

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA



**“La óptica y sus aplicaciones a través de exhibiciones interactivas”**

Que para obtener el grado de  
LICENCIATURA EN INGENIERÍA MECATRÓNICA

Presenta:

**David Asahel Zavala Peñuelas**

**Jorge Adán Collins Higuera**

Mexicali, B.C. Mayo 2016

<b>Índice</b>	<b>Página</b>
<b>Capítulo 1. Introducción</b>	<b>3</b>
1.1 Antecedentes	6
1.2 Objetivo	7
1.3 Meta	7
1.4 Propuesta de exhibiciones	8
<b>Capítulo 2. Conceptos de óptica</b>	<b>11</b>
2.1 Naturaleza de la luz	11
2.2 Reflexión	13
2.3 Refracción	14
2.4 Prismas	16
2.5 Lentes	17
2.6 La lente de nuestro ojo	18
2.7 El color	20
2.8 Interferencia	22
2.9 Polarización	26
2.10 Birrefringencia	27
2.11 Fotoelasticidad	28
2.12 Fuentes de luz	29
2.13 El láser	31
2.14 Fibras ópticas	33
2.15 Curvas de Lissajous	34
<b>Capítulo 3. Planteamiento del programa</b>	<b>37</b>
3.1 Exhibición interactiva “Ojo humano”	37
3.2 Exhibición interactiva “Refracción de la luz”	38
3.3 Exhibición interactiva “El láser y otras fuentes de luz”	40

3.4 Exhibición interactiva “Interferencia”	41
3.5 Exhibición interactiva “Figuras láser tipo Lissajous”	42
3.6 Exhibición interactiva “Transmisión de información a través de fibra óptica”	44
3.7 Exhibición interactiva “Arpa óptica”	45
3.8 Exhibición interactiva “Mezcla aditiva de colores”	46
3.9 Exhibición interactiva “Polarización y birrefringencia”	47
3.10 Exhibición interactiva “Índice de refracción”	48
<b>Capítulo 4. Resultados</b>	50
4.1 Exhibición interactiva “Ojo humano”	50
4.2 Exhibición interactiva “Refracción de la luz”	54
4.3 Exhibición interactiva “El láser y otras fuentes de luz”	57
4.4 Exhibición interactiva “Interferencia”	58
4.5 Exhibición interactiva “Figuras láser tipo Lissajous”	61
4.6 Exhibición interactiva “Transmisión de información a través de fibra óptica”	64
4.7 Exhibición interactiva “Arpa óptica”	66
4.8 Exhibición interactiva “Mezcla aditiva de colores”	69
4.9 Exhibición interactiva “Polarización y birrefringencia”	71
4.10 Exhibición interactiva “Índice de refracción”	74
<b>Capítulo 5. Conclusiones</b>	77
<b>Referencias</b>	80

# Capítulo 1

## Introducción

A lo largo de nuestra historia, la ciencia ha jugado un papel protagónico en el desarrollo de la humanidad, entendiendo ciencia como el conjunto de conocimientos que se derivó del proceso de observación y el razonamiento, el cual permitió en un inicio hacer que el ser humano se valiera de herramientas para sobrevivir y que hoy en día nos sirve para modelar la forma en que vivimos. Dicho conocimiento ha ido evolucionando a través de los años gracias al método científico que funge como plataforma para la documentación y el crecimiento del mismo. Estamos conscientes de que así como la ciencia tuvo importancia en el desarrollo de la vida de nuestros antepasados, hoy en día la tiene y la seguirá teniendo en las futuras generaciones, a través de su manifestación en la tecnología.

Debido a la importancia que ha tenido la ciencia en el desarrollo de la humanidad, actualmente se cuenta con centros de investigación en áreas específicas de la ciencia, que cumplen con la comitiva de desarrollar nuevas tecnologías aplicables en nuestra vida cotidiana. El conocimiento obtenido por medio de las investigaciones no siempre está al alcance de todos, ya sea por ubicación geográfica o simplemente por modelos sociales. Es por ello que en las últimas décadas, surge una actividad que tiene como objetivo informar al resto de la sociedad acerca de los adelantos tecnológicos y científicos que se desarrollan en centros de investigación, por medio de la cual, los científicos exponen sus conocimientos a un público heterogéneo en edades y conocimiento, coloquialmente llamado “público general”. Su foco de atención incluye a aquellos que no se dedican propiamente a “hacer ciencia” en ámbitos formales, sino a aquellos que forman parte de una población que juega un rol en la sociedad menos científico. A este rol de distribución del conocimiento entre un emisor especialista en un tema y un receptor sin conocimiento al respecto se le conoce como: “divulgación de la ciencia”.

La palabra divulgación ha cambiado desde su origen, pues surge del latín vulgo que significa pueblo, muchedumbre, común de las personas de ahí se deriva la palabra vulgar la cual tiene hoy en día connotaciones como superficialidad, ligereza, bajo nivel de educación, etc. Divulgar en su significado primario es hacer público alguna información,

es difundir la información en donde el o los receptores son el común de la población en cuanto a conocimiento se refiere [1]

Carl Sagan (s.f), uno de los principales divulgadores de la Ciencia, afirmaba que vivimos en una sociedad dependiente de las ciencias y la tecnología, en la cual prácticamente nadie sabe nada acerca de la ciencia o la tecnología.

Por ello y con el fin de diversificar en públicos, la divulgación de la ciencia se expresa mediante diferentes técnicas por ejemplo; talleres, cursos, documentales, escritos, programas de televisión, festivales, programas de radio, foros, etc. los cuales se llevan a cabo en instituciones educativas, bibliotecas y parques, entre otros lugares. Sin embargo, existen escenarios que tienen como misión y objetivo hacer divulgación de la ciencia, por lo cual cuentan con la infraestructura y programas educativos orientados al desarrollo de esta actividad. Cada vez se piensa más en estas instituciones como recurso didáctico, como apoyo para la formación y la promoción cultural, hablamos de los Museos y centros de ciencia. Dichos espacios se suman sinérgicamente a una amplia red en la que tienen lugar los aprendizajes, entendiendo por aprendizaje un proceso complejo y permanente, una experiencia acumulativa y de carácter individual [2].

Tanto los museos como los centros de ciencia, buscan promover el aprendizaje y la divulgación del conocimiento y se valen de recursos como la interacción entre visitantes y exposiciones para lograr experiencias educativas. De esta manera se crean ambientes propicios para la popularización de la ciencia y la promoción de cultura científica y tecnológica.

A lo largo de la historia, el concepto de museo ha ido evolucionando para adaptarse a las nuevas tecnologías y existen en consecuencia, diversos tipos y modalidades. Los primeros museos de ciencia se inauguraron hace más de un siglo, uno de los primeros surgió en Estados Unidos cuando el *Franklin Institute* abrió sus puertas en 1824; en la primera parte del siglo XX el *Museum of Science and Industry* de Chicago inauguró en 1926, el *Henry Ford Museum* y el *Greenfield Village* se fundaron en 1929. Pero no fue hasta finales de los sesenta cuando apareció en escena un nuevo estilo de museo de ciencia, conocido como “Centro de ciencia y tecnología” o simplemente, “Centro de ciencia”. Los dos primeros centros de ciencias del mundo fueron; el *Exploratorium* de San Francisco y el *Ontario Science Center* de Toronto abrieron sus puertas en 1969.

El término museo surge de la palabra griega *museiun*, que era un templo de Atenas dedicado a las musas. La misma palabra se utilizó para designar un conjunto de edificios de Alejandría que comprendía una biblioteca, un anfiteatro, un observatorio, salas de trabajo y de estudio, un jardín botánico y una colección [3]

Actualmente los *museos* y en especial los *Centros interactivos de ciencia y tecnología*, son espacios de aprendizaje que permiten a sus visitantes la oportunidad de observar fenómenos inasequibles en la escuela, de participar en experimentos poco comunes o difíciles de realizar, de conocer ejemplos reales contextualizados a escalas apropiadas, y especialmente de fungir como un instrumento de aprendizaje no formal. De la misma manera pueden servir como espacios donde se desarrollan y aplican materiales didácticos, como punto de encuentro que permiten vincular directamente a los museos con el sistema educativo, cuyo éxito dependerá tanto de las posibilidades de interacción que el museo ofrezca, de sus programas de divulgación, así como de sus “*exhibiciones interactivas*”.

En estos escenarios de interacción, es necesario diseñar recursos museográficos que cuenten con equipos mecánicos, electrónicos y multimedia con interfaces innovadoras, todo reunido en modelos físicos llamados “*exhibiciones interactivas*”. Las exhibiciones interactivas son aquellos recursos didácticos en los cuales el visitante puede conducir actividades, recolectar evidencia, seleccionar opciones, formar conclusiones, probar habilidades, proporcionar insumos y, de hecho, alterar una situación basada en un insumo [4]. Tienen como objetivo expresar una idea o incluso un conjunto de ellas; una de sus características principales es que sean capaces de explicar por sí mismas un fenómeno o un concepto teórico. El éxito de ellas está ligado estrechamente al ingenio plasmado, es decir, para llevarlas a cabo tienen que ser funcionales y atractivas en diseño. En esta última característica se hace énfasis, pues para generar exposiciones funcionales es necesario primeramente formular preguntas fundamentales que dicten cómo proponer dichas exhibiciones: ¿a qué público va dirigido?, ¿de qué edad?, ¿con qué frecuencia se usará?, ¿en qué espacios?, ¿cuáles son las condiciones ambientales?, entre otras. Luego de responder esas preguntas, se podrá obtener información que dictará el contexto físico, el cual se refiere a la naturaleza de las exhibiciones interactivas,

a la congruencia de cada una de ellas con las demás y con el ambiente total de la sala expositiva para la cual se está diseñando.

Al diseñar, construir y montar exhibiciones, es necesario prever sus características deseables en términos de su potencial de atracción, entretenimiento y aprendizaje [4]. Algunas de ellas pueden ser: de carácter expositivo, demostrativo o interactivo; su capacidad de facilitar experiencias y resultados, ya sea "cerrados" o "abiertos"; su enfoque a la percepción y estimulación unisensorial o multisensorial; la inclusión en ella de elementos conocidos o verdaderamente novedosos para el público común; su fundamentación en sólo uno o varios principios o fenómenos (y así mismo su representación); su enfoque a ser utilizadas por un sólo usuario o bien a estimular la participación cooperativa; su potencial como recurso de apoyo para la necesaria experimentación en los programas educativos escolarizados.

En este contexto en este trabajo de tesis se presenta una propuesta para divulgar la ciencia a través de exhibiciones en un "centro interactivo de ciencia". Haciendo una conjunción entre conocimientos de Ingeniería mecatrónica y de la Física, se pretende generar un espacio donde se expongan los fenómenos ópticos más comunes.

Fenómenos de óptica ocurren diariamente y son apreciados precisamente por un sistema óptico que forma parte del ser humano, y que además es uno de los principales medios para relacionarse con su entorno. Inclusive una lista larga de dispositivos domésticos e industriales que inciden directa o indirectamente en nuestra calidad de vida, son producto de la óptica. Es por ello que dicho conocimiento es de interés común, he ahí su validez y pertinencia en un museo de ciencia.

## **1.1 Antecedentes**

El Centro Interactivo de Ciencia para el que está dirigida la propuesta de divulgar la ciencia a través de exhibiciones de óptica, es una Asociación Civil que abrió sus puertas en el año de 1998, fue creado con la misión de cultivar el interés de las personas por la cultura, la ciencia la tecnología y el medio ambiente, a través de un contexto de Educación interactiva que propicie la experimentación, la reflexión, el análisis la innovación y la capacidad creadora que fortalezca en ellas su formación integral en un ambiente no formal por medio de exhibiciones interactivas. En estos casi 18 años, este museo ha

recibido cerca de 4 millones de visitantes, en su mayoría niños y jóvenes en edad escolar. A través de sus diversas áreas temáticas este centro emprende una comunicación de la ciencia y la cultura para públicos amplios, desde niños de preescolar hasta universidad; además de maestros, y familias en general.

Para lograr esta importante afluencia, el museo ha buscado mantener un ritmo constante de renovación de sus salas permanentes y con apoyos externos llevo a cabo proyectos de fortalecimiento de infraestructura y de comunicación de la ciencia tales como "Sala de Energía y Medio ambiente" en 2009; "Sala de ciencias de la Tierra" también en 2009. Y la sala de "Ciencia Mágica" en 2012.

## **1.2 Objetivo**

El objetivo de nuestro trabajo es divulgar el área de la óptica mediante *exhibiciones interactivas* que muestren el estado de desarrollo científico y tecnológico en temas como: el color, absorción, reflexión, refracción, esparcimiento, polarizadores, el láser, el diodo emisor de luz LED (por sus siglas en ingles), guías de onda, fibras ópticas, lentes y espejos, la óptica de nuestro ojo y espectro electromagnético y con ello resaltar el valor e impacto que tiene en la cotidianidad.

## **1.3 Meta**

Se busca contar con 10 exhibiciones interactivas de óptica reunidas en una sala las cuales consistirán en equipos mecánicos, electrónicos o de software que tendrán el fin de explicar un fenómeno físico específico. Un eje que se considera importante para el diseño de dichas exhibiciones, es la parte *informativa*; es decir, las *cédulas explicativas*. Se refieren al documento adjunto a la arquitectura de la exhibición que está dirigida al público, en donde se desglosa el contenido escrito y sirve como apoyo para un mejor entendimiento del concepto a expresar. Presenta el conocimiento de una manera clara y atractiva para que tenga un impacto significativo en las personas. Además, contiene elementos gráficos que la identifican como un ente dentro del conjunto de exhibiciones relacionadas.

## 1.4 Propuesta de exhibiciones

A continuación se presenta una introducción a las ideas que más adelante se describirán a detalle. Se trata de la propuesta de 10 exhibiciones interactivas referentes a los temas más importantes de la óptica explicados de manera clara y sin excesivos términos científicos.

La propuesta de exhibiciones interactivas comienza con el sistema óptico principal del ser humano: su propio ojo. En esta exhibición interactiva se presenta a la córnea como la lente básica que, mediante refracción, conduce la luz hasta nuestro sistema de detección: los bastones y conos ubicados en la retina. Asimismo, se muestran los problemas que mayormente afectan la visión humana, como es el caso de la miopía y la hipermetropía, y la manera de corregirlos mediante la inclusión de otros elementos refractivos, los anteojos.

La segunda exhibición interactiva hace alusión precisamente a principio físico detrás del concepto de refracción. En este se explica el cambio de dirección que sufre la luz al pasar de un medio a otro y se introducen conceptos básicos como los ángulos de incidencia y de refracción. Estos conceptos terminan siendo ligados para explicar, de manera sencilla, cómo podemos manipular la luz mediante los lentes, y por qué estos constituyen las piezas fundamentales de cualquier sistema óptico más complejo.

En la tercera exhibición interactiva presenta a la luz visible como una pequeña fracción del espectro electromagnético y se relacionan los colores que vemos con las temperaturas de emisión de los materiales que generan esta radiación. En este módulo se mencionan las principales fuentes de luz, tanto naturales como artificiales, y se describe el concepto fundamental de longitud de onda y su color asociado. Finalmente, se presenta una fuente de luz artificial que juega un papel importantísimo en la tecnología actual, el láser, y se describen, de forma sencilla, sus principios de funcionamiento y los conceptos básicos asociados a este tipo de luz.

La cuarta exhibición introduce un principio básico de la luz como fenómeno ondulatorio: la interferencia. Este concepto se presenta como el resultado de la suma y restas de ondas, además se mencionan las condiciones bajo las cuales el fenómeno puede ocurrir. En el módulo se hace hincapié en las manifestaciones cotidianas del fenómeno de

interferencia, tales como los colores asociados a burbujas de jabón, y se mencionan diversas aplicaciones científicas y tecnológicas basadas en este principio.

Con un propósito más visual que académico, en la quinta exhibición interactiva se hace una descripción somera de un sistema de barrido para un haz láser mediante espejos gobernados por ecuaciones sencillas. Se trata de las llamadas figuras de Lissajous. Estas figuras se obtienen reflejando luz en espejos planos que oscilan en dos direcciones y que son controlados por ecuaciones del movimiento armónico simple. El resultado es definitivamente muy vistoso.

La conducción de la luz en un medio flexible mediante reflexiones totales internas se describe en la exhibición interactiva número seis. Este principio es el fundamento de la transmisión de luz mediante fibras y guías de onda ópticas. En este módulo se presentan las fibras ópticas, sus características y su enorme aplicación como canal de transmisión de grandes cantidades de información a alta velocidad.

Con el objeto de que el visitante interactúe con luz láser, la séptima exhibición interactiva presenta una arpa cuyas cuerdas han sido reemplazadas por haces de luz. Este interactivo resulta muy atractivo y permite no sólo jugar con el instrumento, sino que es posible reconocer el concepto fundamental de la transmisión de información mediante un simple y sencillo sistema de modulación de la amplitud (encendido y apagado). De esta forma, cada cuerda luminosa tocará una nota cuando su haz sea interrumpido por el dedo del arpista.

Un concepto muy usado en colorimetría es presentado en la exhibición número ocho. En este se describe el principio básico de la suma y resta de colores y el mecanismo mediante el cual operan los populares sistemas de codificación del color: RGB y CMY. Esta técnica forma la base de cualquier tecnología cuyo propósito sea la producción de color, desde las pinturas hasta las modernas pantallas de computadoras y la televisión.

Polarización y birrefringencia son descritos en el material de la exhibición nueve. Intentando usar explicaciones sencillas, este módulo presenta a la luz natural como una colección de ondas que oscilan en todas direcciones. Esta luz, llamada no polarizada, difiere de la luz que ha pasado por un polarizador en el sentido de que esta última oscila sólo en una dirección (que está orientada con el eje del polarizador). Algunos materiales,

como la calcita, presentan dos direcciones de polarización, dando lugar al fenómeno de birrefringencia o doble refracción. En el módulo se explican estos conceptos y se mencionan algunos fenómenos naturales que pueden ser explicados por dichos efectos ópticos.

Finalmente, en la décima exhibición se ilustra un concepto fundamental relacionado con la velocidad de la luz. En esta parte se introduce el índice de refracción, posiblemente el parámetro más usado para caracterizar un medio óptico. Este número adimensional representa la cantidad de veces que la velocidad de la luz en el vacío, es superior a la velocidad de la luz en dicho medio. Este número está virtualmente presente en todos los cálculos que se realizan en óptica.

## Capítulo 2. Conceptos de Óptica

### Introducción:

En el presente capítulo se describen de manera sencilla los temas de la óptica relacionados con las exhibiciones propuestas.

#### 2.1 Naturaleza de la luz

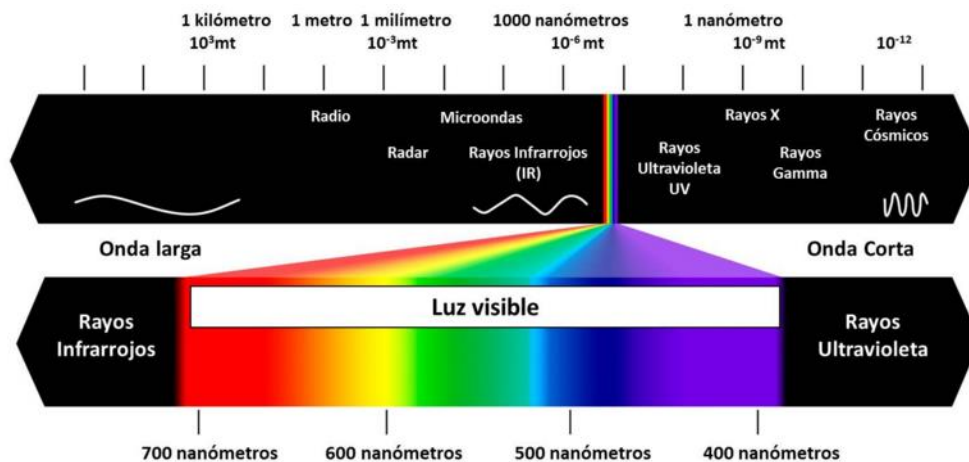
Es difícil ofrecer una respuesta asertiva a la pregunta ¿qué es la luz?, pues se dice que la luz posee una doble naturaleza; es decir, para algunos casos es conveniente analizarla como si fuera una onda y para otros como una partícula.

Desde hace muchos años, civilizaciones pasadas han estudiado el concepto de luz. Por ejemplo los Griegos creían que la luz estaba compuesta de partículas (corpúsculos) emitidas por una fuente luminosa, las cuales modificaban nuestra percepción de la visión al incidir en el ojo del observador. Newton utilizó esta teoría corpuscular para explicar la Reflexión y Refracción de la luz. En 1670 un contemporáneo a Newton, el científico Holandés Christian Huygens consiguió explicar muchas de las propiedades de la luz al proponer que esta tenía características de onda. En 1801 Thomas Young brindó un fuerte apoyo a la teoría ondulatoria al demostrar el fenómeno de Interferencia. En 1865 Maxwell elaboró una teoría que afirma que las ondas electromagnéticas se desplazan a la velocidad de la luz, para entonces la teoría ondulatoria parecía estar asentada sobre bases muy firmes. Sin embargo, a principios del siglo XX Max Planck introdujo la cuantización de la radiación electromagnética y Albert Einstein volvió a la teoría corpuscular con el fin de explicar la radiación que emiten los objetos calientes y los electrones que emite un metal expuesto a la luz (el efecto fotoeléctrico). Como mencionamos antes, hoy en día los científicos ven a la luz con una doble naturaleza, se pueden idear experimentos que exhiben su naturaleza ya sea de partícula y de onda. [5].

