

Universidad de Morelos  
Facultad de Ingeniería y Tecnología

EFECTO DE POLARIZACIÓN Y DIFRACCIÓN DEL HAZ MODULADO POR PWM EN  
COMUNICACIÓN ÓPTICA DE ESPACIO ABIERTO

Proyecto de investigación presentada en cumplimiento parcial de los requisitos para el grado de licenciatura  
en ingeniería en electrónica y telecomunicaciones.

Por  
Hugo Enrique Álvarez González  
Abril de 2015

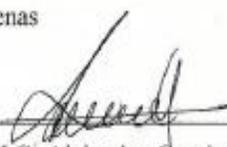
EFFECTO DE POLARIZACIÓN Y DIFRACCIÓN DEL HAZ MODULADO POR PWM EN  
COMUNICACIÓN ÓPTICA DE ESPACIO ABIERTO

Proyecto de investigación presentada en cumplimiento parcial de los requisitos para el grado de licenciatura  
en ingeniería en electrónica y telecomunicaciones.

Por  
Hugo Enrique Álvarez González

APROBADA POR LA COMISIÓN

  
Asesor principal: M.C. Gerardo Salvador  
Romo Cardenas

  
Miembro: M.C. Alejandro Garcia Mendoza  
Lopez

  
Director de facultad: M.C. Alejandro Garcia Mendoza

  
Miembro: M.C. Carlos Emilio Hernández Rentería

  
Coordinador de Pregrado: M.C. Jair Arody Del valle

20 de abril de 2015

Fecha de aprobación

## DECLARACIÓN DE LA INTEGRACIÓN DE LA FE

En medio de el tiempo que pasaba buscando información, autores, libros, revistas y otros medios de información se me vino a la mente el parecido a la vida de un cristiano que espera la segunda venida de Jesús. ¿Cómo podría esto reflejar eso? Simplemente lo compare con el esfuerzo que un cristiano hace para tener una vida diaria en comunión con el creador, que muchas veces es difícil y otras muchas son de iluminación, bendición y alegría al encontrar en el estudio de la biblia y lecturas diarias sobre como es el amor de Dios hacia nosotros, sus hijos.

Una parte importante de mi trabajo fue entender la dualidad de la luz. La luz se comporta como foton y onda electromagnetica al mismo tiempo. Esto es vinulado a la dualidad de Jesús cuando estuvo en la tierra, cuando tenía naturaleza humana pero tambien tenía naturaleza divina. Esto ayuda a explicar y entender ese enigma que para muchas personas resulta difícil de entender y aveces hasta imposible. Pero Dios, en el segundo libro que nos dejó, que es la naturaleza nos enseña claramente misterios como este que son asombrosos para el hombre y de gran bendición cuando decide investigar.

Muchas veces no queremos leer la biblia e investigar en sus escritos, pero cuando decidamos hacerlo grandes palabras de sabiduria emanaran de ella y grandes misterios son revelados. Como escrito esta en Jeremias 33:3 “Clama a mí, y yo te responderé y te revelaré cosas grandes e inaccesibles, que tú no conoces”.

## TABLA DE CONTENIDO

DECLARACIÓN DE INTEGRACIÓN DE LA FE.....	iii
CAPITULO	
I. INTRODUCCIÓN .....	1
Antecedentes .....	1
Problema .....	10
Objetivos .....	10
Preguntas e hipótesis .....	10
II. METODOS .....	10
III. RESULTADOS .....	11
IV. CONCLUSIONES .....	13
V. REFERENCIAS .....	14
VI. APÉNDICE .....	16

# Estudio de los efectos polarización y difracción del haz en comunicaciones ópticas en espacio abierto para comunicaciones moduladas por ancho de pulso

Hugo Enrique Álvarez González  
Facultad de Ingeniería y Tecnología  
Universidad de Morelia  
Morelia, N.L. México

Gerardo Salvador Romo Cardenas  
Investigación en Biomédicas  
Universidad de Morelia  
Morelia, N.L. México

**Resumen**— Las comunicaciones ópticas en espacio abierto, se refieren a la transmisión de un haz laser modulado a través de la atmósfera para establecer comunicación de información. Este trabajo propone un estudio preliminar de estos sistemas. Es una técnica de reciente exploración, para cuál no se ha estado investigando, sus capacidades y limitantes en diversos escenarios y aplicaciones específicas.

Teniendo como equipo un kit educativo que funciona haciendo modulación de ancho de pulso para montar una señal de audio a un diodo laser. Se diseñarán experimentos simulando los efectos ópticos de polarización y difracción para observar los efectos que causan en la transmisión en la atmósfera terrestre.

Así mismo, se propone hacer experimentos de difracción y polarización del haz para entender mejor su funcionamiento, limitantes y ventajas de estos sistemas de comunicaciones. Hay que tomar en cuenta que la polarización genera efectos en la intensidad de la señal transmitida.

**Keywords**— *Intensidad de la señal, atmosfera, polarización, difracción, fenómenos atmosféricos, simulación, fenómenos físicos, FSO.*

## I. INTRODUCCIÓN

### A. ANTECEDENTES

#### a. LA LUZ

La luz posee características de onda y de partícula conjuntamente, pero es algo más que cualquiera de ellas por separado. Hoy en día se acepta que posee propiedades duales. En unos casos se comporta como onda y en otros casos como partícula. Con la particularidad de que cuando se comporta como partícula, su energía depende de la frecuencia, definida del modelos ondulatorio. [1]

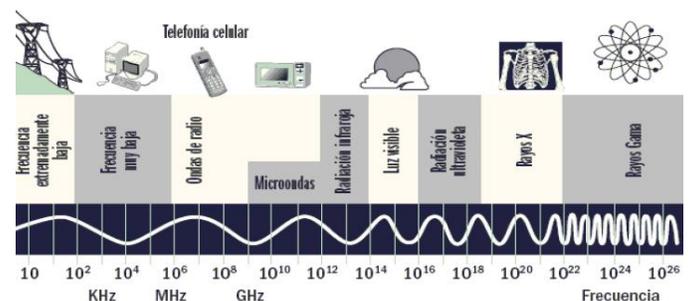


Figura 1: Radiación electromagnética. [2]

La luz es una onda electromagnética, similar a las ondas que se generan y propagan en la superficie del agua, pero aquí lo que oscila no es ninguna superficie, sino un complejo revoltijo de campos eléctricos y magnéticos. Estos campos continuamente se generan unos a otros, a la vez que se propagan en el vacío o cualquier otro medio con una velocidad característica, de aproximadamente 300 000 km/s. También se acostumbra hablar de radiación electromagnética (figura 1) y consiste de ondas eléctricas y magnéticas moviéndose a través del espacio a la velocidad de la luz. El comportamiento de las radiaciones electromagnéticas depende de su longitud de onda. [2]

El número de veces que esos campos cambian de sentido en un segundo es la frecuencia de la radiación designada

usualmente por la letra griega  $\nu$  (nú), y es del orden de miles de millones o más veces por segundo, el ojo humano es capaz de detectar la radiación electromagnética en un determinado intervalo de frecuencias; las más altas corresponden al azul y la violeta, (figura 2) mientras que las más baja corresponde al rojo. [3]. Se puede observar la constante de la luz y de ahí se puede obtener la longitud de onda. (1) [4]

$$c = \nu \lambda \quad (1)$$

La luz es una forma de energía electromagnética (figura 3), representada por el espectro electromagnético. La luz visible se distingue porque su longitud de onda o color está comprendida entre los 400 y 700 nanómetros (nm) aproximadamente.



Figura 2: Espectro de luz visible [2]

Todas estas formas de energía electromagnética presentan unas características comunes:

- Son emitidas a partir de una fuente energética o emisor: lámpara de filamento, antena, el Sol.
- Se transmiten por el vacío (de forma aproximada el espacio) y pueden pasar a través de cualquier sustancia que sea "transparente".
- Se desplazan a la misma velocidad en el vacío: cerca de 300.000 Km/s. En otras materias "transparentes" (agua, aire), la velocidad disminuye.
- Son irradiadas en líneas o "rayos" rectos en el vacío. [5]

El espectro visible origina una variación continua de colores, sin divisiones abruptas entre diferentes longitudes de onda. Mezcladas en las proporciones adecuadas producen la sensación de «luz blanca». Sin embargo se puede establecer la situación de determinados colores, tal como lo ven nuestros ojos:

El «violeta» se sitúa en una franja comprendida entre los 380 y 450 nm; el «azul» entre los 450 y 500 nm; el «verde», entre los 500 y 570 nm; el «amarillo», entre los 570 y 590 nm; el «naranja», entre los 590 y 620 nm y el «rojo», entre los 620 y 750 nm. [5]

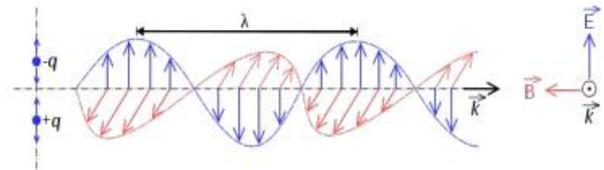


Figura 3: Esquema de una onda electromagnética en un instante dado

### b. FUENTES DE LUZ

La luz visible puede ser producida por diferentes fuentes de emisión. Unas son naturales, como el Sol, mientras que hay otras artificiales, como la iluminación eléctrica.

