



Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Ingeniería

---

---

# Desarrollo de un sensor óptico pasivo para determinar distancias

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

PRESENTA:

IRELIA HIROMI VALENZO AOKI

DIRECTOR DE TESIS: Dr. Augusto García Valenzuela



Ciudad Universitaria, México D.F.

2006



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

---

---

*A mi familia, por todo su amor y apoyo.*

---

---

---

# AGRADECIMIENTOS

Durante la elaboración de este trabajo, recibí gran apoyo de muchas personas. Primeramente, le agradezco al Dr. Augusto García por todas las enseñanzas que me brindó, por su tiempo y por sus valiosos consejos. También quiero agradecer a mis sinodales, por su interés y su ayuda en la finalización de este trabajo.

Asimismo, siento una enorme gratitud a las personas que, si bien no participaron directamente en el desarrollo de esta tesis, estuvieron conmigo en el trabajo diario o apoyándome y motivándome en todo momento.

---

---

---

# ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>OBJETIVO</b>	<b>2</b>
<b>CAPITULO 1: DISPOSITIVOS DE AYUDA PARA LAS PERSONAS CON DISCAPACIDAD VISUAL</b>	<b>3</b>
1.1 Las necesidades visuales especiales	3
1.2 Estado del arte de los sistemas sensoriales electrónicos para discapacitados visuales	4
1.2.1 Sistemas sensoriales electrónicos para evadir obstáculos	5
1.2.2 Sistemas sensoriales electrónicos para el reconocimiento del ambiente	6
1.2.3 Sistemas sensoriales electrónicos para navegación y orientación	7
1.3 El sensor de distancias propuesto en el contexto de los sistemas sensoriales electrónicos para discapacitados visuales	7
<b>CAPITULO 2: PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO</b>	<b>9</b>
2.1 Análisis del sistema óptico	9
2.2 Modelo matemático	13
2.2.1 Modelo desarrollado	14
2.2.2 Modelo simplificado	15
2.2.3 Comparación de ambos modelos	16
2.3 Consideraciones adicionales	16
2.3.1 El cono de visión	17
2.3.2 Fuentes puntuales fuera del eje óptico	18
2.3.3 Ubicación del detector	18
2.3.4 El ruido	20
2.4 Conclusiones del capítulo	23
<b>CAPITULO 3: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL</b>	<b>25</b>
3.1 El sistema óptico	25
3.1.1 La Lente	25
3.1.2 El Iris	26
3.1.3 El aislamiento óptico	25
3.2 El sistema optoelectrónico	27
3.2.1 El fotodetector	27
3.2.2 El circuito electrónico amplificador	32
3.3 Descripción del dispositivo experimental completo	34
3.4 Alineación de los componentes	35
3.5 Conclusiones del capítulo	36

---

---

---

<b>CAPÍTULO 4: PRUEBAS Y RESULTADOS</b>	<b>37</b>
4.1 Prueba general para determinar la curva de respuesta del dispositivo experimental	37
4.1.1 Repetibilidad en los experimentos	43
4.1.2 Análisis de la curva de respuesta y de los errores en el prototipo experimental	44
4.2 Prueba para determinar la inmunidad de la señal a diferentes intensidades luminosas	47
4.3 Prueba para determinar el cono de visión	48
4.4 Prueba para determinar el alcance y la resolución del dispositivo experimental	51
4.4.1 Determinación del ruido presente en el dispositivo experimental	52
4.4.2 Determinación de la resolución y del alcance del dispositivo experimental	54
4.5 Prueba para determinar el límite de medición experimental del dispositivo (cuando el blanco es muy lejano)	56
4.6 Conclusiones del capítulo	57
<b>CAPITULO 5: ANÁLISIS DE RESULTADOS Y OPTIMIZACIÓN DEL DISPOSITIVO</b>	<b>59</b>
5.1 Análisis de resultados	59
5.2 Optimización de parámetros	62
5.2.1 Principales fuentes de error en el dispositivo experimental	62
5.2.2 Optimización de los parámetros del sistema óptico	63
5.2.3 Optimización de la estructura del dispositivo: Un sistema instantáneo	64
5.2.4 Optimización de los parámetros del sistema optoelectrónico	64
5.3 Perspectivas	65
5.4 Comentarios adicionales	66
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>67</b>
<b>REFERENCIAS</b>	<b>68</b>

---

# INTRODUCCIÓN

En México existe un sector importante de la población que sufre de discapacidad visual y, por lo tanto, que requiere para su movilización de sistemas que le brinden información del medio donde se desplaza.

La ayuda más común, por su facilidad y costo, es el bastón para invidentes; sin embargo, después de este dispositivo se han desarrollado varios Sistemas Electrónicos Sensoriales para los Discapacitados Visuales (SESDV) que pretenden ayudar a las personas con necesidades visuales especiales en sus tareas de movilidad y orientación.

Sin embargo, existen varios inconvenientes en la mayoría de los SESDV: muchos de ellos son demasiado sofisticados e implican altos costos. En consecuencia, los SESDV no penetran el mercado y las personas con necesidades visuales especiales difícilmente tienen acceso a ellos. En nuestro país esto es un problema innegable; el único dispositivo que la mayoría de los discapacitados visuales tienen a su alcance para desplazarse es el bastón blanco. Además de éste, en los centros de rehabilitación y hospitales los dispositivos de ayuda a personas invidentes que se pueden encontrar sirven como ayuda en otro tipo de actividades (como escribir o manejar objetos). Es por esta razón que el trabajar en el desarrollo de tecnologías complementarias para ayudar a los invidentes a desplazarse y orientarse tiene gran relevancia.