Aunque estos conceptos son sumamente interesantes, en este capítulo nos concentraremos en aquellos conceptos que son necesarios para comprender los fenómenos más comunes que se producen en la luz ya sea experimentando de manera corpuscular o de manera ondulatoria.

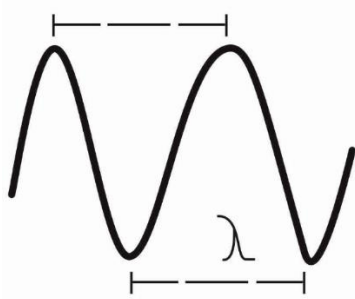
En un modelo ondulatorio la luz está compuesta de ondas electromagnéticas que nos permiten observar todo lo que nos rodea. Se le conoce con el nombre de luz visible a las ondas electromagnéticas que el ojo humano es capaz de percibir (los colores).

Isaac Newton fue uno de los primeros en conocer más sobre la principal fuente de luz natural, la luz del sol. En 1665 realizó un experimento donde un rayo de luz del sol viajaba a través de un orificio que se encontraba en la pared. Este rayo de luz incidía en un prisma, pasaba a través de él y el haz de luz que salía del prisma era dirigido hacia una pantalla blanca. Ahí observó que la luz del sol estaba compuesta por colores; los mismos colores que se observan en el arcoíris, figura 1. Esto indica que la luz conocida como luz blanca es la combinación de todos los colores.



**Figura 1.** Colores como los obtenidos en el experimento realizado por Isaac Newton. Figura tomada de [6].

La unidad de medida utilizada para identificar las ondas de luz es la longitud de onda, que es la distancia que existe entre dos máximos de una onda propagante como se muestra en la figura 2.



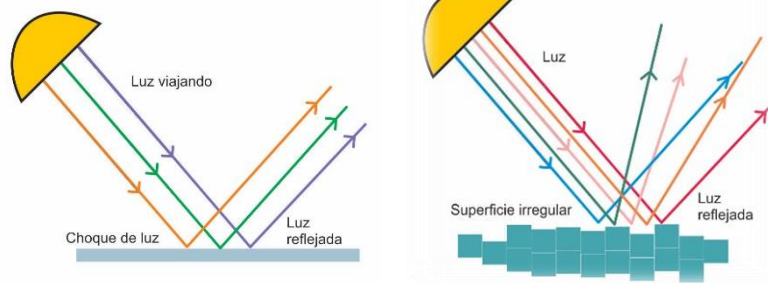
**Figura 2.** La longitud de onda, generalmente se denota por la letra griega  $\lambda$ , es la distancia entre cresta y cresta o entre valle y valle, de una determinada onda.

Por ser distancias muy pequeñas, del orden de  $1 \times 10^{-9}$  metros, se utiliza el prefijo nano. El rango en el que se encuentra el espectro visible es de 350nm a 750nm y esto se ilustra en la figura 1. Podemos observar que cada color tiene asociada una longitud de onda. Por debajo de los 400nm se encuentra la radiación ultravioleta y por arriba de los 750nm se encuentra la radiación infrarroja. Estos dos rangos (ultravioleta e infrarrojo) son longitudes de onda que el ojo no puede percibir y que sólo con el uso de la tecnología nos es posible apreciarla, sin embargo, muchas fuentes de luz emiten por ejemplo este es el caso de nuestra principal fuente de luz natural, el sol. A menudo es posible ver la trayectoria de la luz, esto sucede porque en el ambiente existen partículas de polvo y agua que reflejan la luz a nuestros ojos. La mayoría de las superficies reflejan la luz en todas direcciones, las superficies muy lisas como las de un espejo reflejan la luz en forma regular.

## 2.2 Reflexión

La reflexión es un fenómeno óptico que se produce cuando la luz que viaja por un medio transparente encuentra una frontera tras la cual hay un segundo medio y en la cual parte de la luz choca y se regresa al primer medio, dicho con términos más coloquiales la luz rebota en una superficie y viaja a otro punto.

Si la superficie en donde la luz se refleja es lisa, los rayos se desplazarán paralelos entre sí, como se muestra en la figura 3 (a), a esto se le conoce como reflexión especular. Si la superficie en la que se refleja la luz es irregular entonces la luz se propaga en varias direcciones como se muestra en la figura 3 (b), a lo cual se le conoce como reflexión difusa.



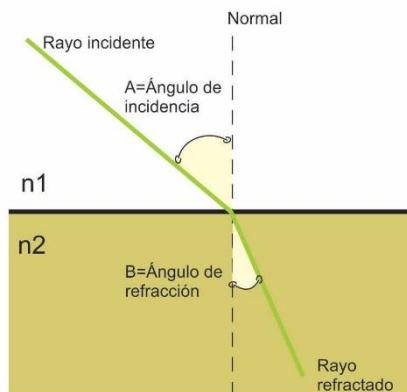
(a)

(b)

**Figura 3.** (a) Luz que viaja por un medio y se encuentra con un segundo medio y es reflejada. (b) Luz reflejada por una superficie irregular.

### 2.3 Refracción

Cada encuentro de la luz con la materia puede ser visto como un evento en donde un grupo de fotones “choca” con un grupo de átomos que forman la materia. Estos fotones también pueden ser vistos como un rayo de fotones que viaja en línea recta, como se muestra en la figura 4. Imaginarnos que la luz (o los fotones) viajan de esta manera nos simplifica significativamente el análisis de su trayectoria. En la ciencia es muy común hacer uso de este tipo de simplificaciones o aproximaciones, como son llamadas comúnmente. Para el caso de fotones siendo vistos como un único rayo de luz, se dice que estamos haciendo una aproximación a óptica geométrica.



**Figura 4.** Diagrama de un rayo que sufre un cambio de dirección en su trayectoria al pasar de un medio a otro.

Bajo estas suposiciones, la refracción puede verse como el fenómeno en el que un rayo de luz se desvía al pasar de un medio a otro. Si consideramos la situación de la Figura 4, se observa que el rayo llega a un medio distinto con cierto ángulo de incidencia y que al pasar la frontera que separa ambos medios, el ángulo al que viaja cambia. Este nuevo ángulo recibe el nombre de ángulo de refracción. Si estos dos ángulos fueran iguales, el rayo de luz no parecería estar doblado, pues ángulos iguales significa que la trayectoria de dicho rayo no fue afectada.

En óptica, un medio se describe con dos datos principales: la velocidad a la cual la luz viaja en él y la forma en la que esta velocidad cambia dependiendo de las características de la onda que la componen. Para entender el segundo, es necesario saber qué significa que la luz tenga distintas velocidad, así que primero se hablará un poco esto.

Normalmente se dice que la luz viaja a una velocidad bien determinada y que nada puede viajar más rápido que eso, aproximadamente 300 000 km/s, sin embargo, el valor límite de la rapidez es aquél que se mide en el vacío, que es el espacio donde no existe materia. Cuando la luz viaja en aire, en el cual hay ciertas moléculas, su velocidad disminuirá; si viaja en agua, disminuirá más y si lo hace en el vidrio, será aún menor.

Ahora podríamos empezar a preguntarnos cuáles son esos ángulos de incidencia y de refracción. Si el rayo incide a un ángulo distinto al de la figura 4, ¿el ángulo de refracción se mantendrá o también será distinto? Resulta que uno depende del otro y viceversa, por lo que si el ángulo de incidencia cambia, el ángulo de refracción también cambiará. La ecuación matemática que relaciona los dos ángulos y es conocida como la Ley de Refracción o La Ley de Snell y se puede ver en ecuación 1 [7]:

$$n_1 \text{ sen } A = n_2 \text{ sen } B \quad (1)$$

Donde  $n_1$  y  $n_2$  son los índices de refracción de los dos medios y  $A$  y  $B$  son los ángulos de incidencia y refracción con respecto a la normal encontrada entre la frontera de ambos medios, respectivamente.

Lo anterior puede ilustrarse con una analogía sobre dónde es más difícil correr: es más fácil hacerlo en una pista especial, que dentro de una piscina; pero es más fácil correr en la piscina que una pantano o una zona lodosa. Como en la ciencia es de vital importancia cuantificar estos parámetros, se ha definido el índice de refracción como el factor de cuántas veces más despacio viaja la luz en cierto medio en comparación con el vacío.

Como el índice de refracción es sólo un factor comparativo (para fines prácticos diremos que siempre es mayor a 1, aunque esto no siempre es cierto bajo circunstancias especiales), no tiene unidades, es decir que no se puede medir en metros, segundos, litros ni nada parecido; únicamente se dice que la velocidad de la luz en cierto medio material es “tantas” veces más lenta que en el vacío. Matemáticamente se describe en la ecuación 2 [7]:

$$n = \frac{c}{v} \quad (2)$$

Donde  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío y  $v$  en el medio. Esta última también se conoce como velocidad de fase. Despejando la velocidad del medio en la ecuación 1 puede interpretarse como que la velocidad de la luz en cierto medio es igual a la velocidad en el vacío dividida por el índice de refracción del mismo medio. Así que entre mayor sea el índice de refracción de un medio, la luz viajará más lento en él.

Como explicamos antes un rayo de luz blanca es en realidad una mezcla de todos los colores que viajan juntos y ciertos eventos naturales como el arcoíris son una prueba de esta teoría, también es posible separar los colores en experimentos con ayuda de los prismas.

## 2.4 Prismas

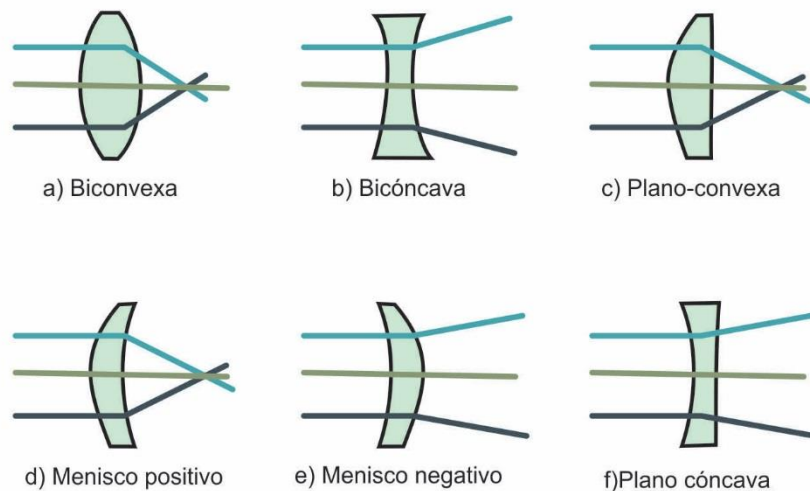
Los prismas son dispositivos ópticos compuestos típicamente de vidrio o acrílico de diferentes formas que separan los colores, esto en realidad sucede porque cada color tiene un índice de refracción distinto aunque se trate de un mismo medio. Si consideramos la Ley de Snell, veremos que mientras mayor sea el índice de refracción del medio hacia donde el rayo viaja, mayor será la desviación que sufra. Por esto, a cada color con cierto índice le corresponde una desviación específica y, como consecuencia,

a la salida de un prisma vemos los rayos de colores separados precisamente porque cada color se desvió de forma diferente.

## 2.5 Lentes

Las lentes son dispositivos ópticos que al igual que los prismas pueden ser de vidrio o acrílico y que también refractan la luz, en donde la diferencia radica en la forma en la que refractan esa luz. Una lente es un dispositivo refractor que configura la distribución de la luz emitida o reflejada por los objetos, estos se usan en muchas aplicaciones de la vida diaria y de la ciencia: cámaras fotográficas, lupas, microscopios, telescopios y, por supuesto, los lentes correctivos de la visión.

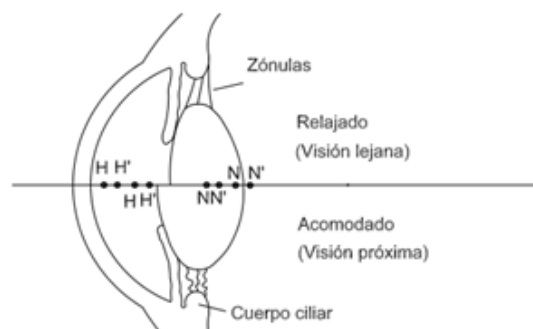
En términos generales, las lentes pueden clasificarse en convergentes y divergentes. Sus nombres indican si los rayos que inciden y pasan a través de ellas convergen o divergen al salir por el otro extremo. Se le llama foco o eje focal al punto de donde proceden las ondas al divergir o el punto en donde se juntan al converger. En la figura 5 se muestran tres rayos de colores que cambian de dirección cuando pasan a través de seis lentes distintas. Observa que cada una de las lentes le impone una trayectoria distinta a los rayos a pesar de que éstos inciden en las lentes de la misma manera.



**Figura 5.** Diagrama de rayos que cambian su dirección al pasar a través de distintos tipos de lentes. De izquierda a derecha las lentes son: a) biconvexa, b) bicóncava, c) plano-convexa, d) menisco positivo, e) menisco negativo y f) plano-cóncava.

## 2.6 La lente de nuestro ojo

Sin duda el sistema óptico más utilizado es una lente y es precisamente lo que tenemos en nuestro ojo. En el ojo los principios de formación de imágenes son los mismos que un sistema de lentes convencional. En el caso del ojo humano, la luz entra a través de la córnea, que es la parte más exterior de nuestro ojo y que cubre a la pupila y el iris, además de contribuir a la formación de la imagen. La luz cruza a través del lente del cristalino para proyectarse en la retina. Este proceso es esencial para tener una buena formación de las imágenes e influye directamente en los problemas visuales más comunes. Nos enfocaremos precisamente en el cristalino, el cual a grandes rasgos funciona como una lente biconvexa variable, por lo cual puede ajustar su eje focal a diferentes distancias. Para entender cómo se logra esa variación en el cristalino, es importante mencionar que tiene una estructura en capas muy compleja con un gradiente de índice no-uniforme. A lo largo de la vida, estas capas en el cristalino siguen creciendo en grosor por la generación de nuevas capas y, por consecuencia, la lente pierde claridad y flexibilidad con el tiempo. Un par de ligamentos que controlan la variación del cristalino, llamados “ligamentos suspensorios de la zónula de Zinn”, sostienen la lente y controlan la curvatura de la misma por la acción de un músculo llamado “músculo ciliar” como se muestra en la figura 6. De esta forma se controla el enfoque a diferentes distancias.



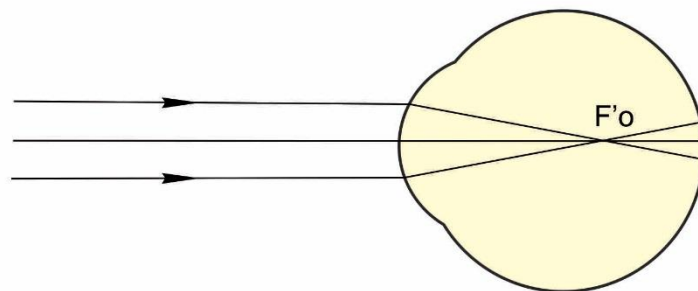
**Figura 6.** Ojo visto en sección transversal. Se muestra la estructura del cristalino y su efecto en la variación de la lente. Figura tomada de [8].

Posteriormente, la luz enfocada por el cristalino incide sobre la retina, otra parte importante del ojo, y que cumple la función de capturar la imagen. Esto lo consigue por medio de los “bastones y conos”, que son nuestros foto receptores (células sensibles a la luz). Los bastones son los responsables de detectar la luz débil (visión nocturna, por

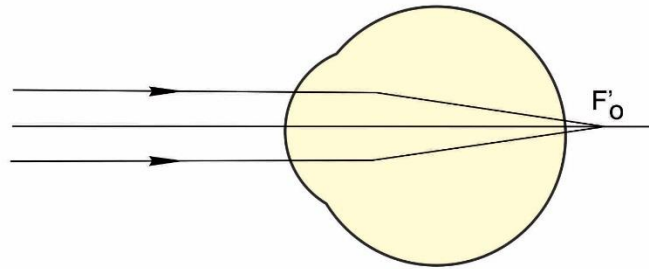
ejemplo) y los conos son responsables de detectar la luz intensa (como la luz que se tiene durante el día). La información obtenida se envía al cerebro por medio del nervio óptico. Como el nervio óptico tiene una entrada en nuestra retina, existe un área específica en donde no hay bastones y conos; esta es la razón de que exista una pequeña área en nuestra visión en donde no podemos ver.

Es importante resaltar que en este sistema, como en cualquier otro, se pueden generar errores de enfoque, ya que son varios los procesos que intervienen para que la imagen que nuestro ojo forma sea clara. Los errores asociados con el enfoque de la imagen tienen una relación importante con la córnea y también con nuestro “lente” o cristalino. Se le conoce como ametropía, que significa ojo fuera de medida, cuando la imagen no se enfoca en la retina sino en una posición por delante o por detrás de ella. Si la luz es enfocada por delante de la retina se le conoce en medicina como miopía, como se muestra en la figura 7. En el caso contrario, cuando la imagen se forma por detrás de la retina se da lugar a un fenómeno llamado hipermetropía, como se muestra en la figura 8.

Este tipo de errores de visión suelen ser corregidos mediante lentes puestos en un armazón, o incluso por contacto. Esto incluye un nuevo elemento refractor en el sistema, resultando entonces en un sistema óptico más complejo. En los últimos años se ha popularizado la cirugía de corrección. Este procedimiento quirúrgico utiliza otra tecnología óptica muy importante, el láser, el cual se utiliza para alterar la forma de la córnea.



**Figura 7.** Ojo con miopía. La luz es enfocada por el cristalino en un plano anterior a la retina.



**Figura 8.** Ojo hipermetrope. En este caso la luz se enfoca en un plano posterior al de la retina.

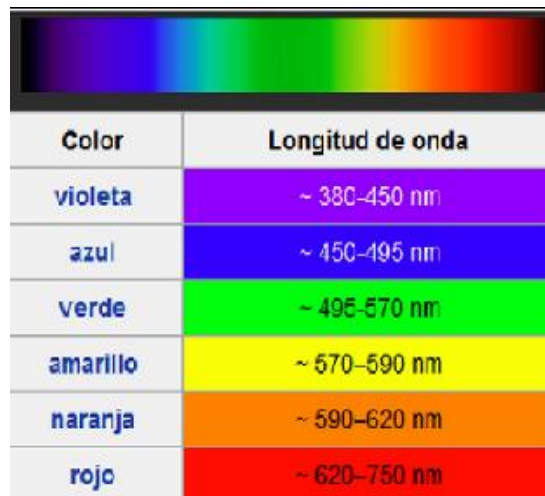
## 2.7 El color

A la luz emitida por el sol, o por las lámparas convencionales para iluminación, se le conoce como luz blanca y como vimos anteriormente puede ser separada, por la naturaleza o en experimentos por medio de prismas, en sus colores componentes. En un arcoíris, por ejemplo, con nuestro ojo podemos percibir seis colores.

Cuando la fuente de luz blanca ilumina un objeto, éste absorberá la mayoría de los colores y solo reflejará hacia nuestros ojos el color que no es absorbido. Así es como la mayoría de los objetos aparentan tener un determinado color.

Puesto que las características de los ojos varían entre una persona y otra, lo que una persona percibe como rojo, para otra persona puede ser de una tonalidad ligeramente diferente. Recordemos que la percepción del color se trata de una sensación visual, y las sensaciones varían entre una persona y otra. Por lo tanto existe la necesidad de cuantificar y estandarizar la característica de la luz que la hace responsable de producir sensaciones diferentes (colores) para un mismo ojo.

De aquí surge la necesidad de recordar que la luz es una onda electromagnética y al ser una onda tiene como característica a un parámetro llamado longitud de onda.



**Figura 9.** La diferencia entre los colores radica en la longitud de onda. Los colores rojizos tienen longitudes de onda mayores que los colores violetas. Figura tomada de [9].