Según su origen se pueden establecer diferentes categorías:

**Por incandescencia:** Cuando un cuerpo se calienta por encima de los 1.300 ° C aproximadamente comienza a emitir luz propia visible. Si la temperatura va en aumento, irá emitiendo luz en diferentes colores; primero, rojo, después y sucesivamente, naranja, amarillo, blanco, y finalmente blanco-azulado. De aquí se deriva el concepto de temperatura de color (TC), basado en el comportamiento de un cuerpo negro y que se aplica a todas las fuentes incandescentes (naturales o artificiales).

**Por luminiscencia:** Cuando los electrones de una sustancia alcanzan niveles de energía extra proporcionados por una fuente externa, radian este exceso de energía en forma de luz visible antes de volver a su estado original. Existen dos tipos de luminiscencias:

1. **Fluorescencia:** La emisión de luz cesa tan pronto como se acaba la aportación de la fuente externa. Hay diferentes tipos de fluorescencia dependiendo del origen de la fuente y la naturaleza del cuerpo con el que interactúa.
2. **Fosforescencia:** La emisión de luz continúa un tiempo después de que haya cesado la aportación de energía de la fuente externa. También aquí existen diferentes tipos según las sustancias.

**Luz Incoherente.** La luz de un foco se produce cuando se le aplica energía a un átomo, llevando así, a un electrón a un nivel de energía superior inestable. Este electrón regresa aleatoriamente a su estado estable de energía por medio del desprendimiento de un fotón. La luz que se produce de esta forma se llama Luz Incoherente ver (figura 4 y tiene muchas longitudes de onda, direcciones y fases.

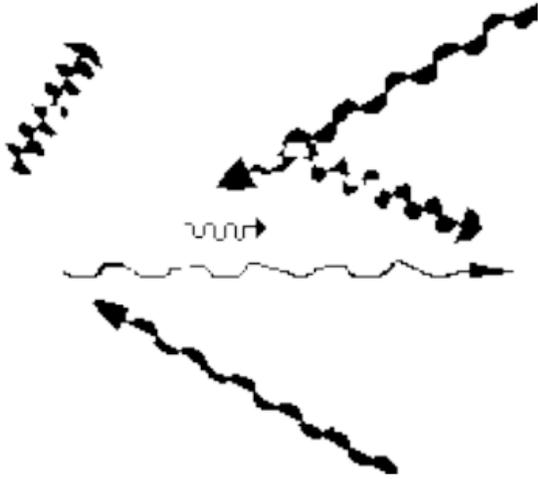


Figura 4: Luz Incoherente. [6]

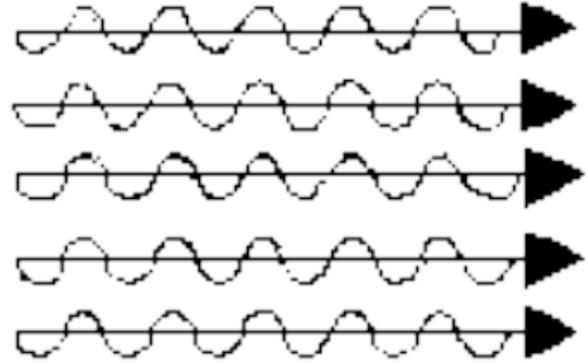


Figura 5: Luz Coherente [6]

Luz Coherente. Cuando la energía es aplicada a un medio láser los electrones son llevados a un estado inestable de energía y luego espontáneamente decaen a un estado metaestable de relativamente larga vida. Los electrones en este estado no vuelen espontáneamente a su nivel de energía inicial; por esto es posible bombear grandes cantidades de energía a un material logrando así una inversión de población en la cual la mayoría de los átomos están en estado metaestable. Después de que esta inversión de poblaciones se ha logrado, se comienza la acción láser cuando un electrón vuelve espontáneamente a su estado de energía inicial liberando un fotón. Si el fotón liberado tiene la longitud de onda correcta va a estimular a que un átomo en estado metaestable emita un fotón de la misma longitud de onda (Emisión Estimulada). Muchos de estos fotones se pierden cuando golpean la parte lateral del medio láser; sin embargo si los fotones viajan de forma paralela al eje de la cavidad óptica éstos van a continuar estimulando la emisión de otros fotones con la misma longitud de onda, así se forma la luz coherente (ver figura 5). Esto sigue ocurriendo hasta que se encuentren con los extremos reflejantes de los lados. Cuando el haz choca con el lado totalmente reflejante, cambia su dirección y devuelve estimulando la producción de fotones los cuales se incrementan hasta encontrarse con el espejo parcialmente reflejante. Una pequeña parte de esta luz coherente se transmite mientras que la otra parte e refleja para continuar el efecto estimular fotones. La radiación láser va a continuar mientras se le continúe aplicando energía al medio láser. El proceso de emisión estimulada se observa en la figura 6.

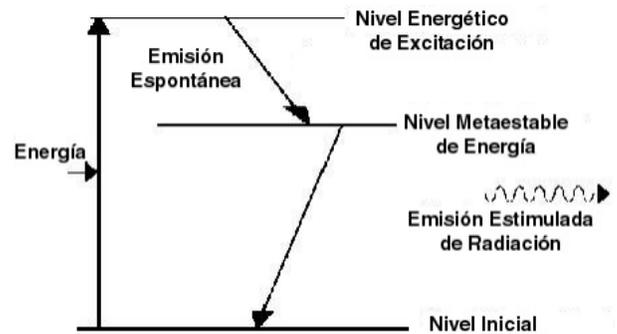


Figura 6: Estado de la energía en la cavidad de un medio láser [6]

### c. INTERACCION DE LA LUZ

Reflexión. Es el retorno de la luz por el mismo medio en que se propaga, al llegar a la superficie de separación de dos sustancias distintas. Se llama ángulo de incidencia ( $\epsilon$ ) el que forma el rayo incidente (IS) y la normal (SN) a la superficie. Se llama ángulo de reflexión ( $\epsilon'$ ) el que forma el rayo reflejado (SR) y la normal (SN). [7]

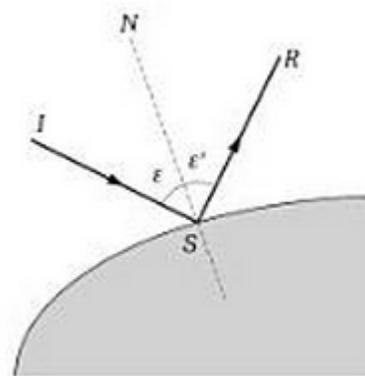


Figura 7: Ejemplo del fenómeno físico de reflexión. [7]

La reflexión puede ser de tres tipos:

- 1) Especular. Se produce cuando la luz incide en sustancias con superficies lisas, como el agua en calma, vidrio, etc. Los rayos de luz que llegan a la superficie son reflejados en el mismo ángulo respecto a la perpendicular de la superficie o normal (Figura 7).
- 2) Difusa. Cuando la superficie de incidencia es irregular se produce una reflexión en todas direcciones, causando un aspecto mate. Por ejemplo, en una hoja de papel o la Luna.
- 3) Selectiva. Hay superficies que además tienen la propiedad de reflejar ciertas longitudes de onda y absorber las restantes. En un objeto de color amarillo, por ejemplo, se absorben todos los colores excepto el amarillo, que es reflejado.

**Refracción.** Cuando la luz pasa oblicuamente de un medio a otro con diferente densidad (por ejemplo, del aire al vidrio) se origina un cambio de dirección. En la refracción, el rayo incidente y el refractado están en el mismo plano y en lados opuestos de la normal a la superficie. Entonces, se cumple la ley de refracción (ley de Snell).

1º Ley de refracción: El rayo incidente, el rayo refractado y la normal a la superficie de separación de los medios son coplanares.