El propósito de esta tesis es proponer y probar un principio físico novedoso para desarrollar un sensor de distancias que sirva como parte de un SESDV; específicamente, se busca que este principio permita el desarrollo de un dispositivo de bajo costo, de fácil implementación, que pueda integrarse dentro de un sistema sensorial electrónico para evadir obstáculos.

Es importante mencionar que esta tesis sólo se enfoca en exponer el modelo matemático que permite crear un dispositivo para determinar distancias a partir de técnicas fotométricas y en probar este modelo con la ayuda de un prototipo experimental. Esta fuera del alcance de esta tesis crear y probar el SESDV completo, es decir, implementar el dispositivo práctico y diseñar la interfaz con el usuario. Sin embargo, al final de esta tesis, con base en los resultados obtenidos, se realiza una propuesta para desarrollar estos aspectos.

Así, este trabajo de tesis se expone en cinco capítulos. En el primer capítulo se da una breve descripción de las necesidades visuales especiales y de los dispositivos de ayuda que se han desarrollado para cubrir estas necesidades; además, se describe el estado del arte de los SESDV. Este primer capítulo tiene como finalidad dar un panorama general de la aplicación deseada para el sensor de distancias propuesto, por lo que al final de éste se explica cómo está ubicado el trabajo hecho en esta tesis en el contexto de los SESDV.

El segundo capítulo contiene todo el desarrollo teórico del sensor de distancias. Primeramente se describe la estructura del sistema óptico que forma parte del sensor y se realiza un análisis geométrico para explicar su principio de funcionamiento, presentando después un modelo matemático representativo de éste. A continuación en este capítulo se

presentan algunas consideraciones que se deben hacer para entender el funcionamiento general de nuestro sensor de distancias. Finalmente se hace un breve análisis del ruido que existe en nuestro sistema y la importancia que tiene al determinar algunas de las características de nuestro sensor.

El tercer capítulo trata sobre el diseño del dispositivo experimental que utilizamos para comprobar el principio de funcionamiento; así, se describe cada uno de los componentes de la parte óptica y de la parte optoelectrónica del dispositivo experimental. En este capítulo se da principal atención al diseño del sistema optoelectrónico: se presenta una pequeña investigación acerca de los detectores de luz y se realiza el análisis del circuito electrónico amplificador que utilizamos. Por último se muestra cómo se integró todo el dispositivo experimental, incluyendo algunos de los componentes externos a éste que también formaron parte de los experimentos, como las fuentes de luz y el dispositivo de adquisición de datos empleados.

El cuarto capítulo es probablemente la parte principal de esta tesis, ya que en éste se presentan las pruebas experimentales y los resultados obtenidos para poder comprobar el principio de funcionamiento propuesto en el segundo capítulo. Así, en este capítulo se presenta la curva de respuesta experimental, el comportamiento que tiene ante diferentes intensidades luminosas, el cono de visión y el límite experimental de nuestro dispositivo. Finalmente se hace una prueba interesante acerca del ruido que existe en nuestro sistema; los resultados obtenidos en esta prueba nos permiten hacer un análisis sobre la resolución y el alcance de nuestro dispositivo experimental y sobre las características alcanzables en futuras implementaciones.

Finalmente, el capítulo quinto expone las conclusiones generales a las que se llegaron después de la realización de esta tesis. Aquí se analizan los resultados obtenidos en el capítulo cuarto; se expone cómo optimizar los parámetros del sistema y finalmente se propone el diseño de un SESDV basado en este sensor de distancias. En general, en este capítulo se plantean las perspectivas del sistema basadas en los resultados obtenidos en el trabajo realizado para esta tesis.

## **OBJETIVO**

El objetivo de esta tesis es proponer un principio fotométrico para desarrollar sensores ópticos de distancia y realizar un dispositivo que permita comprobar experimentalmente este principio de funcionamiento; además, se pretende que la principal aplicación de este principio sea en el desarrollo de dispositivos de ayuda a personas con discapacidad visual.

# CAPITULO 1

## DISPOSITIVOS DE AYUDA PARA LAS PERSONAS CON DISCAPACIDAD VISUAL

La discapacidad visual puede ser la ausencia total del sentido de la vista (ceguera) o una reducción significativa de la agudeza visual (debilidad visual) [1]. De acuerdo con algunas investigaciones, el 80% de la información acerca de nuestro entorno es recibida por la vía visual [2], por lo que las personas con discapacidad visual sufren de un acceso restringido de su entorno. Para compensar las privaciones de las experiencias que brinda el sentido de la vista, un discapacitado visual desarrolla en forma natural sus otros sentidos y, por lo general, requiere de instrumentos especiales que le ayuden en sus actividades diarias, en la comunicación y, sobre todo, en la orientación y en la movilidad.

