



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

“DISEÑO Y PRINCIPIOS DE UN SENSOR  
OPTICO PASIVO DE PROXIMIDAD”

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO ELÉCTRICO-ELECTRÓNICO  
P R E S E N T A :  
ORAÉL HERNÁNDEZ MARTÍNEZ



DIRECTOR DE TESIS:  
DR. AUGUSTO GARCÍA VALENZUELA

MÉXICO 2005

A Dios quien me ha dado la vida, la fuerza y la sabiduría para concluir una etapa más en mi vida.

A mi padre Adolfo por su esfuerzo en darme incondicionalmente su amor y apoyo, a mi madre Cristina por darme por sus consejos.

A mi esposa Verónica por amarme, comprenderme y alentarme a cada día.

A mi tía Aurora por tener siempre palabras de estímulo en momentos difíciles.

## Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México, mi alma mater, la cual me permitió realizar mis estudios de nivel medio superior y de nivel superior.

A mis profesores de la Facultad de Ingeniería por su tiempo y conocimientos transmitidos.

Al Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico por permitirme realizar mi servicio social y mi tesis, así como el brindarme su apoyo con sus instalaciones y equipo.

Agradezco al Dr. Augusto García Valenzuela, quien siendo mi tutor me brindo su tiempo, conocimientos, experiencia y consejos, durante el desarrollo de mi tesis y estancia en el CCADET.

Agradezco a la Dra. Celia Sánchez Pérez, al Dr. Eduardo Sandoval Romero, al Dr. Juan Hernández Cordero y al Dr. Pablo Pérez Alcázar, por el tiempo que me brindaron para revisar, corregir, aconsejar y sugerir en el desarrollo de esta tesis.

Agradezco al Dr. Luis Castañeda Aviña por sus observaciones y sugerencias en la edición de esta investigación.

*Cuando se quiere demostrar una cosa general, es preciso dar la regla particular de un caso pero si se quiere demostrar un caso particular, será necesario comenzar por la regla general.*

*Blas Pascal*

*La ciencia sin amor nos aparta de Dios, y el amor aun sin ciencia y, acaso mejor sin ella, nos lleva a Dios y por Dios a la sabiduría.*

*Miguel Unamuno*

# ÍNDICE

	<b>Página</b>
<b>Introducción</b>	2
<b>Capítulo 1 Óptica Geométrica</b>	
Introducción	7
1    Radiación Óptica	7
1.1    Teoría Paraxial	13
1.2    Lentes y Divisores de Haz	14
1.3    Sistemas Ópticos	29
1.4    Radiometría y Fotometría	30
1.5    Aberraciones Cromáticas	34
<b>Capítulo 2 Fotodiodos y Amplificadores</b>	
Introducción	37
2    Teoría y Física de los Semiconductores	37
2.1    Transistores y Diodos	38
2.2    Amplificadores Operacionales	40
2.3    Configuraciones y Arreglos	41
2.4    Amplificadores de Transimpedancia	43
<b>Capítulo 3 Diseño de un Sensor Óptico Pasivo de Proximidad</b>	
Introducción	46
3    Diseño del Prototipo Experimental	47
3.1    Fundamentos Ópticos	48
3.2    Diseño de la Electrónica para Amplificación de DC	60
<b>Capítulo 4 Resultados</b>	
4    Pruebas y Experimentación	67
4.1    Resultados Obtenidos	68
4.2    Análisis de Resultados	70
4.3    Ventajas y Aportaciones del Proyecto	74
4.4    Aplicaciones	75
<b>Capítulo 5 Conclusiones</b>	
5    Conclusiones	78
<b>Anexos</b>	
Bibliografía y Referencias	81
Anexo 1	83

## RESUMEN

En la actualidad existen muchos instrumentos para la medición de distancias, o bien para sensor proximidad de objetos o superficies. Estos dispositivos pueden ser pasivos o activos, aunque la mayoría son de tipo activo. Sin embargo, ninguno hasta el momento puede ser utilizado como ayuda para personas ciegas. La razón se debe a que no están diseñados para esta aplicación. Observando esta problemática, surgió el interés por desarrollar un sensor de proximidad óptico pasivo. El proyecto es ambicioso, ya que no se conoce actualmente una propuesta similar, y su desarrollo partió prácticamente de cero. Las expectativas principales del prototipo a desarrollar es que sea portátil, de bajo consumo de energía, y brinde una ayuda complementaria a personas ciegas. En esta tesis se mostrarán los principios y el diseño del sensor de proximidad óptico pasivo, el modelo físico-matemático obtenido, así como las características y análisis de los resultados de las pruebas realizadas al prototipo, en un intervalo de operación de 0 a 6 metros, así mismo, se presentan algunas de sus principales ventajas, como su resolución mínima de 30 cm y su alcance máximo obtenido de 4.5 m, que a comparación de otros homólogos pasivo, es superior, finalmente se propone al termino de este trabajo una propuesta de mejora al sistema, con el cual podría ser posible obtener información 3D del entorno.

## INTRODUCCIÓN

En México se presenta en gran medida la incapacidad de obtener información de cualquier índole, ya sea con fines de investigación, desarrollo tecnológico, estadístico, etc. Esto debido a que no se tiene la infraestructura ni los servicios para obtenerla, y donde nadie queda exento de sufrir estas consecuencias, que en muchas ocasiones suelen ser frustrantes. Sin embargo, esto es tan solo una pequeña parte de lo que las personas discapacitadas visualmente sufren a diario. Debido a esta carencia de información visual, su desarrollo personal y convivencia con la sociedad se ve muy limitado. La discapacidad es la causante de su infortunio, ya que la restricción o ausencia de poder realizar algunas actividades, limita física y psicológicamente a estas personas. Esta discapacidad puede ser temporal o definitiva, reversible o irreversible. El sufrir una deficiencia visual, complica más el desarrollo de una persona dentro de la sociedad que otras discapacidades, y se vuelve un desafío, y más aun cuando no se tienen los recursos o medios necesarios para enfrentarlo. Para estas personas la esencia de su desenvolvimiento depende en gran manera de la información que posean. Muchas de las limitantes presentadas en estas personas, se debe principalmente a las dificultades presentadas para su desplazamiento, entorpeciendo su integración y desarrollo en la sociedad.

Desde tiempos remotos, el ser humano se traslada de un lugar a otro utilizando primordialmente para ello el sentido de la vista. El hombre relaciona puntos de ubicación con su visión para lograr desplazarse en su medio. Para ello las personas requieren información del medio, ya sea para reconocer el

terreno como para estimar la proximidad de los objetos que se encuentran en dicho medio. Actualmente muchas de las personas con discapacidad visual se apoyan en bastones o perros lazarillos. La última opción es muy costosa en su adquisición como en su manutención, y la primera muy limitada. La carencia de algún sentido, ya sea auditivo, sensitivo o visual, coloca a los individuos en desventaja e impide que se relacionen de una forma habitual. Es por ello que la medicina e ingeniería se dan a la tarea del desarrollar dispositivos adaptativos, con los cuales se logre aminorar la carencia de algún sentido. Con ello, estas personas pueden auxiliarse y desarrollar mejor sus vidas.

La discapacidad visual es una problemática importante en México. Cerca de 2 millones de personas <sup>[1]</sup> la padecen. Una persona invidente tiene la necesidad de conocer la proximidad y la distancia a la que se encuentran aquellos objetos que lo rodean. Es clara la importancia del desarrollo de artefactos tecnológicos que les proporcionen una solución, al menos parcial, a sus necesidades. En la actualidad existen prototipos de ayuda al invidente, que se han desarrollado para determinar la proximidad a objetos cercanos. También, estos dispositivos son empleados en la industria y la robótica para líneas de producción. Entre esta clase de sensores de proximidad se ubican los de tipo capacitivo, inductivo, ultrasónicos y ópticos. Actualmente los dispositivos más exitosos son aquellos basados primordialmente en ultrasonido <sup>[2]</sup>. Sin embargo, un dispositivo óptico podría dar mayor información y con mejor resolución. Atacar este problema es el objetivo del presente trabajo, teniendo como metas principales, el diseñar un dispositivo que opere con baja energía y sin procesamientos de señal complejos. Se desea que este sistema sea



pasivo, para no requerir transmitir ningún tipo de energía al medio con el que se interactúa. El sistema a diseñar, solo necesitará de la energía luminosa proveniente de los objetos del sitio donde estas personas se encuentren. La información que proporcionará el sensor, estará asociada a la cercanía de los objetos, brindando algún tipo de señal en función de la proximidad del objeto al que se dirija el sensor, independientemente de la forma, color e iluminación de éste. El alcance deseado es registrar distancias desde los 50 cm. hasta los 10 metros, con una resolución mínima de 30 cm.

En esta tesis se expone el diseño de un posible dispositivo, el modelo teórico, y los resultados experimentales. Se exponen los principios, diseño e interpretación de los modelos teóricos implementados que forman parte de la contribución de esta tesis. Se observarán, analizarán y discutirán, las ventajas y desventajas del sistema basado en los resultados experimentales. Por último, se realizarán propuestas de interfases por desarrollar, y se expondrán líneas futuras de investigación para mejorar e implementar los principios utilizados en otros problemas actuales.

## **Capítulo 1 Óptica Geométrica**

## Introducción

La naturaleza y el comportamiento de la luz es el tema central de este capítulo. Se revisarán brevemente conceptos y fenómenos fundamentales de la óptica. La propagación, el esparcimiento y la radiación de luz en sistemas ópticos, son conceptos necesarios para entender el funcionamiento del dispositivo propuesto en el capítulo 3.

### 1 Radiación Óptica

La luz consiste físicamente de oscilaciones electromagnéticas que tienen una amplia banda de frecuencias<sup>[3]</sup>. Los distintos tipos de radiación electromagnética forman el espectro electromagnético, que está constituido por: ondas de radio, microondas, luz infrarroja, visible y ultravioleta, rayos X y rayos gamma<sup>[3-5,14]</sup>. Para todas las radiaciones electromagnéticas, la velocidad de propagación de las ondas en el vacío es la misma y se toma igual a 300 000 km/s. Cada uno de estos tipos de radiación se distingue por un parámetro físico denominado longitud de onda. Del espectro total de las oscilaciones electromagnéticas se destaca el óptico, al que pertenecen oscilaciones con longitudes de onda de  $\lambda = 0.001$  nm a  $\lambda = 1$  cm. En la figura 1.1 se muestra la disposición de la banda óptica en el espectro total de las oscilaciones electromagnéticas. La luz reflejada por los cuerpos en el espacio, son oscilaciones electromagnéticas que se encuentran dentro de una cierta banda del espectro de las oscilaciones electromagnéticas, cada una de estas forman parte de lo que constituye la radiación óptica, o bien la luz.

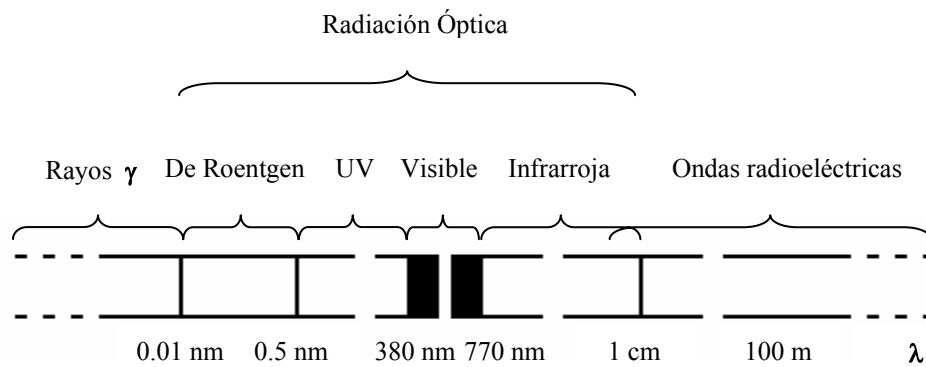


Fig. 1.1 Espectro de las oscilaciones electromagnéticas.

La radiación ultravioleta se sobrecubre por la de los rayos X, la infrarroja por la radiación de las ondas de radio. Si la radiación se produce solo con una frecuencia (longitud de onda “  $\lambda$  ”), se llama radiación monocromática. Por lo cual la radiación sumaria en cierto intervalo de longitudes de onda se llama radiación integral, que muchas veces nosotros observamos como luz blanca o luz de día. La detección de cada tipo de radiación electromagnética requiere de distintos tipos de detectores, como son telescopios ópticos y fotodetectores: que trabajan con luz visible, infrarrojo cercano y ultravioleta cercano <sup>[13]</sup>. La región del espectro va aproximadamente de 300 nm a 1000 nm (1nm o nanómetro =0.00000001m). También existen otras clases de instrumentos que son utilizados para medir diferentes tipos de longitudes de onda, como son detectores geiger, fotodetectores, fotosensores, los cuales dependiendo de su fabricación es la selectividad para detectar ciertas longitudes de onda. La luz que vemos con nuestros ojos generalmente está formada por una superposición de luz azul ( $\lambda=450$  nm), luz amarilla ( $\lambda=550$  nm) y luz roja ( $\lambda=650$  nm). Y es con la cual recaban nuestros ojos información para formar imágenes por medio de impulsos eléctricos en nuestro cerebro. Para una mejor comprensión del la luz y su interacción con los medios, hay que recurrir a los

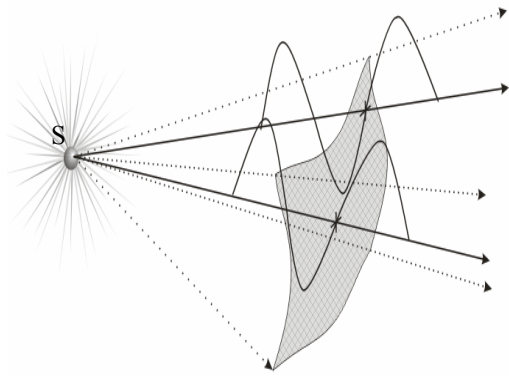


Fig. 1.2a Segmento de onda esférica.

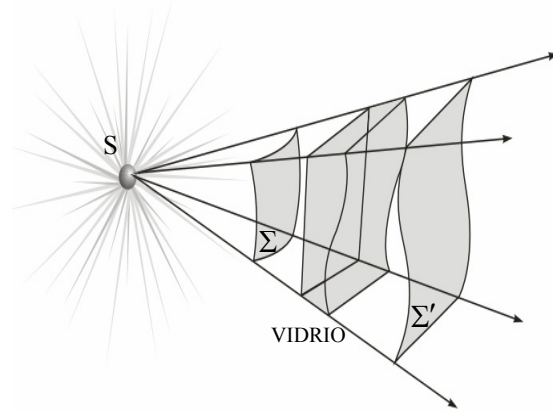


Fig. 1.2b Distorsión de una porción de un frente de onda al pasar por un medio no uniforme.

trabajos de Christian Huygens del año 1678, donde define a la luz como un fenómeno ondulatorio semejante al que se produce con el sonido. Proponiendo que un frente de onda “es una superficie sobre la cual un disturbio óptico tiene fase constante” [3], a manera que si se observa una pequeña porción de un frente de onda esférico  $\Sigma$ , que está emanando de una fuente puntual monocromática  $S$  en un medio homogéneo (Fig. 1.2a), observaremos claramente, que el radio  $r$ , del frente de onda después de algún tiempo  $t$ , será simplemente  $r + vt$ , donde  $v$  es la velocidad de la fase de onda siempre y cuando el medio sea homogéneo. Cuando la luz pasa a través de una hoja de vidrio no uniforme (Fig. 1.2b), se puede enunciar el principio de Huygens, es decir de que “cada punto en un frente de onda primario sirve como una fuente de ondas esféricas secundarias, tales que el frente de onda primario, un momento mas tarde, es la envolvente de estas ondas secundarias. Además, las ondas avanzan con una rapidez y frecuencia igual a la de la onda primaria en cada punto del espacio” [3]. Por lo tanto, si el medio es homogéneo, las ondas pueden construirse con radio finito, mientras que si no lo es, las ondas secundarias tendrán que tener radios infinitesimales. Se logra así observar claramente una vista del frente de la onda  $\Sigma$ , al mismo tiempo que un número

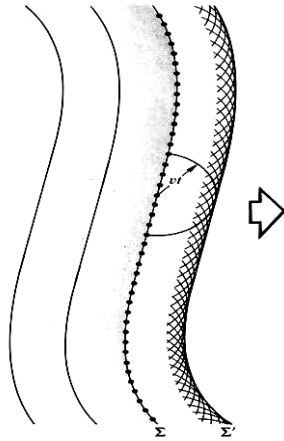


Fig. 1.3 Propagación de un frente de onda por medio del principio de Huygens.

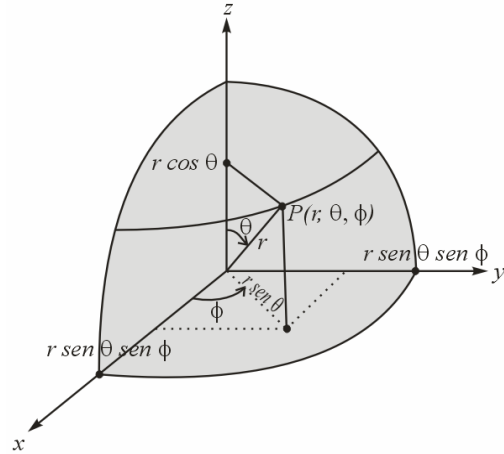


Fig. 1.4 Geometría de las coordenadas esféricas.

de ondas esféricas secundarias, que después de un instante  $t$ , se han extendido hasta un radio  $vt$ , es ahí donde se dice entonces que la envolvente de todas estas ondas secundarias corresponde a la onda primaria avanzada  $\Sigma'$  (Fig. 1.3).

Como ya se dijo la luz es una perturbación de género electromagnético, y su viaje puede describirse por medio de la ecuación de onda. Para describir lo anterior ubiquemos una fuente puntual de luz en el espacio, la radiación que emana de ésta, fluye radialmente hacia afuera en todas direcciones uniformemente. Considerando que la fuente es isotrópica, y que para modelar la propagación se utilizan ondas esféricas que facilitan su descripción. Los frentes de onda resultantes serán esferas concéntricas centradas en la fuente [3,5]. Considerando que la representación del operador Laplaciano en coordenadas esféricas es:

$$\nabla^2 \equiv \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \text{sen} \theta} \frac{1}{\partial \theta} \left( \text{sen} \theta \frac{\partial}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \text{sen}^2 \theta} \frac{\partial}{\partial \phi^2}, \quad (1.1)$$

y que  $r, \theta$  y  $\phi$  se definen por:

$$x = r \text{sen} \theta \cos \phi, \quad y = r \text{sen} \theta \text{sen} \phi, \quad z = r \cos \theta.$$

Al buscar la descripción de las ondas, vemos que para una fuente isotrópica en la que el campo no depende de  $\theta$  ni de  $\phi$ , de modo que el Laplaciano de  $\psi(r)$  es simplemente <sup>[3,5-7]</sup>:

$$\nabla^2 \psi(r) = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial \psi}{\partial r} \right). \quad (1.2)$$

Partiendo de la forma cartesiana del Laplaciano y operando sobre la función de onda  $\psi(r)$  que es simétricamente esférica, al convertir cada término a coordenadas polares y examinando solamente la dependencia de  $x$  tenemos:

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} = \frac{\partial \psi}{\partial r} \frac{\partial r}{\partial x} \quad \text{y} \quad \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} \left( \frac{\partial r}{\partial x} \right)^2 + \frac{\partial \psi}{\partial r} \frac{\partial^2 r}{\partial x^2}, \quad (1.3)$$

Usando  $x^2 + y^2 + z^2 = r^2$ , y al manipular las expresiones obtenemos:

$$\nabla^2 \psi(r) = \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r},$$

la cual es equivalente a la Ec.1.2, y se puede expresar también como:

$$\nabla^2 \psi = \frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial r^2} (r\psi).$$

Así, la ecuación de onda  $\nabla^2 \psi = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0$  se puede escribir en este caso como <sup>[3,7]</sup>:

$$\frac{\partial^2}{\partial r^2} (r\psi) = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} (r\psi),$$

donde la solución general es:

$$\psi(r, t) = C_1 \frac{f(r - vt)}{r} + C_2 \frac{g(r + vt)}{r},$$

por lo que la onda esférica armónica es:

$$\psi(r, t) = \left( \frac{\mathcal{A}}{r} \right) \cos k(r \pm vt) \quad \text{o como} \quad \psi(r, t) = \left( \frac{\mathcal{A}}{r} \right) e^{ik(r \pm vt)}. \quad (1.3a)$$

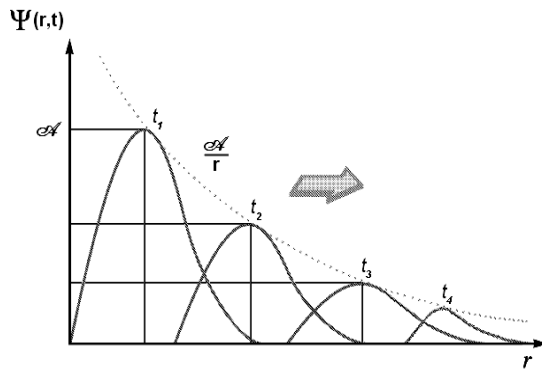


Fig. 1.5 Exposición cuádruple de un pulso esférico.

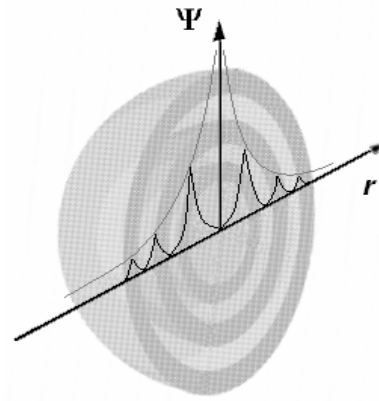


Fig. 1.6 Frentes de onda esféricos.

De la expresión anterior la constante  $\mathcal{A}$  se le llama intensidad de la fuente. Para cualquier valor fijo del tiempo la solución 1.3a, representa una agrupación de esferas concéntricas que llenan todo el espacio, cada frente de onda, o superficie de fase constante, está dado por:  $Kr = \text{constante}$ . Es ahí donde se observa que la amplitud de cualquier onda esférica es una función de  $r$  (Fig. 1.5). El término  $r^{-1}$  sirve como un factor de atenuación <sup>[3]</sup>. Al contrario de una onda plana, una onda esférica disminuye en amplitud, sufriendo un cambio en su perfil cuando se expande y se aleja del origen. En la Fig. 1.5 se ilustra gráficamente mostrando una exposición múltiple de un pulso esférico en cuatro tiempos diferentes. El pulso tiene la misma extensión en el espacio y en cualquier punto a lo largo de cualquier radio  $r$ , es decir que el ancho del pulso a lo largo del eje  $r$  es una constante. La figura 1.6 es un intento de relacionar la representación de  $\psi(r,t)$ , a su forma real como una onda esférica, la cual representa la mitad de un pulso esférico en tres tiempos diferentes cuando la onda se expande hacia fuera. Observamos así que la perturbación senoidal de la Fig. 1.6 esta acotada por las curvas:

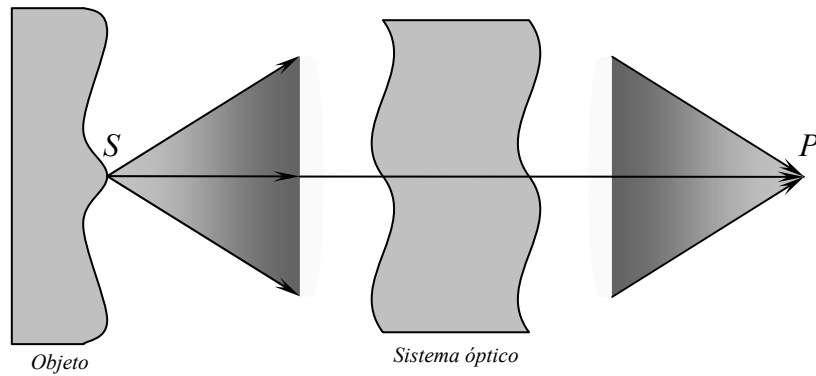
$$\Psi = \frac{\mathcal{A}}{r} \quad \text{ó} \quad \Psi = -\frac{\mathcal{A}}{r}. \quad (1.3b)$$



Finalmente, la onda esférica viaja hacia fuera, emanada de una fuente puntual. Al alejarse de la fuente puntual, una porción del frente de la onda parecerá más una onda plana. Dado esto, en general podemos aproximar el comportamiento de la luz, como una expresión de ondas planas o como ondas esféricas <sup>[3]</sup>. Estos conceptos son necesarios para comprender la formación de imágenes.