2º Ley de refracción: Para cada par de medios y para cada luz monocromática incidente que se refracta se cumple la ley de Snell, que puede expresarse:  $n_1 \cdot \text{sen } a = n_2 \cdot \text{sen } g$

- 1) Si  $n_2 > n_1$  ;  $\text{sen } g < \text{sen } a$  o sea  $g < a$  , entonces cuando un rayo de luz pasa de un medio menos refringente a otro más refringente, se acerca a la normal.
- 2) Si  $n_2 < n_1$  ;  $\text{sen } g > \text{sen } a$  o sea  $g > a$  , entonces cuando un rayo de luz pasa de un medio refringente a otro menos refringente, se aleja de la normal.
- 3) Si el ángulo de incidencia es nulo ( $0^\circ$ ), entonces el ángulo de refracción también lo será. [8]

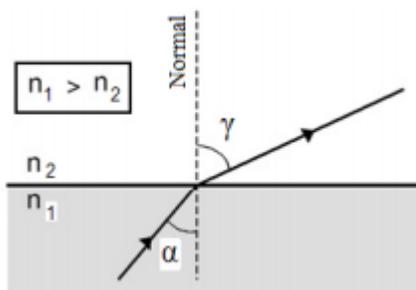


Figura 8: Explicación del fenómeno de refracción [8]

**Transmisión.** Es el paso de la luz a través de sustancias no opacas. Pueden producirse tres tipos de transmisiones:

- 1) Directa. Si la transmisión se realiza directamente a través de un material sin dispersarse (como el vidrio, por ejemplo).
- 2) Difusa. La luz se desvía en muchas direcciones como ocurre con los materiales translúcidos como el vidrio deslustrado.
- 3) Selectiva. Además ciertos materiales pueden absorber ciertas longitudes de onda. Un filtro de color rojo solo deja pasar las longitudes de ondas correspondientes a esta zona del espectro visible, absorbiendo el resto de los colores.

**Dispersión.** Es un caso de refracción en el que se produce la separación de la luz en sus diferentes longitudes de onda, como el arcoíris. Todos los medios materiales son más o menos dispersivos, como el agua, el vidrio o el aire.

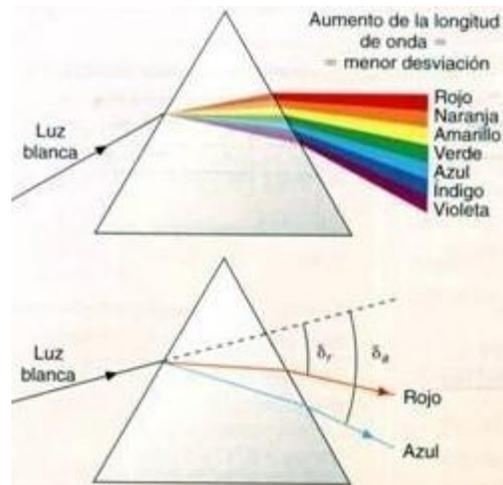


Figura 9: Ejemplo de dispersión de la luz [9]

**Difracción.** Es un fenómeno debido a la naturaleza ondulatoria de la luz. Se produce cuando la luz abandona su trayectoria rectilínea, desviándose y curvándose aparentemente en los bordes de un obstáculo o de un orificio cuyo tamaño es menor o comparable a la longitud de onda de la luz. Cuanto menor es el obstáculo más notable es el fenómeno de la difracción. La difracción de la luz es difícil de observar debido a que la longitud de onda es pequeña en comparación con el tamaño de los objetos corrientes. La difracción en una abertura circular repercute en la resolución de los instrumentos ópticos.

La difracción es junto con la interferencia un fenómeno típicamente ondulatorio. La difracción se observa cuando se distorsiona una onda por un obstáculo cuyas dimensiones son comparables a la longitud de onda. [10]

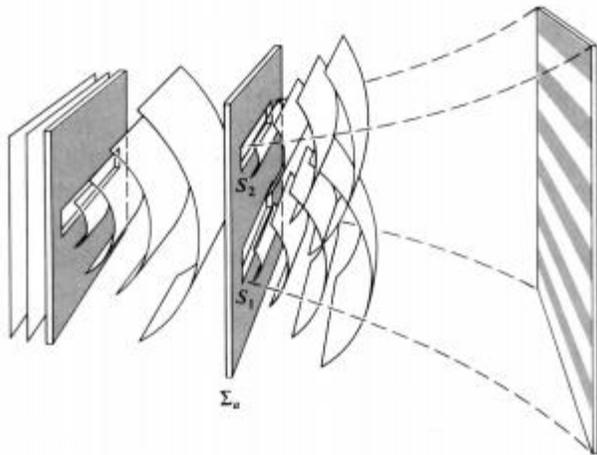


Figura 10: Experimento de Young o de doble rejilla ejemplificando el fenómeno de difracción y comprobando la naturaleza corpuscular de la luz.

Polarización. También se debe al carácter ondulatorio de la luz. La luz puede considerarse como un conjunto de ondas que se desplazan en planos de todas las direcciones perpendiculares a la dirección de movimiento.

Bajo ciertas circunstancias las ondas de luz se ven obligadas a vibrar en un solo plano. Esta luz se llama polarizada y el plano restante es el de polarización. Los tipos de polarización más comunes son el lineal y el circular (Figura 11), que indican la proyección del plano de desplazamiento de la onda.

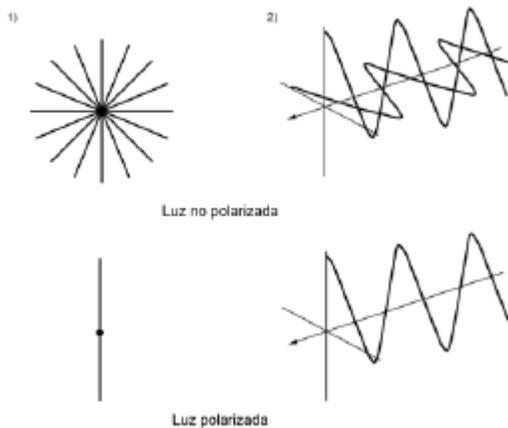


Figura 11: Ejemplos de luz polarizada y luz no polarizada

El ojo humano no puede distinguir normalmente si una luz es o no polarizada, pero se pueden producir ciertos efectos visuales y fotográficos. Para ello se emplean filtros polarizadores (lineales y circulares), que están compuestos por dos cristales polarizadores, de manera que rotando uno de ellos se ajusta el efecto deseado. En la Naturaleza frecuentemente se producen varios de todos estos fenómenos simultáneamente. [11]

Polarización atmosférica. Una gran parte de la luz atmosférica está polarizada. Según se puede comprobar mediante un filtro polarizador, la mayor parte de la luz polarizada proviene de una zona del cielo que se encuentra perpendicular a la posición del sol. Si éste se encuentra cerca del horizonte, la zona de polarización se concentra en una franja de unos 30° de anchura que se distribuye de horizonte a horizonte pasando por el cenit. Por el contrario, si el Sol se encuentra alto en el cielo la zona de polarización se sitúa cercana al horizonte a lo largo de éste.

La luz de las nubes no está polarizada, de manera que mantienen su brillo con un filtro polarizador, lo que se aprecia claramente cuando se encuentran en la zona de máxima polarización del cielo, contrastándose notablemente con el cielo.

Con un filtro polarizador también se reduce la luz atmosférica entre el observador y el objeto. Este efecto se acentúa más en los días en que la atmósfera está limpia de partículas, lo cual permite percibir mejor los objetos lejanos, al aumentar la perspectiva de distancia. Además los colores del paisaje y de los objetos se mostrarán más saturados, al eliminarse en gran parte el velo azulado debido a la dispersión atmosférica. [12]

Polarización por reflexión Como se ha señalado más arriba en toda reflexión se produce una cierta absorción por parte de la superficie reflectante. Las sustancias lisas y no metálicas absorben la luz que se encuentra polarizada en la dirección perpendicular a su superficie, de manera que la luz reflejada en el plano paralelo a la superficie se encuentra muy polarizada.

La polarización por reflexión tiene una fuerte dependencia con el ángulo de incidencia de la luz. La máxima polarización se produce, para una sustancia determinada, cuando el rayo reflejado es perpendicular a la dirección del rayo refractado en la sustancia. Este ángulo es conocido como ángulo de Brewster o ángulo de polarización, aunque alrededor de este valor también hay una polarización importante.

El ojo humano es débilmente sensible a la polarización, sin la necesidad de filtros, mediante un fenómeno llamado haz de Haidinger. La luz polarizada crea una figura muy tenue, en forma de doble huso de color amarillento, de unos 2° o 3° de longitud y situado en el centro del campo visual. La orientación de la figura está relacionada con el plano de polarización de la luz, de manera que su eje mayor es perpendicular al plano de polarización.

Algunas personas son más sensibles al haz de Haidinger, de manera que lo pueden ver mirando a un cielo despejado. [5].

#### d. EL LÁSER

##### i. Propiedades del láser

¿Qué hace que el láser sea diferente a los otros tipos de luz? Primero que todo, la luz que emana de un foco convencional se dispersa en todas direcciones en cambio el haz láser viaja en una sola dirección.

Para que un haz de luz pueda llamarse láser debe cumplir con ciertas reglas.

- Lo primero es que debe ser monocromática; esto es que debe ser de un solo color o longitud de onda. La mayoría de los láseres producen varias longitudes de onda, pero siempre hay una que domina sobre las otras.
- Debe ser coherente. El láser presenta dos tipos de coherencia, en el espacio y en el tiempo.