### 1.1 LAS NECESIDADES VISUALES ESPECIALES

Según el censo de población y vivienda del 2000, en México viven aproximadamente 466778 personas que sufren de discapacidad visual; esto corresponde al 26% de las personas que sufren alguna discapacidad, siendo la segunda con mayor incidencia después de la discapacidad motriz [3]. Estos datos nos indican que es muy importante desarrollar e implementar los medios adecuados para que estas personas puedan desarrollarse plenamente, integrarse a las actividades sociales y desempeñarse en igualdad de oportunidades en la educación y el trabajo.

Para implementar los medios adecuados que ayuden a un discapacitado visual, debemos entender que la forma en que una persona ciega y una persona vidente conocen el ambiente que los rodea no es la misma. Una persona que posee el sentido de la vista es capaz de recoger suficiente información de su entorno a través de ella y tiene una verificación constante e instantánea de esta información, lo que no sucede con una persona que carece de visión. Una persona ciega, por otra parte, debe de apoyarse completamente en sus otros sentidos.

Para las personas con discapacidad visual, el sentido que proporciona mayor información es el oído. Este sentido les sirve para orientarse en el espacio y para desarrollarse independientemente en su medio. Por otro lado, a través del tacto reciben información de estímulos de presión y de vibraciones, aunque es un sentido limitado ya que requiere contacto directo con los objetos. A través de estos sentidos, los discapacitados visuales pueden recibir información necesaria para adaptarse e integrarse a una sociedad mayoritariamente vidente, pero requieren de instrumentos especiales que les ayuden en muchas de sus tareas.

Actualmente existen diversos instrumentos especiales para ayudar en las tareas cotidianas de una persona con discapacidad visual. En el caso de las personas con debilidad visual los elementos de apoyo más comunes son los lentes, las lupas, microscopios, etc. Estos instrumentos les ayudan a realizar la mayoría de las actividades cotidianas. En el caso de

las personas ciegas, la creación de un instrumento “universal” que les ayude a la mayoría de sus actividades no ha sido posible. Las personas ciegas requieren de instrumentos específicos para cada tarea que realizan; en general, es sumamente difícil que un mismo instrumento les brinde toda la información necesaria para realizar alguna actividad. Así, por ejemplo, existen instrumentos como plantillas y punzones para escribir en sistema Braille, regletas para medir el nivel de los líquidos, audiolibros y programas especiales de lector de pantalla para acceder a información, mapas táctiles para orientarse y bastones para poder desplazarse.

Aún son muy pocos los instrumentos desarrollados para mejorar la calidad de vida de las personas con discapacidad visual y la mayoría de ellos son muy limitados. En especial, las personas ciegas sufren de severas restricciones en los aspectos de movilidad y orientación, y no se han desarrollado instrumentos que les permitan desplazarse de forma independiente, eficiente, efectiva y segura dentro de ambientes desconocidos [4].

Hasta ahora, los instrumentos más utilizados por las personas invidentes son el bastón blanco y el perro guía. El bastón blanco fue introducido a finales de los 1940s por Richard Hoover, y es un dispositivo puramente mecánico, que es utilizado para detectar obstáculos por medio del contacto directo a través del bastón. Con debido entrenamiento, el usuario de este bastón puede evadir obstáculos y reconocer superficies; además, con el sonido producido cuando el bastón choca contra el piso puede obtener mayor información del medio en el que se está desplazando [4]. Este dispositivo es barato y sencillo, pero la información que recibe el usuario es limitada a un rango de aproximadamente de un metro, por lo que requiere de una reacción inmediata por parte del usuario cuando se encuentra con un obstáculo. Por otra parte, el perro guía es una muy buena ayuda para las personas con discapacidad visual, pero el costo de estas mascotas es muy elevado debido a su entrenamiento especializado, a su manutención y cuidados especiales. Otra desventaja es que su vida útil es de sólo 5 años aproximadamente [5]. En nuestro país existen organizaciones que apoyan a las personas invidentes con perros guía [6] pero difícilmente podrán cubrir las necesidades de este sector de la población.

Durante las últimas décadas han aumentados los esfuerzos por desarrollar sistemas que puedan mejorar las posibilidades que brinda el bastón blanco. El problema de la movilidad y la orientación en personas invidentes es sumamente complejo, y es por eso que se pensó en la creación de sistemas electrónicos sensoriales que pudieran resolverlo. Especialmente, con el desarrollo de tecnologías como el radar y el sonar, y el posterior desarrollo de tecnología para robots móviles [5], se realizaron grandes avances en Sistemas Sensoriales Electrónicos para Discapacitados Visuales (SESDV) [7] cuyo principal objetivo es extender el “rango de observación” de los discapacitados visuales.