## 1.1 Teoría Paraxial

En la sección anterior se habló de la forma en que la luz se expande. Ahora, si la propagación de la luz se entiende como una perturbación en forma esférica que se expande, se observará que el radio de las ondas esféricas ira aumentando conforme se desplaza, conservando siempre una relación existente entre su radio y la amplitud de su energía. En la naturaleza cuando los objetos son iluminados externamente, nosotros podemos suponer que la luz que emana o se refleja de estos cuerpos, proviene de un gran número de fuentes puntuales. Cada una de éstas emite ondas esféricas y los rayos emanan radialmente en la dirección en que fluye la energía. Con nuestros ojos observamos los frentes de onda de estas perturbaciones, sin embargo, no capturamos toda la energía de las mismas, si no una pequeña porción del frente de onda. La descripción del comportamiento de estos frentes de onda, en dispositivos o medios reflectores y refractores que forman un sistema óptico, es en lo que se enfoca la óptica geométrica y la teoría paraxial. Para expresar el desplazamiento, y la propagación de estos frentes de onda, se utiliza la representación por medio de rayos, donde estos representan la dirección del flujo de la energía radiante y de los frentes de onda. Para visualizarlo,



*Fig. 1.7 Rayos convergentes y divergentes.*

supongamos un punto  $S$  de un objeto, del cual emanan un número infinito de rayos en forma radial (Fig. 1.7), estos rayos pueden hacerse pasar a través de un punto  $P$ , por medio de un sistema óptico. Lo anterior sugiere que la función de los sistemas ópticos, es coleccionar y cambiar la forma de una porción de un frente de onda incidente, a menudo con la intención final de formar la imagen de un objeto. En la actualidad un ejemplo de estos sistemas son las lentes, el funcionamiento y uso de las diferentes clases de lentes, se conocerá en la siguiente sección.

## 1.2 Lentes y Divisores de Haz

### Lentes

Una gota de agua, fue quizás una de las primeras lentes que conoció el hombre, ya que a través de ella logró observar una pequeña imagen amplificada. Esto debido a que el contorno de una gota de agua tiene forma de elipsoide. Al contorno de la gota la llamaremos interfase. Las interfases se forman al existir siempre medios materiales diferentes donde se propicia que la luz viaje a diferente velocidad. Es preciso conocer algunas características de estas interfaces, y la interacción de los frentes de onda de una fuente con ellas. Así que, imaginemos una fuente puntual  $S$  en el espacio, cuyas ondas

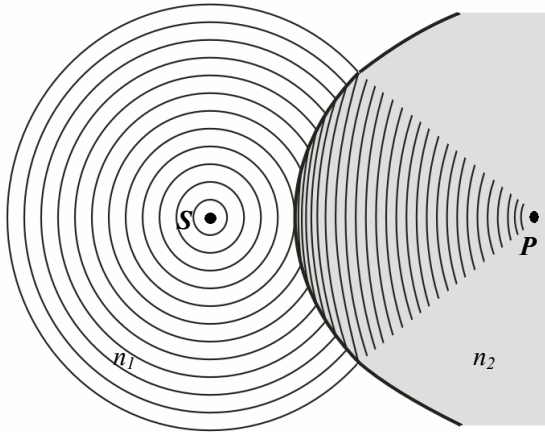


Fig. 1.8 Enfocamiento de una onda esférica por una interfase refractora ( $n_1 < n_2$ ).

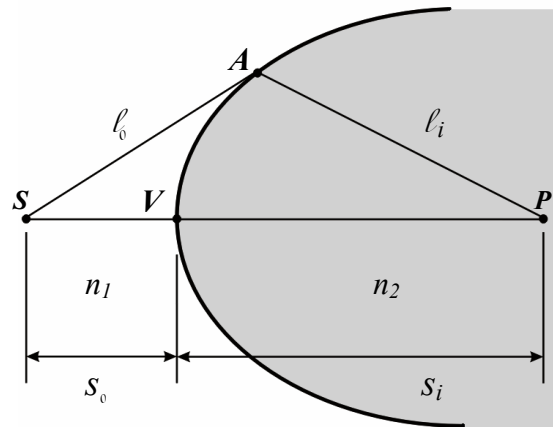


Fig. 1.9 El ovalo cartesiano.

esféricas llegan a una interfase entre dos medios transparentes (Fig. 1.8), y deseamos determinar el contorno que debe tener la interfase, a fin de que los frentes de onda que viajan dentro del segundo medio, converjan a un punto  $P$ , formando ahí una imagen perfecta. Podemos observar en la Fig. 1.9, que el tiempo que toman todas y cada una de las porciones de un frente de onda provenientes de  $S$ , para converger en  $P$ , debe de ser idéntico. El principio de Fermat nos enuncia que “Si muchos rayos diferentes deben de ir de  $S$  a  $P$ , cada rayo debe de atravesar la misma Longitud de camino óptico” [3]. Por lo tanto si para  $S$   $n_2 > n_1$ , tendremos que:

$$l_0 n_1 + l_i n_2 = S_0 n_1 + S_i n_2,$$

donde  $S_0$  y  $S_i$  son las distancias al objeto imagen, medidas desde el vértice o polo  $V$  respectivamente. Al escoger  $S_0$  y  $S_i$ , el lado derecho de esta ecuación queda expresado como:

$$l_0 n_1 + l_i n_2 = \text{constante}.$$

La expresión anterior es la ecuación de un ovalo cartesiano; por lo que cuando una interfase entre dos medios presenta forma de ovalo cartesiano de revolución alrededor de  $\overline{SP}$ , o eje óptico  $S$  y  $P$ , se les llama puntos

conjugados. Es decir, una fuente puntual en cualquiera de las dos ubicaciones tendrá una imagen perfecta en la otra. Lo principal de ello es que uno busca transformar los frentes de onda con un fin o propósito específico. Hay que tener en cuenta que una onda plana incidente convergerá al foco mas alejado de un elipsoide, tal como una onda esférica emitida de ese foco emergerá como una onda plana, nosotros podemos esperar de la Fig. 1.8, que si se logra mover el punto  $S$  hacia el infinito, el ovoide se transformará gradualmente en

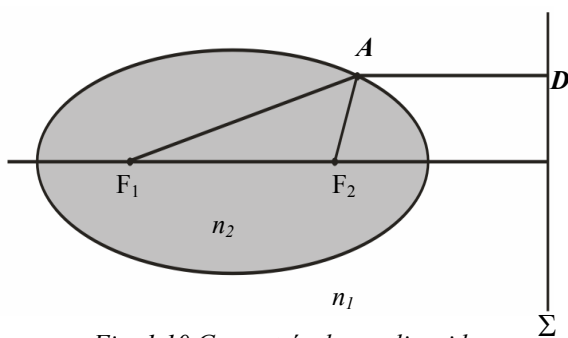


Fig. 1.10 Geometría de un elipsoide.

un elipsoide. Al examinar la Fig. 1.10, observamos la relación de las longitudes de los caminos ópticos de cualquier punto  $D$  en el frente de onda plano  $\Sigma$  al foco  $F_1$ , que debe ser igual a la misma

constante  $C$ , o sea:

$$(\overline{F_1A})n_2 + (\overline{AD})n_1 = C$$

ó

$$(\overline{F_1A}) + (\overline{AD})n_{12} = C/n_2. \tag{1.4}$$

Para comprobar que la relación se satisface por un elipsoide de revolución, debemos de tener en cuenta que si  $\Sigma$  corresponde a la directriz de la elipse, entonces se tiene que  $(\overline{F_2A}) = e(\overline{AD})$  donde  $e$  es la excentricidad. Entonces, si  $e = n_{12}$ , el lado izquierdo de la Ec. 1.4 queda como  $(\overline{F_1A}) + (\overline{F_2A})$ <sup>[3]</sup>, la que será constante siempre para una elipse. Aquí la excentricidad es menor que uno ( $e = n_1/n_2$ ), pero si ésta fuere mayor que uno (es decir  $n_1 > n_2$ ), la curva sería una hipérbola. Así con esta información uno puede construir

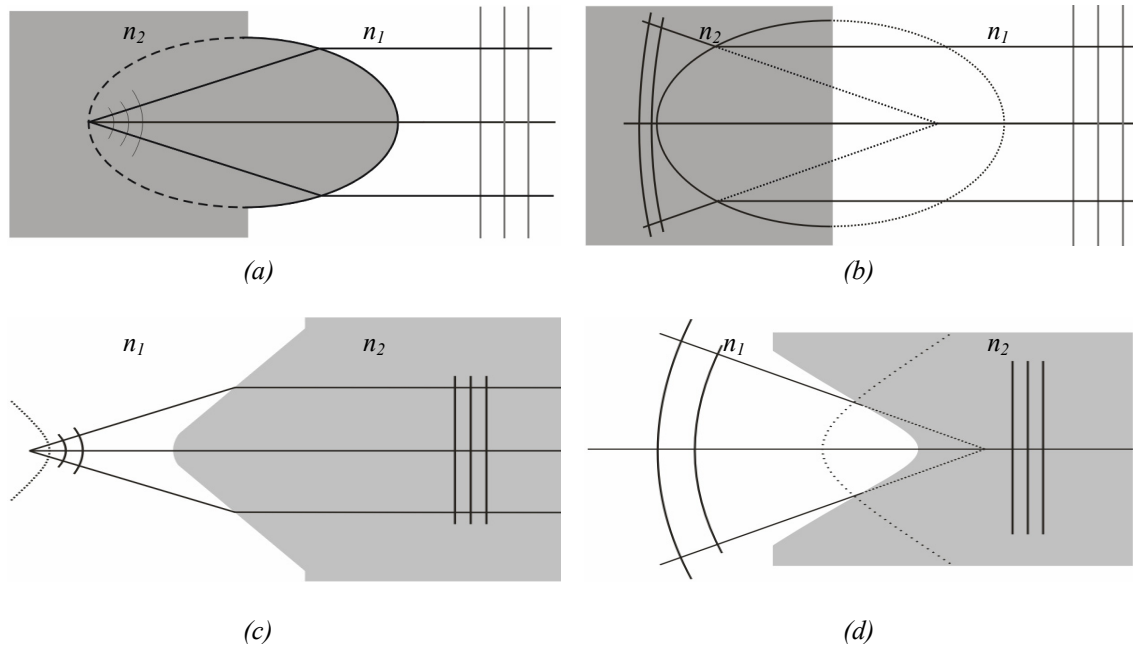


Fig. 1.11 Superficies refractoras elipsoidales e hiperboloidales ( $n_2 > n_1$ ).

arreglos de interfaces, con la finalidad de manipular los frentes de onda a nuestra voluntad, y así formar sistemas ópticos donde principalmente lo que se desea o busca es formar imágenes. La agrupación de interfases permite construir diferentes tipos de lentes. Para esta investigación solo consideraré las más importantes, el primer tipo se denomina hiperbólica doble convexa<sup>[3,5-9]</sup> (del latín *convexus*, significa arqueado). Esta se ilustra en la Fig. 1.11a, donde una onda esférica divergente se transforma en plana después de atravesar la primera superficie hiperbólica. Ahora, si una de las interfases es plana y la otra es hiperbólica, tenemos una lente plano-hiperbólica convexa<sup>[3,5-9]</sup> como en la Fig. 1.11b, donde las ondas planas dentro de la lente pegarán a la superficie posterior perpendicularmente y emergerán sin alteración. Otro tipo es la lente esfero-elíptica convexa<sup>[3,5-9]</sup>, que convierte ondas esféricas en ondas planas como se muestra en la Fig. 1.11c. Por último la plano-hiperbólica cóncava (del latín *concavus*, que significa hueco o cavidad). En la Fig. 1.12 se pueden observar, algunas de las combinaciones de interfases con las cuales se forman

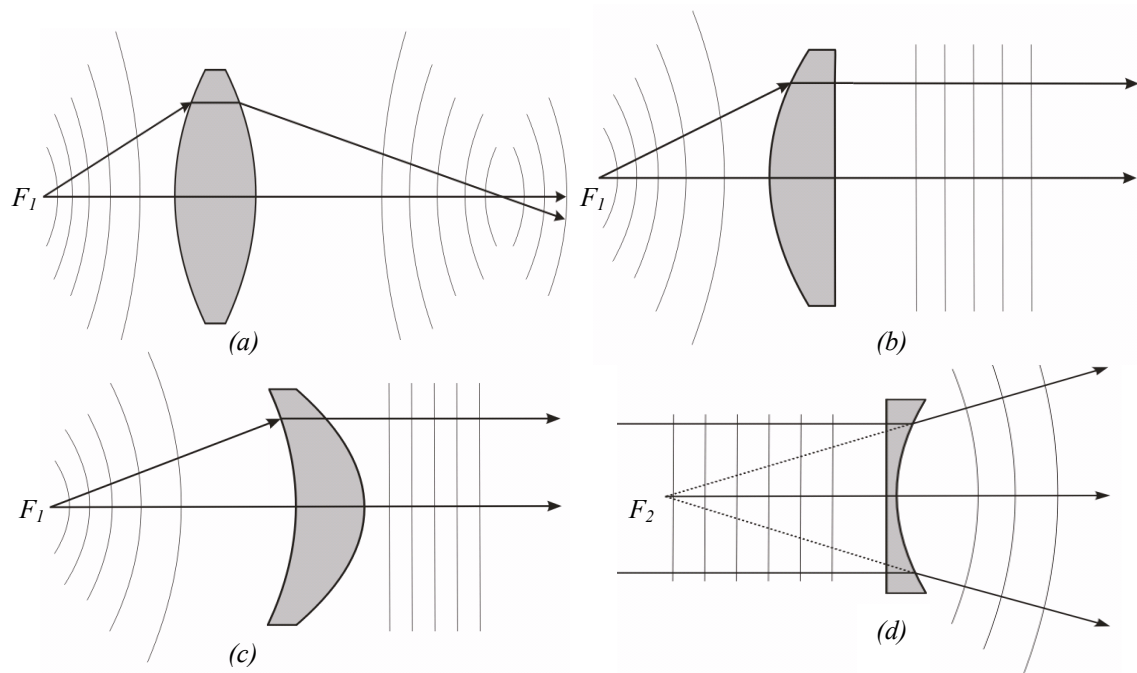


Fig. 1.12 (a) Lente hiperbólica. (b) Lente convexa hiperbólica plana. (c) Lente esfero-elíptica. (d) Lente plano hiperbólica.

diferentes tipos de lentes. Los errores producidos por las lentes son conocidos como aberraciones, estando presentes siempre, aunque con la tecnología de fabricación actual se controlan y aminoran. Limitando solo a producir errores debidos a la difracción. En la Fig. 1.13 se muestra la propagación por medio de ondas y trazo de rayos de la fuente puntual  $S$ , que llegan a una interfase esférica de radio  $R$  centrada en  $C$ . Ahí se observa que el rayo  $(\overline{SA})$  es refractado en la interfase en  $A$  (donde  $n_2 > n_1$ ) hacia el eje óptico. Teniendo en cuenta que si algún punto  $P$  cruzará el eje como lo harán otros rayos incidentes con el mismo ángulo  $\theta_i$ . El principio de Fermat sostiene que la longitud de camino óptico (L.C.O.) es estacionaria, es decir su derivada con respecto a la variable de posición es cero <sup>[3,9]</sup>. Para el rayo en cuestión tenemos que:

$$\text{L.C.O.} = n_1 l_0 + n_2 l_i .$$

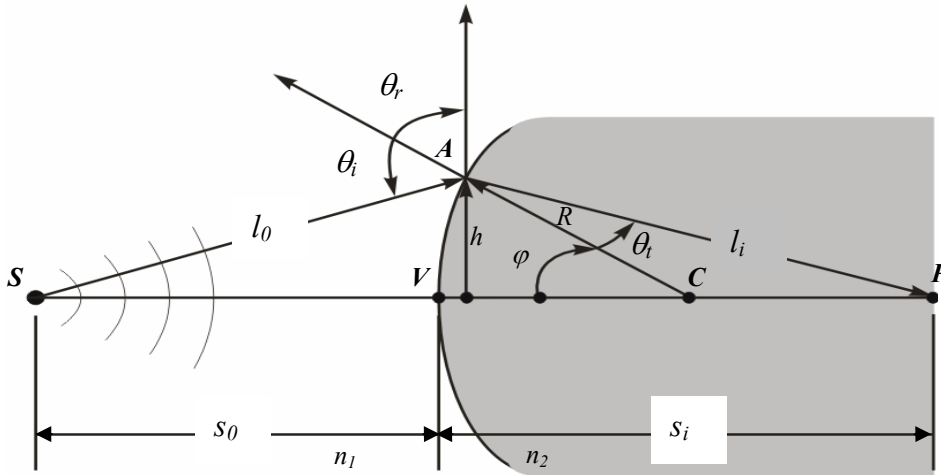


Fig. 1.13 Refracción en una interfase esférica.

Usando la ley de los cosenos en los triángulos  $SAC$  y  $ACP$  junto con el hecho de que  $\cos \varphi = -\cos(180 - \varphi)$  obtenemos que <sup>[3]</sup>:

$$l_0 = \left[ R^2 + (s_0 + R)^2 - 2R(s_0 + R)\cos \varphi \right]^{\frac{1}{2}}$$

Y

$$l_i = \left[ R^2 + (s_i - R)^2 + 2R(s_i - R)\cos \varphi \right]^{\frac{1}{2}}.$$

La L.C.O. se puede escribir como:

$$(\text{L.C.O.}) = \left[ R^2 + (s_0 + R)^2 - 2R(s_0 + R)\cos \varphi \right]^{\frac{1}{2}} + \left[ R^2 + (s_i - R)^2 + 2R(s_i - R)\cos \varphi \right]^{\frac{1}{2}}.$$

Todas las cantidades en el diagrama son números positivos de acuerdo a la convención de signos mostrada en la Tabla 1.1. Si el punto  $A$  se mueve al extremo de un radio fijo (es decir  $R=\text{constante}$ ),  $\varphi$  es la variable de posición y

$s_0, f_0$	+ izquierda de $V$
$x_0$	+ izquierda de $F$
$s_i, f_i$	+ derecha de $V$
$x_i$	+ derecha de $f_i$
$R$	+ si $C$ ésta a la derecha de $V$
$y_0, y_i$	+arriba del eje óptico

Tabla 1.1 Convención de signos para superficies refractoras y lentes delgadas.

haciendo  $d(L.C.O.)/d\varphi = 0$ , aplicando el medio del principio de Fermat encontramos:

$$\frac{n_1 R(s_0 + R) \operatorname{sen} \varphi}{2l_0} - \frac{n_2 R(s_i + R) \operatorname{sen} \varphi}{2l_i} = 0,$$

de lo cual se deduce <sup>[3]</sup>:

$$\frac{n_1}{l_0} + \frac{n_2}{l_i} = \frac{1}{R} \left( \frac{n_2 s_i}{l_i} - \frac{n_1 s_0}{l_0} \right). \quad (1.5)$$

La ecuación 1.5 es la relación que rige entre los parámetros de un rayo que va de  $S$  a  $P$  por medio de la refracción en la interfase esférica. Hay que tener en cuenta que aunque es exacta, la expresión es complicada, debido a que si  $A$  se mueve a una nueva posición cambiando  $\varphi$  el nuevo rayo, no interceptara el eje óptico en  $P$ . Las aproximaciones  $\cos \varphi$  y  $\operatorname{sen} \varphi$  que a continuación se muestran, se utilizan para simplificar la ecuación 1.5.

$$\cos \varphi = 1 - \frac{\varphi^2}{2!} + \frac{\varphi^4}{4!} - \frac{\varphi^6}{6!} + \dots \quad \text{Y} \quad \operatorname{sen} \varphi = \varphi - \frac{\varphi^3}{3!} + \frac{\varphi^5}{5!} - \frac{\varphi^7}{7!} + \dots$$

Suponiendo valores pequeños de  $\varphi$ , donde  $A$  es cercano a  $V$ ,  $\cos \varphi \approx 1$ , las expresiones para  $l_0$  y  $l_i$  dan  $l_0 \approx s_0$ ,  $l_i \approx s_i$  y con estas aproximaciones obtenemos <sup>[3,5,7,9]</sup>:

$$\frac{n_1}{s_0} + \frac{n_2}{s_i} = \frac{n_2 - n_1}{R}. \quad (1.6)$$

La Ec. 1.6 aproximación describe el dominio de lo que se llama teoría de primer orden. Los rayos que llegan con ángulos pequeños con respecto al eje óptico se conocen como rayos paraxiales, mientras que el segmento del frente de onda saliente que corresponde a estos rayos paraxiales es esencialmente esférico y formará una imagen perfecta en su centro  $P$  colocado en  $s_i$ . Hay que observar que la Ec. 1.6 es completamente independiente de la ubicación de  $A$  sobre un área pequeña cercana al eje de simetría; es decir, la región paraxial.



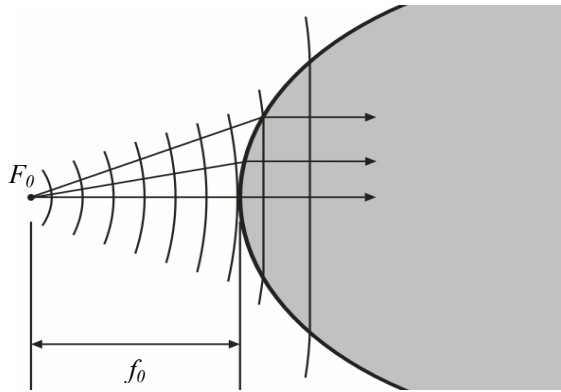


Fig. 1.14 Ondas planas propagándose más allá de una interfase esférica.

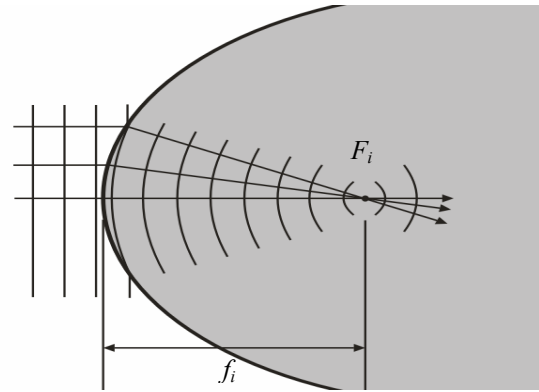


Fig.1.15 Cambiando ondas planas a esféricas en una interfase esférica.