La coherencia en el espacio está relacionada con el ancho de banda finito de la fuente de luz [13] y se refiere a que los fotones que se transmiten de manera que todas las crestas coinciden al igual que los valles logrando así crear una sola onda

La coherencia en el tiempo está relacionada con la extensión finita en el espacio de la fuente [13] y se refiere a la emisión de las ondas en intervalos muy precisos, lo cual se parece mucho a la forma en que un oscilador produce una salida a una frecuencia específica.

- Finalmente la luz láser debe ser colimada. Esto es que el haz no diverge (se mantiene enfocado). [6]

##### ii. Principios del láser

La palabra LASER es el acrónimo de Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation. Los láseres, sin importar su tipo, estilo o aplicación, tienen cuatro componentes básicos:

- Medio Activo: Los medios activos pueden ser elementos como rubí, Nd:YAG, tintes líquidos, gases como CO<sub>2</sub> o Helio-Neón, semiconductores como GaAs. Los medios activos contienen átomos cuyos electrones pueden ser excitados a estados de energía metaestables a través de una fuente de energía.
- Mecanismo de excitación: los mecanismos de excitación bombean energía al medio activo por medio

de uno o más de los tres métodos básicos: óptico, eléctrico o químico.

- Espejo de alta reflectancia: es un espejo que esencialmente refleja el 100% de la luz láser.
- Espejo parcialmente transmisivo: es un espejo que transmite menos del 100% de la luz láser y transmite la diferencia

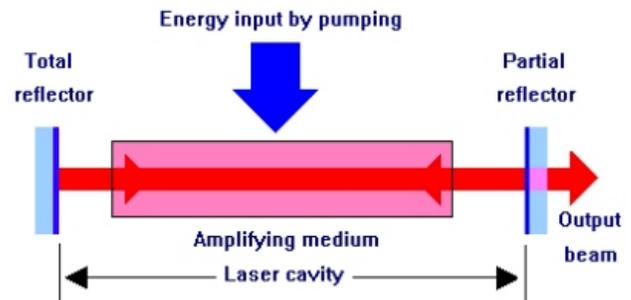


Figura 12: Esquema básico de un Sistema láser. [13]

##### iii. Tipos de láseres

En la actualidad se pueden encontrar los siguientes tipos de láser:

- Estado Sólido

Los de estado sólido, como medio láser, usualmente emplean sustancias como rubí sintético, Neodimio YAG, o cristales de neodimio dopado. Estos son bombeados por luz muy fuertes como las de xenón. Estos sistemas pueden producir tanto haces pulsantes como haces continuos.

- Líquidos

Los láseres líquidos son muy versátiles ya que estos pueden ser ajustados en longitudes de onda desde el ultravioleta hasta el infrarrojo pero su complejidad y costo hace que no sean muy utilizados.

- Gaseosos

Los láseres de gas proveen la variedad más amplia. Algunos de ellos son:

-Helio – Neón  
Dióxido de Carbono, CO<sub>2</sub>  
Vapor de Cobre  
Argón • Nitrógeno  
Neón • Criptón  
Monóxido de carbono, CO  
Gases Nobles • Helio-Cadmio  
Xenón-Helio  
Excimer (compuesto químicos diversos)

## e. LA ATMÓSFERA

La atmósfera terrestre es la capa gaseosa que rodea a la Tierra. Está compuesta principalmente por nitrógeno (78,1%) y oxígeno (20,94%), con pequeñas cantidades de argón (0,93%) y dióxido de carbono (0,033%), y proporciones aún menores de vapor de agua, neón, helio, criptón, hidrógeno y ozono. También hay partículas sólidas y líquidas en suspensión (aerosoles), tanto de origen inorgánico como orgánico y de procedencia natural o debida a la actividad humana.

Los componentes de la atmósfera se encuentran concentrados cerca de la superficie, comprimidos por la atracción de la gravedad. Conforme aumenta la altura la densidad de la atmósfera disminuye con gran rapidez. En los 5,5 kilómetros más cercanos a la superficie se encuentra la mitad de la masa total y antes de los 15 kilómetros de altura está el 95% de toda la materia atmosférica. El aire mantiene la proporción de los distintos componentes de gases atmosféricos casi invariable hasta los 80 km. de altura.

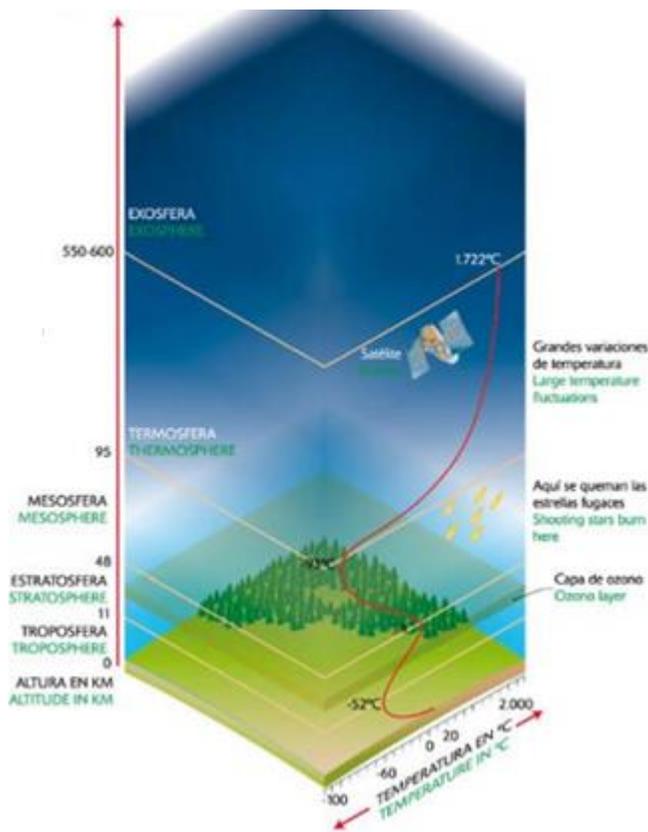


Figura 13: Capas de la atmósfera

La atmósfera se puede dividir en diferentes Capas:

1. La troposfera, que abarca hasta un límite superior llamado tropopausa que se encuentra a los 9 Km en los polos y los 18 km en el ecuador. En ella se producen importantes movimientos verticales y horizontales de

las masas de aire (vientos) y hay relativa abundancia de agua, por su cercanía a la hidrosfera<sup>7</sup>. Por todo esto es la zona de formación de las nubes y de los fenómenos climáticos: luvias, vientos, cambios de temperatura, etc. En la troposfera la temperatura va disminuyendo con la altitud, hasta llegar a -70° C en su límite superior.

2. La estratosfera comienza a partir de la tropopausa y llega hasta un límite superior llamado estratopausa que se sitúa a los 50 kilómetros de altitud. En esta capa la temperatura cambia su tendencia y va aumentando hasta llegar a ser de alrededor de 0°C en la estratopausa. Casi no hay movimiento en dirección vertical del aire, pero los vientos horizontales llegan a alcanzar frecuentemente los 200 km/h, lo que facilita el que cualquier sustancia que llega a la estratosfera se difunda por todo el globo con rapidez. En esta parte de la atmósfera, entre los 30 y los 50 kilómetros, se encuentra el ozono.
3. La Mesosfera, se extiende de los 50 a los 80 km. de altura y contiene solo el 0,1 % de la masa total del aire. En la mesosfera la temperatura disminuye con la altura hasta llegar a unos -80° C. En esta capa tienen lugar fenómenos de ionización y reacciones químicas, y es aquí donde se observan los meteoros que se desintegran en la termosfera. En límite superior constituye la mesopausa.
4. La termosfera o ionosfera constituye la parte permanentemente ionizada de la atmósfera debido a la radiación solar. Puede alcanzar temperaturas de 1.500 ° C (por eso se le denomina asimismo termosfera), aunque la densidad del medio es muy baja. Se extiende desde la mesopausa hasta más allá de los 500 km. de altura, formando la zona inferior de la magnetosfera<sup>8</sup>. La ionosfera permite que la atmósfera superior refleje las ondas de radio emitidas desde la superficie terrestre posibilitando las telecomunicaciones. En las zonas polares se forman las auroras por efecto del viento solar.
5. La exosfera es la capa superior de la atmósfera, a partir de los 650 km., y en contacto con el espacio exterior. En esta capa la temperatura no varía y el aire pierde sus cualidades fisicoquímicas. Su límite superior se localiza a altitudes que superan los 1.000 km, haciendo de zona de tránsito entre la atmósfera terrestre y el espacio interplanetario. [5]

## f. MODULACIÓN

Transmisión de una señal a la frecuencia deseada, pero variando alguna característica de la señal (o sea, modulando la señal) de forma proporcional al mensaje o señal que queremos transmitir.

¿Por qué se modulan las señales? El proceso de modulación supone una adaptación de la señal al medio de transmisión por el cual va a propagarse.