### **1.2 ESTADO DEL ARTE DE LOS SISTEMAS SENSORIALES ELECTRÓNICOS PARA DISCAPACITADOS VISUALES**

Primeramente aclaremos que en el contexto de esta tesis, los Sistemas Sensoriales Electrónicos para Discapacitados Visuales (SESDV) son aquellos sistemas desarrollados para cubrir las necesidades específicas de movilidad y orientación para las personas con

necesidades visuales diferentes. Estos sistemas pueden clasificarse en tres grandes grupos dependiendo de la función que realizan [7]:

- 1) Sistemas electrónicos sensoriales para evadir obstáculos
- 2) Sistemas electrónicos sensoriales para el reconocimiento del ambiente
- 3) Sistemas electrónicos sensoriales para la navegación y orientación

### **1.2.1 Sistemas electrónicos sensoriales para evadir obstáculos**

Los SESDV para evadir obstáculos sirven para indicar la presencia y la distancia aproximada a la cual se encuentra un obstáculo. Los dispositivos sensores de obstáculos dentro de este sistema funcionan de forma similar a un radar: mandan un pulso y determinan el tiempo que tarda en regresar reflejado de un objeto cercano. Estos pulsos son usualmente ultrasónicos o láser [8]. La principal ventaja de estos SESDV es que pueden brindar información de distancias más lejanas que las que se pueden alcanzar con el bastón blanco; en general, estos dispositivos pueden alcanzar rangos de hasta 5m [5].

Dentro de los SESDV para evadir obstáculos podemos encontrar los siguientes sistemas ultrasónicos: el Russell pathsounder, el detector de obstáculos Nottingham, el indicador de trayectorias sónico (sonic pathfinder) y el Polaron. En cuanto a los sistemas basados en láser, el más ampliamente desarrollado es el bastón laser (laser cane)[7].

#### ***Sistemas ultrasónicos***

El Russel pathsounder es un sistema que utiliza un transmisor de ultrasonido colocado a la altura del pecho y que se suspende del cuello. El haz que transmite tiene una apertura de 30° y brinda la información recibida al usuario por medio de una alarma con tres niveles de sonido o vibración para indicar la distancia aproximada a la que se encuentra un objeto. Este sistema tiene un rango de hasta 1.82 m. [4].

El detector de obstáculos Nottingham es un sistema que se puede llevar en la mano. El sensor de distancias que tiene este sistema es un sonar de pulsos cuyo haz es estrecho. Transmite la información a través de ocho notas correspondientes a la escala musical [4].

El indicador de trayectorias sónico es un sistema que va montado a la altura de la cabeza. Tiene un rango de hasta 2.4 metros y brinda la distancia de los objetos a través de notas en la escala musical, cada nota cubre un rango de aproximadamente 30 centímetros [9].

El Polaron es un dispositivo que se puede llevar en la mano e indica, por medio de vibraciones y tonos, la distancia a la cual se encuentra un objeto: cuanto más cercano esté el objeto, más alto será el tono y más intensa será la vibración que emita. Puede seleccionarse el rango de detección deseado a 122, 244 y 488 centímetros.

La tecnología del ultrasonido existente en los 1960s se desarrolló para aplicaciones debajo del agua. Posteriormente se contempló para aplicaciones de movilidad, pero aparecieron complicaciones como grandes atenuaciones y dificultades en el acoplamiento de los transductores con el aire. Finalmente, los avances en esta tecnología superaron estos

problemas y se volvió la opción más recurrida en el diseño de sistemas sensoriales para tareas de movilidad. Sin embargo, presenta algunas desventajas importantes como tener un rango útil limitado y mostrar dificultades cuando se presentan superficies más suaves [4]. Además, algunos dispositivos reciben ocasionalmente interferencia de otras fuentes de ultrasonido y son incapaces de detectar eficientemente caídas como escaleras hacia abajo, orillas, etc. [10]

### *Sistemas basados en láser*

Probablemente el SESDV basado en láser más conocido sea el bastón láser, que basa sus mediciones en la triangulación [9]. Este sistema incorpora tres sensores láser al bastón blanco: uno para localizar obstáculos arriba, otro para detectar objetos al frente y el último para localizar bajadas frente al usuario [11]. Este detector indica la presencia de obstáculos dentro de un rango de 3.65 metros a través de tonos o vibraciones [9].

Los sistemas descritos anteriormente son los más conocidos dentro de los sistemas para evadir obstáculos. Para mayor información y detalles sobre otros SESDV para evadir obstáculos se puede consultar [9].

### **1.2.2 Sistemas electrónicos sensoriales para el reconocimiento del ambiente**

En general, los SESDV para reconocimiento del ambiente son más complejos que los SESDV descritos en la sección 1.2.1, pero están diseñados como complemento a sistemas de detección de obstáculos, principalmente al bastón blanco y al perro guía. El propósito de estos sistemas es dar mayor información a la persona invidente acerca de los objetos que están a su alrededor; es decir, brindar señales para que el usuario pueda no sólo percibir la presencia de un objeto, sino identificar al objeto en sí. Con estos sistemas una persona invidente puede identificar texturas y patrones de flujo. Los principales SESDV para reconocimiento del ambiente desarrollados hasta ahora son la lámpara sónica Kay (Kay sonic torch) y el Sonicguide [7].

La lámpara sónica Kay es un dispositivo que se puede transportar en la mano y utiliza un sonar FM. Este aparato transmite al usuario información auditiva por medio de un audífono; donde él puede identificar diferentes patrones de sonido dependiendo del rango y la naturaleza de los objetos. Con la lámpara sónica Kay, una persona con discapacidad visual puede incluso diferenciar el tipo de suelo por el cual camina (por ejemplo, una banqueta o pasto) [11].