Por lo tanto conforme aumenta la perfección del sistema óptico, más se acercan los resultados a la teoría de primer orden. Si el punto  $F_0$  en la Fig. 1.14 tiene su imagen en infinito ( $s_i = \infty$ ) tenemos:

$$\frac{n_1}{s_0} + \frac{n_2}{\infty} = \frac{n_2 - n_1}{R}.$$

La distancia objeto se define como la primera distancia focal o distancia focal objeto  $s_0 \equiv f_0$ , tal que [3]:

$$f_0 = \frac{n_1}{n_2 - n_1} R.$$

El punto  $F_0$  en si mismo se conoce como el primer foco o foco de objeto. Similarmente el segundo foco o foco imagen, es el punto axial  $F_i$  donde la imagen se forma cuando  $s_0 = \infty$ , esto es:

$$\frac{n_1}{\infty} + \frac{n_2}{s_i} = \frac{n_2 - n_1}{R}.$$

La segunda distancia focal o imagen focal  $f_i$  se define como la distancia  $s_i$  (Fig. 1.15), en este caso en especial se tendrá:

$$f_i = \frac{n_1}{n_2 - n_1} R.$$

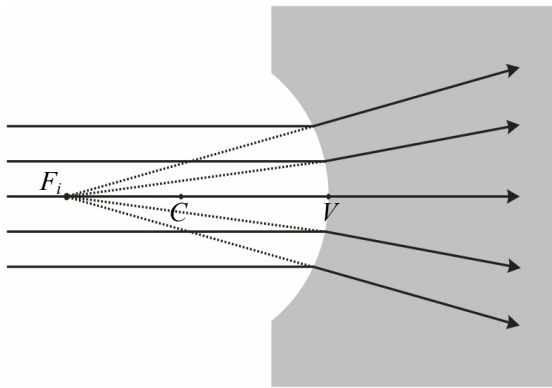


Fig.1.16 Un punto imagen virtual.

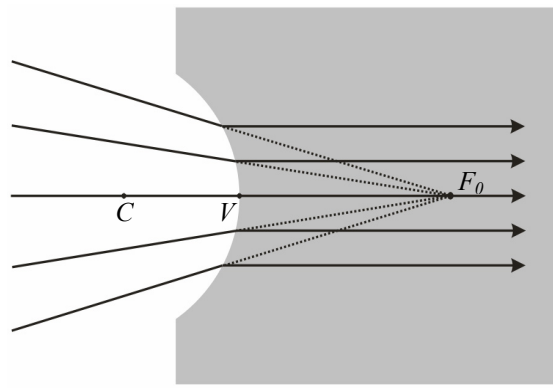


Fig.1.17 Un punto objeto virtual.

Tomando en cuenta que una imagen es virtual cuando los rayos divergen de ella, como se muestra en la Fig. 1.16, podemos decir también que un objeto es virtual cuando los rayos convergen hacia él. Hay que observar que el objeto virtual está ahora a la derecha del vértice y por consiguiente  $s_0$  se tomara como una cantidad negativa. Así, dependiendo de la aplicación existen una gran variedad de configuraciones de superficies refractoras, ya sea para que los frentes de onda converjan o diverjan. Las combinaciones de estas

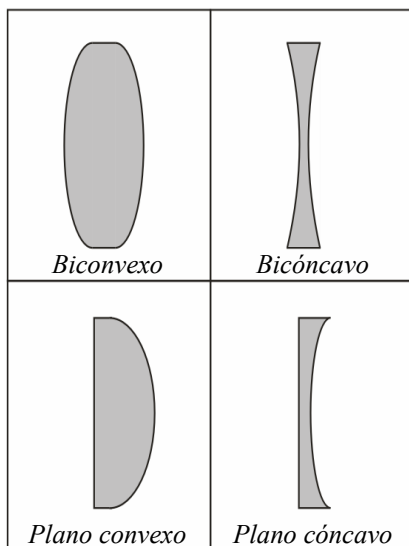


Fig.1.18 Lentes simples esféricas.

superficies permiten obtener diferentes tipos de lentes. En la Fig. 1.18 se muestran algunas de las lentes simples más representativas, “simples” por que están formadas por un elemento, que posee dos interfases refractoras. Existen dos tipos de lentes: las convexas, convergentes o positivas que son más gruesas del centro, tendiendo a disminuir el radio de curvatura de

los frentes de onda, por otro lado las lentes divergentes son más delgadas del centro, logrando avanzar esa porción del frente de onda haciéndola más

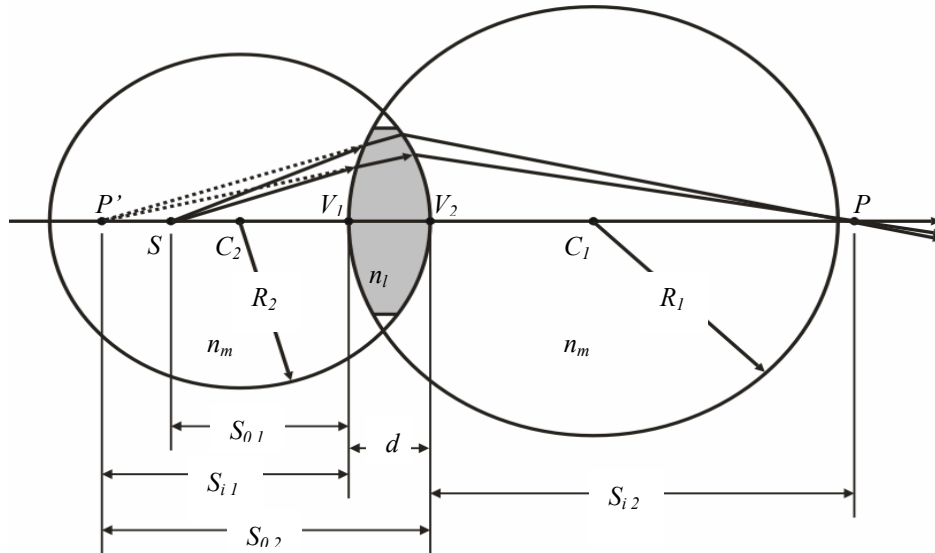


Fig.1.19 Interfases que forman una lente esférica.

divergente. Observemos un caso particular, si tenemos una interfase refractora la ubicación de los puntos conjugados  $S$  y  $P$  esta dada por [3,5,7,9].

$$\frac{n_1}{S_0} + \frac{n_2}{S_i} = \frac{n_2 - n_1}{R} \quad (1.7)$$

Lo anterior se observa en la Fig. 1.13, cuando  $S_0$  es grande y  $\left(\frac{n_2 - n_1}{R}\right)$  es fijo  $S_i$  será pequeño. Si  $S_0$  disminuye,  $S_i$  se aleja del vértice, por lo que  $\theta_i$  y  $\theta_l$  aumentan hasta que  $S_0 = f_0$  y  $S_i = \infty$ , situación en la que se forma una imagen virtual. Ahora si colocamos dos puntos conjugados para la lente de índice  $n_l$  rodeada por un medio de índice  $n_m$  (Fig. 1.19), sabemos por la Ec. 1.7 que los rayos paraxiales que parten de  $S$  en  $S_{01}$  se encontrara en  $P'$  a una distancia  $V_1$ , que llamaremos  $S_{i1}$ , dada por:

$$\frac{n_m}{S_{01}} + \frac{n_l}{S_{i1}} = \frac{n_l - n_m}{R_1} \quad (1.8)$$

La segunda superficie, observará los rayos provenientes de  $P'$  considerando que  $|S_{02}| = |S_{i1}| + d$ , debido a que  $S_{02}$  esta a la izquierda y es

positiva,  $S_{02} = |S_{02}|$  por lo que  $S_{i1}$  esta a la izquierda será negativa y  $-S_{i1} = |S_{i1}|$  lo que implica que  $S_{02} = -S_{i1} + d$  sustituimos en la Ec. 1.8 y tenemos:

$$\frac{n_l}{(-S_{i1} + d)} + \frac{n_m}{S_{i2}} = (n_l - n_m) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) + \frac{n_l d}{(S_{i1} - d) S_{i1}}.$$

Si  $d \rightarrow 0$  y se considera que el aire es el medio que rodea las interfaces es el aire, entonces se tiene que  $n_m \approx 1$ , al sustituir los valores obtenemos la ecuación del fabricante de lentes <sup>[3-10]</sup>:

$$\frac{1}{S_0} + \frac{1}{S_i} = (n_l - 1) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right). \quad (1.9)$$

Si  $S_{01} = S_0$  y  $S_{i2} = S_i$ , entonces los puntos  $V_1$  y  $V_2$  se superponen cuando  $d \rightarrow 0$ , tal que  $S_0$  y  $S_i$ , se pueden medir bien desde los vértices o del centro de la lente, por lo que:

$$\lim_{S_0 \rightarrow \infty} S_i = f_i \quad \text{y} \quad \lim_{S_i \rightarrow 0} S_0 = f_0$$

ésto implicará que para una lente delgada  $f_i = f_0$ , por lo que se eliminarán los subíndices de la Ec. 1.9, obteniendo así:

$$\frac{1}{f} = (n_l - 1) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

Y

$$\frac{1}{S_0} + \frac{1}{S_i} = \frac{1}{f}.$$

Esta última ecuación se conoce como la fórmula de Gauss para las lentes <sup>[3-7]</sup>. El trazo de los rayos se realiza por medio de líneas perpendiculares al vector de pointing, o a la dirección de propagación de las ondas. Los rayos incidentes en una superficie refractora se enfocan en un punto del eje óptico llamado foco (Fig. 1.20). Todos los manojos de rayos paralelos serán

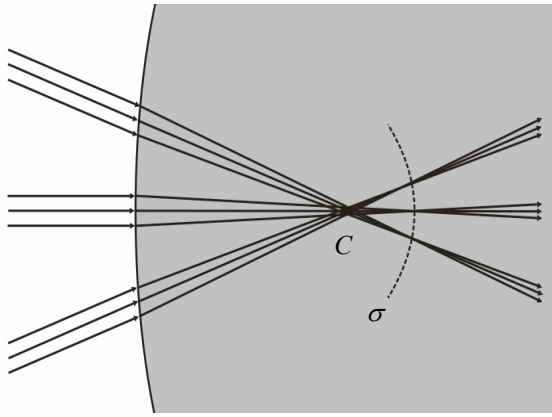


Fig.1.20 Manojos de rayos enfocados.

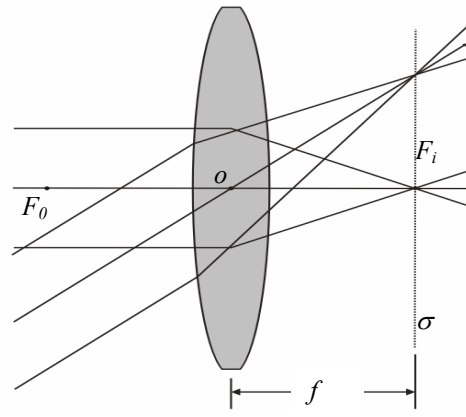


Fig.1.21 Plano focal de una lente convexa.

incidentes en una superficie llamada plano focal  $\sigma$  (Fig. 1.21). Al formar imágenes por medio de las interfases refractoras observaremos que estas pueden amplificarse o reducirse, es decir éstas pueden aumentar o disminuir su tamaño original. Las imágenes siempre se formarán en el plano  $\sigma$  normal al eje óptico. Para determinar el tamaño, ubicación y orientación de una imagen, se puede utilizar el diagrama de rayos mostrada en la Fig. 1.22. Sin embargo se necesitan otras expresiones para ello, por lo que empezemos por observar en la Fig. 1.23 que  $y_0 > 0$  y  $y_i < 0$ , donde la imagen se dice que esta invertida,

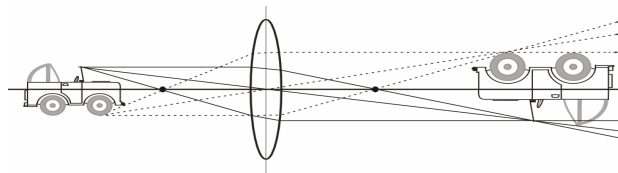


Fig.1.22 Objeto real por medio de una lente positiva.

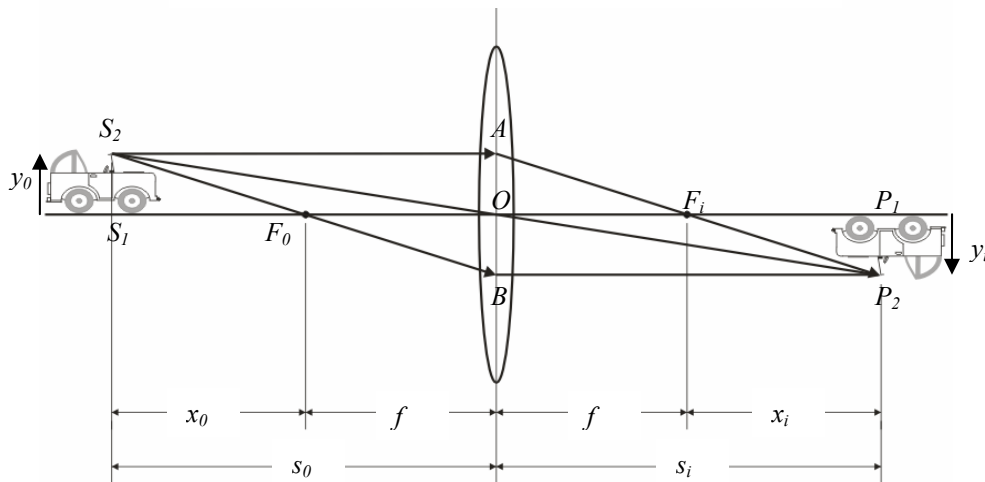


Fig.1.23 Ubicación del objeto y la imagen para una lente delgada.

mientras que si  $y_i > 0$  y  $y_0 > 0$  la imagen esta erecta. Dado que los  $\Delta AOF_i$  y  $\Delta P_2P_1F_i$  son similares <sup>[3]</sup> se tiene que:

$$\frac{y_0}{|y_i|} = \frac{f}{(S_i - f)}, \quad (1.10)$$

de la misma forma los  $\Delta S_2S_1$  y  $\Delta P_2P_1$  son similares por lo que:

$$\frac{y_0}{|y_i|} = \frac{S_0}{S_i}. \quad (1.11)$$

Al igualar la Ec. 1.10 y la Ec. 1.11, y considerando que todas las cantidades son positivas, a excepción de  $y_i$ , se obtiene <sup>[3-5]</sup>:

$$\frac{S_0}{S_i} = \frac{f}{(S_i - f)}.$$

De la Fig. 1.23 observamos que los  $\Delta S_2S_1F_0$  y  $\Delta BOF_0$  son similares, de acuerdo con ello obtenemos que  $\frac{f}{(S_0 - f)} = \frac{|y_i|}{y_0}$ . Usando las medidas de los puntos focales y combinando la 1.10 tenemos <sup>[3]</sup>:

$$x_0x_i = f^2.$$

La ecuación anterior es la forma newtoniana de la ecuación de lentes,  $x_0$  y  $x_i$  se toman en cuenta como positivo respecto a su foco, por convención  $x_0$  se toma positiva a la izquierda de  $F_0$  mientras que  $x_i$  positiva a la derecha de  $F_i$ . La razón de la dimensión transversal de la imagen final formada por cualquier sistema óptico, a la dimensión correspondiente del objeto, se define como aumento lateral o transversal  $M_T$ , es decir <sup>[3]</sup>:

$$M_T \equiv \frac{y_i}{y_0} \quad \text{ó} \quad M_T = -\frac{S_i}{S_0} \quad \text{de la Ec. 1.11}$$

De tal manera que  $M_T = -\frac{x_i}{f} = -\frac{f}{x_0}$ .

Mientras el aumento longitudinal  $M_L$  se relaciona con la dirección axial y esta definido como:

$$M_L = \frac{dx_i}{dx_0}$$

ésta razón de longitud axial infinitesimal, en la región de la imagen correspondiente así como en la región del objeto, se obtiene que <sup>[3]</sup>:

$$M_L = -\frac{f^2}{x_0^2} = -M_T^2$$

Evidentemente  $M_L < 0$  de tal manera que  $dx_0$  corresponda a una  $dx_i$  negativa y viceversa. Con esto último tenemos las herramientas necesarias para comprender la propagación de la luz en diferentes interfases, lo cual será de gran ayuda para comprender el desarrollo de este trabajo.

### **Divisores de Haz**

En la óptica frecuentemente son utilizados los prismas con la finalidad de ser divisores de haz, de formar sistemas polarizadores o simplemente de descomponer un haz de luz. Por ello un prisma suele utilizarse como un sistema dispersor de luz, es decir, tiene la capacidad de separar las frecuencias constitutivas de un haz policromático de luz (esto con algún fin en particular). Los prismas pueden producir un cambio de orientación de la imagen o de la propagación de la luz, donde una forma muy típica de un prisma es el cubo. Los divisores de haz suelen tener esta forma al ser también prismas. La función básica de estas piezas ópticas consiste en dividir un haz de luz en dos o más haces independientes. Idealmente, en el divisor el haz se divide de

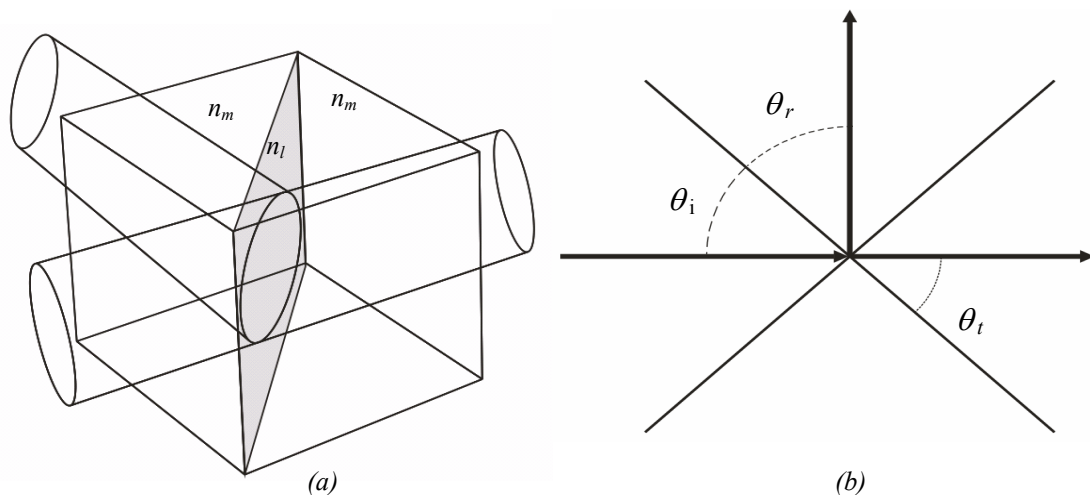


Fig.1.24 (a) Divisor de haz, formado por tres medios, dos de ellos iguales, entre ellos una película de diferente índice de refracción. (b) Vista superior observando los diferentes ángulos, el incidente, reflejado y l transmitido.

manera equitativa, observándose dos haces con diferentes direcciones que en el caso de este trabajo son ortogonales entre si, además la energía de cada uno de ellos, es la mitad del haz original. Esto es posible debido al fenómeno conocido como reflexión total interna frustrada RTIF [3]. El concepto se basa principalmente en la reflexión total interna, donde existe un ángulo crítico, que es el valor especial del ángulo de incidencia para el cual el ángulo transmitido es de  $90^\circ$  [3-4]. Para ángulos mayores o iguales al ángulo crítico, el haz se refleja de regreso al medio incidente. Para lograr este fenómeno, el divisor de haz está provisto de tres medios, dos de ellos iguales y uno muy delgado que va entre los dos prismas, como se muestra en la figura 1.24, de tal forma que si un haz de luz incide en la primera interfase, ésta viajara con un ángulo de incidencia  $\theta_i$  hasta llegar a la juntura de los dos medios. Si el medio pequeño no existiera, se observaría una juntura de dos medios iguales, por lo cual provocaría que el haz atravesara la interfase sin sufrir una reflexión interna, sin embargo cuando existe una tercera interfaz, el cambio del índice de refracción que se sufre alrededor de esa interfase, genera una reflexión interna; provocando que parte del haz se refleje y tenga salida en una cara del divisor, y



la otra atraviese el medio y vuelva a su dirección original por medio de la última interfase. La magnitud y proporción de la división del haz está en función del índice de refracción de la interfase media y de su espesor, por lo que frecuentemente se utiliza una película delgada de bajo índice de refracción como espaciador de precisión. En el presente trabajo se utiliza un divisor de haz que divide al 50 % la cantidad de energía proveniente de un haz.

### 1.3 Sistemas Ópticos

Los sistemas ópticos los conforman una serie de piezas ópticas en un arreglo en serie o paralelo. Un claro ejemplo de un sistema óptico es la agrupación de más de una lente, considerándose así, un microscopio o un telescopio como sistemas ópticos <sup>[8,10]</sup> (Fig. 1.25). Estos sistemas están contruidos con más de un tipo de lentes, en una serie de arreglos de diversos tipos de interfases ópticas para así formar un sistema óptico. Los sistemas ópticos se componen además de diferentes dispositivos ópticos, como diafragmas o iris, divisores de haz, lentes, polarizadores, entre otros. En el desarrollo de instrumentos ópticos, se suele utilizar esta clase de sistemas, ya sea para la obtención de señales ópticas, fotométricas, electrónicas <sup>[11]</sup>.

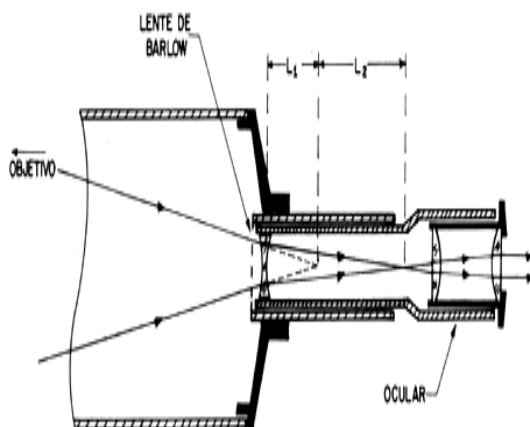


Fig. 1.25 Telescopio terrestre.

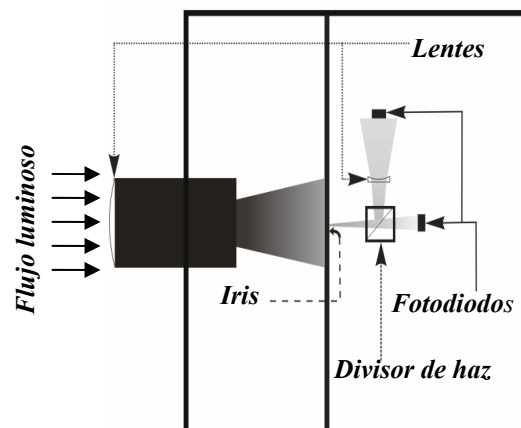


Fig. 1.26 Sistema óptico.

En esta investigación se propone el desarrollo de un sistema óptico, que formará parte de un sistema que en conjunto se le llama “sensor óptico pasivo de proximidad”. Parte de este sistema se visualiza en la Fig. 1.26, y consiste en una caja oscura, la cual tiene un tubo donde se encuentra montada una lente convexa, interfase por la cual se recaba la luz que entra al sistema. Posterior a ello está una pared óptica, donde se encuentra un iris, cuya abertura se ubica en el eje óptico de la lente, de ahí el flujo luminoso pasa en forma de un cono de luz a un divisor de haz, produciendo así dos conos ortogonales en sus ejes, cada uno de los conos concentra aproximadamente la mitad de la energía del cono original. El sistema óptico finaliza con un par de fotodiodos, donde el cono que atraviesa el divisor de haz, se hace incidir completamente en un primer fotodiodo, cuya superficie esta perpendicular al eje óptico. El segundo fotodiodo se ubica detrás de una lente plano-cóncava, entre el divisor de haz y el fotodiodo. La finalidad de la lente, es que los frentes de onda sean más divergentes, y se proyecte un cono de luz de base mayor, a comparación del que se proyecta directamente en el primer fotodiodo. Y así solo capturé el segundo fotodiodo una porción del cono. La finalidad de este sistema óptico, es encontrar una relación de proporción de energía luminosa de los fotodiodos, en función de la lejanía del sistema óptico a un objeto.