Normalmente implica la alteración de su banda de frecuencias para transmitir la señal en una gama de frecuencias más adecuada. La necesidad de modular viene dada por la imposibilidad de la propagación de la señal en su banda de frecuencias “base”, o en superar las dificultades que representa esta propagación. [14]

- **Señal portadora:** Señal de alta frecuencia, normalmente de tipo senoidal, que sirve de soporte para trasladar la frecuencia de la señal moduladora.
- **Señal moduladora:** Señal procedente del transductor. Es el mensaje a transmitir.
- **Modulación:** Modificación de algún parámetro de una señal por otra.
- **Señal modulada:** Combinación de las señales moduladora y portadora. Es la señal que se emite. [15]

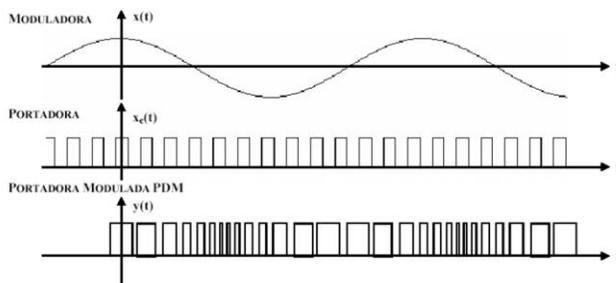


Figura 14: Partes de una señal modulada. [16]

## g. FREE SPACE OPTICS

Imagina una tecnología que ofrece full-duplex, rendimiento Gigabit Ethernet. Una tecnología que se puede instalar sin licencia en todo el mundo, y se puede instalar en menos de un día. Una tecnología que ofrece una forma rápida, alto ROI. Esa tecnología es Óptica de espacio libre (FSO). Este enfoque de la tecnología de línea de visión utiliza rayos invisibles de la luz para proporcionar conexiones de ancho de banda óptica. Es capaz de enviar hasta 2,5 Gbps de datos, voz y comunicaciones de vídeo de forma simultánea a través del aire que permite la conectividad de fibra óptica sin necesidad de cable de fibra óptica física. Permite comunicaciones ópticas a la velocidad de la luz. Y es la base de una nueva categoría de productos. FSO es una tecnología de línea de visión que utiliza rayos invisibles de la luz para proporcionar conexiones de ancho de banda

óptica que pueden enviar y recibir voz, video, datos e información. Esta conectividad óptica no requiere cable de fibra óptica caro o licencias de espectro de sujeción para las soluciones de radiofrecuencia (RF). La tecnología FSO requiere luz. El uso de la luz es un simple concepto similar a las transmisiones ópticas usando cables de fibra óptica; la única diferencia es el medio. La luz viaja a través del aire más rápido que lo hace a través del cristal, por lo que es justo para clasificar la tecnología FSO como comunicaciones ópticas a la velocidad de la luz. [17]

Óptica de Espacio Libre (FSO), también conocido como Wireless Optical o Lasercom (es decir Comunicaciones láser), es una tecnología reemergente usando rayos ópticos modulados para establecer a corto, mediano o largo alcance de transmisión inalámbrica de datos. La mayor parte de la atención en los sistemas de comunicación del FSO inicialmente fue hecha con fines militares y el primer desarrollo de esta tecnología fue dedicado a la solución de problemas relacionados con las aplicaciones de defensa. El mercado de hoy para FSO se refiere a los dos escenarios civiles y militares que abarcan diferentes situaciones y diferentes ambientes, desde submarino a espacio. En particular, debido a la alta frecuencia portadora de 300 THz y el consiguiente gran ancho de banda, la ventaja más destacada de óptica de espacio libre (FSO) son los enlaces de comunicación que puede ser su potencial de muy altas velocidades de datos de varios Gbps (hasta 160 Gbps en sistemas de demostración). Otras ventajas como la operación sin necesidad de licencia, de fácil instalación, disponibilidad comercial, y la insensibilidad a las interferencias electromagnéticas, atascos o escuchas telefónicas hacen FSO interesante para aplicaciones como acceso de última milla, la comunicación aérea y desde satélites, enlaces temporal de teléfonos y conexiones permanentes entre los edificios. Principalmente, es necesaria la adopción de FSO cuando una conexión física no es una solución viable y cuando se solicita para manejar un ancho de banda alto. Como cuestión de hecho, FSO es la única tecnología, en el escenario inalámbrico, capaz de conceder ancho de banda de varios Gigabits por segundo. El interés en esta tecnología también se debe a la exigencia inicial baja CAPEX (gastos de capital), a la intrínseca protección de datos de alto nivel y la seguridad, a la buena flexibilidad y gran escalabilidad innata en esta solución. Por estas razones FSO crea posibles aplicaciones que abarcan actualmente, como se ha mencionado, una amplia gama. Así, esta tecnología genera interés en varios mercados: la primera / última milla en zonas urbanas densas, acceso a la red para instalaciones aisladas, de alta velocidad LAN-to-LAN (redes de área local, conexión de red transitorio y temporal, bajo la superficie y las comunicaciones espaciales. Además FSO se puede utilizar como una alternativa o actualización complemento a las tecnologías inalámbricas existentes cuando las condiciones climáticas permiten su uso completo. [18].

#### h. Historia de Free-Space Optics

Originalmente desarrollado por los militares y la NASA, FSO ha sido utilizado por más de tres décadas en diversas formas para proporcionar enlaces de comunicaciones rápidas en lugares remotos. LightPointe tiene una amplia experiencia en este campo: sus principales científicos en los laboratorios de desarrollo de sistemas FSO prototipo en Alemania a finales de 1960, incluso antes de la llegada de la fibra óptica. Se puede ver una copia del libro blanco FSO originales en alemán, publicado en Berlín, Alemania, en la revista Nachrichtentechnik, en junio de 1968 por el Dr. Erhard Kube, Jefe Científico de LightPointe y ampliamente considerado como el "padre de la tecnología FSO".

Mientras que las comunicaciones de fibra óptica van ganando aceptación en todo el mundo y en la industria de las telecomunicaciones, las comunicaciones de FSO se consideran aun relativamente nuevo. La tecnología FSO permite capacidades de transmisión de ancho de banda que son similares a la fibra óptica, usando transmisores y receptores ópticos similares e incluso que permitan tecnologías-WDM Como para operar a través del espacio libre. [17].

#### i. Como funciona FSO/Comunicación laser

La tecnología FSO es sorprendentemente simple. Se basa en la conectividad entre las unidades ópticas inalámbricas basados en FSO, cada uno compuesto de un tranceptor óptico con un transmisor y un receptor para proporcionar full-duplex capacidad bidireccional. Cada unidad inalámbrica óptica utiliza una fuente óptica, además de un lente o telescopio que transmite luz a través de la atmósfera a otra lente que recibe la información. En este punto, la lente receptora o telescopio se conecta a un receptor de alta sensibilidad a través de fibra óptica. Este enfoque de la tecnología FSO tiene una serie de ventajas: No requiere licencias de espectro RF. Es fácilmente actualizable, y sus interfaces abiertas apoyan equipo de una variedad de vendedores, que ayuda a las empresas y proveedores de servicios a proteger su inversión en infraestructuras de telecomunicaciones integradas. No requiere de actualizaciones de software de seguridad. Es inmune a las interferencias de radio frecuencia o la saturación. Puede ser desplegado detrás de las ventanas, lo que elimina la necesidad de costosos derechos de azotea. [17]

#### j. Ventajas de usar la tecnología de Free-Space Optics

##### Alto Rendimiento

- Esta tecnología permite velocidades de hasta 2.5 Gbps que llega a ser una velocidad sorprendente y necesaria para empresas de gran flujo de datos e información.

##### Instalación Rápida

- La instalación en comparación con la fibra óptica es súper rápida, ya que simplemente se monta los tranceptores y se configuran y en unas cuantas horas la conexión se realiza.

##### Alta confiabilidad

- La confiabilidad de esta tecnología es muy alta, de 99.999% en condiciones óptimas.

##### Libre de licencias

- En comparación con las transmisiones de radiofrecuencia y otras más, esta es totalmente libre y no se tiene que pagar por su uso.

##### Son cuota mensual de alquiler

- No depende de compañías de telecomunicaciones las cuales cobran un alquiler para brindar el servicio.

##### No se necesitan cables

- Si el área es muy retadora o su uso es temporal el uso de cables sería difícil de instalar o un gasto innecesario. Es por eso que esta tecnología es ideal para esos entornos.

##### Operación con diversas tecnologías

- Es compatible con diversas tecnologías como BroadBand radio, Microwave, WiFi, MMW.

##### Totalmente gestionable

- Fácil de configurar e instalar

##### Redundante

- Se puede hacer una redundancia de la red con el cableado existente o radiofrecuencia.

##### Altamente seguro

- A diferencia de la tecnología WiFi que se dispersa en todas direcciones. El haz láser que transmite la información por el medio va por una sola vía y su luz puede ser invisible y usa técnicas de seguridad.