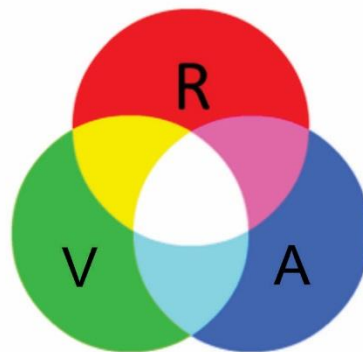
Como se mencionó anteriormente la longitud de onda ( $\lambda$ ) es la distancia que hay entre cresta y cresta o bien, entre valle y valle. Es justamente la longitud de onda de la luz lo que diferencia entre un color y otro, figura 9. El color rojo posee una longitud de onda más grande y el violeta una más corta. Sin embargo, hay que tener en cuenta que las longitudes de onda de la luz que vemos son muy pequeñas; tanto como 0.0000007 m (700 nanómetros) para el rojo y 0.0000004 m (400 nanómetros) para el violeta. El resto de los colores se encuentra en este rango.

El humano empezó a estudiar a la luz y sus colores hace muchos años. Los primeros estudios importantes fueron realizados por Isaac Newton quien, usando un prisma de vidrio separó la luz blanca en seis colores y concluyó que todos esos colores se encontraban juntos en la luz blanca y que no era el vidrio el que coloreaba a la luz como se había estado creyendo. Desde entonces se han hecho grandes avances y hoy la tecnología nos permite reproducir una gran cantidad de colores a partir de los llamados tres colores primarios: rojo, verde y azul (el sistema RGB, por sus siglas en inglés), ver figura 10. Televisiones, pantallas de computadores y celulares reproducen imágenes a todo color usando tríos de píxeles, uno para cada color primario. Al variar la intensidad de cada uno de ellos se puede obtener una amplia gama de colores.

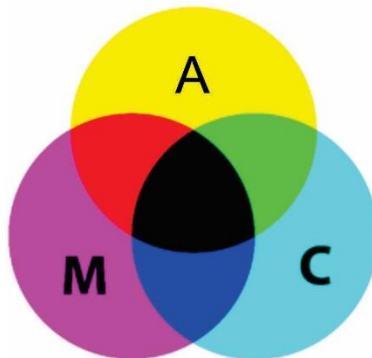
Ahora se sabe que la retina de nuestro ojo posee tres diferentes células a manera de sensores para detectar los colores primarios; el resto de los colores son interpretados por

nuestro cerebro como una combinación al activarse dos o tres de estos sensores, conocidos como conos.

Por otro lado, existe la técnica sustractiva para la generación de colores, empleada en impresiones y el arte. En este caso los colores básicos cian, magenta y amarillo se van restando para obtener los otros colores, método CMY *Cyan, Magenta y Yellow* por sus siglas en inglés, como se muestra en la figura 11. Al restar los tres colores del CMY se obtiene el negro, es decir la ausencia de color. La técnica sustractiva funciona cuando se mezclan pigmentos.



**Figura 10.** Diagrama representando a los tres colores primarios: rojo, verde y azul. Este es el método aditivo para la síntesis de colores.



**Figura 11.** Diagrama que representa a los colores cian, magenta y amarillo y que constituye el método sustractivo para la generación de colores.

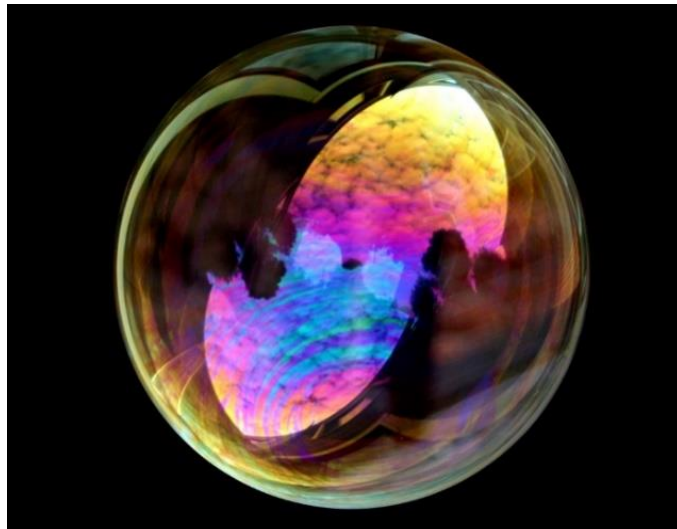
## 2.8 Interferencia

Seguramente, después de una lluvia, todos hemos visto los colores generados sobre el pavimento asfáltico manchado con aceite de automóvil, figura 12, o bien esas intrincadas

distribuciones de color que se mueven tan llamativamente en las burbujas de jabón, figura 13. Estos fenómenos presentes en nuestra vida diaria son ejemplos de la interferencia de la luz, resultado del comportamiento ondulatorio de la luz.

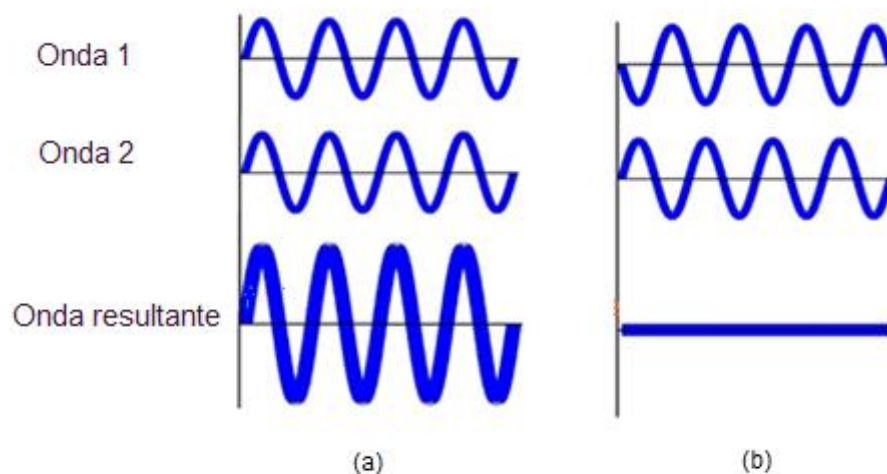


**Figura 12.** Interferencia de la luz del sol sobre una mancha de aceite en el pavimento asfáltico mojado. Figura tomada de [10].



**Figura 13.** Interferencia de la luz del sol en una burbuja de jabón. Figura tomada de [11].

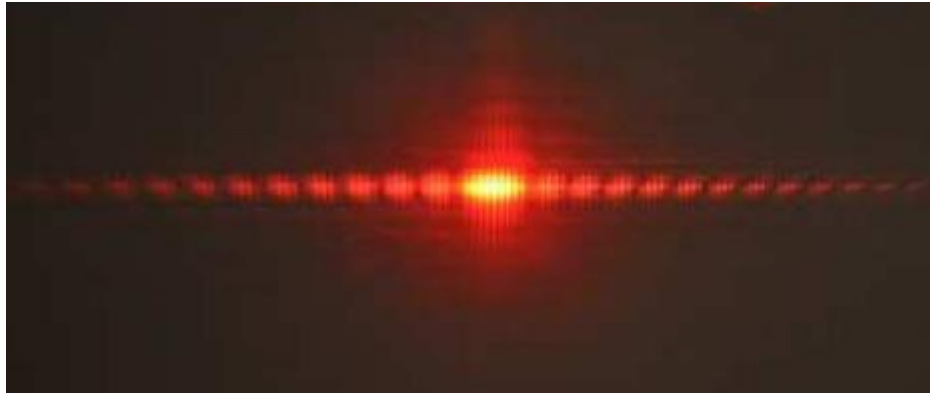
La interferencia óptica es el fenómeno en el cual dos o más ondas se superponen para generar una onda de mayor o menor intensidad que las ondas originales. Si las crestas (también llamados máximos) de las dos ondas coinciden unas con otras entonces se dice que ambas ondas están en fase, figura 14 a). Para el caso en el que las crestas de una onda coinciden con los valles (también llamados mínimos) de otra onda, se dice que ambas ondas están en contrafase o desfasadas, figura 14 b). Cuando las ondas se superponen, se origina una redistribución de la energía, generándose así los llamados patrones de interferencia. Estos patrones están formados por franjas brillantes y franjas oscuras. En las zonas donde las ondas se encuentran en fase se genera interferencia constructiva, lo cual se observa como una intensificación de la luz (franja brillante), mientras que en las regiones donde las ondas se encuentran desfasadas se genera interferencia destructiva y se observa una ausencia de luz (franja oscura).



**Figura 14.** Superposición de ondas. (a) Interferencia constructiva total; las ondas 1 y 2 están en fase. (b) Interferencia destructiva total; las ondas 1 y 2 están en contrafase.

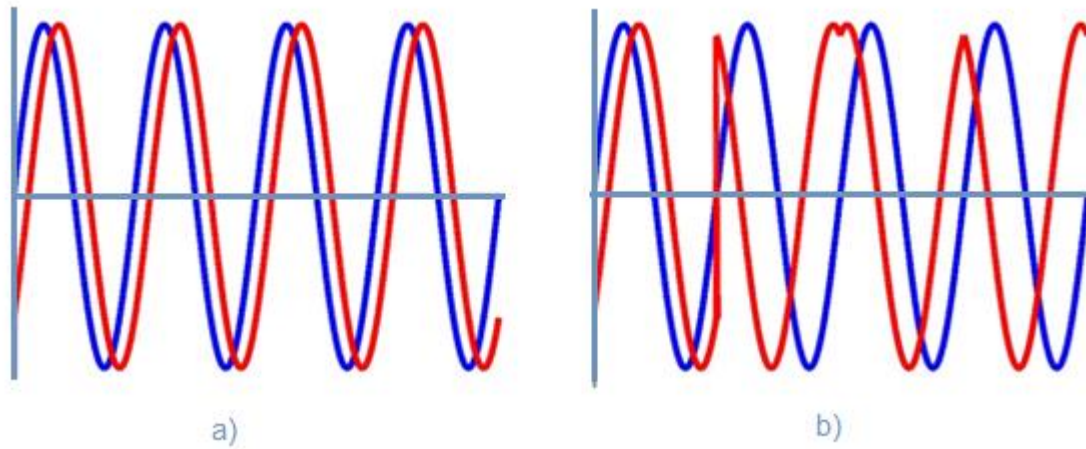
Para observar interferencia óptica se requieren algunas condiciones. Una de ellas es que las dos ondas que se superpongan posean casi la misma frecuencia; es decir que sean del mismo color. Sabemos que la luz blanca está compuesta por todos los colores presentes en el arcoíris, así que solo las componentes rojas interferirán con las rojas, las

azules con las azules y así sucesivamente. Esto es lo que produce patrones de interferencia como los de las figuras 12 y 13. Cuando la luz tiene solamente un color, los patrones de interferencia son más definidos, como el de la figura 15.



**Figura 15.** Patrón de interferencia generado por dos haces provenientes de un mismo láser rojo. Las zonas iluminadas corresponden a interferencia constructiva y las zonas oscuras a interferencia destructiva. Figura tomada de [12].

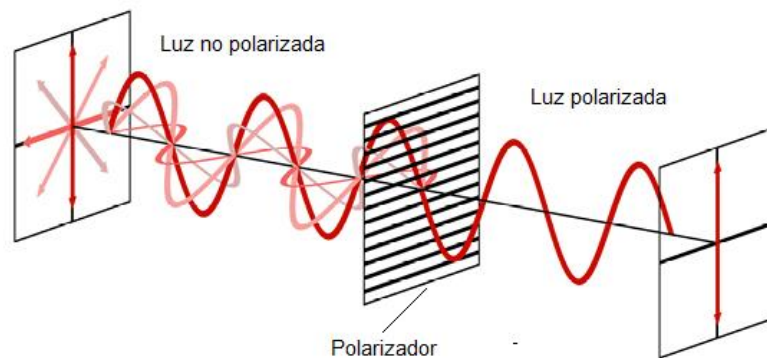
Una condición más para observar interferencia es que las ondas que se superponen tienen que ‘marchar’ juntas; en otras palabras, que la fase entre las dos permanezca constante, algo que en óptica se le conoce como coherencia. Si alguna de las ondas da un ‘salto’ y deja de ‘marchar’ a la par de la otra onda entonces las ondas no interfieren y se dice que son incoherentes, figura 16. Además de permitirnos observar colores, la interferencia tiene muchas aplicaciones en la tecnología actual. Como ejemplos podemos mencionar a sistemas muy precisos de medición, los recubrimientos anti-reflejantes para lentes, los paneles solares, los cascos de astronauta, en la fabricación de telescopios o en cámaras muy sofisticadas, los sistemas de espectroscopía que permiten conocer los elementos que constituyen objetos tan lejanos como las estrellas, etc.



**Figura 16.** Representación de dos ondas cuando son (a) coherentes e (b) incoherentes . En el caso de ondas coherentes se puede dar interferencia entre ellas, mientras que para ondas incoherentes no veremos interferencia.

## 2.9 Polarización

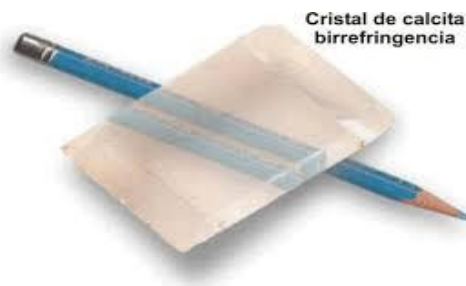
Cada rayo de luz que observamos está formado por muchas ondas luminosas, y estas ondas pueden estar oscilando en una o más direcciones mientras viajan, un polarizador de luz es un material que permite el paso de las ondas que oscilan en una única dirección específica, mientras que absorbe o bloquea a los rayos cuyas ondas oscilan en otras direcciones. Un polarizador sirve entonces para seleccionar la dirección con la que queremos que oscilen las ondas de luz, figura 17.



**Figura 17.** En esta figura un haz de luz no polarizada incide en un polarizador, después del Polarizador solamente tenemos ondas luminosas que oscilan en dirección vertical. Figura tomada de [13].

## 2.10 Birrefringencia

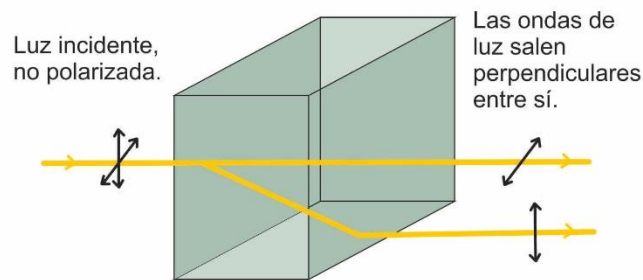
Cuando la luz viaja a través de algunos materiales, en determinadas direcciones, se produce una doble imagen o doble refracción, figura 18; esta propiedad también es llamada birrefringencia. Por ejemplo, si colocamos un pedazo de calcita, un mineral típico que presenta birrefringencia, sobre las páginas de un libro, en una dirección determinada, podemos observar que las letras se ven doble. Lo mismo ocurre al colocar cualquier otro objeto debajo de la calcita.



**Figura 18.** Ejemplos del fenómeno de doble refracción o birrefringencia en calcita. Figura tomada de [14].

La propiedad de doble refracción se debe a la estructura interna de los materiales; es decir a la manera en la que los átomos de cada material están distribuidos. Además, si aplicamos una fuerza o estrés mecánico sobre los materiales, los átomos se reacomodarán y por lo tanto la birrefringencia aumentará en aquellos lugares donde se aplica la fuerza. Incluso materiales que no son birrefringentes naturalmente, pueden presentar esta propiedad al ser sometidos a estrés mecánico.

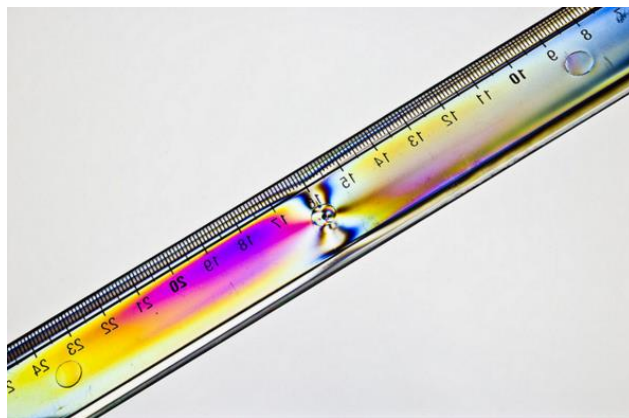
En los materiales birrefringentes las ondas luminosas se dividen en dos rayos distintos que empiezan a viajar por caminos diferentes y a diferentes velocidades, figura 19. Un rayo viajará más lentamente que el otro, así que las ondas de este rayo empezarán a retrasarse con respecto al otro. En este caso, se dice que la fase de las ondas ha cambiado. Los estados de polarización de los rayos que saldrán del material formarán un ángulo recto ( $90^\circ$ ) entre sí.



**Figura 19.** Esquema del fenómeno de doble refracción.

## 2.11 Fotoelasticidad

La propiedad por la cual algunos materiales se ven coloreados cuando se les aplica una fuerza se llama “fotoelasticidad”. Mediante esta propiedad, estudiando los colores que se observan en un plástico es posible determinar los lugares en donde existe estrés mecánico, figura 20. Aquellos lugares donde se concentra más el estrés presentan mayor riesgo de romperse. Por lo tanto, mediante la propiedad de fotoelasticidad, es posible inspeccionar los productos durante los procesos de fabricación, realizar correcciones en dichos procesos y obtener así plásticos más resistentes a las rupturas.



**Figura 20.** Ejemplo de colores observados en plásticos debido al efecto de fotoelasticidad. Figura tomada de [15].

La fotoelasticidad es el resultado de tres fenómenos físicos que son característicos de las ondas luminosas. Estos fenómenos se conocen como “Polarización de la luz”, “Doble refracción de la luz, o birrefringencia” y el fenómeno de “Interferencia de la luz”.

Las razones por las que plásticos transparentes pueden verse con colores se resumen a continuación:

Mediante el uso de un polarizador inicial, se producen rayos con ondas luminosas que solo pueden oscilar en una dirección. La luz polarizada viaja a través del plástico. Dentro del plástico, la luz se divide en dos rayos que se mueven a distintas velocidades debido al fenómeno de doble refracción. Si la luz que entra en el plástico es luz blanca (luz que contiene todos los colores), la diferencia de fase debida a la birrefringencia es diferente para cada color. Si cada color tiene una fase distinta, esto significa que cada color tiene sus puntos máximos y mínimos en posiciones diferentes y entonces algunos colores podrían interferir constructivamente, provocando que se vean más intensos, mientras que otros colores podrían interferir destructivamente y desaparecer. Sin embargo, debemos recordar que al salir del plástico, los dos rayos que contienen a las ondas luminosas forman un ángulo recto entre sí. En este caso las ondas no interfieren, así que no veríamos la intensificación o desaparición de los colores. Pero si a la salida del plástico colocamos un segundo polarizador con el fin de cambiar el ángulo de  $90^\circ$  que forman los rayos entre sí, entonces la interferencia ocurrirá, algunos colores se intensificarán y otros desaparecerán y así podremos observar la aparición de colores en el plástico.

## **2.12 Fuentes de luz**

Joseph Wilson Swan, Heinrich Goebel y Thomas Alba Edison son algunos de los diseñadores de las primeras fuentes de luz artificial conocidas como bombillas incandescentes. Las patentes de estas fuentes artificiales datan del periodo entre los años 1850 y 1870. Después de la creación de la bombilla se han desarrollado un sin fin de fuentes artificiales de luz, como las lámparas de halógeno, que son utilizadas en los estadios en los reflectores, las lámparas de tubos de gas (fluorescente), también conocidas como lámparas ahorradoras y que las podemos encontrar en nuestros lugares de trabajo u hogares y otras fuentes como lámparas LED. Otros ejemplos de fuentes de luz artificial los encontramos en equipos electrónicos como televisores, celulares,

monitores y GPS. Éstas utilizan diferentes tecnologías para producir luz artificial y mostrar la información deseada.

Las fuentes de luz natural (el sol, las estrellas, el fuego y la luminiscencia), junto con las fuentes de luz artificial, tienen la cualidad de radiar las ondas de luz en todas direcciones. Es por ello que entre más nos alejamos de la fuente de luz, menos energía llegará a nosotros. Otra característica muy interesante de estas fuentes de luz es que deben su color a los elementos o compuestos químicos que intervienen en la emisión; por ejemplo, el sol contiene 81% de Hidrógeno, 18% de Helio y 1% de otros elementos y su luz presenta un tono amarillento. Las bombillas incandescentes, que consisten en aplicar un alto voltaje para calentar un filamento de tungsteno o carbón, presentan una tonalidad que tiende al rojizo. Otro ejemplo son las lámparas conocidas como fluorescentes, o lámparas ahorradoras, que consisten en un tubo de vidrio cubierto por diferentes sustancias químicas que emiten luz blanca cuando detectan radiación UV. En estas lámparas existe dentro del tubo vapor de mercurio, argón o neón y en cada extremo del tubo se encuentra un filamento de tungsteno que funciona bajo el principio de la bombilla incandescente y sirve para la ionización de los gases. La luz emitida por estas lámparas presenta una coloración azul o verde. Sin embargo, entre las sustancias químicas del recubrimiento se colocan algunas que emiten en el rojo, para que la luz resultante se observe más blanca. En figura 21 se encuentra el espectro de emisión de 4 fuentes de luz: algunas fuentes presentan un espectro continuo en el rango visible, otras solo contienen algunas longitudes de onda y unas son más intensas que otras. Es por ello que la luz emitida por cada fuente presenta un color diferente.