Por otra parte, el Sonicguide es, probablemente, el dispositivo de ayuda más influyente producido hasta ahora [11]. El sistema de funcionamiento es muy parecido al de la lámpara sónica Kay, aunque existen diferencias como un mayor ángulo de visión, que se coloca en la cabeza y que tiene dos receptores auditivos (uno para cada oído). El Sonicguide recibe información independiente en cada oído, y así la despliega al usuario. Esta diferencia permite que una persona invidente identifique la dirección en la que se encuentra el objeto.

Como podemos ver, estos sistemas aprovechan las grandes cualidades que tiene el oído para que una persona pueda recibir información de su medio ambiente. Sin embargo, la

gran desventaja que puede tener una interfaz auditiva es que limita al usuario para que pueda reaccionar a los estímulos sonoros que existen naturalmente en el ambiente, y los cuales, de por sí, le brindan información muy importante.

Para evitar los problemas causados por las interfaces auditivas, se han tratado de desarrollar Sistemas Sensoriales para reconocimiento de ambientes que desplieguen señales igualmente ricas en información a través del tacto. Estos sistemas despliegan imágenes obtenidas de videocámaras a través de estímulos táctiles eléctricos o mecánicos [11].

### **1.2.3 Sistemas electrónicos sensoriales para navegación y orientación**

Uno de los problemas más graves que enfrenta un discapacitado visual es el de poder orientarse adecuadamente. Además de poder desplazarse seguramente y de conocer su entorno inmediato, una persona invidente necesita saber en dónde se encuentra dentro de su ambiente, hacia dónde quiere ir y cómo llegar desde el lugar en donde está. Este problema es sumamente complicado, sobre todo si consideramos un ambiente desconocido para la persona invidente.

Los Sistemas Sensoriales Electrónicos para navegación y orientación tienen como propósito resolver este problema. Hasta ahora, los desarrollos más significativos en esta área han sido los “signos habladores” (talking signs), el Sistema de Ayuda Sónico para la Orientación en la Navegación, el sistema Easy Walker, el MS-ST y la Luz Piloto (Pilot Guide) [7].

El sistema de “signos habladores” se basa en la idea de colocar módulos de transmisores infrarrojos en puntos clave en el ambiente (esquinas, paradas de autobuses, corredores, números de cuartos y edificios) que den información sobre estos lugares a las personas invidentes a través de un receptor que ellos puedan llevar en la mano [4].

El Sistema de Ayuda en la Navegación y Orientación Sónica brinda información auditiva y es activado por medio de señales de radiofrecuencia.

Los sistemas Easy Walker, MS-ST y la Luz piloto, son sistemas basados en tecnología infrarroja. El Easy Walter indica la dirección adecuada hacia una dirección elegida. El MS-ST es un sistema diseñado para la orientación en aeropuertos, estaciones subterráneas, correos, bancos, hospitales y museos. Finalmente la Luz piloto es un dispositivo portátil que ayuda en la navegación urbana [4].

## **1.3 EL SENSOR DE DISTANCIAS PROPUESTO EN EL CONTEXTO DE LOS SISTEMAS SENSORIALES ELECTRÓNICOS PARA DISCAPACITADOS VISUALES**

Como hemos visto, el diseño de un Sistema Sensorial Electrónico para Discapacitados Visuales (SESDV) no es una tarea sencilla. Requiere de un análisis exhaustivo de las necesidades que tienen los discapacitados visuales: la estructura del dispositivo para que sea cómodo y seguro, la forma en que despliega la información, el grado de redundancia de la información, las habilidades necesarias para usarlo, el entrenamiento que se requiere para

emplearlo adecuadamente, etc. Además de esto, se deben de considerar otros factores sumamente importantes como el costo, la eficiencia y la confiabilidad [4].

Evidentemente el sensor de distancias propuesto en esta tesis no pretende cubrir todos los aspectos necesarios para la creación de un SESDV completo, pero sí pretende aportar una contribución importante a la futura creación de uno.

Específicamente, esta tesis es una propuesta para crear un sensor de distancias que forme parte de un SESDV para detección de obstáculos. A grandes rasgos, un SESDV para evadir obstáculos es un sistema conformado por dos grandes subsistemas: El sensor de distancias o sensor de detección de objetos y la interfaz con el usuario. Actualmente, las tecnologías más utilizadas la parte del sensor de distancias en los SESDV son el sonar y el láser. Esta tesis propone una alternativa para detectar distancias que no se basa en ninguna de éstas dos tecnologías, y que puede brindar ventajas valiosas sobre los actuales sensores para la implementación de un SESDV.

Aunado a lo anterior, podemos decir que esta propuesta aspira a crear un dispositivo óptico pasivo con un cono de visión muy reducido, con el cual se puede hacer un barrido manual para brindar información espacial a una persona invidente acerca de la distribución de los objetos que se encuentran alrededor de ella, y con esto permitirle evadir obstáculos que se encuentran en su camino.

La creación de un SESDV para evadir obstáculos es la aplicación más clara de este sistema; sin embargo, es interesante notar que con un desarrollo más avanzado, en donde se incluya un sistema de adquisición de datos en 3D (como el propuesto en [12]) y una interfaz adecuada para brindarle información al usuario, se podría lograr un SESDV para navegación y orientación, ya que permitiría al usuario reconocer lugares específicos.