##### Seguro y amigable con el medio ambiente.

- No es una tecnología contaminante ni dañina para el ser humano. [19] [20]

k. Efectos atmosféricos que afectan la tecnología de óptica en espacio abierto

Es bien sabido que las nubes, lluvia, nieve, niebla, neblina, la contaminación, etc., son factores atmosféricos que afectan a nuestra visión de los objetos distantes. Estos mismos factores también afectan a la transmisión de un haz de láser a través de la atmósfera. Como la transmisión a través de las nubes o la niebla pesada o neblina normalmente no es posible, debido a la atenuación supera varias decenas de dB = km, Sin embargo, la señal bajo cielo despejado, las condiciones climáticas se atenúa debido a la extinción causada por las moléculas de aire y aerosoles. [21]

La absorción de agua puede atenuar una señal óptica. Una mañana con niebla es un buen ejemplo de excesivo vapor de agua que puede atenuar la señal. El sistema de óptica de espacio abierto emplea longitudes de onda de 850 nm o 1550 nm, muy lejos de las longitudes de onda que son absorbidas por el agua. No obstante la neblina extrema aunado con distancias pueden atenuar una señal óptica a un nivel bajo de la comunicación confiable. [22]

La atenuación atmosférica también presenta otro problema. La cantidad de atenuación puede cambiar con las condiciones del clima. Por estas razones, cercanamente todos los sistemas Wireless ópticos emplean control de poder de transmisor activo para establecer un poder como mínimo necesario para las comunicaciones confiables y levantar el poder así como incrementa la atenuación. Para activamente limitando la cantidad de poder transmitido, se mejora aún más las seguridad.

B. PROBLEMA

a. Declaración del problema

¿Qué efectos causan los fenómenos físicos de la Difracción y la Polarización en la transmisión de audio por medio de PWM?

b. Justificación

Las comunicaciones ópticas de espacio abierto se empezaron a estudiar y a investigar ya que es una tecnología que prácticamente es nueva y es una rama de las comunicaciones que tiene mucho que explotar. Las comunicaciones por láser hoy en día no son muy usadas en todas partes en comparación con las antenas wireless, pero tienen un futuro prometedor ya que tienen ventajas significativas sobre los métodos de comunicación convencionales. Algunas de las ventajas de estas tecnologías son la inmunidad a las interferencias electromagnéticas, la velocidad de transmisión y las grandes cantidades de información a transmitir.

Para poder disfrutar de estas ventajas hay que atravesar problemas que son generados por los fenómenos atmosféricos y es ahí donde se estudiara el comportamiento de estos.

Otra de las razones para utilizar comunicaciones ópticas de espacio abierto es que son de bajo costo en contraste con la fibra óptica, las cuales pueden elevarse tres veces más el precio de instalación. Otra ventaja es la instalación rápida de estos sistemas que duran menos que las instalaciones de fibras ópticas y no se diga de los servicios de reparación de las fibras que pueden durar más tiempo y ser muy costosas. Con la tecnología óptica de espacio abierto se reduciría el tiempo y el dinero invertido.

Cada vez más tener acceso a la tecnología óptica de espacio abierto se hace menos costoso y por ende los usuarios aumentan. Esta tecnología es cambiante y no solo se utilizara en espacios atmosféricos abiertos, también se utilizara en espacios controlados como edificios.

C. OBJETIVOS

Estudiar los efectos de la difracción y la polarización en un ambiente controlado simulando algunos fenómenos atmosféricos para analizar el comportamiento tanto del haz láser como el de información modulada aplicada a sistemas de comunicación en espacio abierto.

D. PREGUNTAS E HIPÓTESIS

a. Preguntas de investigación de la investigación mayor que se responden en la investigación parcial.

¿Qué efecto tiene la polarización y la difracción por transmisión de audio por medio de PWM?

¿Qué efectos causa la polarización y la difracción en la transmisión de información a través del espacio abierto, tomando en cuenta los fenómenos atmosféricos más concurrentes?

b. Hipótesis: aquellas de la investigación mayor, si existen, que han de probarse en la investigación parcial.

La transmisión de audio en óptica de espacio abierto es sensible a los fenómenos de la difracción y polarización en el medio.

II. METODOS

En el laboratorio se armó un sistema laser de modulación por ancho de pulso (PWM). Marca Ramsey el cual tiene un emisor en un extremo y en el otro un receptor. La modulación de ancho de pulso es una técnica para modular la información que viaja sobre el medio. Se usa en inversores DC/AC monofásicos y trifásicos. Se basan en la comparación de una señal de referencia a modular y una

señal portadora de forma triangular o diente de sierra (Figura 11); la comparación generará un tren de pulsos de ancho específico que se utilizan en la conmutación del puente inversor. La relación entre la amplitud de la señal portadora y la señal de referencia se llama índice de modulación y se representa por  $m_a$  (2), donde  $A_r$  es la amplitud de la señal de referencia y  $A_c$  es la amplitud de la señal portadora. El índice de modulación permite obtener tensión variable a la salida del Inversor. [15]

$$m_a = \frac{A_r}{A_c}$$

$$m_f = \frac{F_r}{F_c} \quad (2)$$

La relación entre la frecuencia de la señal portadora y la frecuencia de referencia se denomina índice de frecuencia y se representa por  $m_f$ , idealmente  $m_f$  debe ser mayor a 21 y la frecuencia de la portadora múltiplo de la frecuencia de la señal de referencia. El índice de frecuencia determina la distorsión armónica de la señal de salida la cual es una medida de su contenido armónico. La variación de la señal de referencia y la secuencia de conmutación dan como resultado diferentes técnicas de modulación PWM, cada una modifica la eficiencia de la conversión, las pérdidas por conmutación en el puente inversor y la pureza de la señal de salida. [23]

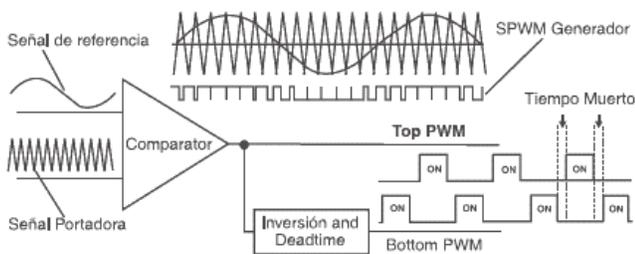


Figura 15: Circuito generador escalar PWM.

El método que se utilizó para obtener las mediciones realizadas para saber el comportamiento del haz laser cuando se polariza, consistió en colocar un material polarizador en medio del transmisor y receptor buscando el ángulo indicado para no dejar pasar la luz polarizada del láser y el ángulo para dejar pasar esa luz polarizada. Una vez que se encontró el ángulo de 90° donde el haz láser polarizado no traspasaba el material polarizador, ahí se empezaron las mediciones como referencias, de esa forma se fueron cambiando los ángulos de forma decreciente

hasta llegar a 0°, buscando cual era la relación de la calidad del sonido y grados de polarización.

EL experimento que se realizó para obtener las mediciones de los diferentes haces refractados o mejor conocidos como ordenes de difracción consistió en colocar en medio del transmisor y el receptor laser dos tipos de rejillas de difracción también llamadas red de difracción, una de 50 líneas/mm y otra de 25 líneas/mm la diferencia de estas son la cantidad de líneas en un milimetro. En la red de difracción se muestran las rejillas las cuales son iluminadas por un haz de luz monocromática de 650 nm.

El experimento se centró en medir las intensidades de los órdenes de difracción 0,  $\pm 1$  y  $\pm 2$  o también dicho en relación a la figura 18. Los órdenes de difracción de 0,  $\pm \pi$  y  $\pm 2\pi$ . La siguiente ecuación (3) indica la apertura entre cada orden de difracción.

$$V = \left| \text{sinc} \left( \frac{a\pi w}{s\lambda} \right) \right| = \left| \text{sinc} \left( \frac{a\pi b}{\lambda} \right) \right| \quad (3)$$

Donde:

- a = distancia entre las rejillas
- l = distancia frente rejillas (plano objeto)
- s = Distancia entre los planos objeto e imagen
- b = extensión de la fuente (plano objeto)
- w = Separación entre franjas (plano imagen)
- $\lambda$  = Longitud de onda de iluminación

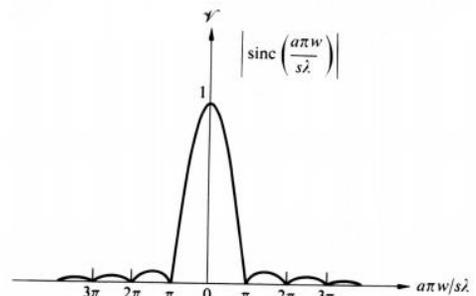


Figura 18: Forma del orden de difracción a partir de la ecuación de vista. [13]

$$\text{Longitud de onda} = \text{distancia} * \sin \Theta$$

Primero se hicieron las mediciones en la rejilla de difracción de 50 líneas/mm y después en la rejilla de difracción de 25 líneas/mm, de esta forma se obtuvieron mediciones de los 3 órdenes de difracción de los dos tipos de rejillas que se utilizaron para los experimentos.