#### 1.4 Radiometría y Fotometría

Para apreciar la energía luminosa y la interacción con receptores de radiación óptica, se emplean instrumentos o sensores capaces de registrar magnitudes energéticas y fotométricas. Nuestros ojos durante mucho tiempo han sido los únicos receptores de la radiación óptica, por lo cual, para una

valoración cualitativa y cuantitativa de esta radiación percibida, se emplearon magnitudes fotométricas proporcionales a las respectivas magnitudes energéticas. La energía luminosa, también conocida como energía de radiación óptica, se mide en joules, ergios o calorías. A la radiación que es visible se le denomina flujo luminoso, mientras que la potencia media durante cierto intervalo de tiempo, se le denomina flujo radiante y se mide en W, designando energía luminosa [13-16]. Cuando nosotros valoramos dos fuentes de radiación visible y se comparan sus luminosidades dirigidas a una misma superficie se le llama intensidad luminosa. Para evaluar ésta distribución espacial de la energía luminosa, se emplea el concepto de ángulo sólido, que es una parte del espacio limitada por una superficie cónica arbitraria [13,14], esto es válido, ya que podemos modelar una fuente de luz por medio de ondas esféricas, tomando una fuente puntual como centro y vértice de la superficie formada (Fig. 1.26), considerando así la propagación de la luz en forma de ondas esféricas. El área  $S$  del sector de la esfera cortada por la superficie cónica, será proporcional al cuadrado del radio  $r$  de la esfera [13]:

$$S = \omega r^2.$$

El radio  $r$  puede ser interpretado como la distancia de la lejanía al vértice o centro de la esfera,  $\omega$  es el coeficiente de proporcionalidad y la dimensión

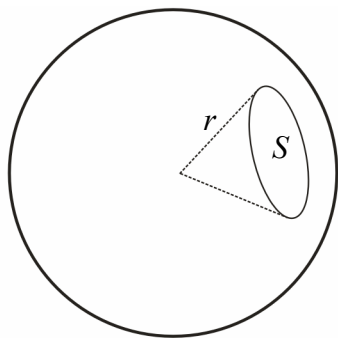


Fig.1.26 Ángulo sólido.

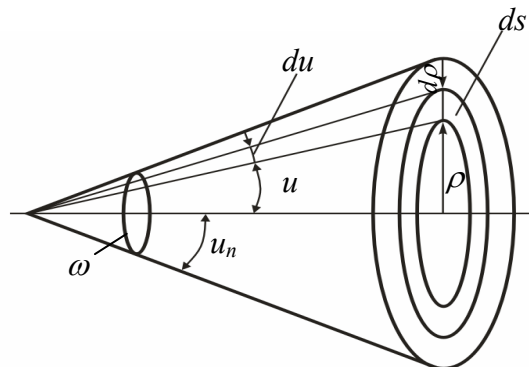


Fig.1.27 Radiación en el ángulo sólido.

del ángulo sólido. Así conociendo la magnitud del ángulo plano  $u_n$ , mostrado en la Fig. 1.27, entre el eje y la generatriz del cono, se puede determinar el ángulo sólido que a este le corresponde. De la Fig. 1.27 se puede obtener un ángulo infinitesimal  $d\omega$ , proveniente del ángulo sólido  $\omega$ . Este  $d\omega$  corta a la esfera en un sector anular infinitamente estrecho. Así el área del sector anular de la Fig. 1.26 esta determinada por <sup>[13]</sup>:

$$dS = 2\pi\rho d\rho ,$$

donde  $\rho$  es la distancia desde el eje del cono hasta el anillo estrecho de anchura  $d\rho$ . De acuerdo con la Fig. 1.27,  $\rho = r \text{ sen } u$ ,  $d\rho = r du$ , donde  $r$  es el radio de la esfera, por lo tanto:

$$dS = 2\pi r^2 \text{ sen } u du , \text{ de donde } d\omega = 2\pi \text{ sen } u du ,$$

por lo que el ángulo sólido que le corresponde al ángulo plano  $u_n$  es <sup>[13]</sup>:

$$\omega = \int_0^{u_n} 2\pi \text{ sen } u du = 2\pi(1 - \cos u_n).$$

Al conocer el ángulo sólido correspondiente a un ángulo plano, se permite calcular de manera adecuada la cantidad de luz que incide en un área lejana a la fuente, ya que al utilizar el modelo de propagación de ondas esféricas, la intensidad de la fuente decrece conforme se propaga en el espacio como  $1/r^2$ , donde  $r$  es el radio de la esfera, considerándose válido siempre y cuando el radio del área sea menor que la distancia a la fuente, a esa relación entre intensidad luminosa y el radio de la esfera se le llama iluminación, así si los rayos forman con la normal a la superficie iluminada un ángulo  $i$  obtenemos las siguientes expresiones <sup>[13-15]</sup>:

$$E = \frac{I}{r^2} \cos i \quad \text{Si } i = 0 \quad E = \frac{I}{r^2} . \quad (1.12)$$

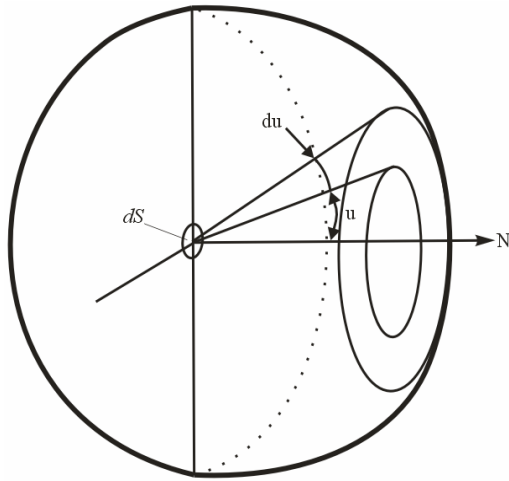


Fig.1.28 Radiación por una superficie  $dS$ .

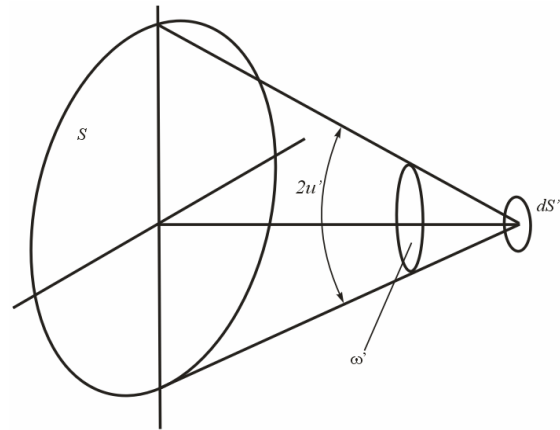


Fig.1.29 Flujo de radiación de una superficie grande.

Cuando se tiene una superficie difusora perfecta entre la iluminación de ésta y su luminancia existe la dependencia siguiente <sup>[13,16]</sup>:  $B = \frac{E}{\pi}$

Para cuando los objetos son no autoluminosos, estos dispersan la radiación que incide sobre ellos. Las luminancias energéticas de tales objetos pueden considerarse iguales en todos los sentidos. Esta tesis es conocida como la Ley de Lambert. Lo cual si se tiene una superficie  $dS$  y posee en todos los sentidos una luminancia energética uniforme  $B_e$  dentro de los límites de la semiesfera, el ángulo sólido elemental que abarca el espacio entre dos conos circulares con vértice común en el centro del elemento  $dS$ , es igual a  $d\omega = 2\pi \sin u \, du$  <sup>[13]</sup>, por lo que referidas al flujo radiante tenemos:

$$d\Phi = B_e dS \cos u \, d\omega = 2\pi B_e dS \sin u \cos u \, du ,$$

por lo tanto el flujo radiante total del elemento  $dS$  a la semiesfera es igual a <sup>[13]</sup>:

$$\Phi = \int_0^{\pi/2} d\Phi = \pi B_e dS .$$

La luminosidad energética del elemento  $dS$  es igual a la luminancia energética, siempre y cuando se someta a la Ley de Lambert, por lo que:  $B_e = \frac{E}{\pi}$

Por otra parte, si deseamos buscar el flujo radiante que va desde una superficie grande  $S$  a un elemento  $dS$  (Fig. 1.29), cuyo plano es paralelo al de la superficie mayor, y se tiene que el flujo radiante es:

$$\Phi = \pi B_e dS' \text{sen}^2 u' ,$$

por lo que la iluminación energética de este elemento es <sup>[13]</sup>:

$$E_e = \frac{\Phi}{dS} = \pi B_e \text{sen}^2 u' .$$

Así, con estas expresiones es posible conocer la intensidad luminosa energética, el flujo radiante, la iluminación energética y la luminancia energética, de una superficie radiante de luz.

## 1.5 Aberraciones Cromáticas

En un sistema óptico, cuando se presenta la descomposición de la luz blanca en alguno de sus componentes ópticos, se logra formar para cada color imágenes independientes, situadas a diferentes distancias del sistema, debido a que no todos los rayos con su longitud de onda inciden en un mismo foco o punto, observado así un fenómeno condicionado por el índice de refracción al paso de la luz, respecto a la longitud de onda luminosa. Originándose así lo que llamamos aberraciones cromáticas <sup>[13,16]</sup>. Uno de los tipos principales de aberración, es la aberración cromática de los rayos paraxiales, también llamado cromatismo. Este se considera para determinados rayos en los límites de una zona del espectro óptico. Por ejemplo, para los instrumentos de observación que funcionan en conjunto con el ojo humano, la zona del espectro se limita a las longitudes de onda de 486 a 656 nm, los cuales corresponden para nuestros ojos, a la zona visible del espectro. Físicamente una aberración

cromática se traduce en una fina banda irisada que contornea los objetos <sup>[12]</sup>, ya que cada color forma una imagen de distinto tamaño (cromatismo en aumento). Esta clase de efectos son apreciables y considerables para la formación y tratamiento de imágenes, sin embargo, cuando solo se utiliza la luz de manera energética pueden descartarse, ya que se trata solo de capturar la energía y no la imagen de la fuente. Finalmente, con los conceptos de óptica geométrica y fotometría revisados en este capítulo, será posible comprender los principios físicos que se establecen en el capítulo 3, para describir el modelo físico del sensor óptico pasivo de proximidad.

## **Capítulo 2 Fotodiodos y Amplificadores**



## Introducción

Los fotodetectores desarrollados en este trabajo consisten de fotodiodos acoplados a un amplificador de transimpedancia. Con el fin de ayudar al lector a recordar algunos conceptos para entender el funcionamiento de los detectores, en este capítulo se presenta una revisión breve de los semiconductores, los diodos, transistores y amplificadores operacionales.

## 2. Teoría y Física de los Semiconductores

Los materiales se pueden clasificar en aislantes, conductores y semiconductores, debido a las propiedades que presentan cada uno de ellos, como su conductividad y resistividad <sup>[17]</sup>. Los aislantes se caracterizan por no ser conductores de cargas eléctricas, por el contrario, los conductores son buenos para permitir el flujo de cargas eléctricas, mientras que los semiconductores pueden o no comportarse como alguno de los dos. Los semiconductores son estructuras cristalinas que no cambian significativamente cuando a estas se le adicionan impurezas, esta cualidad se utiliza con el fin de que un material conductor relativamente pobre, pase a ser un buen conductor, llamando a este procedimiento dopado. A los materiales sometidos a este proceso se les llama extrínsecos <sup>[17]</sup>, y donde para su fabricación se utiliza el silicio y el germanio. Existen dos tipos de materiales extrínsecos, los tipo P y tipo N que cuenta con un exceso de portadores libres o electrones, aunque en su estado es eléctricamente neutral, debido al equilibrio de carga existente, ya que el número de protones en los núcleos, es igual al número de electrones libres en la orbita de la estructura. El material tipo P contará con una gran cantidad de átomos aceptores (huecos), los cuales aceptaran fácilmente

electrones libres. El material tipo N se dice que contiene cargas positivas fijas y cargas negativas móviles, mientras que el material tipo P tiene cargas negativas fijas y cargas positivas móviles. Al unir dos tipos de materiales intrínsecos se obtiene lo que denominamos como junturas, a partir de ellas elaboran dispositivos electrónicos, de la unión de dos o más de estos materiales, ejemplos se pueden mencionar los diodos con unión P-N y los transistores con uniones P-N-P y N-P-N. En este tipo de uniones, al aplicarles una diferencia de potencial en sus terminales y dependiendo de sus configuraciones, se puede o no tener conducción a través de ellos. Cuando alguna unión de un material tipo P y otro tipo N se polariza en directa, se dice que el material conduce, cuando se polariza en inversa, se dice que el material no conduce. La configuración de polarización, depende del tipo de uniones y orden de los tipos de materiales que se tenga. Así con diferentes arreglos de uniones de material, se construyen dispositivos electrónicos discretos como son los diodos, TBJs, FETs, entre otros. A partir de éstos se pueden diseñar, fabricar y construir circuitos y arreglos electrónicos más avanzados. Los amplificadores operacionales, microprocesadores y microcontroladores son ejemplos claros de la incorporación de los elementos electrónicos discretos. Por esta razón esta clase de materiales semiconductores es de gran importancia para el desarrollo tecnológico de la electrónica.

## 2.1 Transistores y Diodos.

La unión de diferentes tipos de materiales extrínsecos da origen a los dispositivos electrónicos discretos como son los diodos, los transistores y los fotodiodos <sup>[17]</sup>. Dentro de estos existen diferentes tipos, cuyas características

varían de acuerdo al tipo de uniones y combinaciones que existan presentes en cada dispositivo, por lo tanto su configuración e interconexión y el tipo polarización que estos posean define la utilidad y función de estos. Los diodos son principalmente utilizados como rectificadores, reguladores y como complemento a otros dispositivos para realizar alguna función en particular. Por otro lado, los transistores son usualmente utilizados para la amplificación de señales de AC, y para la fabricación de amplificadores operacionales, que permiten amplificar tanto DC como AC. Además los transistores también tienen aplicaciones en procesos analógicos de señales eléctricas. Otra clase de dispositivos similares a los diodos, son los fotodiodos, los cuales también son construidos a partir de uniones P-N, operando estos en la región de polarización inversa. La exposición de la unión (con polarización inversa) a una radiación luminosa, dará como resultado una transferencia de energía de los fotones incidentes a la estructura atómica, que implicará un aumento en la cantidad de portadores minoritarios (huecos en el material n y electrones en el material p) <sup>[17]</sup> y un incremento en el nivel de la corriente inversa; así, se observará que la corriente inversa y el flujo luminoso están relacionados casi linealmente. En otras palabras, el aumento de la intensidad de luz dará como resultado un incremento proporcional en la corriente inversa, a esta región de operación se le denomina fotoconductiva (Fig. 2.1) <sup>[19]</sup>. La fotoconductividad se explica considerando que la conductividad de un material es proporcional a la concentración de portadores de carga presentes. La energía radiante que llega hasta un elemento de material semiconductor provoca la ruptura de los enlaces covalentes, generando pares hueco-electrón en exceso respecto a los que se crean por agitación térmica. El incremento de los portadores de carga

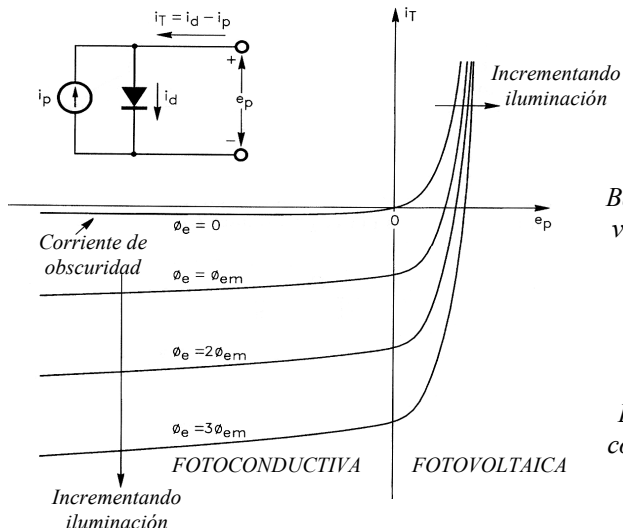


Fig. 2.1 Curvas del comportamiento del fotodiodo.

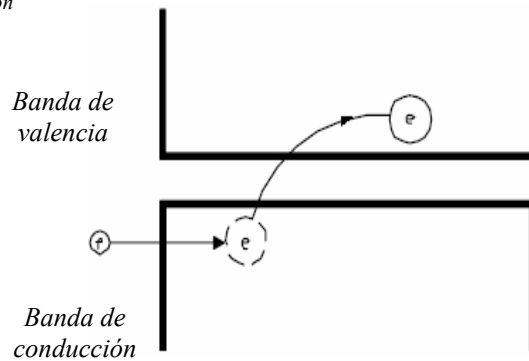


Fig. 2.2 Fotoexcitación de un semiconductor.

hace disminuir la resistividad del material; aumentando de este modo la conductividad. Si un material semiconductor con impurezas es alcanzado por un fotón (de suficiente energía), se producen pares electrón-hueco; dando lugar, así, a la excitación intrínseca. Un fotón puede excitar a un electrón a la banda de conducción (Fig. 2.2), del mismo modo que un hueco de valencia puede ser llevado a un nivel superior, conociéndose estos fenómenos como transición de impurezas.

## 2.2 Amplificadores Operacionales.

Los amplificadores operacionales (OPAM por sus siglas en inglés) están constituidos principalmente por arreglos de transistores [20-22]. Generalmente son utilizados para el diseño de electrónica analógica y para el desarrollo de circuitos integrados, útiles para operar en computadoras analógicas. Mediante diversas configuraciones y tipos de realimentación, se pueden realizar diferentes operaciones: sumas, restas, multiplicaciones, divisiones, logaritmos, antilogaritmos, integrales y derivadas, de señales analógicas [18,20-23], por ello el

adjetivo de operacionales. Los OPAM son frecuentemente utilizados para amplificar señales de DC y AC, siendo muy útiles y óptimos en estas tareas. Las cualidades y características que las configuraciones presentan, como es la RRMC <sup>[20-25]</sup> (razón a rechazo a modo común), su alta impedancia de entrada, su rápida respuesta, la gran ganancia que se puede obtener y su bajo consumo de energía, permiten su versatilidad y utilidad. Su RRMC es muy útil en algunas aplicaciones, sobre todo cuando uno desea amplificar señales muy pequeñas, lo que hace que frecuentemente se presente en etapas de transducción <sup>[20-21,26]</sup>. La versatilidad de que los OPAM pueden funcionar como filtros activos, permite amplificar como filtrar solo las señales deseadas. Finalmente, el uso que se les da para acoplar etapas entre dispositivos y circuitos electrónicos, facilita su incorporación a otros circuitos electrónicos. Por todas las ventajas señaladas previamente, los OPAM son muy útiles en el desarrollo de dispositivos electrónicos y en la electrónica en general.

### 2.3 Configuraciones y Arreglos.

En el desarrollo y diseño de los transductores se tienen muy presentes las etapas de adquisición y acondicionamiento de la señal, para la amplificación y la presentación final de las señales. En estas etapas la electrónica ésta involucrada en el diseño de los sensores, sobretodo por que los transductores transforman diferentes tipos de energía a señales eléctricas <sup>[26]</sup>. Al acondicionar las señales adquiridas se presenta una parte importante, que es la amplificación de estas, ya que frecuentemente son pequeñas. Por ello siempre hay presente una etapa de amplificación en los transductores o sensores <sup>[26]</sup>. Con el fin de amplificar las señales de AC o DC, se realizan diseños

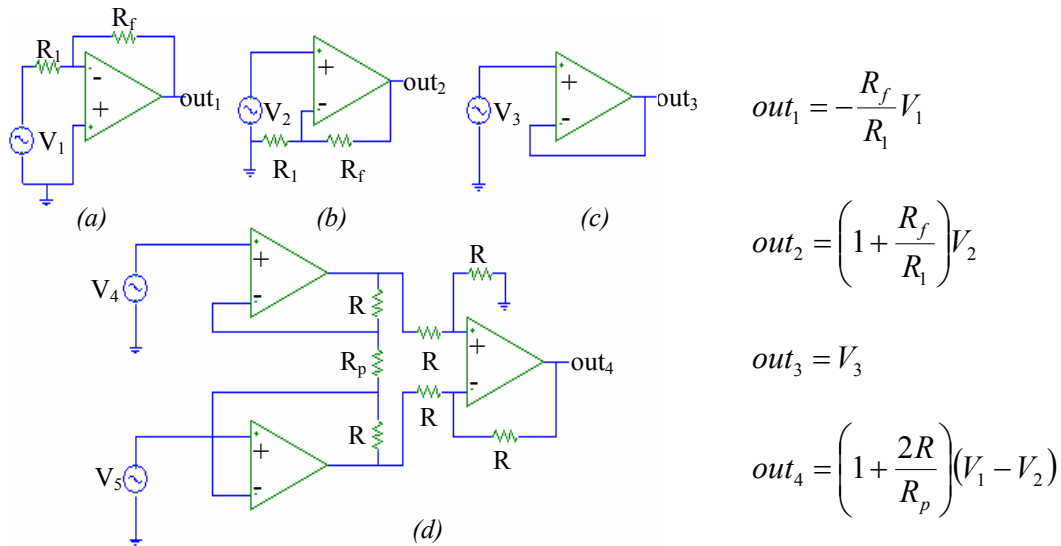


Fig. 2.3 (a) Amplificador inversor, (b) Amplificador no inversor, (c) Seguidor de voltaje o acoplador, (d) Amplificador de instrumentación.

electrónicos con OPAMs, por la facilidad de construir etapas de amplificación complejas a partir de configuraciones básicas, las mas comunes se muestran en la Fig. 2.3. Otra ventaja que permite la electrónica es la selectividad de las señales, ya que numerosas ocasiones se presenta ruido y señales de gran amplitud que no son deseadas, por lo que la utilización de filtros activos contruidos con OPAMs, permite la selectividad de las señales y su amplificación simultánea. Esta es una ventaja singular cuando existen perturbaciones constantes y no se posee un blindaje adecuado en la etapa de transducción. Por otra parte, el ruido inherente proveniente de los medios externos al sistema, es aislado por medio de la electrónica construida con OPAMs, ya que se rechazan este tipo de señales externas al sistema por medio de algunas configuraciones, como son el amplificador de instrumentación (Fig. 2.3d) y el modo diferencial, ambos arreglos rechazan este tipo de ruido y señales indeseadas.

## 2.4 Amplificadores de Transimpedancia.

Las señales adquiridas por sensores o transductores eléctricos transforman diversos tipos de energía a energía eléctrica, en numerosos casos en señales eléctricas muy pequeñas. Usualmente son pequeños voltajes y corrientes, por ello los sistemas que procesan estas señales deben de poseer una impedancia de entrada muy alta, para así evitar la atenuación de la señal

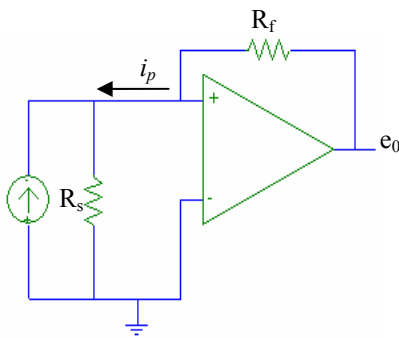


Fig. 2.4 Amplificador de transimpedancia.

de entrada, en el caso de ser un voltaje. Cuando se desea obtener señales procedentes de fuentes de corriente en función de un voltaje sin atenuar la señal de origen, se utilizan los amplificadores de transimpedancia, que son convertidores de corriente-voltaje [26]. Con mucha frecuencia se presentan éstas configuraciones cuando se tienen fotodiodos, fotomultiplicadores y celdas fotoeléctricas, que son fuentes de corriente con impedancia de salida muy grande. El convertidor de corriente a voltaje de la Fig. 2.4 presenta una impedancia de carga de cero a tierra, debido a que la entrada que invierte aparece como tierra virtual. Sin embargo la corriente que pasa a través del resistor de retroalimentación, genera un voltaje de salida [19,24,26].

$$e_0 = -i_p R_f .$$

Esta configuración tiene la característica de ser muy precisa, y presenta una mayor estabilidad a la salida si se agrega un capacitor en serie con la resistencia de realimentación, y además de ello una resistencia en derivación

en la terminal positiva. Este arreglo es aprovechado para censar señales pequeñas y además permite acoplar etapas adicionales con el propósito de obtener una mayor amplificación. La finalidad de dar a conocer algunas de las configuraciones y características de los OPAMs, es para comprender el funcionamiento y el tipo de amplificación en DC, que se implementó en el sensor óptico pasivo de proximidad, cuyo diseño se presenta en el capítulo 3.