Ciertamente la aplicación antes descrita es la única considerada en el desarrollo de esta tesis, sin embargo, cabe mencionar que este sensor de distancias también podría ser empleado para otras aplicaciones como visión robótica, control en niveles de líquidos, control en niveles de sólidos, sensores de proximidad, dimensionamiento, posicionamiento, control de movimiento, etc.

# CAPITULO 2

## PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

En forma general, el sensor óptico que se propone en esta tesis está formado por dos partes: el sistema óptico y el sistema optoelectrónico. El sistema óptico, que está formado por una lente y un iris desplazable a lo largo del eje óptico de la lente, tiene la función de filtrar angularmente la luz recibida, y así definir un cono de visión. Por otro lado, el sistema optoelectrónica está conformado por el fotodetector y sirve como transductor para convertir la potencia óptica<sup>1</sup> recibida en una señal eléctrica adecuada para procesarla.

En este capítulo explicaremos cómo funciona el sistema óptico del sensor de distancias; es decir, cómo se obtiene una señal a partir de la potencia óptica que es dependiente de la distancia a la cual se encuentra un objeto. Asimismo, encontraremos una ecuación que modela aproximadamente este funcionamiento.

### 2.1 ANÁLISIS DEL SISTEMA ÓPTICO

En términos generales, el sistema óptico del sensor está conformado por una lente y un iris, que reciben luz de un objeto, como se muestra en la siguiente figura:

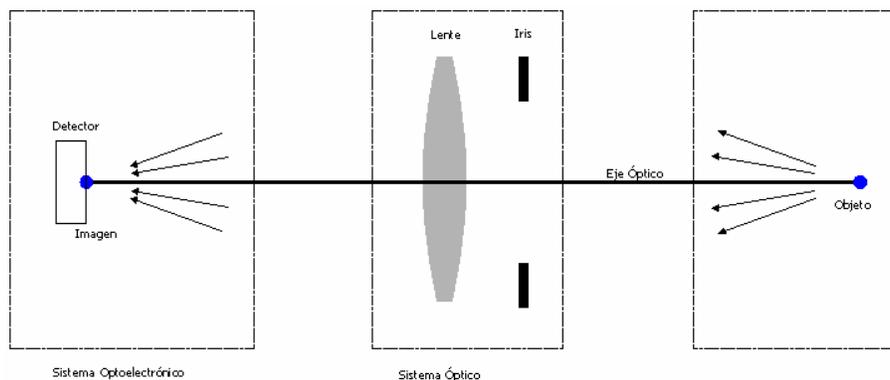


Figura2.1 Partes que conforman el sensor de distancias.

La lente sirve para hacer que una porción de la luz que emana del objeto converja hacia el plano imagen de esta lente, donde está ubicado el detector. Mientras que el iris limita la cantidad de luz que llega a la lente y, por lo tanto, al plano imagen.

Como veremos más adelante, la cantidad de luz que recibe el detector depende de la potencia óptica de la luz del objeto, la distancia a la cuál se encuentra el objeto y la separación entre la lente y el iris.

<sup>1</sup> La potencia óptica es aquella fracción de la potencia radiante total emitida por una fuente de luz, y que se encuentra dentro del espectro visible

Para efectuar un primer análisis de este sistema, necesitamos realizar algunas consideraciones. En primer lugar, asumamos que el objeto es una fuente puntual de luz que irradia uniformemente en todas direcciones y que está sobre el eje óptico del sistema. Es claro que esta fuente puntual no representa el caso general de los objetos cuya distancia queremos determinar, pero nos permite una mejor comprensión del principio de funcionamiento al ser el caso más simple. Además, una vez terminado el análisis para una fuente puntual, podemos generalizar este análisis considerando cualquier objeto como un conjunto de fuentes puntuales.

Una segunda consideración que podemos hacer es que la lente es delgada, ya que esto nos ayudará a realizar algunas simplificaciones en el modelo que no afectarán significativamente a los resultados.

Una vez hechas estas consideraciones, observemos el diagrama de rayos del sistema óptico (formado por el iris y la lente convergente) que es iluminado por una fuente puntual, mostrado en la figura 2.2.

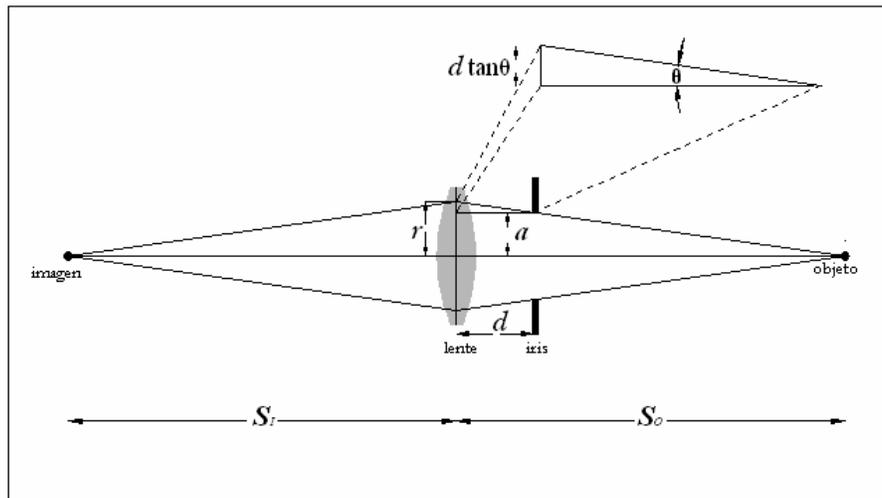


Figura 2.2 Diagrama de rayos del sistema óptico.