Las mediciones que se tomaron fueron los órdenes de difracción 0, que fue el más brillante y los órdenes de difracción  $\pm \pi$  y  $\pm 2\pi$  que eran más tenues que el orden 0 tanto de la rejilla de 50 líneas/mm como la de 25 líneas/mm.

### III. RESULTADOS

Se obtuvieron las medidas óptimas para realizar una transmisión de información hacia el receptor considerando dos distintos fenómenos físicos generados por los fenómenos atmosféricos.

#### A. Polarización

Como se muestra en la figura 20. El transmisor láser generó luz coherente de 650 nm que incidió sobre el polarizador a 90 grados. Esto quiere decir en este caso, que la onda transversal de la luz o el campo eléctrico tienen la misma orientación de polarización que el polarizador y es por eso que la luz no logra pasar y el haz incidente es bloqueado por los polarizadores.

En el caso de la figura 19, la onda transversal de la luz o el campo eléctrico no tienen la misma orientación de polarización que el polarizador y es por eso que la luz logra pasar y el haz incidente no es bloqueado por los polarizadores.

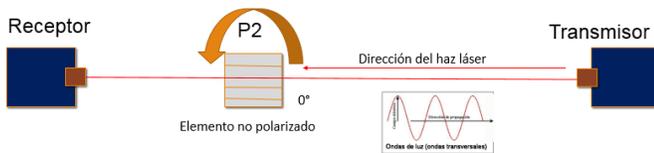


Figura 19: Esquema de polarizador a 0°

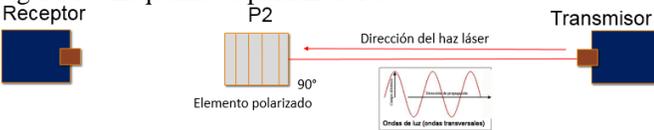


Figura 20: Esquema de polarizador a 90°

La siguiente gráfica muestra la relación entre los voltajes absolutos del circuito receptor y los grados del polarizador.

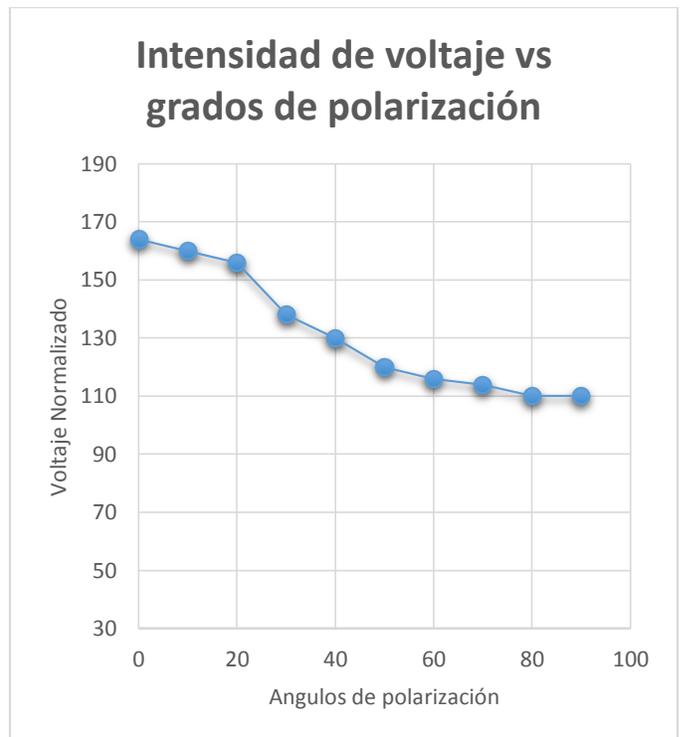


Figura 20: Gráfica de intensidad de voltaje vs grados de polarización

#### B. Difracción

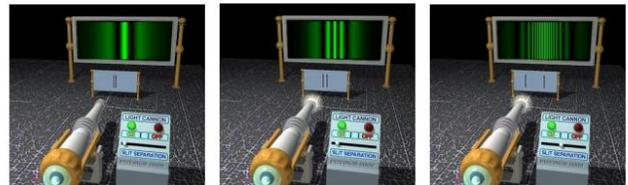


Figura 21: Diferencia entre las distancias de las rejillas [13]

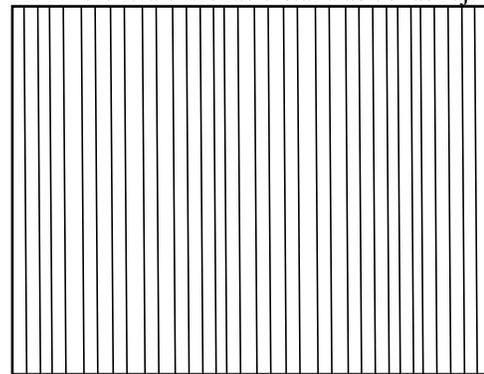


Figura 22: Ejemplo de red de difracción o rejillas de difracción de 25 líneas/mm

La siguiente gráfica muestra los voltajes de cada haz láser difractado por la rejilla de difracción de 50 líneas/mm (figura 22). Las mediciones fueron realizadas de los órdenes de difracción de 0, ±1 y ±2, tomando como referencia el haz de en medio que tiene más intensidad.

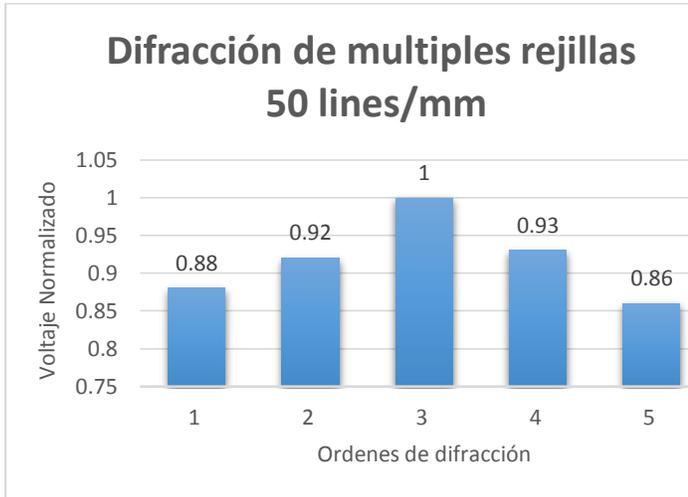


Figura 23: Difracción de múltiples rejillas 50 líneas/mm  
Difracción múltiple por rejilla de 20um.

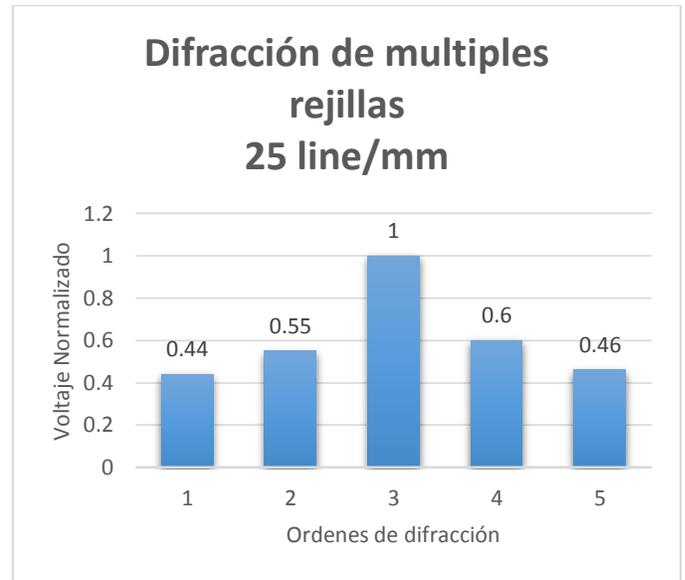


Figura 25: Difracción de múltiples rejillas 25 líneas/mm

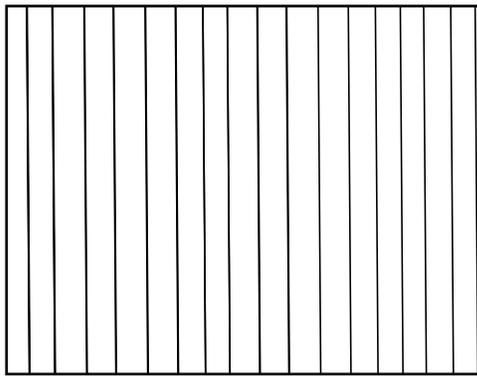


Figura 24: Ejemplo de red de difracción o rejillas de difracción de 25 líneas/mm

La siguiente grafica muestra los voltajes de cada haz laser difractado por la rejilla de difracción de 25 líneas/mm (figura 24). Las mediciones fueron realizadas de los órdenes de difracción de 0,  $\pm 1$  y  $\pm 2$ , tomando como referencia el haz de en medio que tiene más intensidad.