## **Capítulo 3 Diseño de un Sensor Óptico Pasivo de Proximidad**

## Introducción

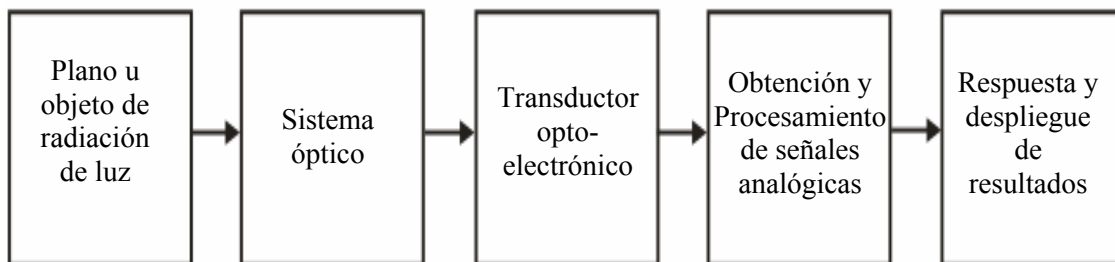
En el desplazamiento de los seres humanos y las máquinas autómatas, se requieren de puntos referencia, ya sea para orientarse o dirigirse a un punto en particular. Es por ello que el tener información 3D del entorno es de gran importancia. Para una persona, el medio principal de información es la visión, sin embargo como todos sabemos, no todas poseen este sentido. Las personas carentes parcialmente o completamente de él, utilizan herramientas que permiten explorar su alrededor, limitándose actualmente a un bastón o perro lazarillo, ambos recursos permiten una descripción limitada y aproximada. En cambio las máquinas poseen sensores que les brindan descripciones más detalladas, e inclusive con un alcance mayor, que el que puede adquirir un ser humano con un bastón. Esto es éticamente inaceptable, y es necesario el desarrollo de sistemas e interfaces que permitan brindar información 3D de su entorno, ofreciéndoles a estas personas una mejor calidad de vida. Algunos dispositivos de auxilio, son los llamados sensores de proximidad, entre ellos destacan diversos sensores activos, como son los ultrasónicos y ópticos de tipo láser. Sin embargo, muchos de éstos utilizan formas de energía que elevan su costo de operación y mantenimiento, además algo que hay que tomar en cuenta, es que no funcionan bien en todos los escenarios o ambientes. Por otra parte, los sensores pasivos tendrían la bondad de no consumir una gran cantidad de energía, y en ciertos casos podrían igualar su desempeño al de los activos, es por ello que el desarrollo de estos sensores, es importante. En este capítulo se propone un sensor óptico pasivo de proximidad, que podría implementarse en sistemas útiles para determinar proximidad.

### 3. Diseño del Prototipo Experimental

Para el diseño del prototipo se tienen en cuenta los objetivos siguientes:

- Definir los principios físicos de la operación del sensor de proximidad.
- Desarrollar el diseño de un sensor pasivo que detecte proximidad.
- Diseñar el sistema electrónico encargado de la adquisición y acondicionamiento de las señales.
- Buscar :
  - Bajo costo
  - Confiabilidad en la información que éste proporcione.
  - Una vez diseñado e implementado proponer interfases para el usuario.

Para ello, en la Fig. 3.1 se muestra un esquema de las partes que conforman al sensor, donde los 3 bloques centrales son el conjunto diseñado e implementado en esta investigación.



*Fig. 3.1 Esquema general del sistema*

Los 3 bloques centrales forman un sistema, el cual denominamos en conjunto “sensor óptico pasivo de proximidad”. La parte principal del proyecto es el desarrollo de un nuevo principio para un sensor de proximidad, mientras que en segundo plano se tiene el diseño e implementación del transductor optoelectrónico. El sistema electrónico se desarrollará para interpretar las señales eléctricas obtenidas, procedentes de las señales ópticas capturadas.

En ésta etapa de adquisición de señales eléctricas, se empleará un diseño electrónico que permite amplificar y filtrar estas señales. Finalmente el despliegue de los resultados se observará por medio de un multímetro, como una señal de voltaje que mantiene una relación directa con la proximidad del plano u objeto. Empezaremos por indicar el principio físico empleado, y el diseño de la electrónica analógica utilizada para obtener la transducción de las señales ópticas, por último se hará la propuesta de interfases y futuras aplicaciones.

### 3.1 Fundamentos Ópticos

Para diseñar y desarrollar el sensor óptico pasivo de proximidad, se asumió que la información recabada provenía exclusivamente de la energía luminosa brindada por el medio. Utilizando esta idea, se diseñó un sistema óptico pasivo. En el cual se pretende demostrar que su modelo físico, expresa la intensidad luminosa  $I$  de un plano u objeto luminoso, en función de la distancia existente entre el sistema óptico y el objeto. Con éste concepto, se encontró su modelo físico y se diseñó un sistema opto-electrónico (Fig. 3.2). Se inició

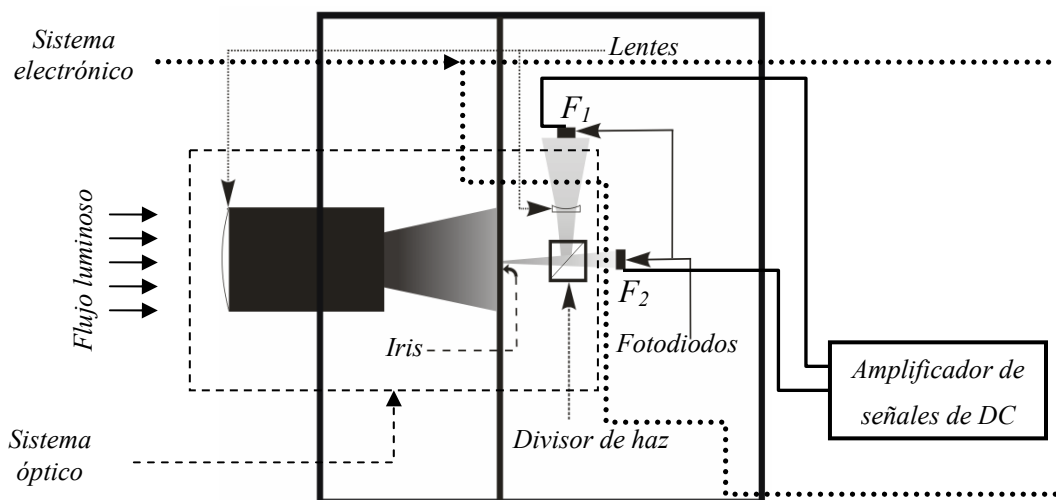


Fig. 3.2 Sistema opto-electrónico del sensor de proximidad.

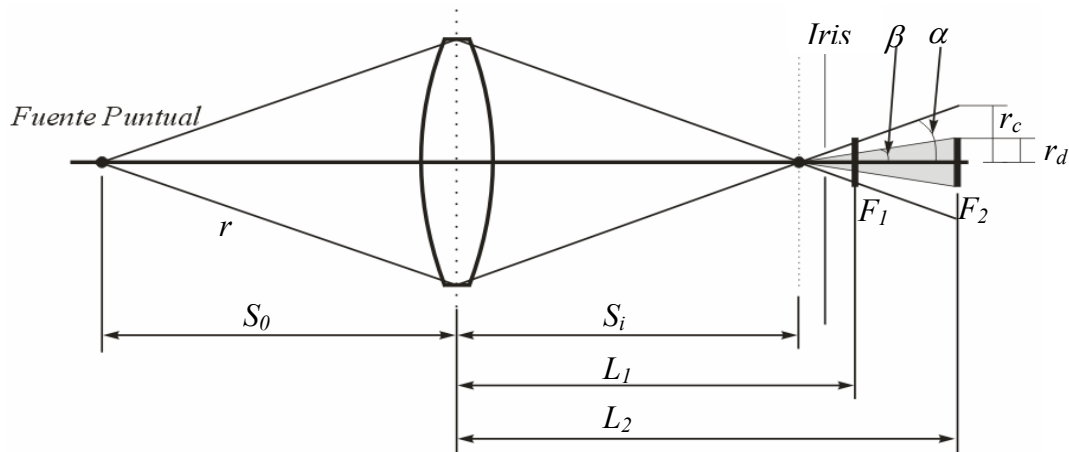


Fig. 3.3 Esquema del sistema para el modelo de propagación de una fuente puntual.

efectuando un análisis del sistema óptico propuesto, suponiendo sobre el eje focal del sistema óptico, una fuente puntual a una distancia  $S_0$  (Fig. 3.3). Además se consideró en el modelo, el enfoque de unos rayos extremos incidentes en la lente, como los límites de los rayos que forman la imagen puntual. Así planteado el sistema, convino determinar la energía capturada de una pequeña región limitada por un iris, cuyo centro de apertura se encuentra en el eje óptico del sistema, a una pequeña distancia detrás del plano imagen. Para ello la luz que atraviesa por la apertura del iris (2 mm. aprox.), pasa a ser radiación de energía luminosa que se extiende como un cono de luz, del cual sólo nos interesa su energía. Sí definimos una fuente puntual de flujo radiante  $\Phi$  [W] ó  $P_0$  [W], y suponemos que es constante y que no cambia de lugar. La energía de ésta se emitirá en forma de ondas esféricas de radio  $r$ <sup>[3]</sup>, todas ellas concéntricas en la fuente puntual, de tal manera que la intensidad luminosa  $I$  se disminuirá conforme se propaga y aumenta el radio de las ondas esféricas<sup>[13-14]</sup>. Mientras que la iluminación energética  $E$  en un punto lejano a la fuente, está en función del radio de las esferas y de la intensidad luminosa de la fuente, expresada como<sup>[13]</sup>:

$$E = \frac{I}{r^2}. \quad (3.1)$$

De la Ec. 3.1 es posible encontrar la  $I$  incidente en los fotodiodos  $F_1$  y  $F_2$  (Fig. 3.3), ya que la  $I$  capturada por cada fotodiodo está en función de  $E$  y  $r$ . Ahora, si el radio de la lente que captura a  $E$  es mucho menor que el radio del frente de onda esférico incidente en la lente, se considerará que  $S_0 = r$ . Para una superficie esférica de radio  $r$  el determinar la  $I$ , parte de conocer el flujo radiante  $P_0$ , y el ángulo sólido en el que se distribuye. Por lo que la intensidad luminosa ésta determinada por:

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega} \left[ \frac{\text{W}}{\text{Sr}} \right], \quad (3.2)$$

y se tiene que para una esfera el ángulo sólido es  $4\pi$ , obtenemos:

$$I = \frac{P_0}{4\pi}. \quad (3.3)$$

Al sustituir la expresión anterior en la Ec. 3.1 resulta <sup>[13]</sup>:

$$E = \frac{P_0}{4\pi \cdot r^2} \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]. \quad (3.4)$$

La Ec. 3.4 determina la iluminación energética  $E$  de una fuente puntual en función de  $P_0$  y  $r$ , por lo tanto, si conocemos la iluminación de la onda esférica para un radio  $r$  o lejanía  $S_0$ , bastará conocer el área de una región de captura para obtener el flujo  $\Phi$  o  $P_0$ . De la Fig. 3.3 si se sigue el trazo de los rayos extremos, observaremos que parte de la energía luminosa proveniente de la fuente puntual, es capturada por la lente e incide completamente en los fotodiodos en forma de conos de luz. De tal manera, que la potencia capturada por el área de la lente, esta determinada por:

$$P_c = E \cdot A_l. \quad (3.5)$$

En el cual  $P_c$  es la potencia capturada por el área de la lente  $A_l$ , debida a la presencia de  $E$ , donde  $A_l$  será:

$$A_l = \pi r_l^2, \quad (3.6)$$

de donde  $r_l$  es el radio de la lente. Con estas expresiones podemos sustituir  $A_l$  en  $P_c$ , y despejar a  $E$  e igualarla con la Ec. 3.4, tomando en cuenta que  $S_0 = r$ , se obtiene:

$$P_c = P_0 \frac{r_l^2}{4S_0^2}. \quad (3.7)$$

Dado que la  $P_c$  incide completamente en  $F_1$ , implicará que la potencia capturada por  $F_1$  está determinada por la Ec. 3.7, a ésta la llamaremos  $P_{CF_1}$  y es expresada como:

$$P_{CF_1} = P_c = P_0 \cdot \frac{r_l^2}{4 \cdot S_0^2}. \quad (3.8)$$

Para obtener la potencia incidente en el fotodiodo  $F_2$ , se considera que el flujo radiante llega con un ángulo  $2\alpha$  a  $F_2$ , y además que se debe omitir el  $F_1$  de la Fig. 3.3, para el análisis de  $F_2$ , ya que el camino óptico real del sistema de  $F_2$  en ningún momento se encuentra obstruido por el  $F_1$ . Si se desea encontrar la potencia incidente en  $F_2$ , primero se debe hallar la proporción de las áreas de las bases de los conos incidentes en el plano de  $F_2$ , que se definen como  $A_{r_d}$  y  $A_{r_c}$  respectivamente. La finalidad es conocer la proporción de  $P_c$  que captura el  $F_2$  expresada en función de  $S_0$ . La razón  $\frac{A_{r_d}}{A_{r_c}}$  de la potencia  $P_c$  incidente en el  $F_2$ , se encuentra en función del ángulo  $\alpha$ , dicha

proporción será denominada como  $A_p$ , la cual depende de  $r_d$  y  $r_c$ , expresándose como:

$$A_p = \frac{A_{r_d}}{A_{r_c}} = \frac{\pi \cdot r_d^2}{\pi \cdot r_c^2}. \quad (3.9)$$

De la Fig. 3.3 podemos definir que:

$$\beta = \arctan\left(\frac{r_d}{L_2 - S_i}\right) \quad (3.10)$$

Y

$$\alpha = \arctan\left(\frac{r_l}{S_i}\right), \quad (3.11)$$

donde  $r_l$  es el radio de la lente y  $r_d$  es el radio del fotodiodo. De las últimas ecuaciones y de la Fig. 3.3,  $r_c$  se define como:

$$r_c = (L_2 - S_i) \tan \alpha, \quad (3.12)$$

al sustituir  $\alpha$  en la ecuación 3.12, queda finalmente:

$$r_c = (L_2 - S_i) \cdot \frac{r_l}{S_i}. \quad (3.13)$$

Sí utilizamos la fórmula del fabricante de lentes y despejamos el valor de  $S_i$  dejándola en función de  $S_0$  y  $f$ , obtenemos:

$$S_i = \frac{S_0 \cdot f}{S_0 - f}, \quad (3.14)$$

que al sustituir el valor de  $S_i$  en  $r_c$  se obtiene:

$$r_c = (L_2 - S_i) \cdot \frac{r_l}{S_i}. \quad (3.15)$$

Ya obtenido  $S_i$  y  $r_c$  se evalúan en  $A_p$ , quedando la siguiente expresión:

$$A_p = \frac{\pi \cdot r_d^2}{\pi \cdot \left(L_2 - \frac{S_0 \cdot f}{S_0 - f}\right)^2 \cdot \left(\frac{r_l \cdot (S_0 - f)}{S_0 \cdot f}\right)^2}. \quad (3.16)$$



Al tener  $A_p$ , se puede conocer la potencia capturada por  $F_2$ , la cual llamaremos  $P_{CF_2}$  y está determinada por:

$$P_{CF_2} = P_c \cdot A_p. \quad (3.17)$$

Por lo que las potencias capturadas por cada uno de los fotodiodos son las siguientes:

$$P_{CF_1} = P_c = P_0 \cdot \frac{r_l^2}{4 \cdot S_0^2} \quad (3.18)$$

Y

$$P_{CF_2} = \frac{P_0 \cdot r_d^2 \cdot f^2}{4 \cdot (S_0(L_2 - f) - L_2 f)^2}. \quad (3.19)$$

Las expresiones 3.18 y 3.19 son los modelos para una fuente puntual, con las cuales se puede calcular el flujo radiante capturado en función de  $S_0$ . Para obtener las gráficas de las ecuaciones 3.18 y 3.19 en función de  $S_0$ , teniendo como variable solo a  $I$ , se evalúan los valores reales de cada uno de los elementos del sistema óptico. Estos valores obtenidos de las especificaciones del fabricante son:

$$r_l = 1.25 \text{ cm}, \quad r_d = 0.215 \text{ cm}, \quad f = 15 \text{ cm}, \quad L_2 = 16 \pm 0.5 \text{ cm}$$

Si se considera  $P_0 = 1\text{W}$ , con la finalidad de facilitar el manejo de las ecuaciones, y se toma  $L_2 = 16 \text{ cm}$  implicará que:

$$P_{CF_1} = \frac{39 \cdot 10^{-6}}{S_0^2} \quad (3.20)$$

Y

$$P_{CF_2} = \frac{2.6 \cdot 10^{-8}}{(0.95 \cdot S_0 - 0.3675)^2}. \quad (3.21)$$

Las expresiones 3.20 y 3.21, son las potencias capturadas por cada uno de los fotodiodos. De donde el modelo final a obtener, es el que expresa el cociente de la  $I_{F_2}$  entre  $I_{F_1}$  en función de  $S_0$ , ya que dicho cociente es

independiente de la  $I$  capturada por los fotodiodos, y sólo está en función de la distancia a la que se encuentre el sistema de la fuente u objeto. Partiendo de ésta idea, las Ec. 3.20 y 3.21 se dividen cada una de ellas entre  $4\pi$ , que es el ángulo sólido de una esfera. Así las expresiones de  $I_{F_1}$  y  $I_{F_2}$  son:

$$I_{F_1} = \frac{6.2 \cdot 10^{-6}}{S_0^2} \quad (3.22)$$

Y

$$I_{F_2} = \frac{4.138 \cdot 10^{-9}}{(0.95 \cdot S_0 - 0.3675)^2} \quad (3.23)$$

Finalmente al realizar el cociente entre  $I_{F_2}$  e  $I_{F_1}$  se obtiene:

$$\frac{I_{F_2}}{I_{F_1}} = \frac{6.674 \cdot 10^{-4} \cdot S_0^2}{(0.95 \cdot S_0 - 0.3675)^2}, \quad (3.24)$$

en conclusión, la Ec. 3.24 es independiente de  $I$ , y solo es función de la lejanía a la cual se encuentra el sistema de la fuente. Las gráficas de las ecuaciones 3.22, 3.23 y 3.24, se muestran en las figuras 3.4, 3.5 y 3.6 respectivamente.

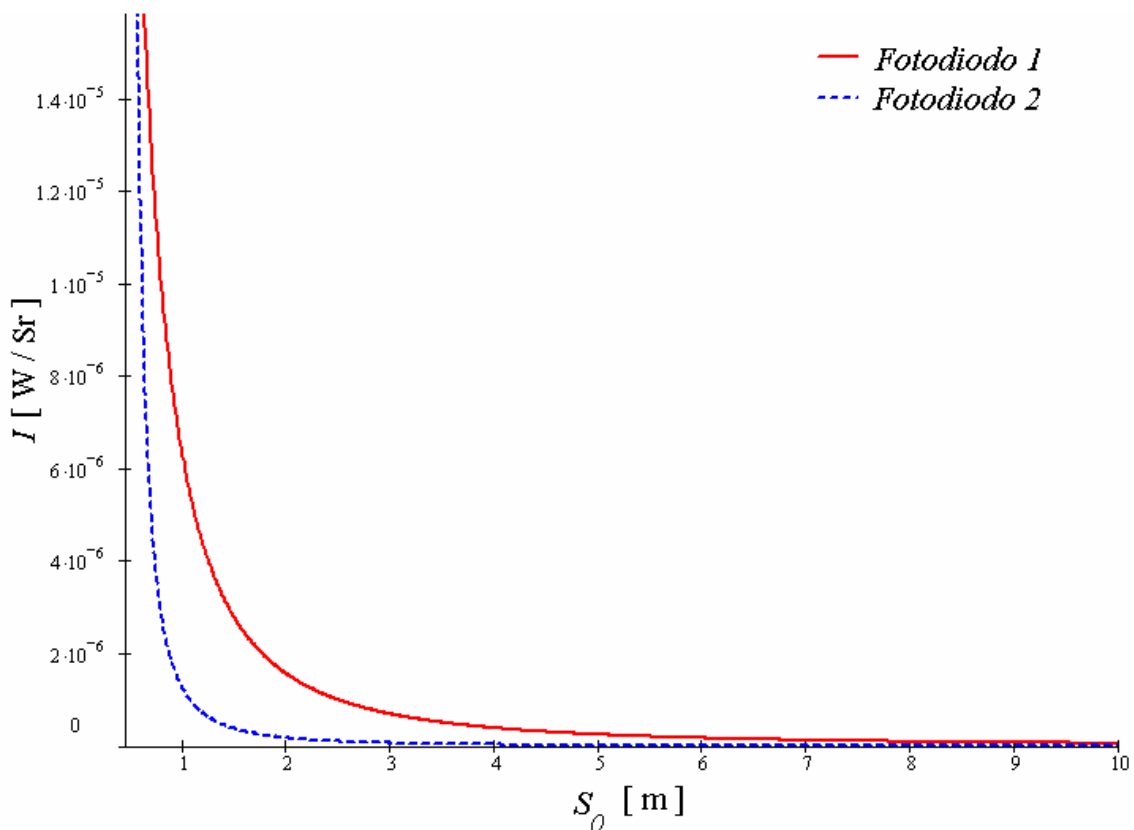


Fig. 3.4 Gráfica de la intensidad energética luminosa de un plano objeto, en función de la lejanía del sistema óptico que conforma al sensor óptico pasivo de proximidad.