Los rayos que se presentan en la figura 2.2 son los rayos marginales, es decir, los rayos que tienen la mayor apertura permitida por el iris. Como podemos ver, el ángulo de dichos rayos con respecto al eje óptico es  $\theta$ . Además,  $a$  es el radio de la apertura del iris, mientras que  $S_o$  y  $S_i$  son la distancia objeto y la distancia imagen respectivamente. Por último vemos que  $r$  es el radio del área iluminada sobre el plano perpendicular al eje óptico que pasa por el centro de la lente.

Supongamos que la fuente puntual tiene una potencia óptica igual a  $P_o$  [W]. Recordemos que la iluminación  $E$  de una superficie  $A$  será igual la potencia óptica  $P$  por unidad de área<sup>2</sup>. Así, en el caso específico de nuestra fuente, la iluminación  $E_o$  que brinda nuestro objeto estará dada por:

<sup>2</sup> La *intensidad luminosa* de una fuente de luz se puede definir como la potencia óptica por unidad de ángulo sólido. Por otra parte, la *iluminación* de una superficie es la potencia óptica por unidad de área. Estas definiciones pueden ser encontradas en [13].

$$E_o = \frac{P_o}{A_o} \quad (2.1)$$

Donde  $A_o$  es la superficie iluminada por nuestro objeto. Si pensamos que nuestra fuente irradia uniformemente en todas las direcciones,  $A_o$  tiene la forma de una esfera (y tiene su centro en el objeto). Para calcular la iluminación que recibe nuestro sensor, debemos de considerar que el radio de dicha esfera estará dado por  $S_o$ , que es la distancia entre la fuente puntual y el plano donde se va a capturar la iluminación  $E_o$ , en este caso, el plano de la lente (figura 2.3).

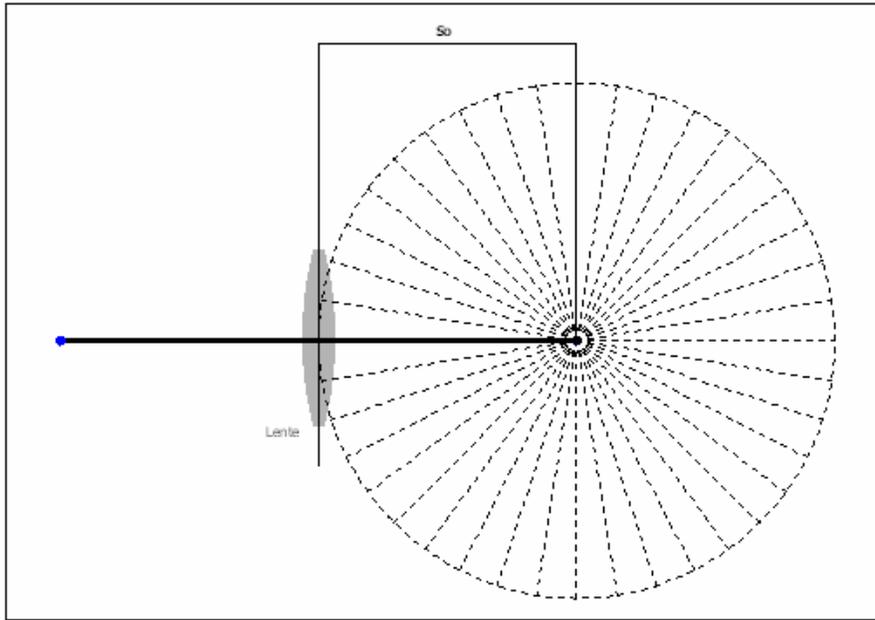


Figura 2.3: Representación de la iluminación recibida en el sensor de distancias por una fuente puntual que irradia uniformemente en todas las direcciones.

De esta forma,

$$A_o = 4\pi \cdot S_o^2 \quad (2.2)$$

Y la potencia óptica por unidad de área o iluminación  $E_o$  que brinda nuestro objeto estará dada por:

$$E_o = \frac{P_o}{A_o} = \frac{P_o}{4\pi \cdot S_o^2} \quad (2.3)$$

Ahora bien, la potencia óptica que llega al detector, es la que la lente recibe y enfoca en la imagen. Basándonos en la figura 2.2 y pensando que la lente es una lente delgada, podemos aproximar el área de la lente que es iluminada por el objeto  $A_L$  como:

$$A_L = \pi \cdot r^2 \quad (2.4)$$

Debido a que la distancia  $S_o$  es mucho más grande que el radio  $r$ , podemos decir que  $E_o$  es constante sobre toda el área iluminada de la lente  $A_L$ . Así, podemos obtener la potencia