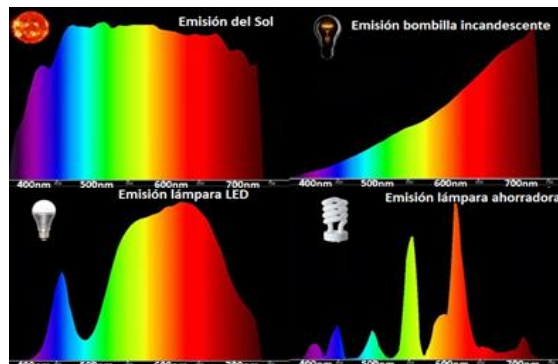
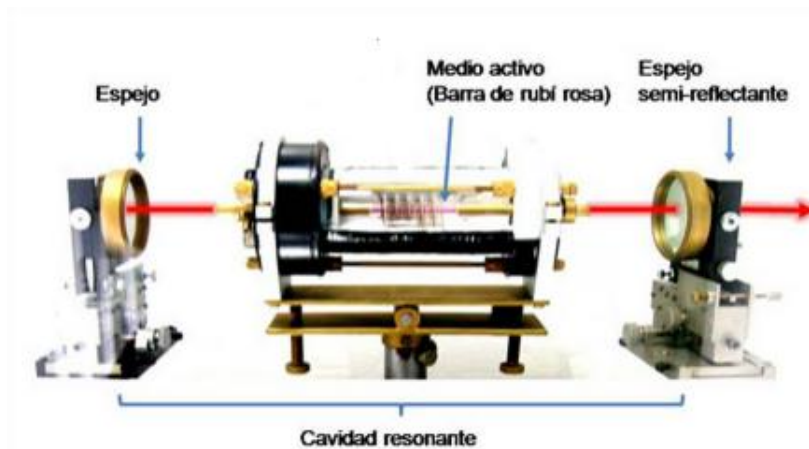


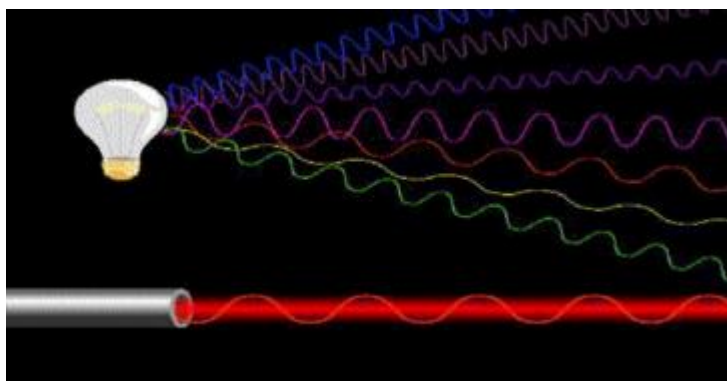
Figura 21. Espectros de emisión de fuentes de luz artificial. Figura tomada de [16].

## 2.13 El láser

En 1960 Otra fuente de luz artificial apareció, es la conocida como luz láser, que es el acrónimo de “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation”, en español “luz amplificada por radiación de emisión estimulada”. Esta fuente presenta características diferentes a las fuentes de luz antes mencionadas. Para poder obtener emisión láser es necesario construir una cavidad formada por un par de espejos y un medio activo que se encarga de la emisión, figura 22. La principal diferencia con otras fuentes de luz es la emisión direccional y no radial; es por ello que la luz emitida por un láser puede viajar grandes distancias con la misma intensidad. Otra diferencia es la emisión de una longitud de onda bien definida o, dicho de otra manera, de un solo color, figura 23. Por último, la luz emitida es coherente. Esto se refiere a que las ondas electromagnéticas emitidas conservan una relación de fase constante. Se puede entender la coherencia como un desfile de militares marchando, llevando todos los mismos movimientos sincronizados.



**Figura 22.** Esquema de láser, este esquema muestra un medio activo que está entre 2 espejos, un espejo reflejante común y otro semi-reflejante por donde sale la luz láser. Figura tomada de [17].



**Figura 23.** Radiación de una fuente artificial de luz y una fuente láser. Figura tomada de [18].

El láser se forma colocando un medio activo dentro de una cavidad, entre dos espejos altamente reflejantes, como se observa en la figura 22. Para que exista emisión del medio activo se requiere una aportación energética que se logra con una fuente de bombeo. La fuente de bombeo se encarga de generar en el medio activo una inversión de población, esto es, los electrones del medio activo que se encuentran en un estado energético base absorben la energía de la fuente de bombeo y son llevados a un nivel más energético, donde se mantienen. El siguiente proceso que se observa es emisión espontánea, donde el electrón después de un tiempo corto decae al nivel de menor energía liberando la energía en forma de luz, la luz emitida se le conoce como fotón, este fotón viaja dentro de la cavidad láser reflejándose en uno de los espejos y regresando al medio activo. En ese momento se produce emisión estimulada, proceso similar a la emisión espontánea. Sin embargo, en este proceso se requiere de un fotón incidente para que el electrón decaiga a su nivel base, la emisión del fotón tendrá la misma energía que el fotón incidente. Lo anterior se puede interpretar como un amplificador debido a que la llegada un fotón a la entrada del medio activo producirá dos fotones a la salida.

Este proceso se repite constantemente y es por ello es muy importante la alineación de la cavidad. Si la cavidad no se encuentra bien alineada la señal emitida por el medio activo puede viajar en otra trayectoria y se perdería (no se reflejaría en los espejos). La emisión de luz de la cavidad se observará a la salida de uno de los espejos y que es 99% reflejante; el resto de los fotones se encontrarán viajando dentro de la cavidad.

Los láseres pueden ser de estado sólido, de gas o de materiales semiconductores, entre otros. También pueden ser continuos o pulsados. Por sus características el láser presenta

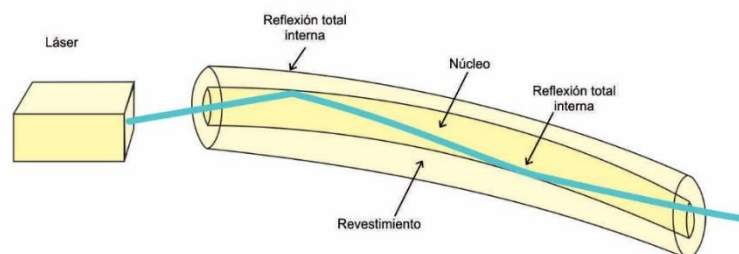
una amplia gama de aplicaciones. Algunas de estas se incluyen en medicina, en la industria farmacéutica, en procesos industriales, en mineralogía, en telecomunicaciones y en arte.

## 2.14 Fibras ópticas

La creciente demanda de los sistemas de comunicación nos ha llevado al desarrollo de nuevas tecnologías que permitan obtener velocidades de transmisión de datos cada vez más rápidas.

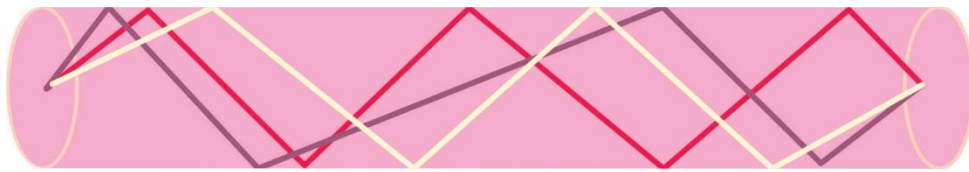
A mediados del siglo pasado, con la invención de la fibra óptica, se propuso utilizar a la luz como una herramienta para la transmisión de información. La idea básica consistía en utilizar a las fibras ópticas como un medio por el cual se pudiera guiar a la luz.

Las fibras ópticas pueden visualizarse como una varilla, cuyo diámetro total es comparable con el grosor de un cabello humano, a través de ellas se hace pasar un haz de luz, normalmente una luz láser y este se refleja en las paredes internas del vidrio (reflexión total interna) de esta manera la luz puede viajar grandes distancias con una pérdida de luz mínima. Las fibras se componen de tres elementos: el núcleo, un revestimiento y una cubierta. El núcleo y el revestimiento están fabricados con vidrio de alta pureza, a diferencia de la cubierta la cual está fabricada con plástico, figura 24. Cabe señalar que el vidrio utilizado para fabricar el núcleo y el revestimiento de la fibra es diferente, es decir tienen propiedades ópticas distintas.



**Figura 24.** Propagación de la luz a través de una fibra óptica

La ventaja de utilizar fibras ópticas es que se puede enviar a través de éstas luz de diferentes colores, es decir de diferentes longitudes de onda, sin que interfieran, ver figura 25. Con la tecnología actual se pueden transmitir 30,000 conversaciones telefónicas simultáneamente con una fibra óptica. Además, son inmunes a la interferencia electromagnética que afecta a las ondas de radio u otras señales. Esto representa una gran ventaja con respecto a otros sistemas de comunicación.

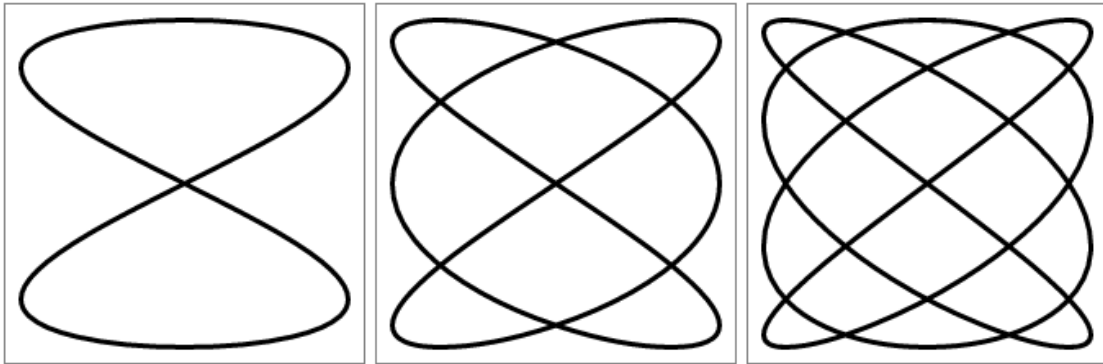


**Figura 25.** Propagación de luz de diferentes longitudes de onda en una fibra óptica.

Otro punto a señalar es que las fibras ópticas pueden transmitir una mayor tasa de información a mayores distancias y en menos tiempo que cualquier otro sistema de comunicación. De hecho, en la actualidad los sistemas de telecomunicaciones trasatlánticos utilizan fibras ópticas. Estas ventajas han llevado a que la fibra se haya convertido en el principal medio de transmisión de las comunicaciones de datos, voz y vídeo.

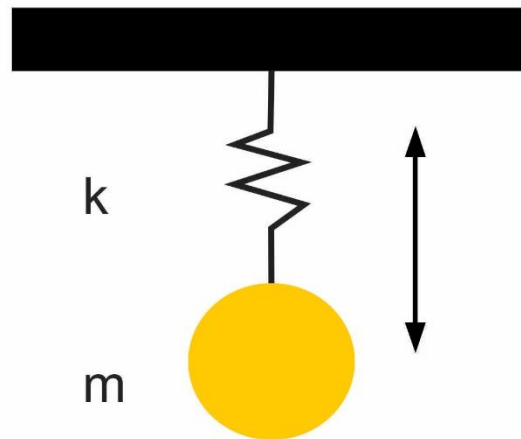
### **2.15 Curvas de Lissajous**

Llamadas en honor del matemático francés Jules-Antoine Lissajous, las curvas de Lissajous son una familia de curvas descritas por las curvas paramétricas de movimiento armónico simple; es decir los patrones de Lissajous se forman cuando se combinan ondas periódicas yendo y viniendo con las ondas periódicas moviéndose arriba y abajo. Cada una de estas ondas puede tener su propia frecuencia y así variar las figuras generadas, figura 26.



**Figura 26.** Curvas de Lissajous para diferentes frecuencias. Figura tomada de [19].

Para poder entender la naturaleza de las figuras o patrones Lissajous es necesario primero entender conceptos que provienen de la física y las matemáticas, Empezaremos por describir el movimiento armónico simple y su relación con la creación de nuestras figuras. El movimiento armónico simple es un movimiento periódico que depende de una fuerza recuperadora que es directamente proporcional a la posición, El ejemplo más usado para simular el movimiento armónico simple es una pesa colgada unida a un resorte, como se ve en la figura 27.



**Figura 27.** Resorte con constante  $k$  unida a una pesa de masa  $m$  en un movimiento armónico que se mueve de arriba debajo de manera periódica.

Si se desplaza este resorte y se suelta, la pesa se moverá de arriba para abajo en un movimiento descrito como armónico y, si suponemos que no hay fricción y pérdidas en el desplazamiento de la pesa, su ecuación de posición en el espacio quedará en función del

tiempo. La solución a este problema fue propuesta por el científico inglés Robert Hooke y se conoce como ley de Hooke.

Las curvas se pueden generar al hacer incidir luz en un espejo que está unido a un generador de movimiento armónico en el plano horizontal ( $x$ ) y que incide sobre otro espejo que está unido a otro generador de movimiento armónico en el plano vertical ( $y$ ), formándose entonces las curvas de Lissajous. Para que se puedan apreciar mejor estas curvas se usan materiales fotosensibles para que se pueda ver la forma completa y se utiliza luz como la de un láser, ya que permite ver la figura en un solo color y de forma más definida.

El movimiento armónico simple es de los modelos más estudiados para describir fenómenos oscilatorios o con movimiento periódico. Una de sus aplicaciones es en la óptica, donde podemos describir de manera sencilla a la luz como una función senoidal que se propaga en el espacio y oscila en el tiempo.

## **Capítulo 3. Planteamiento del programa**

### **Introducción:**

En el presente capítulo se describen cada una de las exhibiciones interactivas propuestas para el área de óptica, de manera sencilla se da una introducción al tema de la óptica relacionado con la exhibición y se representa un diagrama de bloques del funcionamiento, así mismo se explica cada uno de los bloques y su función en el sistema.

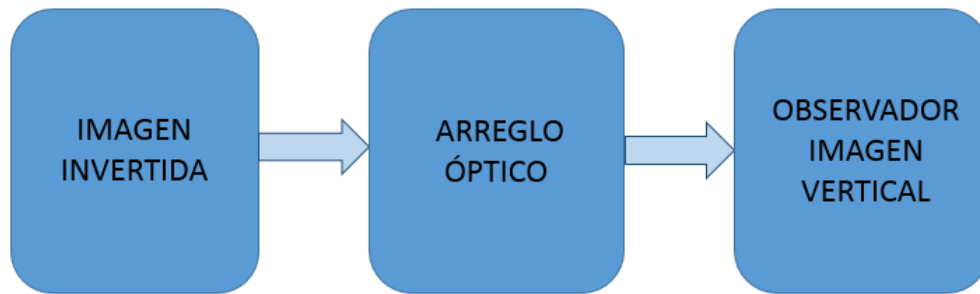
### **3.1 Exhibición interactiva 1: Ojo humano**

La lente de nuestro ojo

Como se explicó en el capítulo anterior, el proceso para la formación de una correcta imagen es complejo, pues intervienen varios factores. Esta exhibición tiene como objetivo describir el proceso para formar la imagen de un objeto en la retina del ojo. Por lo tanto la atención se fijará en el cristalino del ojo, el cual a grandes rasgos funciona como una lente biconvexa variable.

Para esta exhibición se propone un mecanismo con una lente biconvexa de cristal, donde por un lado el observador podrá ver una imagen que a través del lente se ve en correcta posición, pero que sin el uso del lente la imagen se observará en forma invertida, es decir, de cabeza. Se crea una analogía del proceso de inversión que sufren las imágenes en nuestro ojo. Con ello se comprueba que los rayos de luz que inciden en una lente se refractan y en el caso de una lente biconvexa tienden a converger.

El sistema de la exhibición se representa por el siguiente diagrama de bloques:



**Figura 28.** Diagrama de bloques de exhibición interactiva “Ojo humano”.

Como se puede apreciar en el diagrama anterior, la exhibición está dividida en tres bloques esenciales. El primero “IMAGEN INVERTIDA”, es la parte de la exhibición en donde se tiene una impresión de una imagen de cabeza, en esta sección la imagen se aprecia gracias a una fuente de luz que la ilumina desde la parte de atrás. Dicha imagen pasa por el segundo bloque “ARREGLO ÓPTICO”, en donde se tiene la lente biconvexa que cumple con la función de invertir la misma y formar una imagen. Esta lente está cubierta por un plástico que simula la forma de un ojo. Por último, el tercer bloque lo compone el “OBSERVADOR”, quien se coloca en la parte contraria de la imagen y es quien podrá captar la imagen enfocada e invertida de la original.

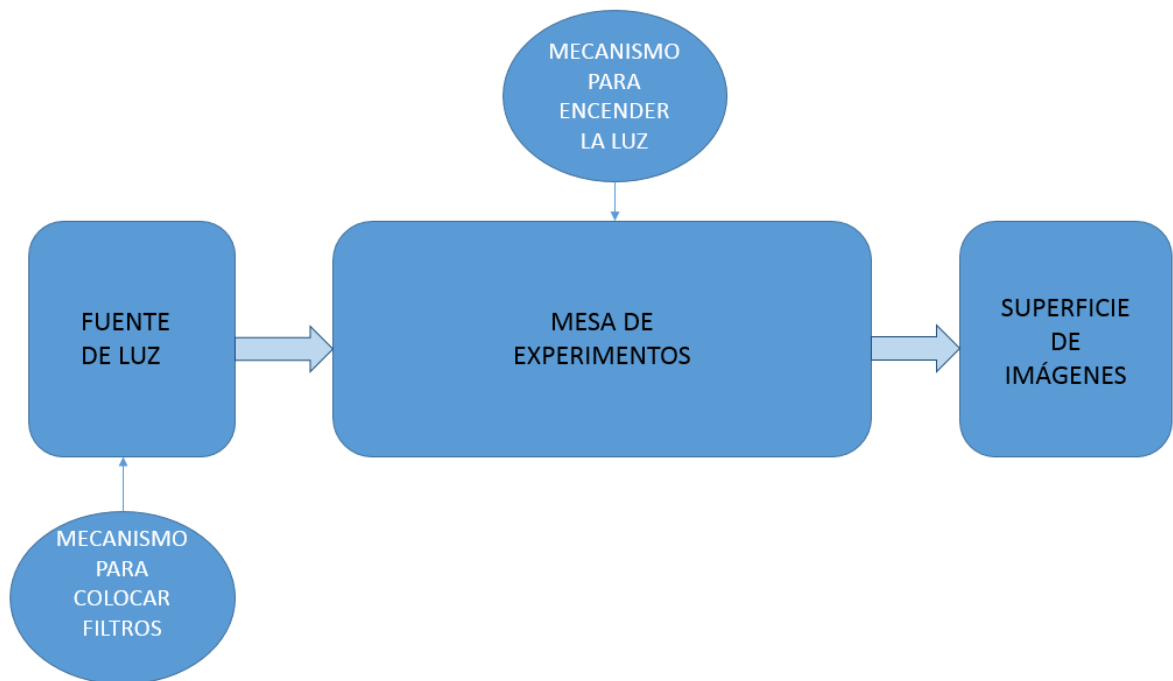
### **3.2 Exhibición interactiva 2: Refracción de la luz**

Lo que hoy sabemos de la luz y el color comenzó con los estudios que Isaac Newton realizó en 1672. Cuando al hacer experimentos con prismas para separar luz natural en varios colores, pudo darle explicación al fenómeno que causa el arcoíris. Mismo que es provocado por la refracción de la luz del sol.

En la exhibición es posible realizar el experimento que hizo Newton al separar los colores. Mismo que consistía en atravesar luz blanca por un prisma y así poder observar los colores que la componen. Adicional a esto, la exhibición cuenta con los siguientes

elementos: espejos, lentes, guías de luz y filtros de color, para poder experimentar fenómenos de reflexión, refracción, reflexión total interna y jugar con la teoría de color.

Para ello se presenta una mesa de color blanco con el fin de reflejar todos los colores que surgen a partir del experimento. Dicha mesa alberga los elementos descritos con anterioridad. En su centro tiene una fuente de luz que ilumina sus paredes, asimismo cuenta con dispositivos aptos para colocar los diferentes filtros de colores. La idea principal es que las personas manipulen los objetos que se encuentran entre la fuente de luz y la pared de la mesa, y con ello puedan apreciar los fenómenos de la luz antes descritos.