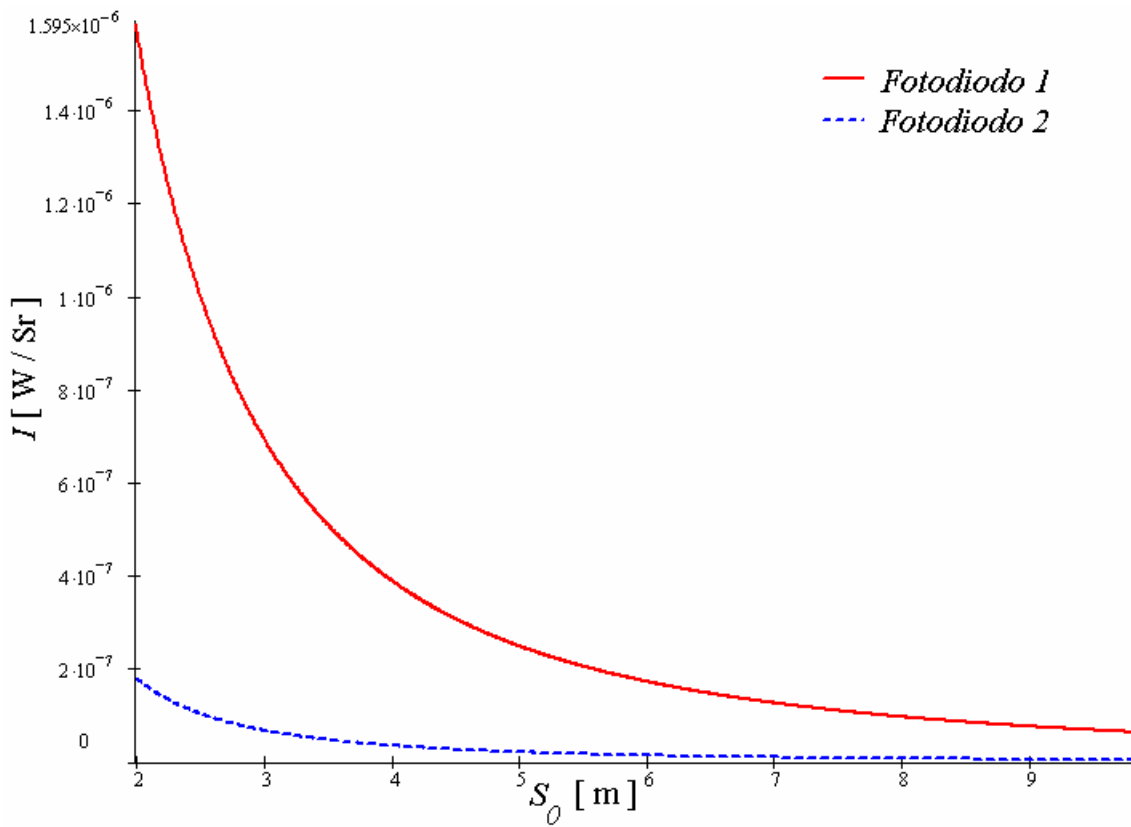


Fig. 3.5 Ampliación de un intervalo de la grafica de la Fig. 3.4.

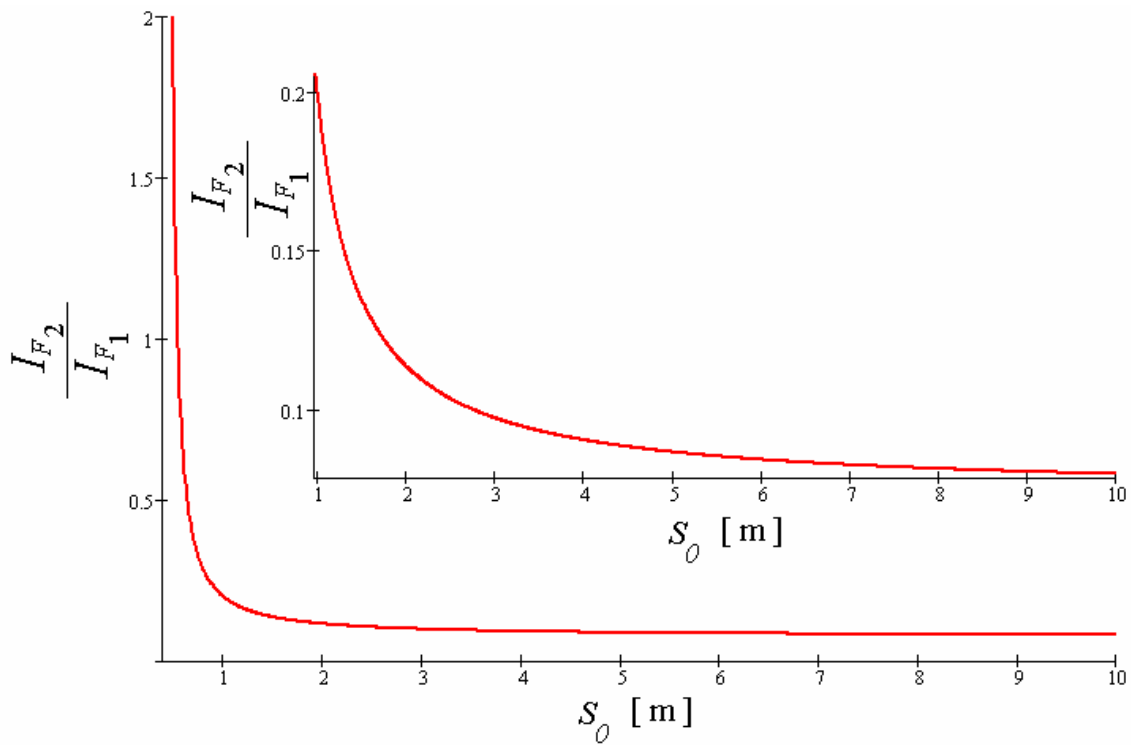


Fig. 3.6 Gráfica del cociente de intensidades energéticas luminosas, en función de la proximidad del objetivo.

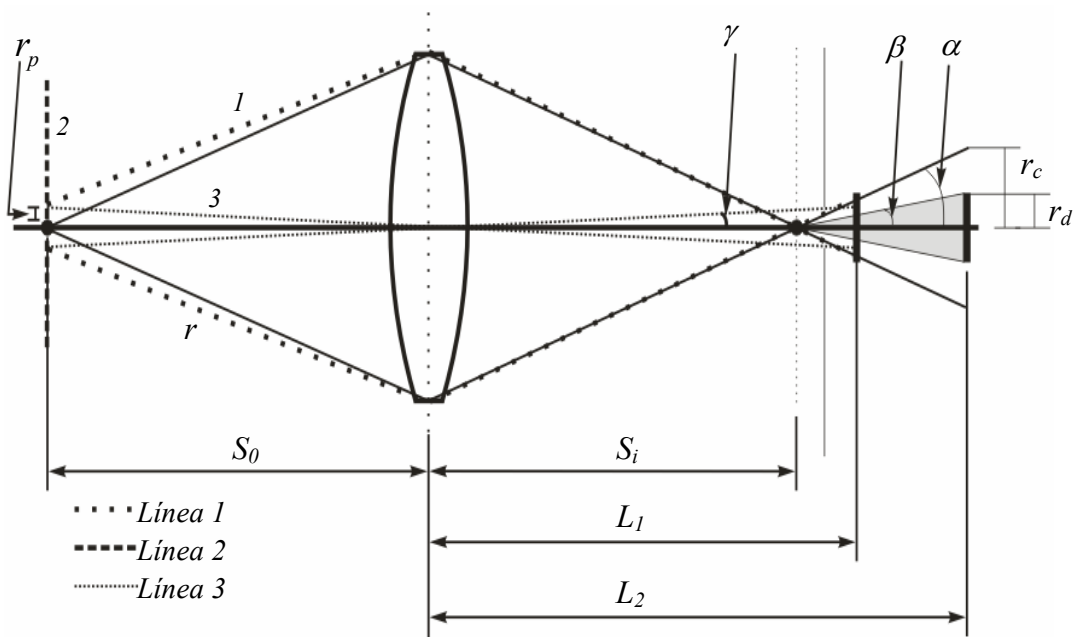


Fig. 3.7 Esquema del sistema para una fuente extendida.

Para obtener el modelo de una fuente extendida que relacione la lejanía del sistema óptico a la fuente, deberán realizarse pequeñas modificaciones al modelo de la fuente puntual, donde la principal consideración es el rango de visión que está en función de  $S_0$ . En el caso de una fuente extendida, se inicia

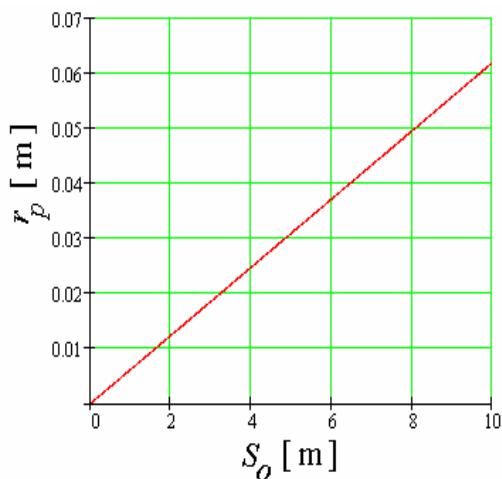


Fig. 3.8 Gráfica  $r_p$  vs.  $S_0$

por considerar el modelo de una fuente puntual, anexando alrededor un gran número de fuentes puntuales de baja intensidad. Esto genera una adición de flujo radiante que depende del área capturada por el sistema. En la Fig. 3.7, la línea 3 delimita el campo de visión del sistema, el cual define la selectividad del sensor de proximidad para demarcar una área en particular. La línea 3 limita el radio del área de captura  $r_p$  en función de

la distancia  $S_0$ , definiéndolo como:

$$r_p = S_0 \operatorname{tg} \gamma. \quad (3.25)$$

El ángulo  $\gamma$  lo define el sistema óptico y tiene un valor de  $\gamma = 0.355^\circ$ , así de ésta manera el comportamiento de  $r_p$  está en función  $S_0$  (Fig. 3.8), mientras tanto la línea 2 de la Fig. 3.7 corresponde al plano o superficie del objeto, y solo servirá como referencia de la ubicación de  $r_p$ . La superficie captada por el sistema es un círculo de radio  $r_p$  ubicada en la línea 2 (para el sistema la medida mínima de  $r_p$  es de 0.185 cm., considerando una lejanía del sistema al objeto de 30 cm.). Las variaciones de  $r_p$  representan para el sistema óptico un incremento o decremento de flujos radiantes, los cuales provienen de otras fuentes puntuales de flujo  $\Phi_{fp}$ , que se incorporan alrededor de la fuente puntual inicial como circunferencias de fuentes puntuales. Asimismo se agregarán más circunferencias cuando se aleja el sistema, o bien se desincorporarán si se acerca el sistema. Cada circunferencia representan un  $\Delta r_p$  alrededor de la fuente puntual inicial y de otras circunferencias. De esta manera cuando se aumenta o disminuye  $r_p$ , se agregará o separará un  $\Delta r_p$  en función de  $S_0$ . Si  $r_0$  es la fuente puntual de flujo  $\Phi_{fp_0}$  a partir del cual se incorporan o desincorporan las circunferencias, tendremos que el círculo formado poseerá un radio  $r_0 + n \cdot \Delta r_p$  alrededor de la fuente puntual inicial ubicada en el eje óptico, donde  $n$  está en función del número de circunferencias agregadas o separadas, que básicamente son fuentes puntuales pertenecientes a una circunferencia de radio  $r_0$ . Por lo cual las fuentes que se agregan o se disgregan contribuyen a formar una sola fuente extendida en forma de un círculo de radio  $r_p = r_0 + n \cdot \Delta r_p$ , es decir tendremos un círculo de radio  $r_p$  que crece o decrece en función  $S_0$ , de esta manera las fuentes que se

anexan o separan se consideran fuentes puntuales coplanares en la superficie, de tal manera que en conjunto finalmente contribuyen a formar una fuente extendida con un flujo  $\Phi$ , que será expresado como:

$$\Phi = \Phi_{fp_0} + \sum_{n=1}^n (\Phi_{fp_1} + \Phi_{fp_2} + \Phi_{fp_3} + \dots + \Phi_{fp_{n-1}} + \Phi_{fp_n}) \quad (3.26)$$

De tal manera que al formarse las circunferencias concéntricas alrededor de la fuente puntual inicial, se estarán sumando cada una de las contribuciones de las fuentes puntuales pertenecientes a las circunferencias que se agregan o disgregan, formando así un flujo  $\Phi$  que es la suma de todas las fuentes puntuales encerradas en el círculo de radio  $r_p$ . Si suponemos que todas las fuentes puntuales poseen el mismo flujo, tendremos que:

$$\Phi = k \Phi_{fp_0} \quad (3.27)$$

Donde  $k$  son el número de las fuentes puntuales que se anexan o separan al círculo captado por el sistema. De este modo al relacionar las ecuaciones 3.1, 3.4, 3.7, 3.20, 3.21, 3.24 y 3.27, se obtiene el modelo para una fuente extendida al que corresponderá la expresión siguiente:

$$I_{F_1} = k \cdot P_0 \frac{6.2 \cdot 10^{-6}}{S_0^2} \quad (3.28)$$

Y

$$I_{F_2} = k \cdot P_0 \frac{4.138 \cdot 10^{-9}}{(0.95 \cdot S_0 - 0.3675)^2} \quad (3.29)$$

Por lo que el modelo que expresa el cociente de las intensidades es:

$$\frac{I_{F_2}}{I_{F_1}} = \frac{\frac{4.138 \cdot 10^{-9}}{(0.95 \cdot S_0 - 0.3675)^2}}{\frac{6.2 \cdot 10^{-6}}{S_0^2}},$$

quedando expresado como:

$$\frac{I_{F_2}}{I_{F_1}} = \frac{6.674 \cdot 10^{-4} \cdot S_0^2}{(0.95 \cdot S_0 - 0.3675)^2} \quad (3.30)$$

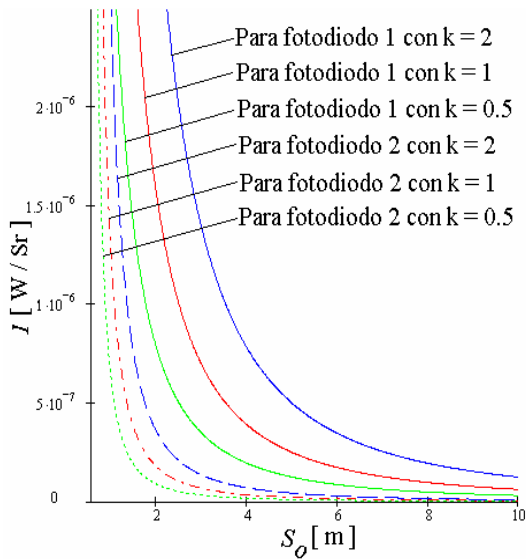


Fig. 3.9 Gráficas de  $I$  en función de  $S_0$  para diferentes valores de  $k$

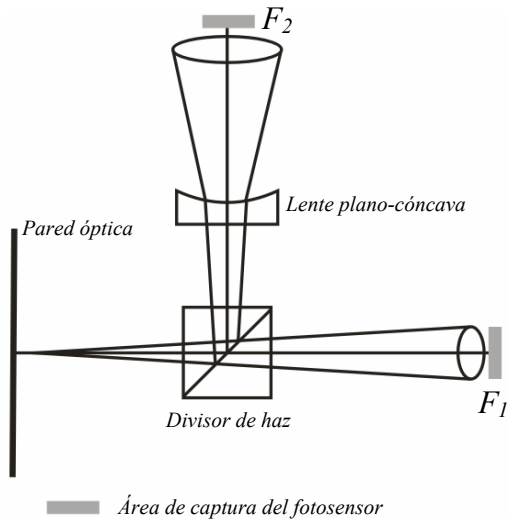


Fig. 3.10 Radiación de luz con un sistema óptico por medio de ángulo sólido.

La Ec. 3.30 es el modelo simplificado para el cociente de la  $I$  de los fotodiodos. Al estar la Ec. 3.28 y 3.29 multiplicada por  $k$ , hará que las graficas sean desplazadas, hacia el origen o fuera del origen como lo muestra la Fig.3.8. Sin embargo al realizar el cociente de las  $I$ , quedará finalmente la grafica de la Fig. 3.6, la cual no depende de la intensidad de cada fuente puntual ni del número de ellas. Con estos modelos teóricos basados en la óptica y la fotometría, se dispuso a diseñar la electrónica, que es una parte importante de la transducción del sensor óptico pasivo de proximidad. Para medir estas señales ópticas se utilizaron fotodiodos que brindan una señal eléctrica, la cual se cuantificó y se caracterizó previamente en cada uno de los fotodiodos. Las cantidades de luz percibidas por ellos eran muy pequeñas, sobre todo la de  $F_2$ , que es mucho menor que la de  $F_1$ , por lo que se diseñó un circuito de gran amplificación de DC que se describe en la siguiente sección.

## 3.2 Diseño de la Electrónica para Amplificación de DC

Por medio de sistemas fotométricos ya fabricados se cuantificó el rango de luz a detectar, ya fuese para una iluminación artificial o natural. Observamos que la potencia óptica a registrar estaba por debajo de los pW, e implicaba que la corriente eléctrica a detectar estaba por el orden de los nA. Las cantidades de  $\Phi$  y de corriente eran tan pequeñas que el sistema requería una gran etapa de amplificación. Considerando estos inconvenientes se desarrolló un sistema electrónico basado principalmente en el modo de transducción del fotodiodo. Después de investigar el comportamiento fotoconductor y fotovoltaico, se optó por el modo fotoconductor, principalmente por su respuesta lineal a las variaciones de  $\Phi$  <sup>[19]</sup>, y a su rapidez en respuesta. Por lo que se decidió que la primera etapa entre el fotodiodo y la electrónica, fuera un amplificador de transimpedancia, donde la incidencia de un flujo  $\Phi$  en el fotodiodo generará una señal eléctrica a la salida, la cual es una corriente eléctrica que está directamente relacionada con  $\Phi$  y la responsividad de 0.65 A/W del fotodiodo. La señal adquirida al final de la primera etapa es un voltaje de directa o señal DC. Al tener la primera etapa lista, se apreció que la señal era muy pequeña, por lo que se decidió emplear una serie de amplificadores en cascada con pequeñas ganancias hasta observar una amplificación aceptable, además se consideró incluir una etapa final de filtrado de ruido y señales externas. Así, el sistema electrónico se basó en OPAMs (amplificadores operacionales), por ser los más indicados para la amplificación de DC, y por ofrecer en sus configuraciones una buena relación



señal a ruido. Después de conocer el intervalo de la cantidad de energía a detectar, se estimó una ganancia de amplificación requerida de aprox.  $1 \cdot 10^9$ . Con estas consideraciones se diseñó el circuito amplificador de la Fig. 3.11, que consta de 4 etapas de amplificación, de manera que el voltaje a la salida del sistema de amplificación, representa una  $A_T I$  para cada fotodiodo, donde  $A_T$  es un factor de ganancia total, en función de las ganancias del conjunto de los OPAMs. La primera etapa es un amplificador de transimpedancia, cuya ganancia  $A_1$  es muy sencilla de calcular, prácticamente  $A_1 = R_1$ , ya que por  $R_1$  atraviesa la corriente producida por el fotodiodo, de tal manera que la respuesta es expresada como:

$$V_{Atr} = -R_1 \cdot i_p, \quad (3.31)$$

donde,  $i_p$  es la corriente generada por el fotodiodo debida al flujo radiante  $\Phi_{if}$  que incide en él. El capacitor en paralelo con la resistencia de realimentación brinda estabilidad en frecuencia al sistema. Si  $r_{fd}$  es la respuesta del fotodiodo

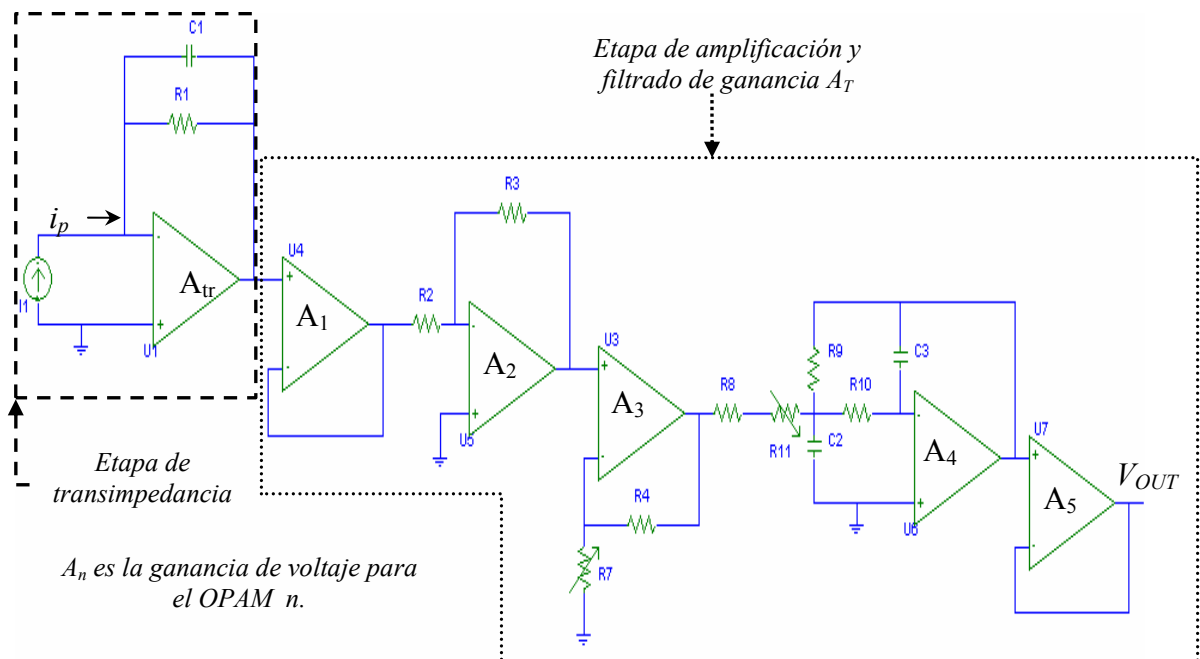


Fig. 3.11 Diagrama electrónico de la etapa de amplificación de DC.

y  $i_p$  esta en función de  $\Phi_{if}$ , su relación está expresada por:

$$r_{fd} = 0.65 \left[ \frac{A}{W} \right] = \frac{i_p}{\Phi_{if}}, \quad (3.32)$$

del cual  $i_p = 0.65 \cdot \Phi_{if}$ , la cual puede expresarse como:

$$\Phi_{if} = \omega \cdot I_F. \quad (3.33)$$

En donde el ángulo sólido  $\omega$  por el cual se propaga la  $I_F$ , es  $\omega = 2\pi$ , por lo que si no incluimos a la primera etapa de transimpedancia como parte del sistema de amplificación, y consideramos a las siguientes etapas de amplificación y filtrado como el sistema de amplificación que produce una ganancia  $A_T$ , la salida del circuito será <sup>[19,26]</sup>:

$$V_{OUT} = -A_T \cdot R_1 \cdot i_p. \quad (3.34)$$

Con el fin de obtener para cada uno de los fotodiodos las expresiones de  $V_{OUT}$  en función de  $I_F$ , se relacionan las expresiones 3.32 y 3.33 en 3.34 obteniendo:

$$V_{OUT1} = -A_T \cdot R_1 \cdot r_{fd} \cdot \omega \cdot I_{F1} \quad (3.35)$$

Y

$$V_{OUT2} = -A_T \cdot R_1 \cdot r_{fd} \cdot \omega \cdot I_{F2}. \quad (3.36)$$

