de Michelson presenta alta sensibilidad en vibración y perturbación de cualquier medio externo.
- Los cambios presentados en las mediciones de los termómetros y del controlador de temperatura no eran exactos, puesto que el fluido estaba en constante perturbación debido a los cambios de la temperatura, por lo que en la gráfica [6.11](#) se muestra un comportamiento diferente en las funciones del resultado experimental y del resultado presentado por Elmer E. Hall.

Bibliografía

- [1] L. Arissian, *Lasers*, Wiley-VCH, 2011.
- [2] M. Born, E. Wolf, *Principles of Optics*, Pergamon press, 1997.
- [3] C. Breck Hitz, *Introduction to laser technology*, Wiley, 2012.
- [4] F. Carreño & M.A. Antón, *Óptica Física*, Prentice Hall, Madrid, 2001.
- [5] Edward Collett, *Field Guide to Polarization*, V.FG05, Spie Press Book, 2005.
- [6] Elmer E. Hall & Arthur R. Payne, *La variación del índice de refracción de agua, alcohol etílico y bisulfuro de carbono, con la temperatura*, Universidad de california departamento de física.
- [7] D. J. Griffiths, *Introduction to electrodynamics*, Prentice Hall of India, 1998.
- [8] R.D. Guenther, *Modern Optics* John Wiley & Sons, 1990.
- [9] E. Hecht, A. Zajac, *Óptica*, Addison Wesley, 2000.
- [10] Huygens C (1690) *Traité de la lumière*, Leyden (completed in 1678, published in 1690).
- [11] F.A. Jenkins, H.E. White, *Fundamentals of Optics*, McGraw-Hill, 1981.
- [12] M.V. Klein, T.E. Furtak, *Optics*, John Wiley and Sons, 1986.
- [13] D. Malacara *Óptica básica*, Ediciones científicas universitarias, 2015.
- [14] Malus ÉL (1809) *Sur une propriété de la lumière réfléctie par les corps diaphanes*, Nouveau Bull d Sci, par la Soc Philomatique (Paris) 1:266-269; Mém de la Soc d'Arcueil 2.
- [15] F.L. Pedrotti, L.S. Pedrotti, *Introduction to Optics*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1993.

- [16] R. Resnick, *Física*, Vol.2, Cecsca, 1996.
- [17] P. Ribeiro, *Optics, photonics and laser technology*, Springer, 2018.
- [18] Roy M. Waxler and G. W. Cleek, *El efecto de la temperatura y la presión sobre el índice de refracción de algunos vidrios de óxido*, JOURNAL OF RESEARCH of the National Bureau of Standards - A. Physics and Chemistry Vol. 77A, No. 6, November-December 1973.
- [19] B.E.A. Saleh, M.C. Teich, *Fundamentals of Photonics*, Wiley interscience, 1991.
- [20] Yang Tan, Ruiyun He, Chen cheng, Dong Wang, Yanxue Chen and Feng Chen, Scientific Reports 4, 7523 (2014).