**Figura 29.** Diagrama de bloques de exhibición interactiva "Refracción".

Esta exhibición tiene tres bloques principales y dos sub bloques que ayudan al correcto funcionamiento de la exhibición. El primero, es el bloque "FUENTE DE LUZ", indica que se tendrá una fuente de luz LED, la cual se encenderá por medio de un botón y permanecerá así por intervalos definidos de tiempo, luego se apagará . La exhibición volverá a encenderse cuando presionen nuevamente el botón. Este bloque está

compuesto por otro un sub bloque, que corresponde al mecanismo para poner y quitar los filtros de color. Se encuentra en las paredes de la fuente de luz.

El segundo bloque, que se refiere a la “MESA DE EXPERIMENTOS”, es el área física en donde están colocados prismas, lentes y filtros, con el fin de que estos elementos sean utilizados aleatoriamente para experimentar con la luz.

El tercer y último bloque, “SUPERFICIE DE IMÁGENES”, es la parte en donde la luz se refleja y en donde se podrán observar los diferentes fenómenos de la luz provocados por la interacción de los prismas, lentes y filtros con la fuente de luz.

### **3.3 Exhibición interactiva 3: El láser y otras fuentes de luz**

Cada fuente de luz tiene un espectro de emisión de color diferente, es decir, la luz que llega a nuestros ojos de los focos incandescentes, fluorescentes, LED, LÁSER e incluso la iluminación de una vela presentan características de onda que las definen.

En la figura 24, se encuentra el espectro de emisión de cuatro fuentes de luz. Algunas fuentes presentan un espectro continuo en el rango visible, otras contienen algunas longitudes de onda donde unas son más intensas que otras. Es por ello, que la luz emitida por cada fuente presenta un color diferente.

La idea de esta exhibición es hacer conciencia visual, para ello se tiene una mampara con cuatro fuentes de luz diferentes, y aproximadamente a un metro de distancia se encuentra un espectrómetro, que al direccionarlo a cualquiera de las fuentes revela la composición de su espectro de color. De esta manera, se puede observar claramente que a cada tipo de luz le corresponde un espectro específico.

Se describe en los siguientes bloques:



**Figura 30.** Diagrama de bloques de exhibición interactiva “El láser y otras fuentes de luz”.

El bloque inicial, “FUENTES DE LUZ”, se compone por una mampara que contiene un foco incandescente, un foco fluorescente, uno LED y un LÁSER.

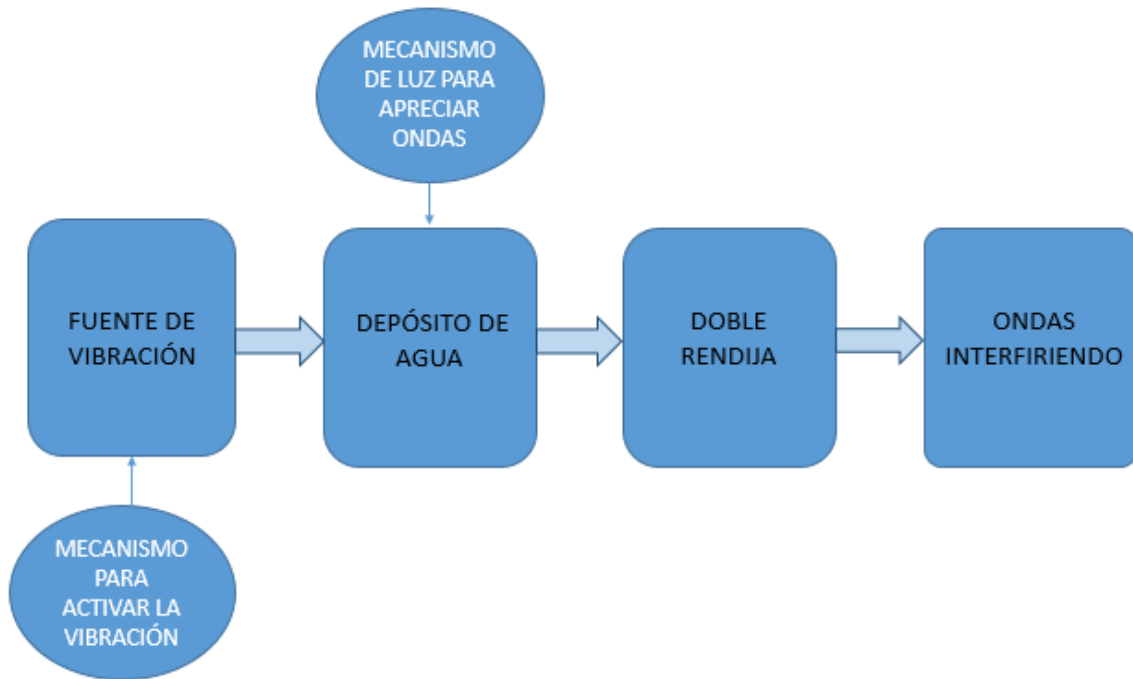
El segundo bloque, “ESPECTRÓMETRO”, se compone por un espectrómetro, por medio del cual el “OBSERVADOR” (bloque tres), podrá identificar los colores que componen cada fuente de luz.

### **3.4 Exhibición interactiva 4: Interferencia**

La interferencia óptica es el fenómeno en el cual dos o más ondas se superponen para generar una onda de mayor o menor intensidad que las ondas originales. Si las crestas (también llamados máximos) de las dos ondas coinciden unas con otras entonces se dice que ambas ondas están en fase. Para el caso en el que las crestas de una onda coinciden con los valles (también llamados mínimos) de otra onda, se dice que ambas ondas están en contrafase o desfasadas. Cuando las ondas se superponen, se origina una redistribución de la energía, generándose así los llamados patrones de interferencia.

Aunque lo anterior está pensado en ondas de luz, el fenómeno también se presenta en las ondas de agua y es incluso más fácil de percibir. Por esta razón, se presenta una exhibición compuesta por un tanque con agua, en donde se generan perturbaciones por medio de un mecanismo simple. Dichas perturbaciones crean ondas en el agua que viajan por el tanque hasta llegar a una barrera con una doble rendija, a partir de este momento se generan dos ondas las cuales interfieren entre sí.

La exhibición muestra este fenómeno de la óptica a través de un sistema que se describe en el siguiente diagrama de bloques:



**Figura 31.** Diagrama de bloques de exhibición interactiva "Interferencia".

En el bloque inicial, "FUENTE DE VIBRACIÓN", consiste en un mecanismo que oscila de arriba a abajo, provocando perturbaciones periódicas en el "DEPÓSITO DE AGUA" (bloque dos).

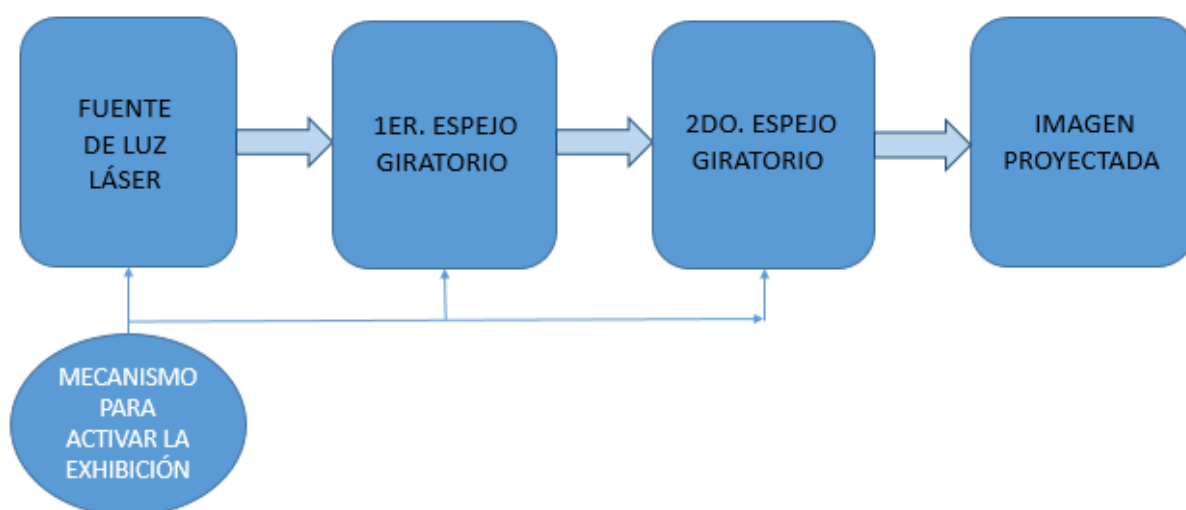
Es un cubo de acrílico que cuenta con iluminación directa para que se puedan apreciar de mejor manera las perturbaciones. El depósito de agua está dividido en dos partes, la división se le llama "DOBLE RENDIJA" y corresponde al bloque tres. Consta de un acrílico con una doble rendija por donde pasarán las ondas de agua generadas en el primer bloque y de la cual se desprende el fenómeno de "INTERFERENCIA" es decir, el bloque cuatro.

### 3.5 Exhibición interactiva 5: Figuras láser tipo Lissajous

Los patrones de Lissajous se forman cuando se combinan las ondas periódicas una vertical y una horizontal, es decir cuando se combinan dos planos en movimiento. Otra

manera de generarlas, es incidir luz en un espejo que está unido a un generador de movimiento armónico, y que a su vez refleja la luz en otro que se encuentra perpendicular a él también en movimiento, formándose así las curvas de Lissajous. Para lograr un mejor efecto se usara luz láser, pues su característica permite que las líneas sean más nítidas y por lo tanto más visibles.

A continuación se presenta el diagrama de bloques correspondiente.



**Figura 32.** Diagrama de bloques de exhibición interactiva "Figuras láser tipo Lissajous".

En el bloque inicial se presenta la "FUENTE DE LUZ LÁSER", misma que envía la luz a un primer "ESPEJO GIRATORIO", es decir el bloque dos. La luz enviada, a su vez se refleja en un "SEGUNDO ESPEJO GIRATORIO" (bloque 3), para de ahí ser reflejada nuevamente en un área de color blanco, llamada "IMAGEN PROYECTADA" (bloque 4). El resultado obtenido se conoce como: figuras Lissajous. Todos los mecanismos y movimiento de motores serán activados por un botón.

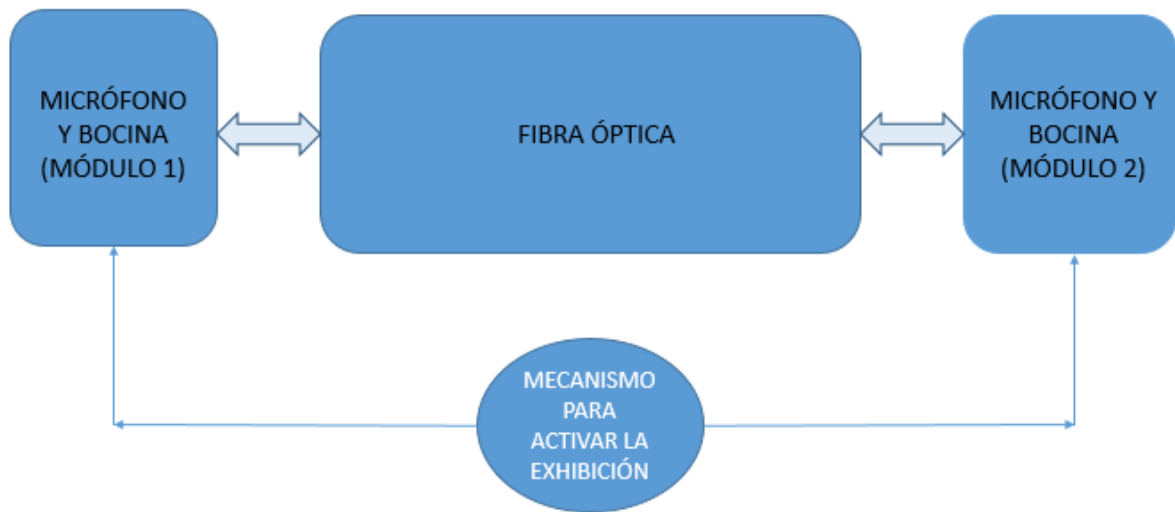
### **3.6 Exhibición interactiva 6: Transmisión de información a través de una fibra óptica.**

Las fibras ópticas pueden visualizarse como una varilla, cuyo diámetro total es comparable con el grosor de un cabello humano. A través de ellas pasa un haz de luz, generalmente suele ser una luz láser, que se refleja en las paredes internas del vidrio, (reflexión total interna) de esta manera, la luz puede viajar grandes distancias con una pérdida mínima.

La ventaja de utilizar fibras ópticas es que se puede enviar a través de esta luz de diferentes colores, es decir, de diferentes longitudes de onda, sin que interfieran entre ellas. Con la tecnología actual se pueden transmitir 30,000 conversaciones telefónicas simultáneamente por una fibra óptica. Además, son inmunes a la interferencia electromagnética que afecta a las ondas de radio u otras señales.

La exhibición consiste en un sistema de comunicación entre dos estaciones. Cada una de estas estaciones cuenta con un micrófono y una bocina. Al hablar en cualquiera de las estaciones, la voz detectada por el micrófono se convierte en pulsos láser por medio de un codificador. Dichos pulsos viajan a través de un delgado hilo de fibra óptica que está conectado a una segunda estación, con la finalidad de ser decodificada y transmitida a través de una bocina.

A continuación, se presenta el proceso en bloques:



**Figura 33.** Diagrama de bloques de exhibición interactiva “Transmisión de información a través de fibra óptica.”

El primer bloque, está conformado por un módulo con “MICRÓFONO Y BOCINA”, donde se codifica o decodifica la información según sea el caso. La información emitida viaja por medio de una interfaz, constituida por “FIBRA ÓPTICA”, que conecta el primer módulo con un segundo módulo, mismo que también está conformado por “MICRÓFONO Y BOCINA”.

Para activar el micrófono e iniciar el proceso de comunicación es necesario presionar un botón.

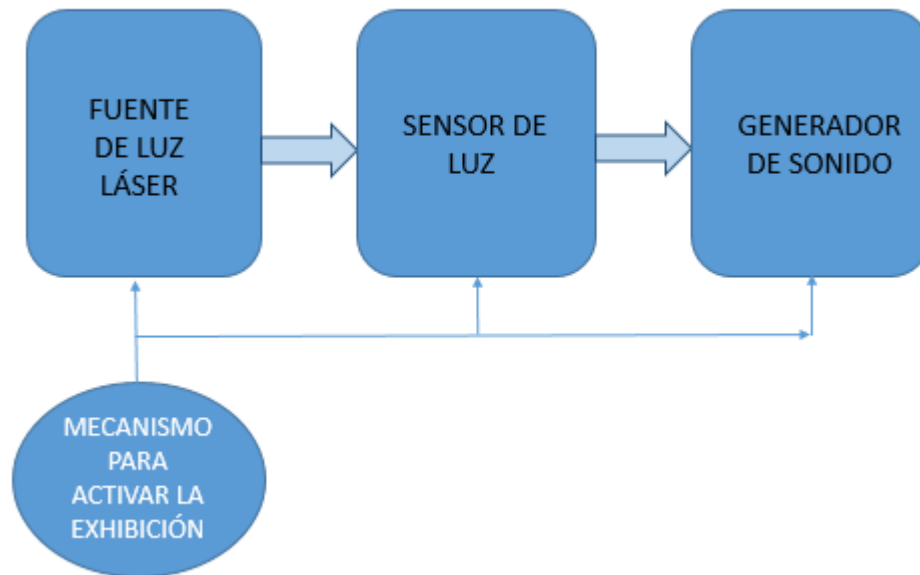
### 3.7 Exhibición interactiva 7: Arpa óptica

El arpa es un instrumento musical compuesto por cuerdas y un cuerpo resonante. Al igual que otros instrumentos musicales se compone por un sistema de notas: Do, Re, Mi, Fa, Sol, La, Si y Do. Estas notas corresponden a una frecuencia específica de vibración de las cuerdas.

En esta exhibición interactiva, para hacer un “arpa láser” se han reemplazado las cuerdas tradicionales por “cuerdas” láser. Las cuerdas de esta arpa son invisibles y sólo se distinguen al contacto con las manos. Cada cuerda está formada por un fino rayo láser

que viaja de un extremo a otro del arpa. Cuando se interrumpe el haz de luz, el sistema electrónico activa una nota musical.

Lo anterior se representa a manera de bloques de la siguiente forma:



**Figura 34.** Diagrama de bloques de exhibición interactiva “Arpa óptica.”

El primer bloque, “FUENTE DE LUZ LÁSER”, es la parte de la exhibición en donde se produce el haz de luz que viaja desde la parte de arriba del arpa hasta la parte de abajo en donde se encuentra un “SENSOR DE LUZ” (bloque 2). Mismo que tiene la finalidad de detectar que la luz esté incidiendo sobre él. Si la fuente de luz se corta, indica que la mano de la persona que interactúa con la exhibición interrumpe el haz del LÁSER, por lo tanto, el circuito electrónico que controla el sonido, corresponde al tercer bloque “GENERADOR DE SONIDO”, que emite la señal para que se produzca el tono que corresponde al sensor.

### **3.8 Exhibición interactiva 8: Mezcla aditiva de colores**

Desde los primeros estudios de Isaac Newton acerca del color, se han hecho grandes avances, es por eso que hoy la tecnología nos permite reproducir una gran cantidad de colores a partir de los llamados tres colores primarios: rojo, verde y azul (el sistema RGB,

por sus siglas en inglés) (ver figura 12). Televisiones, pantallas de computadores y celulares reproducen imágenes a todo color usando tríos de píxeles, uno para cada color primario. Al variar la intensidad de cada uno de ellos, se puede obtener una amplia gama de colores. Esta exhibición está compuesta por tres tanques cilíndricos y transparentes, llenos de agua. Cada uno de ellos tiene un orificio en la parte media, por donde deja escapar un chorro de agua, simulando así, tres fuentes.

Lo anterior se describe en bloques de la siguiente manera:



**Figura 35.** Diagrama de bloques de exhibición interactiva “Mezcla aditiva de colores.”

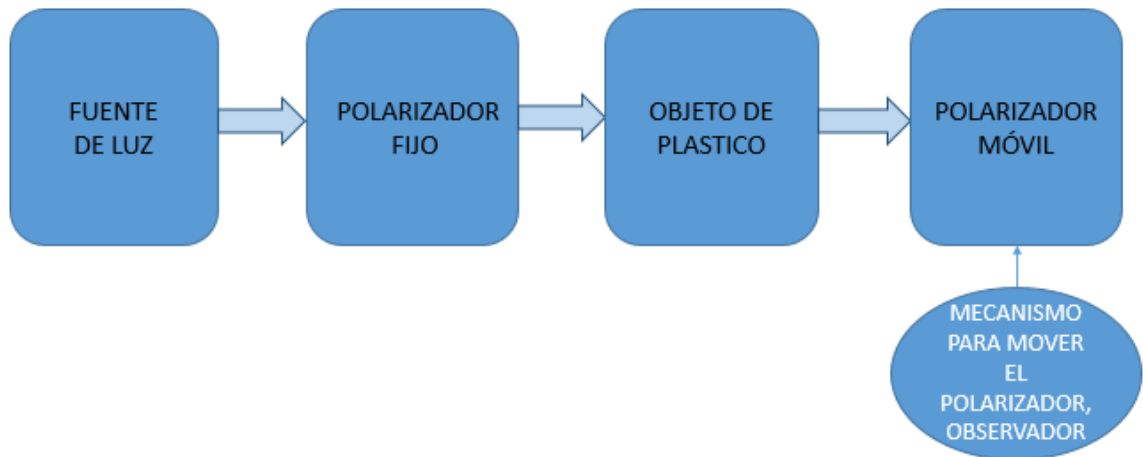
El primer bloque, “TANQUES DE AGUA”, consta de tres tanques llenos de agua, con un orificio en el centro, que deja escapar un chorro de agua de cada uno. Por medio del mismo, viajará la “LUZ” (bloque 2) emitida por un montaje de tres fuentes de luz LED alineadas al orificio del tanque. El tercer bloque es la “COMBINACIÓN DE AGUA Y LUZ”, corresponde al área en donde el agua de las tres fuentes se combina en una estructura de acero inoxidable y como producto de esa combinación se genera la luz blanca.

### **3.9 Exhibición interactiva 9: Polarización y Birrefringencia**

Bajo ciertas condiciones, los plásticos transparentes pueden verse de diferentes colores en algunas regiones del mismo. A lo anterior se le conoce como fotoelasticidad y es un fenómeno que depende de la polarización, refracción e interferencia.

En la exhibición se hace evidente el efecto de fotoelasticidad, para ello se tiene un cubo de acrílico con un polarizador giratorio en la parte superior y otro fijo en la parte de inferior. Entre estos dos polarizadores tenemos objetos de plástico en los cuales se percibe el fenómeno de fotoelasticidad.

En el siguiente diagrama se observa el proceso de la exhibición.