Las salidas de los circuitos están regidas por las expresiones  $V_{OUT1}$  y  $V_{OUT2}$ , cada una de ellas representan eléctricamente a  $I_F$  como un voltaje en función de la fuente u objeto al sistema. Así la utilidad de cada circuito es amplificar la señal original lo suficiente para ser cuantificable, de tal manera que al realizar el cociente la variación del cociente de las  $I$  en función de  $S_0$ , donde el modelo es completamente independiente de  $I$ . Definido ya el modelo eléctrico obtengamos la  $A_T$  del sistema. Posterior a la etapa de

transimpedancia, le sigue una etapa de acoplamiento con ganancia unitaria, por lo cual se tiene que el  $V_{OUTA1} = V_{AT}$ , siguiendo después de esta una configuración inversora, donde su salida es <sup>[18,20-22,24-25]</sup>:

$$V_{OUTA2} = -\left(\frac{R_3}{R_2}\right)V_{OUT1}. \quad (3.37)$$

A la salida del  $OPAM_2$ , para evitar el uso de acopladores, se utiliza una configuración no inversora, con la cual se aumenta la impedancia de entrada al  $OPAM_3$ , cuya salida esta dada por <sup>[18,20-22,24-25]</sup>:

$$V_{OUTA3} = \left(1 + \frac{R_4}{mR_7}\right)V_{OUTA2}, \quad (3.38)$$

donde  $mR_7$  va de  $1K\Omega$  hasta  $100k\Omega$  con la finalidad de tener una ganancia variable. La salida del  $OPAM_3$  entra a una etapa de filtrado y amplificación, por medio de un filtro paso bajas activo (FPB) <sup>[23-25]</sup>. La etapa de filtrado es utilizada para atenuar aquellas señales de AC que se lleguen a introducir al circuito electrónico. Para iniciar el proceso de diseño del FPB se definió una ganancia  $A_4 = H_0$  que va de 5 a 10, y una frecuencia de corte  $f_0$  menor a 2 Hz, de tal manera que al final de la etapa de filtrado solo estén presentes señales de corriente directa. Finalmente, se eligieron valores comerciales de resistencias  $R$ , y capacitancias  $C$ , de manera que  $R_9 = 1M\Omega$ ,  $R_8 = 100k\Omega$  y  $mR_{11}$  un potenciómetro que va de  $1K\Omega$  hasta  $100k\Omega$ . Los capacitores seleccionados fueron:  $C_2 = 82 \text{ nF}$  y  $C_3 = nC_2 = 9.6 \text{ nF}$ . Por definición

$$H_0 = \frac{R_9}{R_8 + mR_{11}} \quad [23], \text{ aunque } H_0 \text{ la definimos como variable, fue fijada por}$$

facilidad en  $H_0 = 10$ , definiendo una  $f_0 = 0.45\text{Hz}$ , conociendo que  $\omega_0 = 2\pi \cdot f_0$  calculamos que <sup>[23]</sup>:

$$R_{10} = \frac{1}{\omega_0^2 C_2^2 R_9 K} = 2.35\text{M}\Omega. \quad (3.39)$$

Con este valor de  $R_{10}$  se termina de diseñar el FPB. Finalmente la última etapa, solo acopla las impedancias del circuito al equipo de medición, este seguidor de voltaje tiene una ganancia unitaria, por lo tanto la ganancia final del sistema después de la etapa de transimpedancia, es:

$$A_T = -\frac{R_3}{R_2} \cdot \left(1 + \frac{R_4}{mR_7}\right) \cdot \left(\frac{R_9}{R_8 + mR_{11}}\right) \cdot 1. \quad (3.40)$$

Al evaluar la Ec. 3.40 en la Ec. 3.35 y la Ec. 3.36 se obtienen las expresiones para cada uno de los fotodiodos en función de  $I_F$ , las cuales son:

$$V_{OUT1} = \frac{R_3}{R_2} \cdot \left(1 + \frac{R_4}{mR_7}\right) \cdot \left(\frac{R_9}{R_8 + mR_{11}}\right) \cdot R_1 \cdot R_{fd} \cdot \omega \cdot I_{F1} \quad (3.41)$$

y

$$V_{OUT2} = \frac{R_3}{R_2} \cdot \left(1 + \frac{R_4}{mR_7}\right) \cdot \left(\frac{R_9}{R_8 + mR_{11}}\right) \cdot R_1 \cdot R_{fd} \cdot \omega \cdot I_{F2}. \quad (3.42)$$

Las salidas  $V_{OUT1}$  y  $V_{OUT2}$ , describen cualitativamente el comportamiento de la intensidad luminosa energética de un plano u objeto, en función de la proximidad del sistema, lo cual significa que la electrónica se utilizó exclusivamente para la amplificación de las señales. Así al sustituir en las ecuaciones 3.28 y 3.29, las expresiones 3.41 y 3.42, y de realizar el cociente de las ecuaciones 3.29 y 3.28, se obtiene la independencia  $I$  y la expresión solamente está en función de la distancia existente entre la fuente u objeto y el sistema. Finalmente con el modelo, los principios, y el diseño tanto óptico

como electrónico que fueron desarrollados en este capítulo, se muestra la viabilidad del desarrollo de este sensor de proximidad. Para comprobar estos principios y teoría establecida, en el siguiente capítulo se presentan los resultados de las pruebas efectuadas que validan los principios de operación del sistema diseñado, que en conjunto forman al sensor óptico pasivo de proximidad. En su implementación se elaboró un diseño del circuito que se muestra en el Anexo 1.

## **Capítulo 4 Resultados**

## 4 Pruebas y Experimentación

En la experimentación y pruebas efectuadas del sistema diseñado, se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

- Tener un plano o pantalla inerte.
- Evitar fuentes luminosas cambiantes en el tiempo que incidan en el plano o pantalla, a excepción de la fuente que ilumina dicho plano.
- Verificar la alineación del sistema óptico en cada una de sus piezas.
- Por medio de otro sistema óptico auxiliar independiente, alinear el sistema con el plano, de tal manera que siempre se observe la misma región

La finalidad de los primeros dos puntos, es que existan las mismas condiciones de iluminación, a los diferentes tiempos en que se toman las lecturas de los fotodiodos. Es por ello que se dispuso de una pared fija iluminada por una lámpara o luz de día, con la finalidad de controlar las condiciones para caracterizar el fenómeno, y así observar su reproducibilidad. La tercera condición importante es la alineación de cada pieza óptica que conforma al sistema, ya que está diseñado y calculado para un sistema óptico alineado; donde los centros de cada una de las piezas ópticas, se encuentran en el eje óptico de la lente de captura, incluyendo a los fotodiodos. La cuarta consideración tomada en la experimentación, es observar siempre la misma área de captura al acercarse o alejarse del sistema. La dirección de visión es el parámetro que controla dicho aspecto, para ello se utilizó una mira láser montada en el sistema, la cual se coordina por medio de una marca fija en la pantalla. Con esta medida se pretende estar observando la misma zona de la pantalla, y evitar observar el plano con un ángulo de incidencia diferente al

alejarse o acercarse al sensor. Por otro lado el control del offset de cada uno de los circuitos es de importancia. Dicho control se logra al compensar las corrientes internas del OPAM, por medio de una configuración externa a este y que es proporcionada por el fabricante. La compensación permite que ambos circuitos se calibren aproximadamente a 0 mV, estando el sistema en completa oscuridad. Finalmente la fuente de luz con la cual se realizaron las pruebas fue luz blanca, y se encontraba a una distancia de 2 m con respecto a la pantalla, su potencia era ajustable de 0 a 100 W. Con estas consideraciones se obtuvieron las mediciones mostradas a continuación.

#### 4.1 Resultados Obtenidos

Los resultados obtenidos de los diversos experimentos realizados, se concentran en las gráficas que se presentan en esta sección, las cuales muestran una serie de medidas, que permiten observar la semejanza al modelo teórico. En las pruebas del sensor se realizaron 7 experimentos, cada experimento constaba de 5 series de medidas, cada una de ellas con 12 lecturas para cada distancia fijada, extendiéndose desde de 0.5 hasta 6 m en pasos de en 0.5 m, en un intervalo de 0.5 a 6 metros. Las gráficas mostradas en las Fig. 4.1 y 4.2, muestran las lecturas para cada uno de los fotodiodos, que pertenecen a un experimento. Los resultados de los 6 experimentos restantes mostraron un comportamiento muy similar al de este experimento registrado. En las series de la Fig. 4.1 y la Fig. 4.2, se observan las gráficas de las señales obtenidas por el sistema en función de su lejanía, tanto para el fotodiodo 1 como el fotodiodo 2 respectivamente. Las fluctuaciones mostradas en cada una de las series, se deben en parte a que el vector normal



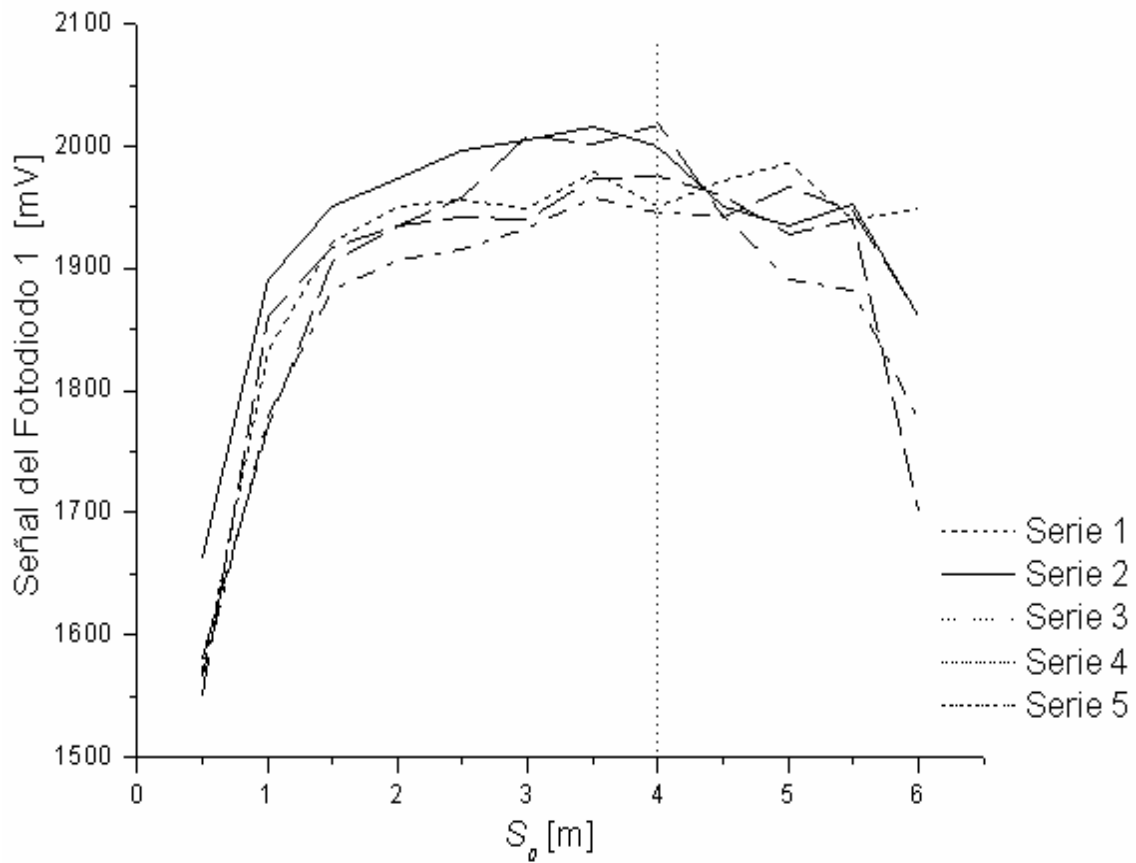


Fig. 4.1 Serie de señal del  $F_1$  en función a la lejanía del plano u objetivo.

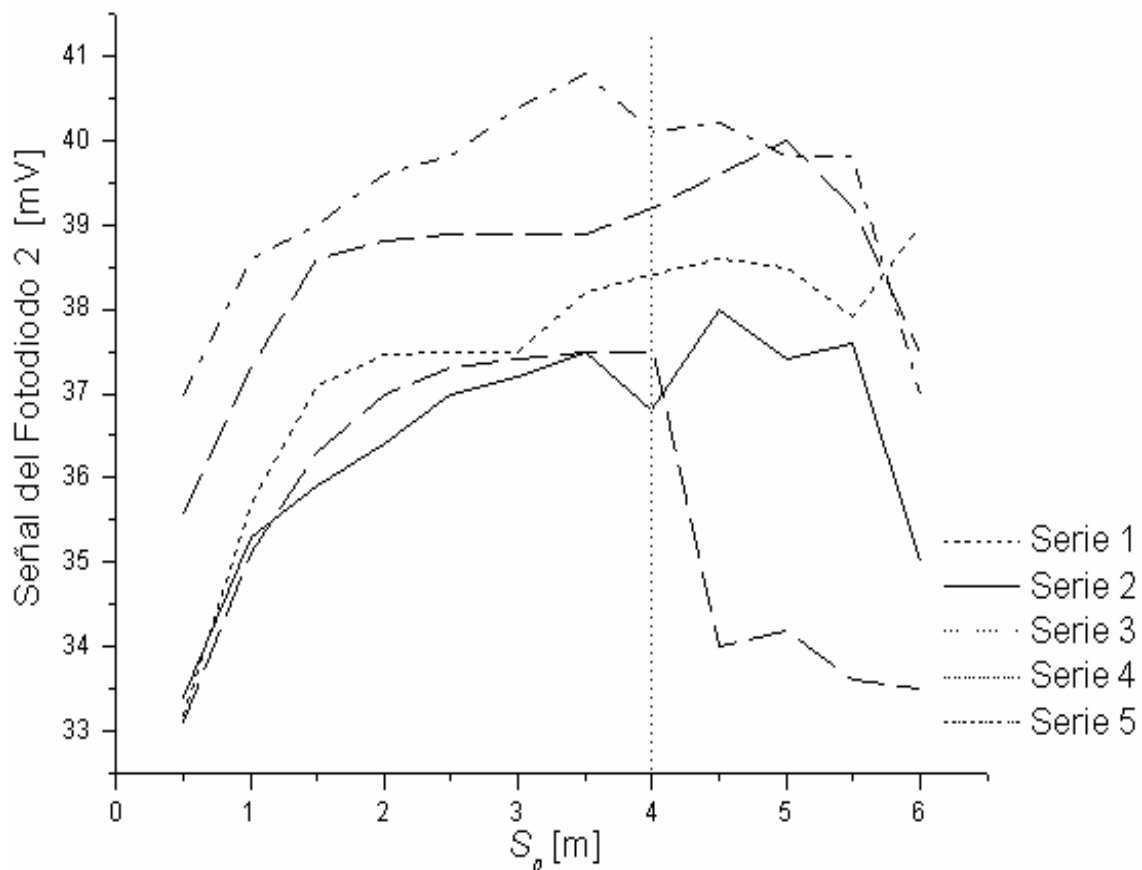


Fig. 4.2 Serie de señal del  $F_2$  en función a la lejanía del plano u objetivo.

a la superficie u objeto, no se encontraba paralelo al eje óptico del sistema. De tal manera que al presentarse una desviación en el ángulo de incidencia del eje óptico, se origina una proyección de la región original, que genera una variación entre las lecturas para un valor fijo de  $S_0$  y  $\Phi$ . Otras fluctuaciones pueden ser causadas por la existencia instantánea de alguna perturbación de índole luminosa. A partir de 4 metros se observan mayores fluctuaciones, sobre todo en el  $F_2$ , principalmente atribuidos a que los cambios de  $I$  son de magnitud muy pequeña, mientras que la magnitud del ruido del sistema de visualización electrónico y de adquisición, es mucho mayor que la variación de  $I$  a partir de 4 metros. Es por ello que la línea vertical interrumpida trazada en las gráficas a los 4 metros, es el límite de confiabilidad del sistema, por lo que las señales después de este límite se deben desechar. En la siguiente sección se muestra el análisis de los resultados obtenidos.

## 4.2 Análisis de Resultados

En la sección 4.1 se realizaron las observaciones y comentarios de las posibles razones que originan las fluctuaciones. Ahora para analizar dichas lecturas, se procedió a obtener el promedio de ellas y de esta manera reducir los errores aleatorios presentados en las mediciones. Las gráficas mostradas en la Fig. 4.3 y la Fig. 4.4, son los promedios de las 5 series del experimento. Se observa que en cada una de estas curvas se alisan los cambios abruptos presentados en las gráficas (Fig. 4.1 y Fig. 4.2). Obtenidos los promedios

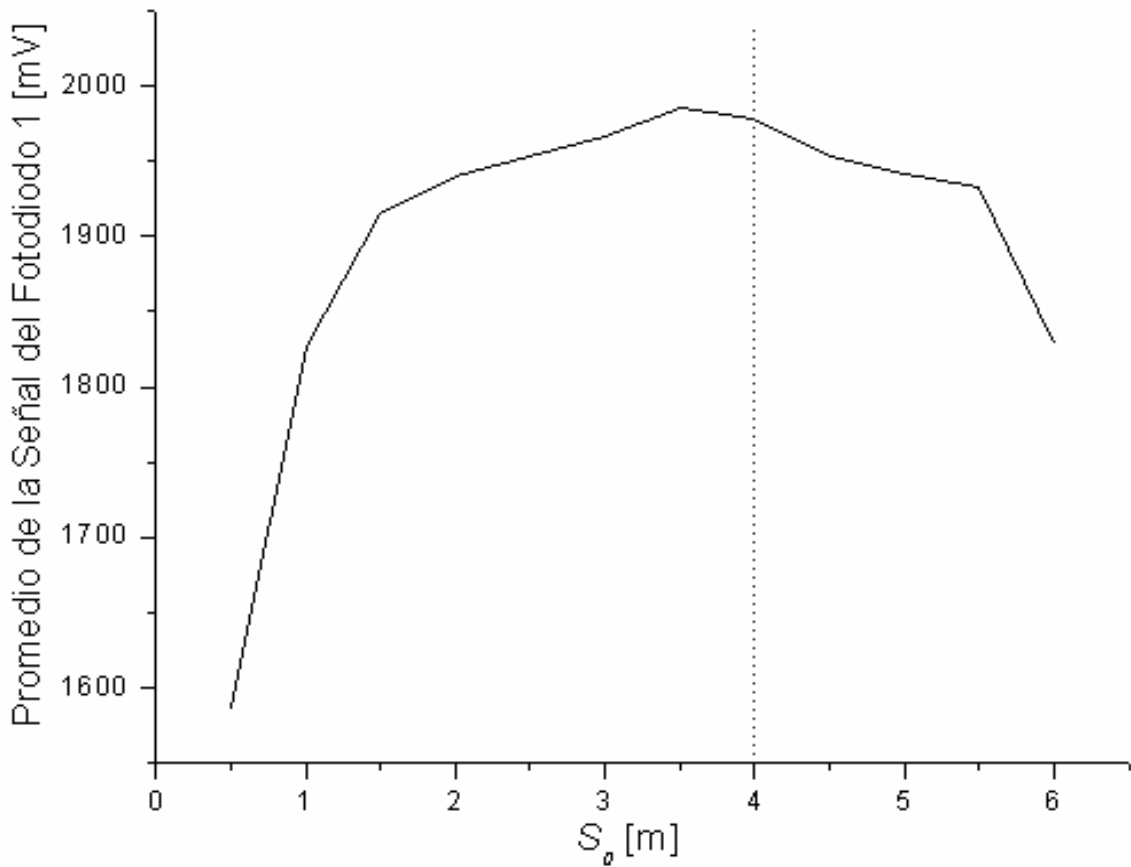


Fig. 4.3 Gráfica representando la señal del  $F_1$  en función a la lejanía del plano u objetivo.

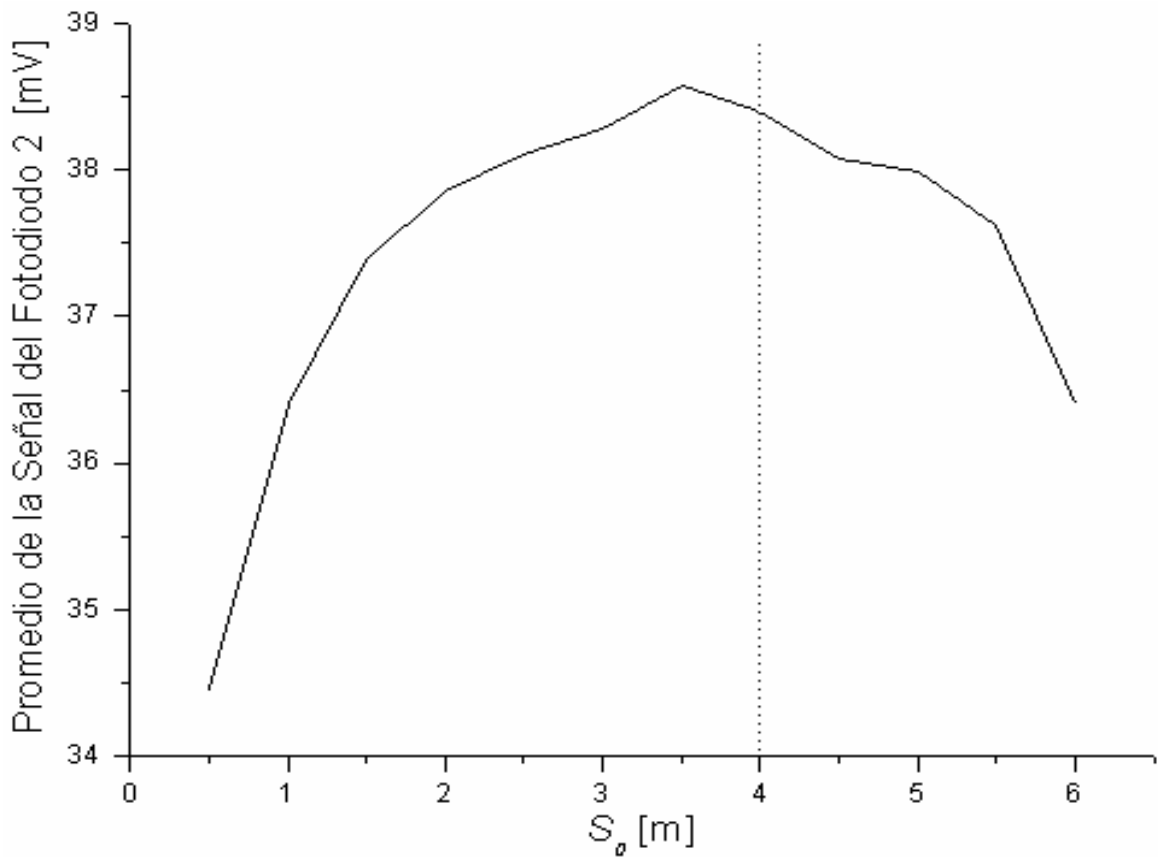


Fig. 4.4 Gráfica representando la señal del  $F_2$  en función a la lejanía del plano u objetivo.

de cada uno de los fotodiodos, se realizó el cociente de las señales electrónicas, con el fin de determinar la gráfica que representa a  $I$  en función de  $S_0$ , de esta manera se obtiene la gráfica de la Fig. 4.5. Al igual que en las graficas de las figuras 4.1 y 4.2 se observan mayores fluctuaciones a partir de los 4 metros, debido principalmente a que en este caso se estima que se tratan de adquirir señales del orden de los fW ( $10^{-15}$ ), que referido a la salida del circuito serian fluctuaciones del orden de los  $\mu\text{V}$ , que son cantidades muy pequeñas para los multímetros (que es el sistema de visualización). Esto impide una apreciación adecuada en esta región de amplificación. Sin embargo con el diseño elaborado podemos decir que es confiable y cuantificable el comportamiento del sistema en un intervalo de 0.5 a 4 metros. Al comparar el modelo experimental con el teórico, se observa gran similitud en cuanto al