#### IV. CONCLUSIONES

##### A. Discusión de resultado

En el experimento de polarización, en la gráfica de la figura 20. Se logró observar que a medida que el polarizador se va acercando a los  $90^\circ$  (la misma orientación de polarización que el haz incidente) el voltaje absoluto disminuye, esto se traduce que la transmisión disminuye en calidad de información y también en intensidad del haz laser.

Difracción. En el experimento de difracción el haz laser se difracta en muchos ordenes de difracción, los que nos interesaron fueron los 3 órdenes de difracción centrales. En las gráficas de las figuras 23 y 25, se logró observar que el orden de difracción 0 (la columna 3) a pesar de sufrir el fenómeno de difracción, la intensidad del haz laser incidente fue fuerte y sin perdidas de calidad de sonido. Los órdenes de difracción  $\pm 1$  (columnas 2 y 4) y  $\pm 2$  (columnas 1 y 5) sufrieron leves degradaciones de la calidad del sonido y de intensidad laser, esto se traduce que la calidad del audio no se compromete a grados críticos a pesar de que el haz laser haya sufrido el efecto de la difracción.

##### B. Conclusiones de la investigación:

En los experimentos de polarización se encontró que este fenómeno físico afecta a la transmisión del sistema FSO realizada por una modulación de PWM. En la gráfica de la figura 20 se logra observar la disminución de voltaje en el fotodiodo receptor conforme el haz laser se va polarizando, tomando como referencia un voltaje alto en las terminales del receptor cuando transmite y un voltaje bajo cuando no transmite. Cuando el haz laser incidente no está polarizado, la transmisión es óptima y de calidad, en contraste cuando el haz laser incidente esta polarizado la transmisión se debilita y disminuye la calidad.

En los experimentos de difracción se encontró que este fenómeno físico no afecta la transmisión del sistema FSO realizada por una modulación de PWM.

### C. Reflexión

Este Proyecto ha sido para mí un reto profesionalmente ya que se necesitó investigar, probar, experimentar, construir, reparar y muchas otras cosas. Pero también fue un motivador y de crecimiento personal ya que me ayudo a poner más empeño en las clases para poder tener tiempo para realizar este proyecto de investigación. Creo que mi aporte a esta investigación fue mínimo, ya que hay más variables para estudiar y profundizar.

### D. Recomendaciones

Se recomienda realizar pruebas de polarización con otro tipo de modulación diferente a PWM. También se recomienda hacer experimentos con otros tamaños y mediadas de rejillas difracción o redes de difracción para poder observar los comportamientos del haz láser.

### E. Futuros aporte

Los futuros aportes para la investigación medular es realizar experimentos con los fenómenos físicos de refracción y reflexión y los distintos fenómenos atmosféricos que los causan. También realizar experimentos con diferentes tipos de modulación, diferente tipo de transmisión y diferentes tipos de láseres con diferentes longitudes de onda (colores) para observar las mejoras en una transmisión de audio y video si las hay.

## V. REFERENCIAS

- [1] A. Arias Gonzalez, «¿Que es la luz?,» *Lapen*, vol. 2, n° 1, 2008.
- [2] K. R. Monsalvo, «Radiación Electromagnética,» Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, 2009.
- [3] «¿Que es la luz?,» *Edvcatio Fisticorvn*, p. 52, 2007.
- [4] J. Barrera Torres, R. L. Pérez Mondragón R, L. F. Terán Mendieta, J. M. Juarez, S. A. Carrillo Araujo, A. R. Sánchez Ornelas, R. Cervantes Pérez y J. Rodriguez Hernández, de *Guía de estudio para presentar el examen extraordinario de física II*, México D.F., Colegio de ciencias y humanidades plantel sur, 2009, p. 10.
- [5] J. C. Casado y M. Serra-Ricart, *Fenomenos Atmosfericos*, Islas Canarias: IAC, 2010.
- [6] J. M. Delgado J., *Anteproyecto para la realización de un reglamento para el uso de equipo médico láser*, San José: Universidad de Costa Rica, 2001.
- [7] S. Burbano de Ercilla, E. Burbano Garcia y C. Garcia Muños, «Óptica Geometrica I,» de *Física General*, Tebar S.L, 2003, p. 578.
- [8] P. N. Fogantini, S. Calderon , G. Corner y Otros., *Física Activa*, As. Argentina: Puerto de Palos, 2001.
- [9] «Fisic,» [En línea]. Available: <http://www.fisic.ch/cursos/primeromedio/refracci%C3%B3n-de-la-luz-y-ley-de-snell/>. [Último acceso: 1 abril 2014].
- [10] V. H. Rios, *Fisica III*, México, 2013.
- [11] V. W. Chan, «Free-space optical communications,» *Journal of lightwave technology*, vol. 24, n° 12, pp. 4750-4762, 2006.
- [12] J. M. Bueno Garcia, «Estudio de las propiedades de polarización del ojo humano,» 2011.
- [13] J. Gamio Aranda, *COERENCIA Y LÁSERES*, MADRID: DEPECA, 2002.
- [14] M. H. Oliva Castillo, *Acoplamiento de facimiles a líneas telefónicas analógicas en México*, México D.F.: ESIME, 2013.
- [15] C. Enrique Sanchis, *Fundamentos y Electrónica de las comunicaciones*, Valencia: PUV, 2004.
- [16] U. t. d. Perú, «Modulación por duración de pulso,» de *Introducción a la Ingeniería de Telecomunicaciones* , Lima, TINS Básico, p. 108.
- [17] Light Pointe Wireless, «Light Pointe,» 24 marzo 2014. [En línea]. Available: <http://www.lightpointe.com/>.
- [18] D. M. Forim y G. Incerti, «Free Space Optical Technologies,» *IntechOpen*, p. 257, 2010.
- [19] C. Matsumoto, «Startup eye Free-Space optics to replace fibre,» *Electronic Engineers Time*, p. 6, 2000.
- [20] J. Meyers, «Setting free the optics,» *Telephony*, p. 26, 2000.
- [21] H. Henniger y O. Wilfert, «An introduction of Free-Space optics Optical Communications,» *Radioengineering*, vol. 19, p. 2, 2010.
- [22] L. Desjardin , «Optical wireless-Free Space Optics comes of Ages,» *Fiber optic technologi*, pp. 11,19, 2004.

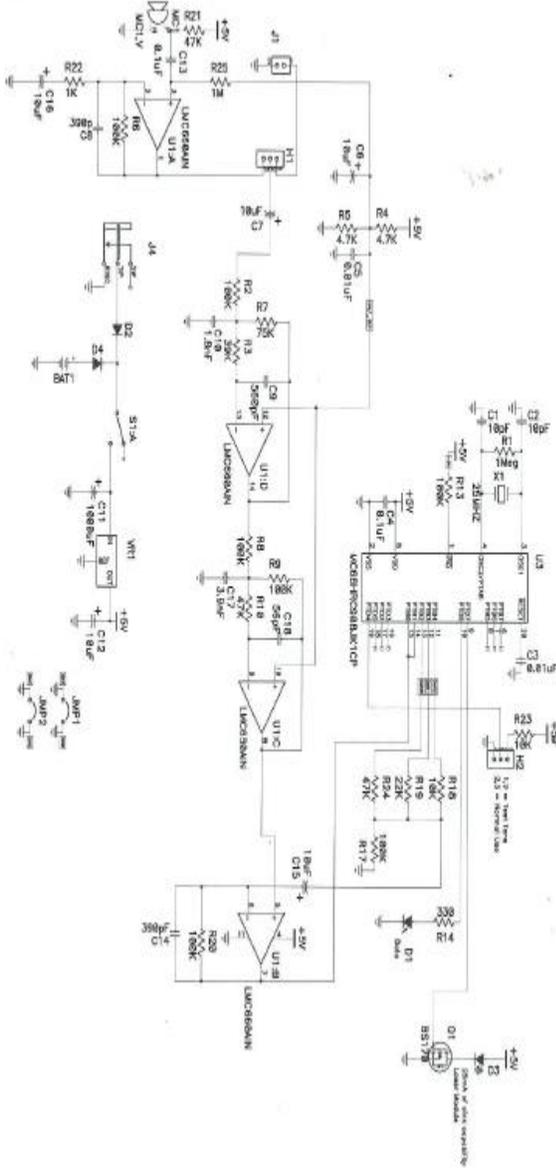
[23] J. Contreras Posada, «Modulación por ancho de pulso (PWM) y modulación vectorial (SVM). Una introducción a las técnicas de modulación,» *Redalyc*, p. 72, 205.

[24] J. C. Casados y M. Sierra.Ricart, *Fenomenos Atmosféricos*, Unidad Didáctica.

## VI. APENDICES

Diagrama esquemático de circuito transmisor

**LBC6K TRANSMITTER BOARD SCHEMATIC DIAGRAM**



## VII.

Diagrama esquemático de circuito transmisor

**LBC6K RECEIVER BOARD SCHEMATIC DIAGRAM**