**Figura 36.** Diagrama de bloques de exhibición interactiva “Polarización y birrefringencia.”

El primer bloque corresponde a la “FUENTE DE LUZ”, la cual es blanca y está apuntando directamente al “POLARIZADOR FIJO” que corresponde al bloque 2. Seguido de este, se encuentra un “OBJETO DE PLÁSTICO” (bloque 3) en el cual se presenta el fenómeno de fotoelasticidad. Por último, se tiene el “POLARIZADOR MÓVIL” (bloque 4), este cuenta con un mecanismo para que el observador mueva el polarizador y de esta manera observar el cambio de colores que se genera en el plástico.

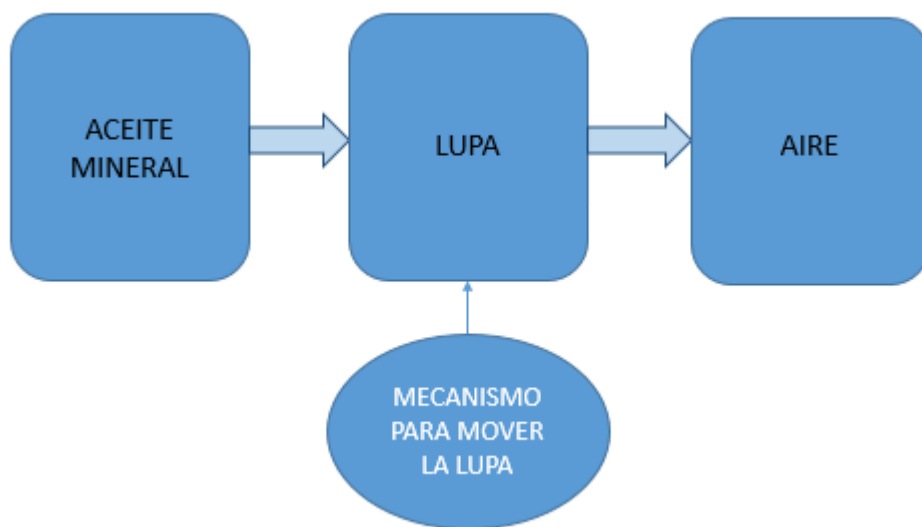
### **3.10 Exhibición interactiva 10: Índice de refracción**

Se sabe que la luz tiene una velocidad bien definida, sin embargo, esta velocidad puede cambiar dependiendo del medio en el que está viajando. Es decir, la luz viaja a diferente velocidad en el aire, en el agua o en el aceite. El medio de propagación por un parámetro se le llama índice de refracción y se interpreta como qué tantas veces es más lenta la luz en algún medio comparada con el vacío.

Este parámetro es fundamental en todas las ramas de la óptica, porque caracteriza de forma muy específica a los medios materiales en los que la luz se propaga. Conocer con exactitud el índice de refracción de los materiales y sustancias nos dice cómo se comportan los rayos cuando inciden, viajan o emergen de ellos.

Para la exhibición se cuenta con un tanque que contiene aceite mineral al 50% de su capacidad. Dentro del tanque se encuentra una lupa suspendida en el aire, sostenida por un mecanismo móvil. Mientras que la lupa está en el aire, hace su efecto normal de lupa, es decir, aumenta de tamaño los objetos, el índice de refracción de la luz, permite que dicho efecto se lleve a cabo. Sin embargo, cuando la lupa se pone en un medio con su mismo índice de refracción, que en este caso es el aceite mineral el fenómeno de aumento desaparece, porque la luz se desvía igual en ambos medios.

La exhibición se describe en el siguiente diagrama de bloques:



**Figura 37.** Diagrama de bloques de exhibición interactiva “Índice de refracción.”

La exhibición consiste básicamente en tres bloques. El primer bloque consta de un tanque que tiene la mitad de “ACEITE MINERAL”, con un índice de refracción similar al del cristal de la lupa. La parte de arriba de este tanque contiene “AIRE” del medio ambiente. En la parte media del tanque se encuentra una “LUPA”, misma que está sujeta a un mecanismo que permite moverla del aceite mineral al aire y viceversa.

## Capítulo 4. Resultados

### Introducción

En el este capítulo se presentan los resultados obtenidos de cada una de las 10 exhibiciones descritas en el capítulo anterior, es importante mencionar que a algunas exhibiciones se les asignó otro nombre con el fin de que sonara más atractivo y adecuado para una exhibición interactiva, recordemos que estas fueron diseñadas con para un público heterogéneo en edades y conocimiento, y se busca con ello hacer divulgación científica. También se presenta el texto que quedó plasmado en la cedula explicativa, planos, simulaciones y fotografías de las exhibiciones terminadas.

#### 4.1 Exhibición 1: Ojo Humano (Ventanas al mundo)

En esta exhibición se obtuvo como resultado una mesa redonda con un diámetro de 1.30 cm. Como se observa en la figura 40, dicha mesa está compuesta por 6 piezas de HDF (tableros de fibra de alta densidad) color morado las cuales se atornillaron a una base acero inoxidable. En el centro de la mesa contiene 6 imágenes invertidas montadas en 3 cubos, los cubos cuentan con un sistema de iluminación interno lo cual permite que las imágenes se vean iluminadas. A cada imagen le corresponde un módulo que simula el ojo humano, el cual contiene en su interior una lente biconvexa. Se decidió cambiar el nombre de la exhibición de “Ojo Humano” por “Ventanas al mundo”. Cada uno de estos módulos está a una altura diferente con el objetivo que visitantes de diferentes estaturas puedan usarlas. Se decidió cambiar el nombre de la exhibición de “Ojo Humano” por “Ventanas al mundo”, la cédula informativa se imprimió de la siguiente manera:

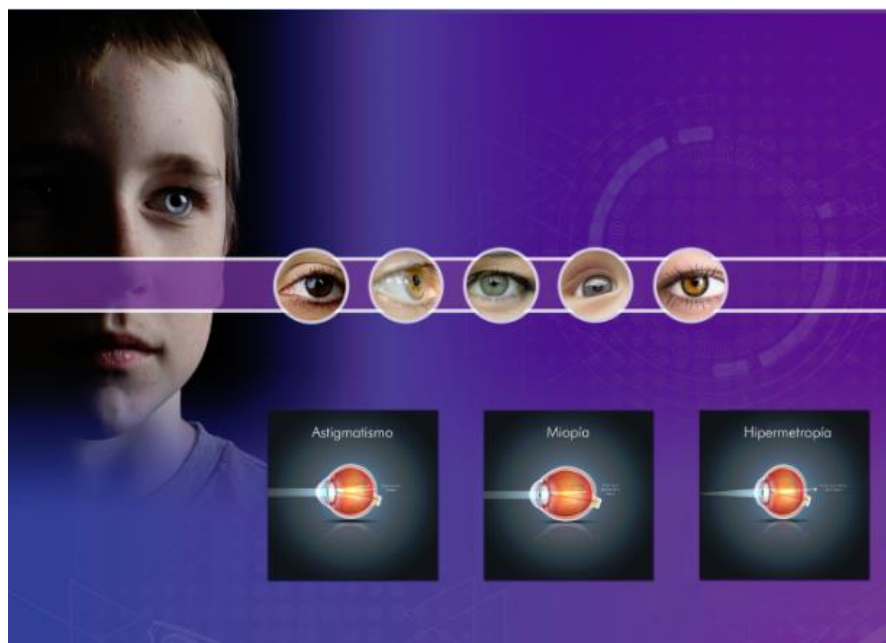
“Los ojos captan la información del entorno y la envían al cerebro, donde es interpretada como sensaciones visuales que nos permiten asignar múltiples características sobre los objetos: el tamaño, la forma, el color y la textura, o incluso evocar recuerdos en nuestra memoria.

La Luz que entra al ojo a través de la córnea pasa por la pupila y atraviesa el cristalino, formando entonces una imagen sobre la retina. Las células de la retina, que son sensibles a la luz, envían la información a través del nervio óptico al cerebro, donde es interpretada y analizada. Algunos problemas de la visión se deben a una incorrecta formación de la imagen sobre la retina y se corrigen con el uso de lentes.”

A continuación los gráficos de la exhibición en ella está impresa la cédula explicativa y la imagen del ojo en corte transversal que ayudará al entendimiento de la exhibición interactiva, figura 38:



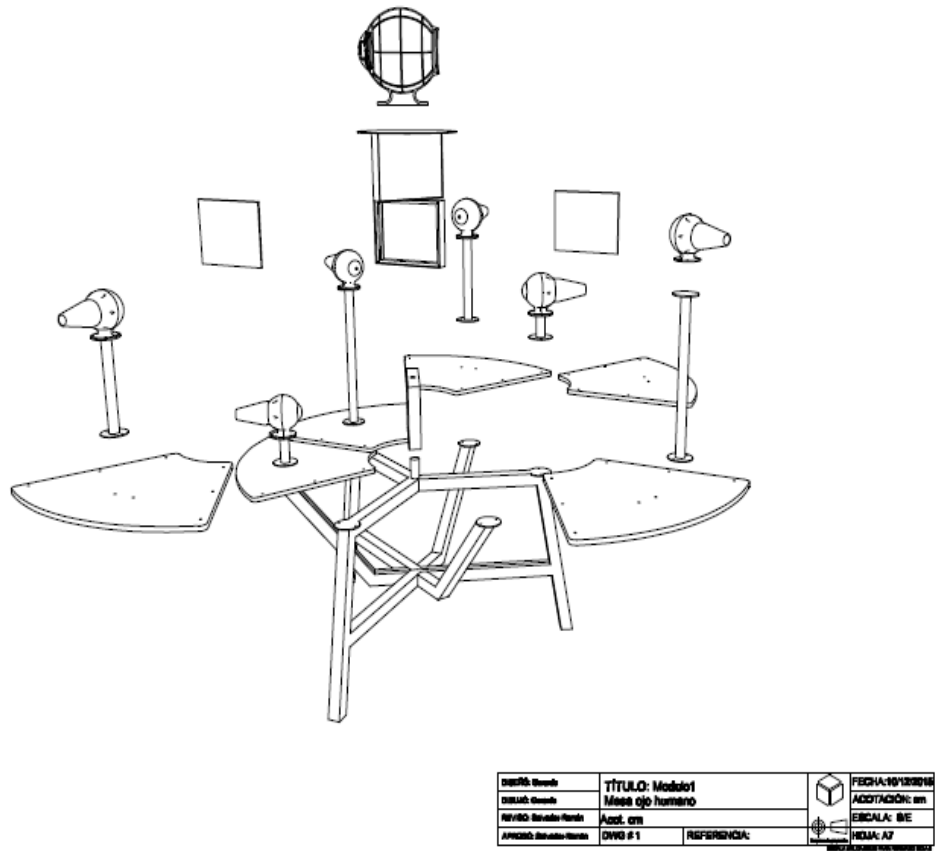
**Figura 38.** Se presenta el gráfico principal de la exhibición “Ventanas al mundo”, contiene la cedula explicativa, el nombre de la exhibición, una imagen de un ojo con sus partes principales, el cual servirá como apoyo para el mejor entendimiento de la exhibición.



**Figura 39.** Gráfico secundario de la exhibición “Ventanas al mundo”, en él se presentan las imágenes de los problemas más comunes relacionados con la visión.

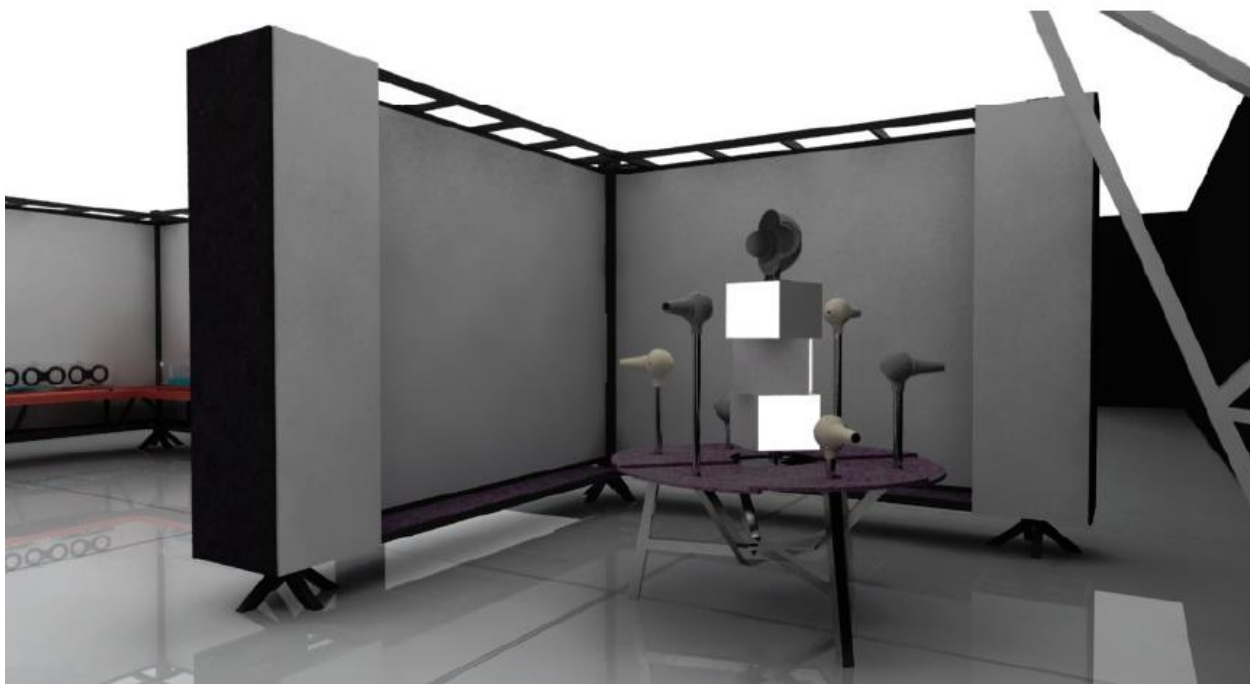
En el trabajo de diseño de las exhibiciones se producen planos a escala de las exhibiciones, los cuales te sirven como guía para el armado de las mismas y en caso de ser necesario para los servicios requeridos.

A continuación los planos de diseño de la exhibición, figura 40:



**Figura 40.** En esta figura se muestra el plano de la mesa que compone la exhibición de en sus partes principales, sobre esta mesa están montados los seis modelos de plástico que simulan los ojos y las seis imágenes invertidas que componen la exhibición.

Se realizó una simulación exhibición “Ventanas la mundo “como se puede ver en la figura 41.



**Figura 41.** Simulación de exhibición “ventanas al mundo”, fue generado a partir de los planos de la exhibición, en esta se muestra una propuesta de colores, formas y dimensiones.

Se muestran fotografías de exhibición ventanas al mundo en la figura 42.



**Figura 42.** Fotografía del resultado obtenido de la exhibición “Ventanas al mundo”, se encuentra montada en el área de óptica, del museo de ciencias.

## 4.2 Exhibición 2: Refracción (Mueve la luz)

En la exhibición interactiva de refracción se decidió cambiar el nombre de “refracción” por “mueve la luz” pues describe de una mejor manera la actividad que el visitante debe realizar en ella, el gráfico que la acompaña tiene la siguiente cédula explicativa:

“Cuando la luz viaja puede encontrarse con diferentes obstáculos. Si llega sobre cuerpos lisos y pulidos puede ser reflejada, como sucede con los espejos; puede ser absorbida si la superficie es de color oscuro; y transmitida si el objeto es transparente, ya que permite su paso a través de él. De toda la luz que incide en un objeto transparente, una parte es absorbida por el material, otra fracción es reflejada sin entrar a él y el resto es la luz que lo atraviesa.

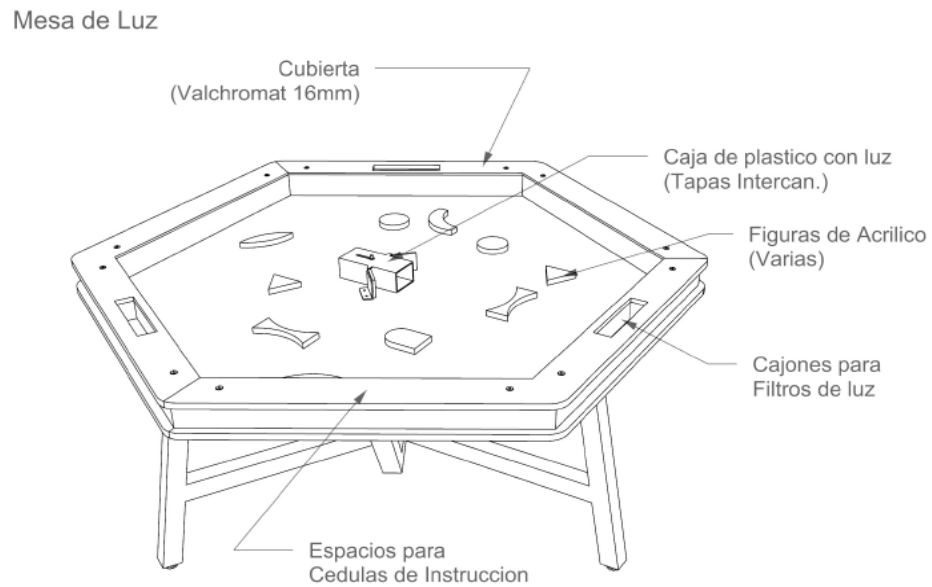
Los arreglos de lentes o espejos son usados para manipular la luz y construir los instrumentos ópticos que usamos, tales como los telescopios o microscopios que nos permiten ver con gran detalle las cosas más distantes y las más pequeñas.”

A continuación imágenes de los gráficos de la exhibición, figura 43:



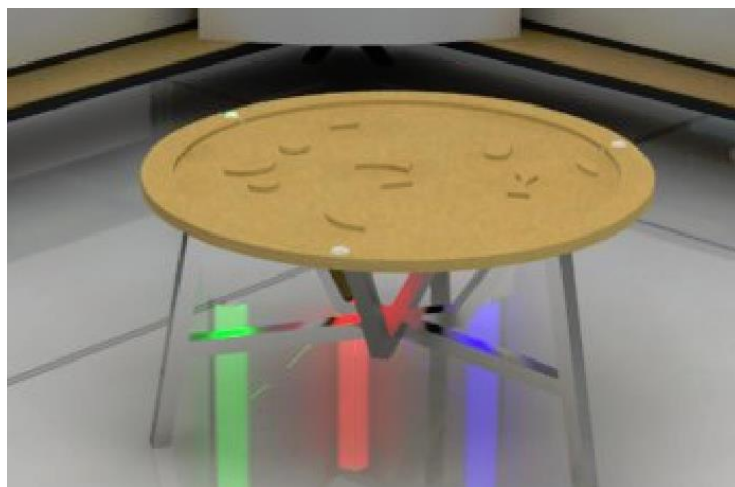
**Figura 43.** Esta figura muestra el gráfico de la exhibición “Mueve la luz,” la cual contiene la cedula explicativa e imágenes de prismas como ambientación.

Se muestran planos de la exhibición mueve la luz en la figura 44.



**Figura 44.** En esta figura se muestra el plano de la mesa de la exhibición “Mueve la luz”, en ella se observa al centro la caja de plástico que sirve como fuente de luz y también se observan las lentes y filtros de acrílico.

Render de la exhibición mueve la luz en la figura 45.

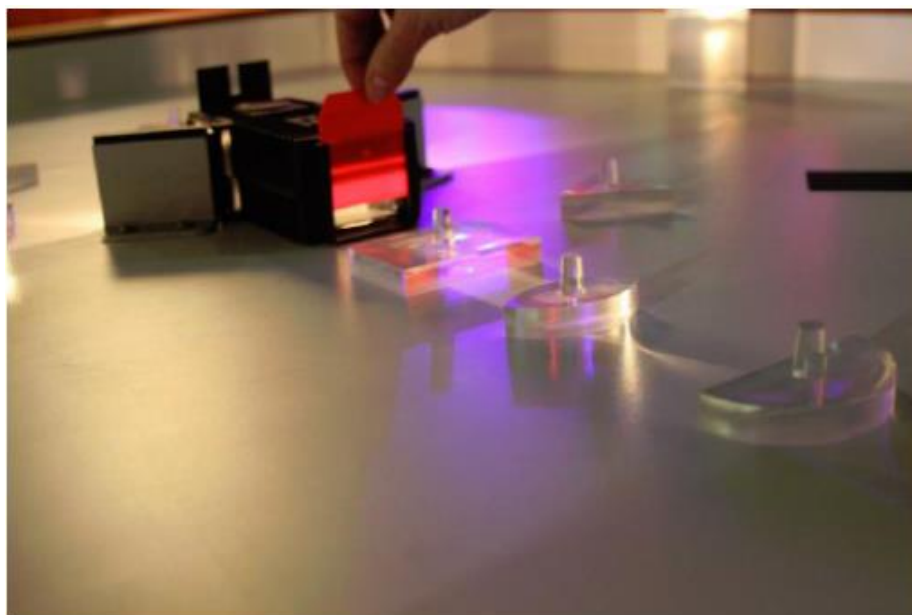


**Figura 45.** Simulación de exhibición “Mueve la luz”, fue generado a partir de los planos de la exhibición y se muestra una propuesta de colores, formas y dimensiones.