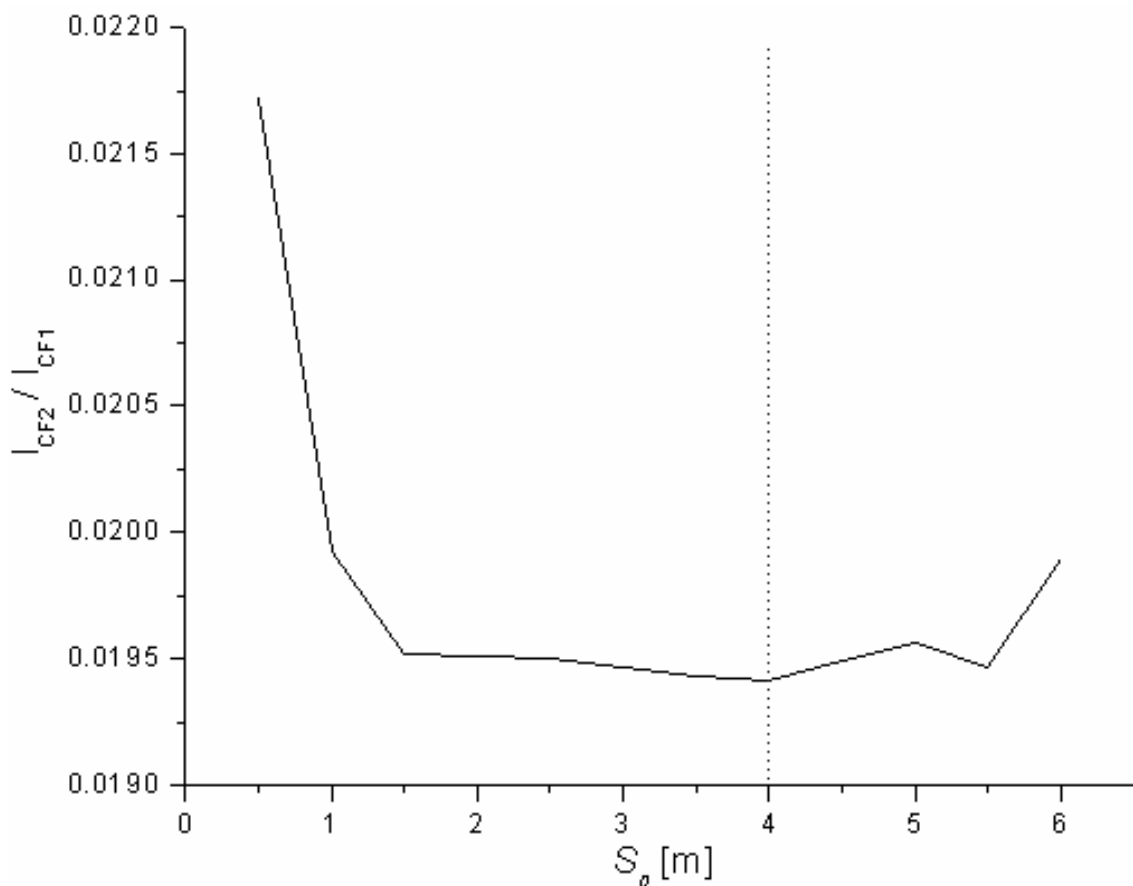


Fig. 4.5 Gráfica representando la señal del  $F_2$  en función a la lejanía del plano u objetivo.

comportamiento del cociente de las  $I$ . Después de un ajuste de la señal promediada, se puede graficar el modelo experimental esperado en la figura 4.6. La línea no continua es el ajuste al modelo teórico, mientras que la línea continua es la curva experimental, que se relaciona con el cociente de las intensidades, en función de la distancia a la que se encuentra el plano u objeto del sistema. El ajuste realizado para caracterizar al fenómeno, se fundamenta en que la proporción  $k$  que multiplica al modelo, es debida a que las ganancias no son iguales en la adquisición, lo que produce que el punto de inflexión se pegue o separe del origen, para compensarlo se utiliza esta constante de proporción  $k$ . Por otra parte el valor de OFFSET que es sumado al modelo teórico, se debe al offset del sistema opto-electrónico. Finalmente la aportación de la investigación es la validación de los principios de diseño y operación del sistema opto-electrónico propuesto, además se presenta una alternativa de diseño y principios para el desarrollo de sensores ópticos

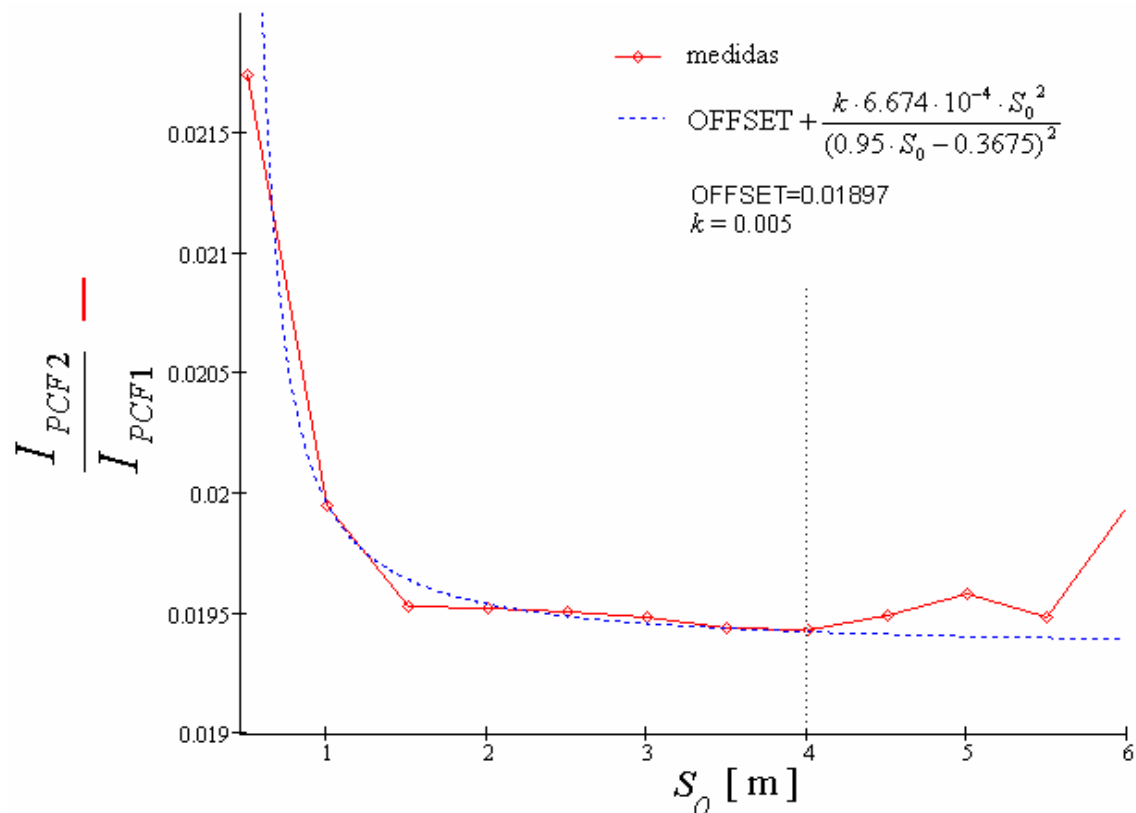


Fig. 4.6 Cociente de las señales  $F_2/F_1$  en función a la lejanía del plano u objetivo.

pasivos de proximidad, en un intervalo de 0.5 a 4 metros. El rango es establecido debido a que a partir de 4 metros se observa una falta de apego al modelo teórico e irregularidades en las lecturas registradas, ya que no se presentan las mismas tendencias de variación a partir de los 4 metros en la señal en uno de los fotodiodos. Por lo que para ampliar el rango de operación del sistema, se debe de obtener un comportamiento general del sistema, caracterizándolo en todos los aspectos, donde los puntos más importantes son desarrollar una electrónica de amplificación capaz de controlar y registrar diferencias muy pequeñas, del orden de los  $\mu\text{V}$ , y una electrónica de visualización capaz de registrar  $\text{nV}$ , donde también una muy buena alineación del sistema óptico contribuiría a mejorar el sistema. La finalidad sería construir un sensor que finalmente brinde una sola señal ya sea mecánica, audible o electrónica que indique la distancia o proximidad a la que se encuentra un objeto.

### 4.3 Ventajas y Aportaciones del Proyecto

La aportación principal del proyecto, es proponer un nuevo principio experimental para medir cercanía con óptica pasiva que podría ser usado en escenarios arbitrarios. En segundo lugar se aportó un diseño óptico y electrónico, al cual denominamos sensor óptico pasivo de proximidad, diseñado para observar el fenómeno físico, que permite relacionar la distancia en función de la intensidad capturada por dos fotodetectores. Una de las ventajas más importantes es que el sistema es pasivo, lo cual permite disminuir el consumo de energía respecto a otros sistemas. Además de ello, se evita el hecho de transmitir algún tipo de excitación sónica u óptica al medio, como algunos

sistemas de proximidad actuales lo realizan, para adquirir información del medio. Esta ventaja puede acceder a que el procesamiento de las señales eléctricas adquiridas, se enfoque solo a acondicionar las señales eléctricas obtenidas por medio de electrónica analógica. Esto permite una rápida respuesta, y evita un procesamiento exhaustivo de señales por medio de microcontroladores o computadoras, como es en el caso de los sistemas activos. Otra posibilidad de mejoría es que el sistema puede construirse con fotodiodos sensibles a otras longitudes de onda, por ejemplo IR. Lo cual permitirá el uso de este sensor de proximidad, en medios donde exista muy poca luz visible. Podemos concluir que el rango perceptible por nuestro sensor es de 0.5 a 4 metros, debido a que a partir de 4 metros se pierde sensibilidad en el sistema, principalmente por la incapacidad de la electrónica de visualización, para registrar diferencias del orden de nV. Por último se puede expresar que los resultados fueron alentadores consiguiendo un intervalo de operación relativamente amplio.

#### 4.4 Aplicaciones

Una aplicación importante que puede darse en un futuro, es que al perfeccionarse el sistema, este sensor podrá ser utilizado para formar un sistema de barrido o “scaneo” espacial en direcciones específicas y ángulos pequeños, estos factores dependiendo del rango de visión deseado. El sistema de barrido se podría diseñar como un sistema mecano-opto-electrónico, que permitiera obtener los contornos de una superficie que esté enfrente del sistema, con la finalidad de procesar esta información para la

generación de imágenes, las cuales serían útiles para desarrollar visión artificial o 3D. Lo cual puede contribuir con el mejor desarrollo de la robótica.



## **Capítulo 5 Conclusiones**

## 5 Conclusiones

Los resultados presentados en esta tesis, permiten demostrar que el diseño del sensor óptico pasivo de proximidad propuesto, es una posible alternativa para ser implementada como una ayuda auxiliar para las personas ciegas. Esta nueva propuesta de dispositivo se fundamenta en la dependencia de la distancia al plano imagen de una lente delgada, con la distancia al plano objeto, siendo esta última la que se pretende estimar. Dado que la aplicación deseada requiere de un instrumento con tiempo de respuesta en el intervalo de milisegundos, se propuso sensar la distancia al plano imagen en una lente, usando un par de fotodetectores y electrónica analógica (Fig. 3.2), por lo que se desarrolló un sistema opto-electrónico cuyo modelo matemático (Ec. 3.30) representa la intensidad luminosa de un plano u objeto luminoso, en función de la distancia existente entre el sistema óptico y el objeto, siendo el funcionamiento del dispositivo independiente del flujo radiante. De tal manera que el dispositivo en principio es capaz de determinar la distancia a un objeto iluminado, independientemente de su forma, textura, e iluminación. La resolución alcanzada en el dispositivo se puede estimar 20-30 cm a partir de los resultados obtenidos, ya que se muestra en la gráfica de la Fig 4.5 un cambio de señal a por lo menos cada 25 cm, aunque las mediciones por facilidad fueron realizadas cada 50 cm. No obstante se observó que el sensor presenta cambios significativos en intervalos de 25 cm. Este sistema puede operar en condiciones bajas de luz, su diseño opera con una iluminación energética de hasta  $3.5 \frac{W}{m^2}$ , con márgenes de error del 5%. Dicha

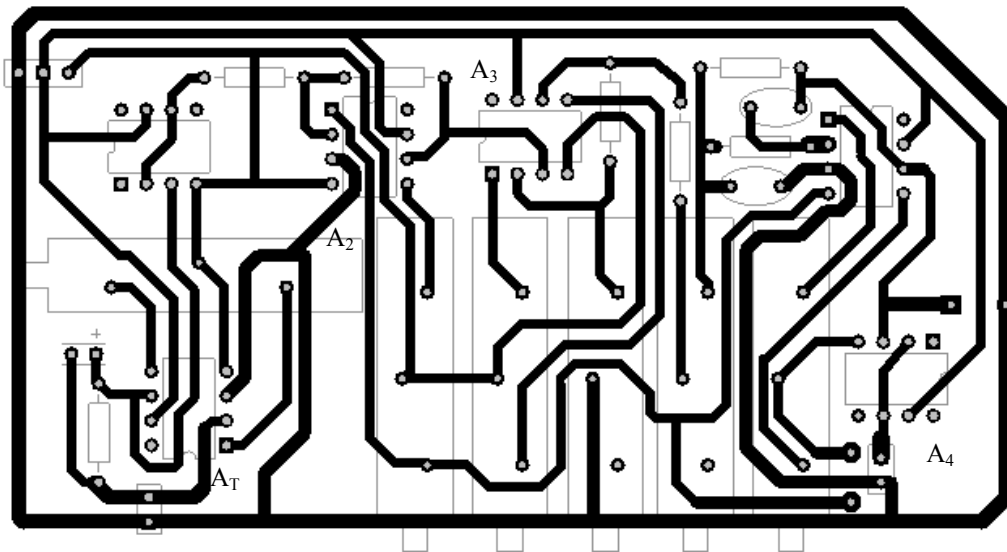
característica se obtuvo de calcular el área aproximada, y la cantidad de luz incidente en la superficie utilizada para realizar el experimento. Este sistema puede superar estas especificaciones al mejorar su alineación, y el tipo de fotodetectores a emplear. Para optimizar el sistema se sugiere el empleo de fotomultiplicadores, o bien, perfeccionar la electrónica para mejorar y dar un mayor intervalo operación. Una de las soluciones a futuro para lograr ver variaciones muy pequeñas, es incrementar la alimentación de la electrónica, aunque debe considerarse para su facilidad de manejo y costo. Ahora, la ventaja de este sistema sobre los activos radica principalmente en el procesamiento de señal, ya que éste no requiere ni de procesamiento digital de señales, ni de complejos algoritmos. Por otra parte, el objetivo principal fue alcanzado, ya que se elaboraron los principios y el diseño del sistema, dejando el intervalo de operación abierto al desarrollo de una electrónica óptima, y así alcanzar un rango mayor en futuros desarrollos. En cuanto a los resultados obtenidos, considero que son satisfactorios, ya que se apegan al modelo teórico empleado para su diseño. En resumen, podemos concluir:

- Se propuso un nuevo tipo de sensor de proximidad.
- Los resultados teóricos y experimentales demuestran que es posible desarrollar esta clase de sensores de proximidad, con ventajas sobre los de tipo activo.
- Se desarrolló un prototipo experimental con el cual se verificó el modelo teórico y que permitirá seguir mejorando este sensor de proximidad.
- La realización de este proyecto es innovador y original, además permitió demostrar la posibilidad de desarrollar un sensor de proximidad, cuya

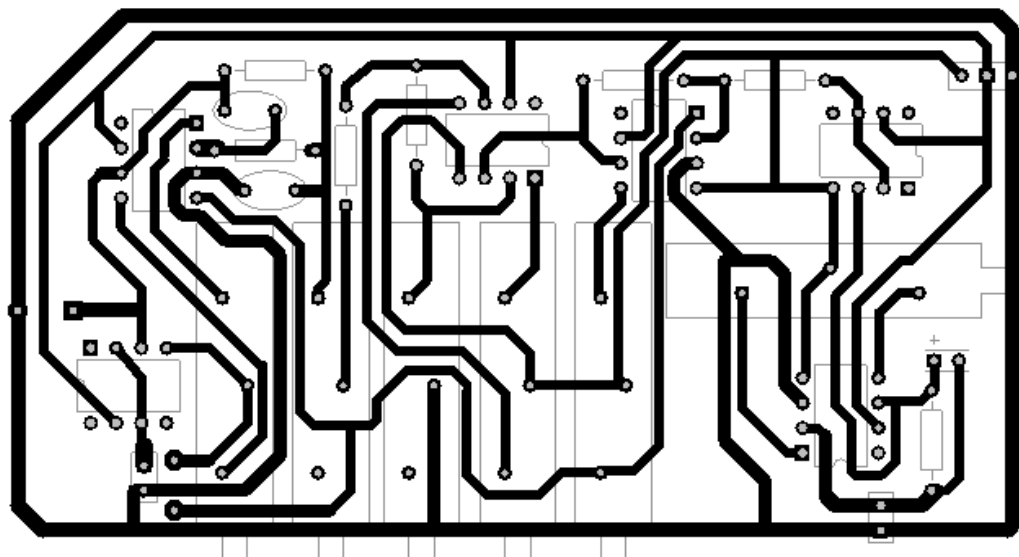
utilidad no solo se limita a la ayuda a ciegos sino a visión 3D para la robótica.

## Anexo 1

Un reto en el desarrollo de esta investigación fue el desarrollo del diseño y fabricación del circuito electrónico, ya que no existía ningún dispositivo fabricado con este fin por lo cual se diseñó la electrónica. Una vez obtenido el diseño se implementó, partiendo del diagrama mostrado en la Fig. 3.10. Para realizar el impreso del circuito se utilizó software como Protel DXP y Pspice obteniendo el siguiente impreso:



*Vista superior del circuito integrado*



*Vista inferior para realizar el impreso*

Donde de la Fig 3.10 los valores son los siguientes:

$$R_1=2.2 \text{ M}\Omega$$

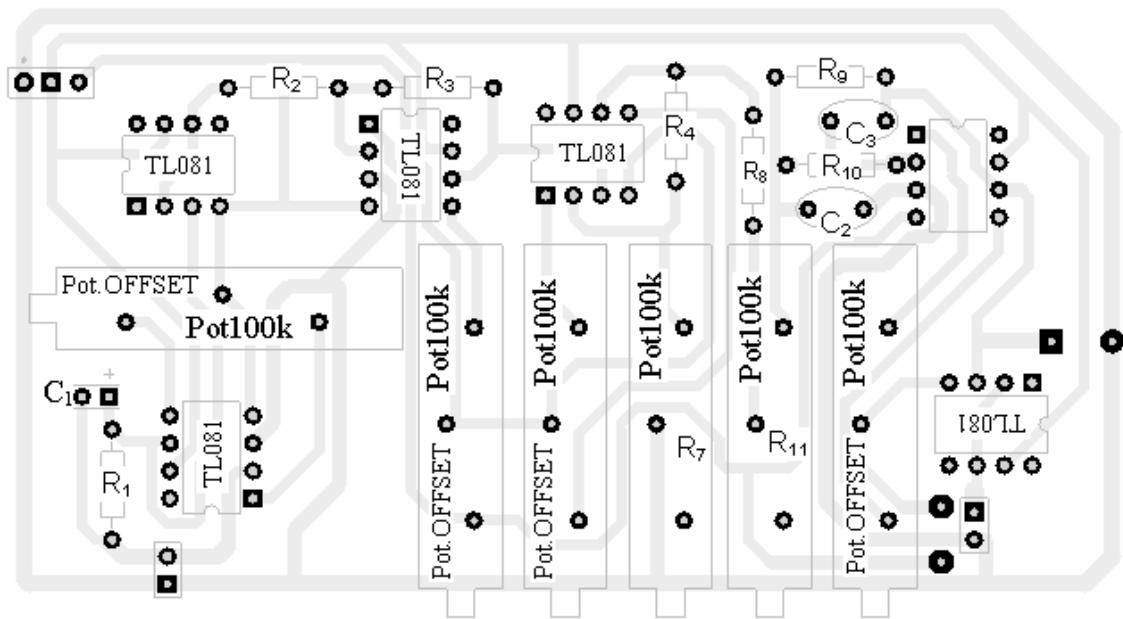
$$R_{11}=R_7=100 \text{ k}\Omega$$

$R_2=R_8=100\text{ k}\Omega$                        $C_3=9.6\text{ nF}$

$R_3=R_4=R_9=1\text{ M}\Omega$                        $C_2=82\text{ nF}$

$R_{10}=2\text{ M}\Omega$                                   Todos los potenciómetros son de  $100\text{ k}\Omega$

Los OPAM son todos TL081 que son tipo FET proporcionando alta impedancia de entrada con una CMRR de 86 dB, todas las resistencias se recomiendan utilizar de precisión y en las resistencias variables trimpots de 15 vueltas como mínimo. En el siguiente diagrama se muestra la colocación de cada uno de los elementos que conforman al circuito.



## ▪ REFERENCIAS

- [1]. XII Censo General de Población y Vivienda 2000. INEGI [www.inegi.com.mx](http://www.inegi.com.mx)
- [2]. Bruno Ando "Electronic Sensory for the Visually Impaired"  
IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. Pag. 62-67 June 2003
- [3]. Hetch, Zajac  
Óptica  
México, 1998, Ed. Addison Wesley.
- [4]. P. Tippens  
Física conceptos y aplicaciones  
México, 1981, Ed. McGraw-Hill.
- [5]. Malacara Hernández, Daniel  
Óptica básica  
México, 1967, UNAM, Facultad de Ciencias.
- [6]. Klein, Miles V  
Óptica.  
New York, 1970, Ed. J. Wiley.
- [7]. Curry, Colin  
Geometrical optics  
London, 1959, Ed. Arnold.
- [8]. Walther, Adriaan  
The ray and wave theory of lenses  
Cambridge, 1995, University of Cambridge.
- [9]. Zimmer, Hans-Georg  
Geometrical optics. [Translated by R. N. Wilson Berlin, Springer, 1970.]  
Applied physics and engineering, v. 9
- [4]. Begunor, Boris Nicolaevich  
Optics  
Singapore, 1986, 2ª ed., Ed. John Wiley & Sons Inc.
- [5]. Nussbaum, Allen  
Optical system design  
New Jersey, 1997, Ed. Prentice Hall PTR.
- [6]. O'Shea, Donald C.  
Elements of modern optical design  
New York, 1985, Ed. John Wiley.
- [7]. BN. Begunov, Np. Zakaznov  
Teoría de sistemas ópticos  
Moscú, 1976, Ed. MIR.
- [8]. Walsh, John William Tudor  
Photometry. 2ª ed.  
Great Britain, 1953, Ed. Constable & Co.
- [9]. Walsh, John William Tudor  
The elementary principle of lighting & photometry  
London, 1923, Ed. Methuen.

- [10]. Shannon, Wyan  
Applied optics and optical engineering  
USA, 1980, Ed. Academic Press.
- [16]. L. Boylestad  
Electrónica: Teoría de Circuitos  
México, 1997, 6ª ed., Ed. Prentice Hall
- [17]. Graeme, Jerald G.  
Applications of operational amplifiers: Third-generation techniques  
New York, 1973, Ed. McGraw-Hill.
- [18]. Graeme, Jerald G.  
Photodiode Amplifiers Op. Amp. Solutions.  
USA. 1996, Ed. Mc Graw-Hill.
- [19]. Coughlin, Robert F.  
Operational amplifiers and linear integrated circuits  
New Jersey, 1982, 2a ed., Ed. Prentice Hall.
- [20]. Faulkenberry, Lucas M.  
Introducción a los amplificadores operacionales: con aplicaciones a CI lineales  
México, 1990, Ed. Limusa.
- [21]. Berlin, Howard M.  
Fundamentals of operational amplifiers and linear integrated circuits / Howard m.  
Berlin and Frank c. getz  
Columbus, Ohio, 1990, Ed. Merrill
- [22]. Tobey, Gene E.  
Operational amplifiers / Design and applications  
New York, 1971, Ed. McGraw-Hill
- [23]. Meiksin, Z. H.  
Complete guide to active filter design, op amps, and passive components / Z. h.  
meiksin  
New Jersey, 1990, Ed. Prentice Hall.
- [24]. Pertence Junior, Antonio  
Amplificadores operacionales y filtros activos: teoría, proyectos y aplicaciones  
prácticas / Antonio Pertence Junior ; tr. M. Isabel Gutiérrez Díaz, José M. Torrubias  
Fernández  
Madrid, 1993, Ed. McGraw-Hill
- [25]. Ramon Pallas Areny  
Sensores y acondicionadores de señal  
España, 2001, 3ª. ed., Ed. Alfa Omega Marcombo