Fotografías de la exhibición mueve la luz terminada en la figuras 46 y 47.



**Figura 46.** Fotografía del resultado obtenido de la exhibición “Mueve la luz”, se encuentra montada en el área de óptica, del museo de ciencias.



**Figura 47.** Fotografía en donde se hace un acercamiento al mecanismo de exhibición “Mueve la luz”.

### 4.3 Exhibición 3: El láser y otras fuentes de luz

Esta exhibición se resume a una cédula explicativa, que contiene el siguiente texto:

“Las fuentes de luz natural (el sol, las estrellas, el fuego y la luminiscencia) y las fuentes de luz artificial (focos incandescentes, focos fluorescentes y lámparas LED) generan luz cuyas ondas viajan en todas direcciones. En 1960 se inventó otra fuente de luz artificial conocida como luz láser (acrónimo de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, y que significa luz amplificada por radiación de emisión estimulada). Esta fuente de luz es diferente se emite con una longitud de onda bien definida, es decir, de un solo color (luz monocromática).”

Cuenta con un solo gráfico, ver figura 48, en el que viene la cédula explicativa y apoyos visuales de las diferentes fuentes de luz.



**Figura 48.** La presente figura presenta el gráfico de la exhibición “El láser y otras fuentes de luz” la cual contiene cinco imágenes de diferentes fuentes de luz así como cédula explicativa

Fotografía de la cédula explicativa de la exhibición, ver figura 49.



Figura 49. Fotografía de mampara informativa en exhibición “El láser y otras fuentes de luz”.

#### 4.4 Exhibición 4: Interferencia (¿Onda o partícula?)

En la exhibición interactiva de interferencia se decidió cambiar el nombre por “¿Onda o partícula?”, en ella se presenta un gráfico que contiene la siguiente cédula explicativa:

“En el siglo XVII **Isaac Newton** propuso que la luz está formada por **partículas** (cuantos de luz) para explicar cómo la luz se refleja en las superficies y como se desvía al atravesar algunos objetos, pero no logró explicar los colores que se forman en una burbuja de jabón. Por la misma época, el holandés **Christian Huygens**, propuso que la luz es una onda. Dos siglos más tarde, **Thomas Young** hizo pasar un estrecho haz de luz sobre dos ranuras y observó sobre una pantalla la formación de franjas brillantes que alternaban con franjas oscuras, de forma parecida a como había sido observado con ondas. Este fenómeno se conoce como interferencia. Con ello demostró el comportamiento ondulatorio de la luz, y explicó que los colores en las burbujas de jabón son debidos a la suma y resta de ondas.

A partir de 1905, **Albert Einstein** y otros físicos del siglo pasado impulsaron la teoría cuántica de la luz. Actualmente sabemos que la luz es mucho más compleja y misteriosa, pues algunas veces se comporta como partícula y otras como onda.”

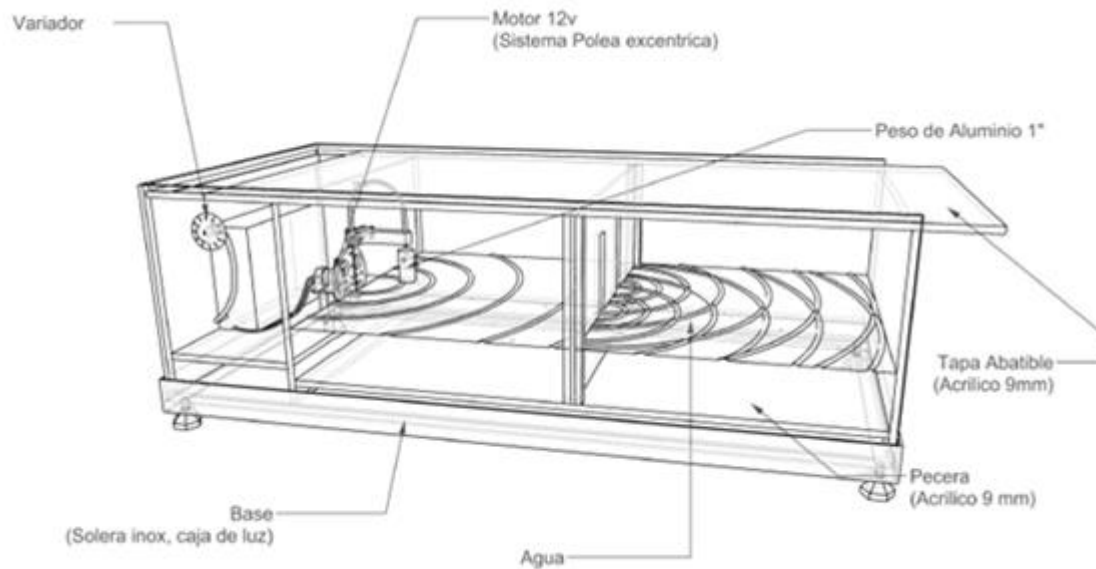
Se utiliza un sólo gráfico en el cual aparte de la cédula explicativa se le introdujo una imagen de ondas en el agua generando el fenómeno de interferencia.

Dicho gráfico se muestra en la figura 50.



**Figura 50.** En esta figura se presenta el gráfico de la exhibición “¿Onda o partícula?”.

Planos de la exhibición ¿Onda o partícula? se muestran en la figura 51.



**Figura 51.** En esta figura se muestra el plano de Partes principales de la exhibición “¿Onda o partícula?”, en ella se observa un estanque dividido y del lado izquierdo se observa el mecanismo que genera las ondas.

Se muestra render de la exhibición “¿Onda o partícula?” en la figura 52.



**Figura 52.** Simulación de exhibición “¿Onda o partícula?”, se observa el estanque con agua montado sobre una mesa rectangular de color naranja.

Se muestran fotografías de la exhibición “¿Onda o partícula?” en la figura 53.



Figura 53. Fotografías de mampara informativa y exhibición “¿Onda o partícula?”.

#### 4.5 Exhibición 5: Figuras láser tipo lissajous (Dibuja con láser o un punto en movimiento)

En esta exhibición se generaron dos módulos que desempeñan la misma actividad, una se activa por medio de un botón y la otra por medio de sonido, consta de un gráfico en donde se imprimió la cédula explicativa de la exhibición y también cuenta con el área en blanco en el cual se reflejan las figuras Lissajous. Además se cambió el nombre de figuras láser tipo Lissajous por el de “Dibuja con láser o un punto en movimiento”.

A continuación la cédula explicativa que está impresa en el gráfico.

“La luz blanca que emiten el sol y algunos focos está formada por todos los colores y viaja en todas las direcciones. La luz de un láser, por otro lado, es muy especial, ya que produce un rayo de luz de un sólo color y puede ser proyectado a grandes distancias. Para dibujar con un sólo rayo láser se utiliza un juego de espejos colocados sobre unos motores, que al accionarlos producen la llamadas figuras de *Lissajous*, nombradas así en honor a su descubridor, quien las obtuvo

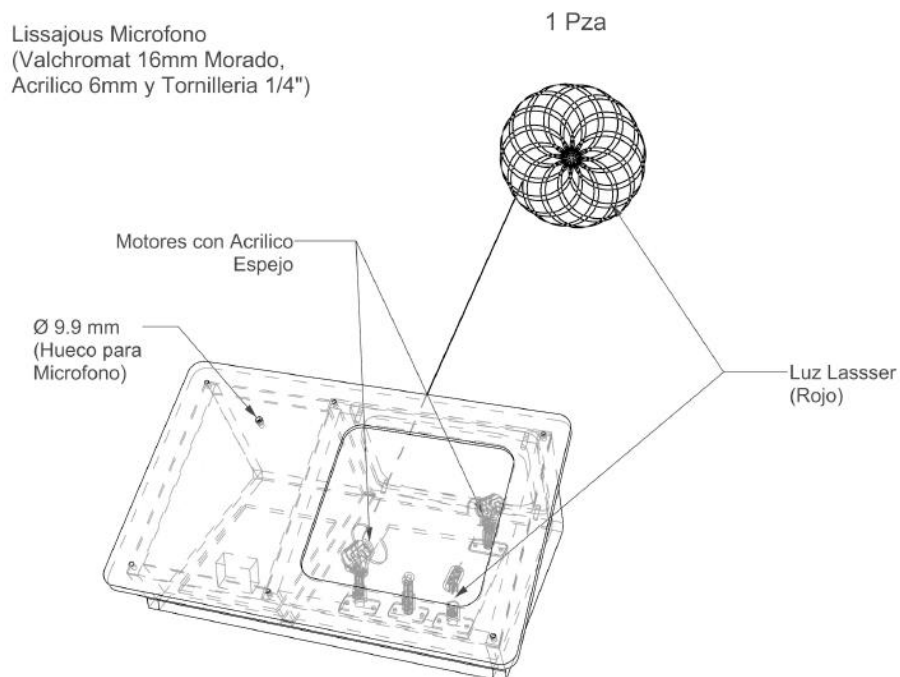
mientras investigaba la forma de hacer visible el sonido. Puesto que no se había inventado el láser, él usaba entonces una lámpara. Hoy en día el láser tiene numerosas aplicaciones en nuestra vida diaria, desde el lector de código de barras hasta las comunicaciones por fibra óptica.”

En la figura 54 se muestra gráfico de la exhibición.



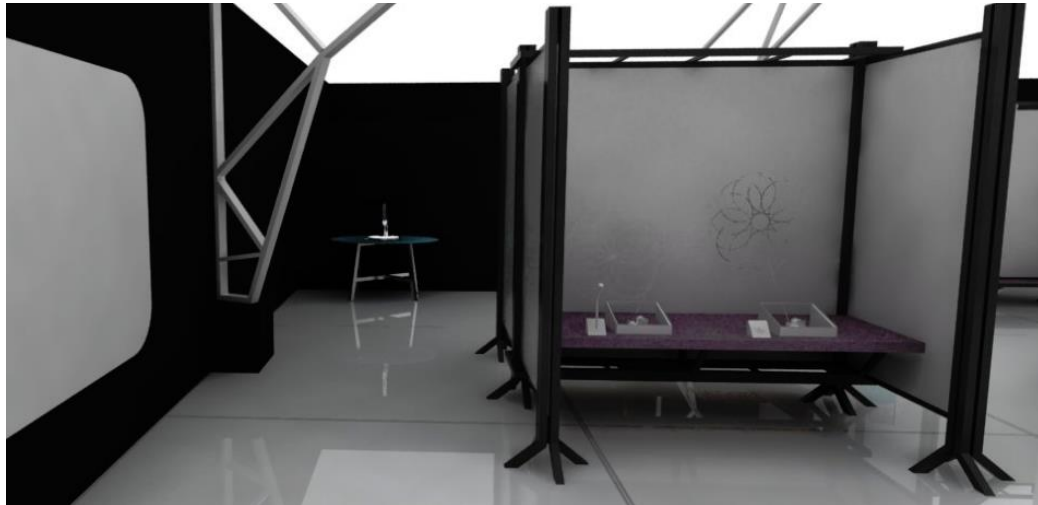
**Figura 54.** Cédula explicativa e imágenes de la exhibición “Dibuja con láser o un punto en movimiento”.

Se muestran planos de exhibición “Dibuja con láser o un punto en movimiento”.



**Figura 55.** En esta figura se muestra el plano del mecanismo que compone la exhibición de “Dibuja con láser o un punto en movimiento”, está compuesta por un micrófono, un láser y 2 espejos conectados a unos motores.

Render de la exhibición “Dibuja con láser o un punto en movimiento”, ver figura 56.

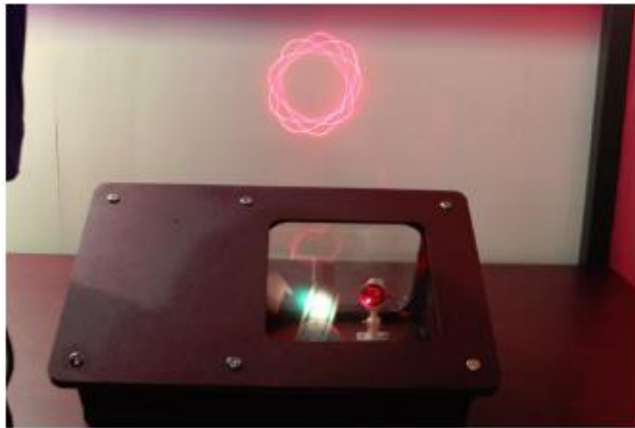


**Figura 56.** Simulación de exhibición “Dibuja con láser o un punto en movimiento”, en ella se observan los colores y los dos módulos que componen la exhibición.

Fotografías de la exhibición “Dibuja con láser o un punto en movimiento”, ver figura 57 y 58.



**Figura 57.** Fotografías de cédula informativa y equipo de exhibición “Dibuja con láser o un punto en movimiento”, en ella se muestra los 2 módulos que componen la exhibición.



**Figura 58.** Fotografía haciendo acercamiento al mecanismo de exhibición “Dibuja con láser o un punto en movimiento”, en ella se observa una figura Lissajous generada por la luz del láser.

#### **4.6 Exhibición 6: Transmisión de información a través de una fibra óptica (Comunicación por luz)**

La exhibición transmisión de información a través de una fibra óptica se le cambió el nombre por “Comunicación por luz” cuenta con dos módulos y también dos gráficas cada una para cada módulo. Además tiene una mampara que divide los módulos. La cédula explicativa quedó de la siguiente manera:

“Las fibras ópticas son filamentos de vidrio, más delgados que un cabello, que han hecho posible el flujo de información alrededor del mundo. Fueron diseñadas para transmitir grandes cantidades de datos conduciendo una forma de luz concentrada que se conoce como luz láser. En el interior de la fibra el rayo láser rebota en sus paredes y viaja grandes distancias con muy pocas pérdidas de energía. Un sistema de fibra óptica tiene tres elementos básicos: un emisor que convierte los impulsos eléctricos en luz, un canal por donde la luz se desplaza (la fibra óptica), y un dispositivo receptor que vuelve a transformar la señal luminosa en impulsos eléctricos.”

El gráfico se muestra a continuación, ver figura 59.



**Figura 59.** Cédula explicativa de la exhibición “Comunicación por luz”.

A continuación render de la exhibición “comunicación por luz”, ver figura 60.



**Figura 60.** Simulación de exhibición “Comunicación por luz”, esta exhibición está compuesta por dos módulos iguales que consisten en un micrófono y una bocina.

Fotografías de exhibición “Comunicación por luz”, ver figura 61.



Figura 61. Fotografías de exhibición “Comunicación por luz”.

#### **4.7 Exhibición 7: Arpa óptica (Cuerdas invisibles)**

A la exhibición de arpa óptica se le cambió el nombre por “Cuerdas invisibles”. Con lo que respecta al diseño e infraestructura del interactivo terminó siendo un mueble muy parecido en forma a la de un arpa convencionales, como ya habíamos mencionado con anterioridad en vez de cuerdas se adaptaron láseres de baja potencia, los planos se muestran más adelante. Cuenta con dos módulos y también dos gráficas cada una para cada módulo. Además tiene una mampara que divide los módulos. La cédula explicativa quedó de la siguiente manera:

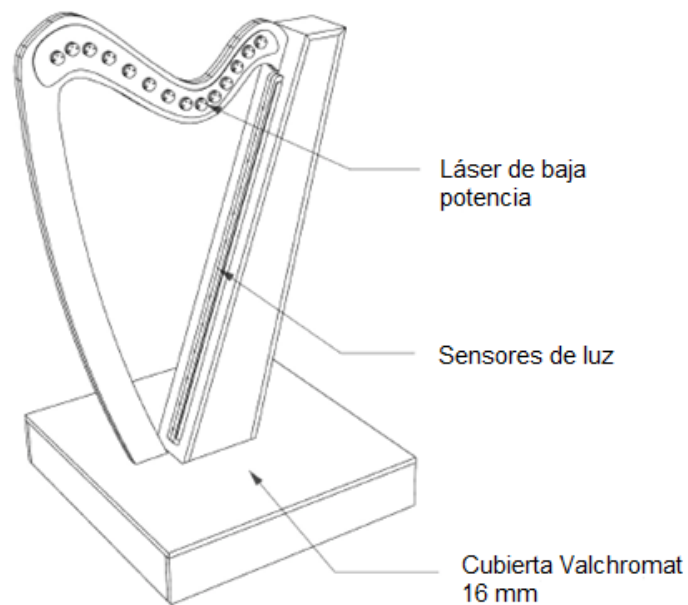
El arpa es un instrumento de cuerdas muy antiguo, que ha sufrido pocos cambios desde su creación. Esta arpa óptica tiene cuerdas invisibles que sólo se distinguen al contacto con las manos, formadas por un fino rayo láser que viaja de un extremo a otro del arpa. Cuando se interrumpe el haz de luz el sistema electrónico activa una nota musical.

El gráfico se muestra a continuación en la figura 62.



**Figura 62.** Cédula explicativa e imágenes de la exhibición “Cuerdas invisibles”.

En la figura 63 se muestran planos de exhibición “Cuerdas invisibles”



**Figura 63.** En esta figura se muestra el plano de exhibición “Cuerdas invisibles”, en el plano se muestra el área en donde están montados los sensores y los láseres, además de la cubierta el circuito electrónico.

Se muestra render de exhibición “Cuerdas invisibles” en la figura 64.



**Figura 64.** Simulación de exhibición “Cuerdas invisibles”, se muestran colores madera para el arpa y esta puesta sobre una base.

Se muestran fotografías de exhibición “Cuerdas Invisibles” en la figura 65.



**Figura 65.** Fotografías de exhibición “Cuerdas invisibles”, en ella se muestran los puntos de color rojo que corresponden a los láseres.

#### 4.8 Exhibición 8: Mezcla aditiva de colores (Fuente de colores)

A la exhibición de Mezcla aditiva de colores se le cambió el nombre por “Fuente de colores”. Se tuvo como resultado una exhibición con 3 cilindros de acrílico iluminados con los colores primarios, debido a que los 3 chorros de agua salpicaban al caer, se instaló un acrílico en la parte de enfrente de la exhibición. La cédula explicativa quedó de la siguiente manera:

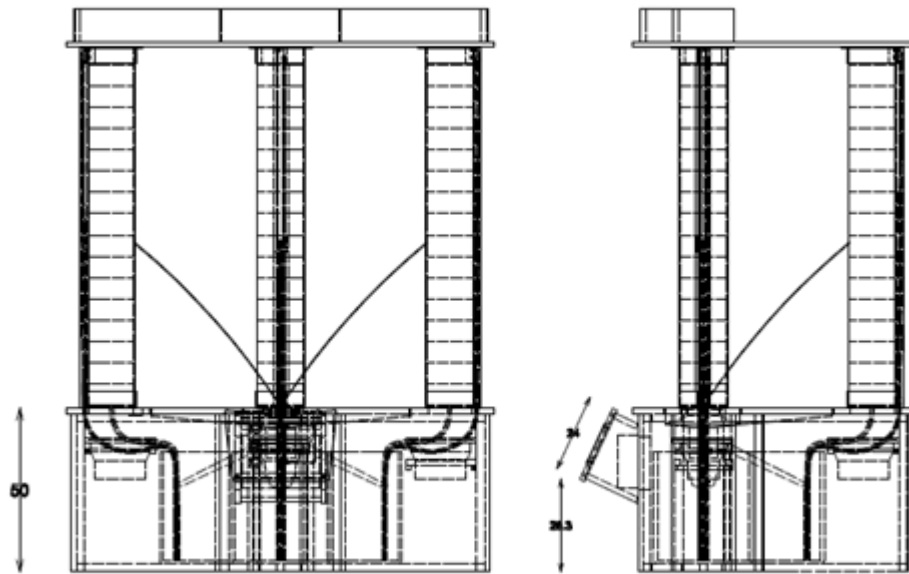
La gran mayoría de los objetos que vemos a nuestro alrededor no emiten luz; sólo se pueden ver porque reflejan la luz que incide sobre ellos. Las plantas se ven de color verde porque reflejan precisamente la luz de la longitud de onda que asociamos con el verde. Los colores básicos son el rojo, el verde y el azul. Cuando estos colores se mezclan entre sí, por parejas, aparecen los colores secundarios: magenta, cian y amarillo. El color blanco es la suma de todos los colores y el negro es la ausencia de color. A este sistema para obtener colores se le conoce como síntesis aditiva y se emplea en las pantallas de televisión.

El gráfico se muestra a continuación, ver figura 66.



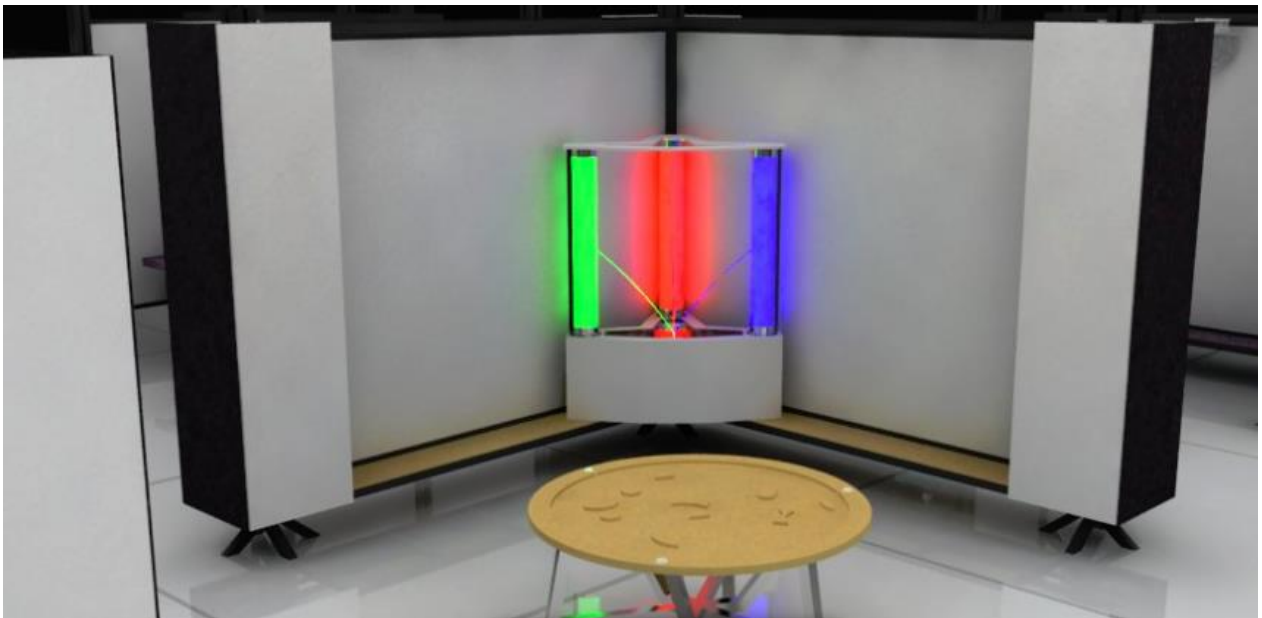
Figura 66. Cédula explicativa de la exhibición “Fuentes de color”.

Se muestran planos de la exhibición “Fuentes de colores” en la figura 67.



**Figura 67.** En esta figura se muestra el plano de frente y de costado de exhibición “Fuente de colores”, en ella se muestran los tres cilindros que la componen y de donde se generan los chorros de agua.

Se muestra Render de exhibición “Fuente de colores” en la figura 68.



**Figura 68.** Simulación de exhibición “Fuente de colores”, la cual está montada en una mampara y se visualiza que los tanques están iluminados de rojo, verde y azul.

Se muestran fotografías de la exhibición “Fuente de colores” en la figura 69.



**Figura 69.** Fotografías de exhibición “Fuente de colores”, en estas fotos se puede observar los cilindros iluminados y en la fotografía de la derecha se hace un acercamiento a los chorros de agua también iluminados.

#### **4.9 Exhibición 9: Polarización y Birrefringencia (Colores y fuerzas)**

A la exhibición de Polarización y Birrefringencia se le cambió el nombre por “Colores y fuerzas”. La cédula explicativa quedó de la siguiente manera:

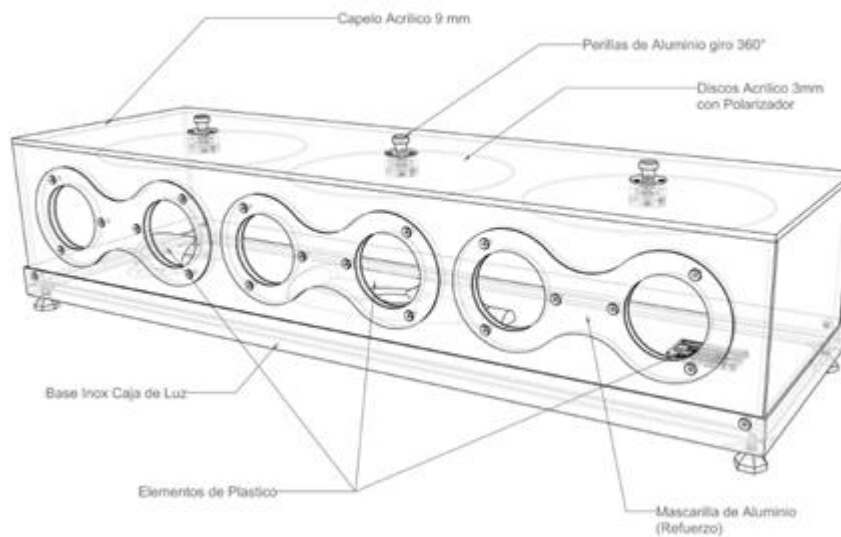
La luz natural está formada por ondas que oscilan en todas direcciones. En cambio, la luz polarizada oscila solamente de una forma. Para polarizar la luz se utilizan filtros compuestos por pequeñísimas ranuras alineadas que sólo dejan pasar la luz perpendicular a ellas y reflejan o absorben el resto. Algunos materiales, cuando son colocados a través de dos polarizadores, muestran colores. Esta propiedad, conocida como fotoelasticidad, se emplea en la industria para conocer los puntos de mayor esfuerzo de un material, los que se distinguen por concentrar más colores. Con pruebas de este tipo es posible diseñar, por ejemplo, plásticos más resistentes.

El gráfico se muestra a continuación en la figura 70.



**Figura 70.** Cédula explicativa de la exhibición “Colores y fuerzas” e imágenes del fenómeno de fotoelasticidad que se puede observar en objetos de plástico.

Los planos de la exhibición “Colores y Fuerzas” se muestran en la figura 71.



**Figura 71.** Plano de estructura de acrílico en exhibición “Colores y fuerzas”, en él se observa que lo componen tres polarizadores giratorios, tiene seis orificios y dentro tiene objetos de plástico en donde se presenta la fotoelasticidad.

El render de exhibición “Colores y fuerzas” se muestra en la figura 72.



**Figura 72.** Simulación de exhibición “Colores y fuerzas”.

Fotografías de exhibición “Colores y fuerzas” en figura 73.



**Figura 73.** Fotografías de exhibición “Colores y Fuerzas”, en la de arriba se observa la exhibición montada sobre la mesa y en la fotografía de abajo se muestran algunos elementos que se pueden analizar con los polarizadores de la exhibición.

## 4.10 Exhibición 10: Índice de refracción

La cédula explicativa de la exhibición de “Índice de refracción” quedó de la siguiente manera:

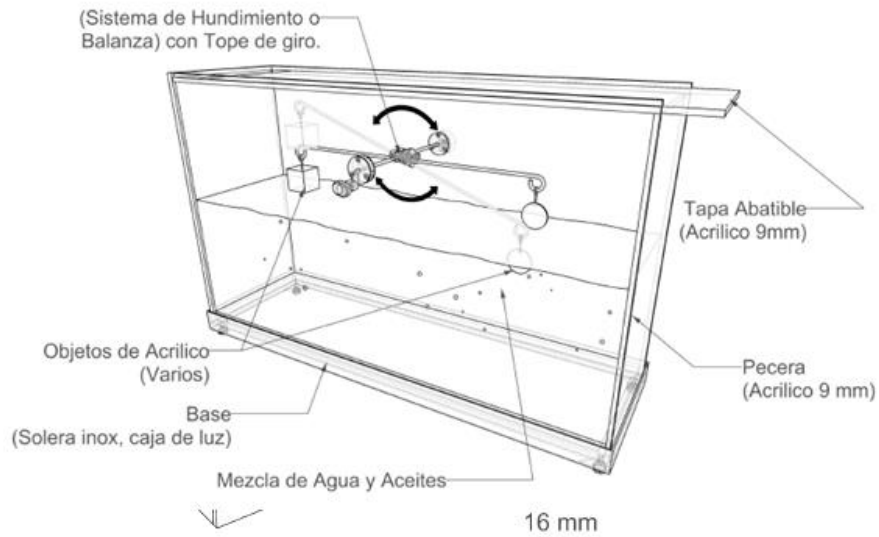
La luz viaja a una velocidad de 300 mil kilómetros por segundo. Sin embargo, cuando entra en un material su velocidad disminuye ligeramente. Este cambio se observa como una desviación de la luz cuando pasa de un medio a otro y se conoce como refracción. Este fenómeno es el responsable, por ejemplo, de que una cuchara parcialmente sumergida en un vaso de agua parezca quebrada. El índice de refracción provee información de la desviación que sufrirá la luz al atravesar un material.

El gráfico se muestra a continuación en la figura 74.



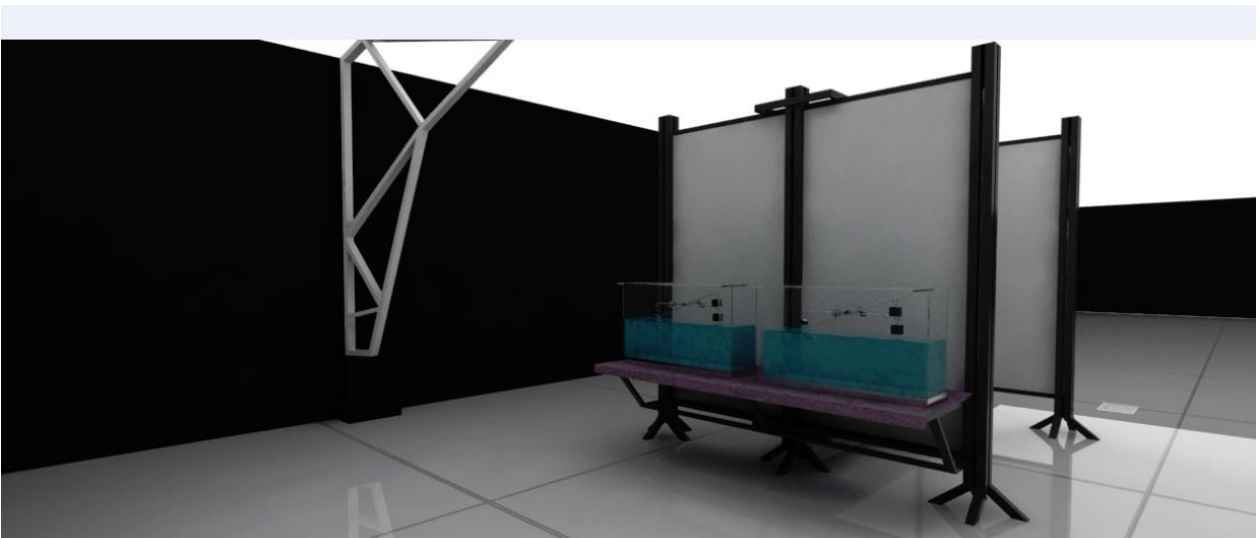
Figura 74. Cédula explicativa e imágenes de la exhibición “Índice de refracción”.

Se muestran planos de exhibición “Índice de refracción”, en la figura 75.



**Figura 75.** Plano de exhibición “Índice de refracción”, en ella se observa la pecera con la mezcla de agua y aceites que contiene, el mecanismo de la balanza y algunos objetos de acrílico que componen la exhibición.

Se muestra Render de exhibición “Índice de refracción” en la figura 76.



**Figura 76.** Simulación de exhibición “Índice de refracción”, ella se muestran las dos peceras que componen la exhibición, montadas sobre una mesa morada.

Fotografías de exhibición “Índice de refracción”, ver figura 77.



**Figura 77.** Fotografías de exhibición “Colores y Fuerzas”, en ella se aprecian las dos peceras iluminadas, las cuales componen la exhibición.

## Capítulo 5

### Conclusiones

Utilizar el ingenio para la solución de problemas es una de las actividades para las cuales fuimos capacitados como ingenieros, y en este sentido podríamos hablar de problemas mecánicos, electrónicos o quizá de programación. Una de las ventajas de tener formación de ingeniero Mecatrónico, es poder analizar esas tres áreas de oportunidad desde un punto vista más general, y de esta manera llegar a soluciones más integrales. En base a lo anterior, se apoyó el desarrollo de un proyecto de divulgación de la ciencia, una actividad que apenas está tomando fuerza, pero que es de gran importancia para seguir generando conocimiento.

El proyecto de divulgación de la ciencia tuvo como meta generar diez exhibiciones interactivas constituidas por equipos mecánicos, electrónicos o de software, diseñadas con la finalidad de explicar un fenómeno físico particular; cada una acompañada de su correspondiente cédula explicativa como apoyo para su comprensión. Estas exhibiciones interactivas fueron montadas en un área específica del museo y se sumaron así, a las ya existentes.

La temática a divulgar fue elegida de acuerdo a dos factores principales. Primero, debido al interés de sensibilizar a los visitantes sobre el impacto que ha tenido la fotónica para la evolución del mundo moderno, y segundo que el 2015 (año en el que iniciamos el proyecto) fue proclamado por la Asamblea General de la ONU como el Año Internacional de la Luz y las Tecnologías Basadas en la Luz, por lo tanto se decidió que el tema fuera: La óptica. El proyecto se titula “La óptica y sus aplicaciones a través de exhibiciones interactivas”.

Una vez clarificados los fines del proyecto, se concluye que la meta se cumplió con éxito, pues no solo se generaron las diez exhibiciones interactivas que hablaban de óptica, sino que también se generó una identidad museográfica y con ello se pudo identificar que todas formaban parte de la misma temática. Cada una de ellas contiene una cédula explicativa que facilita la comprensión del fenómeno físico para el observador

participante, y además se complementan con imágenes relacionadas que ilustran y apoyan este mismo objetivo.

Sumado a lo anterior, se hicieron mejoras al concepto original, pues las exhibiciones no solo fueron puestas en el museo, sino que se creó un área específica para su exposición. Por medio de mamparas se delimitó el lugar para su montaje, estas mismas sirven como respaldo y escenario para la presentación de las exhibiciones.

Los principales factores considerados para construir las exhibiciones fueron: el público, la arquitectura y los materiales. Con respecto al público, tomamos el promedio de afluencia del museo de los 3 últimos años, en donde notamos que está distribuida en un 66% de visitantes en grupos escolares y un 34% en público general. Del 66% constituido por público escolar, un 15% son niños de preescolar, 54% estudiantes de primaria, 16% de secundaria, 8% de preparatoria, 1% de universidad y 6% de otros niveles. Bajo estos datos se concluye que el principal impacto se dará en el público escolar en edades tempranas, de nivel primaria y secundaria, así que las cédulas explicativas y diseño de exhibiciones fueron pensados para niños de entre 9 y 14 años de edad.

Con respecto a la arquitectura y materiales; en un Museo interactivo de ciencias, la principal característica es que los visitantes tienen una interacción con las exposiciones, es decir, pueden tocar y manipular las mismas, por ello es de suma importancia la resistencia de éstas. En este sentido, las exhibiciones están realizadas con materiales plásticos de alta densidad (tercer factor), los equipos electrónicos están protegidos y se pensó en cada una de las posibilidades de accidentes. Pero es preciso decir, que siempre se tendrán factores que son difíciles de anticipar y con el uso de las exhibiciones se encontrarán mejoras que aplicar.

Aunque la meta se alcanzó, el objetivo planteado de divulgar el área de la óptica mediante exhibiciones interactivas que muestren el estado de desarrollo científico y tecnológico en temas como: el color, absorción, reflexión, refracción, esparcimiento, polarizadores, el láser, el diodo emisor de luz LED (por sus siglas en ingles), guías de onda, fibras ópticas, lentes y espejos, la óptica de nuestro ojo y espectro electromagnético y con ello resaltar el valor e impacto que tiene en la cotidianidad, apenas inicia y para evaluarlo es necesario llevar un registro de afluencias, realizar encuestas y monitorear flujos de recorridos.

Este proyecto tiene buenas bases, pues actualmente las exposiciones interactivas son una de las formas más efectivas de divulgación y comunicación de la ciencia, ya que promueven el aprendizaje significativo así como el desarrollo de habilidades y competencias indispensables para el crecimiento intelectual de cualquier persona.

En general, gracias al proyecto denominado: “La óptica y sus aplicaciones a través de exhibiciones interactivas”, el museo de ciencias de la ciudad se fortalece en infraestructura museográfica y ofrece un espacio educativo que fomenta el aprendizaje significativo, vivencial e interactivo; y se posiciona como un generador de vocaciones profesionales; de esparcimiento, de conocimiento y de inspiración para todos sus visitantes. Tener exposiciones interactivas actualizadas mejorará la calidad de la oferta de educación no formal que brindamos a la comunidad y fortalecerá los contenidos que presenta el museo.

## Referencias:

- [1].Zamarrón G. (Enero, 1994).La divulgación de la ciencia en México: una aproximación. Serie de cuadernos de divulgación I. SOMEDICYT, 1. Página 18-39
- [2] Maceira, L. (Mayo-agosto, 2008). Los museos: Espacios para la educación de personas jóvenes y adultas. Recuperado el 19 de junio 2015 de [http://www.academia.edu/10281826/La\\_importancia\\_de\\_los\\_museos\\_en\\_M%C3%A9xico](http://www.academia.edu/10281826/La_importancia_de_los_museos_en_M%C3%A9xico)
- [3] Varie-Bohan, Hugues. (1979). “Los Museos en el mundo”. España: Salva, pag.10 [http://recursos.udgvirtual.udg.mx/biblioteca/bitstream/123456789/1702/1/Los\\_museos\\_en\\_el\\_mundo.pdf](http://recursos.udgvirtual.udg.mx/biblioteca/bitstream/123456789/1702/1/Los_museos_en_el_mundo.pdf)
- [4]Jorge Padilla, Diseño construcción y operatividad de exhibiciones interactivas, Red de popularización de la ciencia y de la tecnología en América Latina y el Caribe recuperado el 22 de junio de 2015 <http://www.redpop.org/redpopAsp/paginas/pagina.asp?PaginaID=36>
- [5]Serway Raymond, Faughn Jerry. (2001). Física, quinta edición. México: Pearson Educación. Pag. 721
- [6] Figura de espectro electromagnético recuperada el 27de abril de 2016, de: <http://www.artinaid.com/2013/04/que-es-la-luz-o-el-electromagnetismo/>
- [7]Hecht, E. (2000). Óptica, tercera edición. España; ADDISSON WESLEY IBEROAMERICANA, Pag.102, 151-156.
- [8] Puell, M. (s.f.). Óptica fisiológica: El sistema óptico del ojo y la visión binocular. Página 21. Recuperado el 30 de abril de 2016 de: [http://eprints.ucm.es/14823/1/Puell\\_%C3%93ptica\\_Fisiol%C3%B3gica.pdf](http://eprints.ucm.es/14823/1/Puell_%C3%93ptica_Fisiol%C3%B3gica.pdf)
- [9] Figura de Rangos de onda de los colores, recuperada el 30 de abril de 2016 de: [http://designstorms.blogspot.mx/2011\\_04\\_01\\_archive.html](http://designstorms.blogspot.mx/2011_04_01_archive.html)
- [10] Fotografía de la interferencia en el aceite, recuperada el 30 de abril de 2016 de: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/phyopt/oilfilm.html>
- [11] Fotografía de la interferencia en burbuja de jabón, recuperada el 30 de abril de 2016 de: <http://www.proyectosandia.com/2010/07/por-que-las-burbujas-de-jabon-muestran.html>
- [12] Fotografía de Patrón de interferencia generado por dos haces provenientes de un mismo láser rojo, recuperada el 30 de abril de 2016 de:

<http://web.educastur.princast.es/proyectos/fisquiweb/Apuntes/Apuntes2Fis/InterferenciasDifraccion.pdf>

[13] Figura de polarizador recuperada el 27 de abril 2016 de <http://www.anamingroup.cl/polarimetro/>

[14] Figura de fenómeno de birrefringencia recuperada el 30 de abril de 2016 de [http://pendientedemigracion.ucm.es/info/opticaf/OPT\\_FIS/apuntes\\_sueltos\\_prov/pdf/Tema3\\_b.pdf](http://pendientedemigracion.ucm.es/info/opticaf/OPT_FIS/apuntes_sueltos_prov/pdf/Tema3_b.pdf)

[15] Figura de fotoelasticidad presente en los plásticos, recuperada el 1 de mayo de 2016 de <https://www.flickr.com/photos/51614580@N08/6808572094/in/photostream/>

[16] Figura de espectros de emisión de fuentes de luz artificial, recuperada el 1 de mayo de 2016 de [http://jcarbex.blogspot.mx/2013\\_12\\_01\\_archive.html](http://jcarbex.blogspot.mx/2013_12_01_archive.html).

[17] Figura de láser, recuperada el 27 de abril de 2016 de <http://www.clpu.es/divulgacion/bits/como-funciona-un-laser>

[18] Figura de ondas generadas por luz láser, recuperada el 1 de mayo de 2016 de <http://clinicatufet.com/blog/2014/09/22/ipl/>

[19] Figura de Lissajous en diferentes frecuencias, recuperada el 1 de mayo de 2016 de <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lissajous.svg>