óptica que la lente enfoca en el detector  $P_D$  como la iluminación brindada por la fuente puntual multiplicada por el área de la lente que recibe dicha iluminación. Por lo tanto, de (2.3) y (2.4) obtenemos que:

$$P_D = E_o \cdot A_L = \frac{r^2 P_o}{4S_o^2} \quad (2.5)$$

Si la potencia óptica  $P_o$  fuera constante, lo único que nos haría falta por determinar para obtener  $P_D$  como función de la distancia  $S_o$  sería el radio del área iluminada  $r$ . Como podemos ver en la representación de rayos de la figura 2.2, el radio  $r$  no es igual al radio de apertura del iris  $a$ ; para calcular dicho radio tendremos que saber la distancia  $d$  a la cual se encuentra colocado nuestro iris de la lente. De esta forma, si la distancia  $d$  es conocida:

$$r = a + d \cdot \tan \theta \quad (2.6)$$

Donde  $\theta$  es el ángulo que forma el rayo marginal y está dado por:

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{a}{S_o - d} \right) \quad (2.7)$$

Por lo tanto, de (2.6) y (2.7) tenemos que:

$$r = a + \frac{d \cdot a}{S_o - d} = a \left( 1 + \frac{d}{S_o - d} \right) \quad (2.8)$$

En este momento ya hemos obtenido una función que nos permite relacionar la potencia óptica capturada por el detector  $P_D$  con la distancia a la cual se encuentra un objeto  $S_o$ . Sustituyendo (2.8) en (2.5) obtenemos esta función:

$$P_D = \frac{a^2 \left( 1 + \frac{d}{S_o - d} \right)^2}{4S_o^2} P_o \quad (2.9)$$

Sin embargo, aún nos queda un problema por resolver: nuestro objetivo es que el detector pueda determinar la distancia de un objeto sin importar la potencia óptica que éste irradie, y en este momento la ecuación (2.9) nos muestra una clara dependencia de la potencia óptica del objeto. En otras palabras, para que el sensor de distancias tenga una aplicación real, no puede depender de la iluminación que exista en los lugares donde se realice la medición, ni del tipo de objeto que se quiere medir. Por lo tanto, es muy importante que obtengamos una función de  $P_D$  independiente del valor de  $P_o$ , ya que, en general  $P_o$  no va a ser constante sino que va a depender del objeto que se esté midiendo, las condiciones de luz en el lugar, etc.

Una forma de resolver este problema es tomar dos mediciones de  $P_D$  en donde lo único que varíe entre una y otra sea la distancia  $d$  entre la lente y el iris. Para lograr esto, lo que tenemos que buscar es mover el iris a lo largo del eje óptico del sistema sin variar su

apertura; por otra parte, una forma ideal de tomar estas mediciones es de manera simultánea, ya que así se garantizaría que  $P_O$  sea constante durante las dos mediciones.

Una vez que tenemos dos muestras diferentes de  $P_D$  para un mismo objeto, podemos operar matemáticamente con ellas para obtener una señal  $S$  función de  $S_O$  e independiente de  $P_O$ . Es decir, si tenemos que  $P_{D1}$  que se obtiene cuando el iris se encuentra a  $d_1$  y  $P_{D2}$  que se obtiene cuando el iris se encuentra a  $d_2$  podemos obtener la señal  $S$  independiente de  $P_O$ . La figura 2.4 ilustra esta idea.

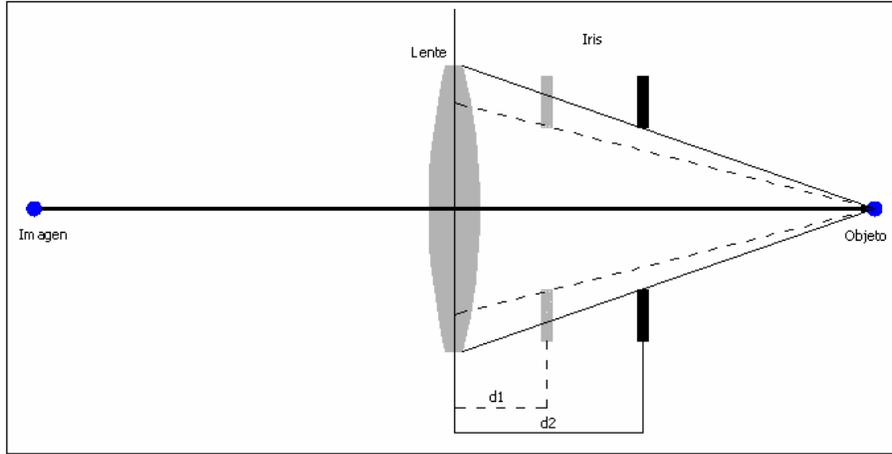


Figura 2.4 Representación de las posiciones del iris.

## 2.2 MODELO MATEMÁTICO

Para encontrar una señal  $S$  función de  $S_O$  e independiente de  $P_O$  se pueden realizar la siguiente operación:

$$P_{D1} = \frac{a^2 \left( 1 + \frac{d_1}{S_O - d_1} \right)}{4S_O^2} P_O \quad (2.10)$$

$$P_{D2} = \frac{a^2 \left( 1 + \frac{d_2}{S_O - d_2} \right)}{4S_O^2} P_O \quad (2.11)$$

$$S = \frac{P_{D2} - P_{D1}}{P_{D2} + P_{D1}} \quad (2.12)$$

### 2.2.1 Modelo desarrollado

Con la ecuación (2.12) podemos obtener una señal  $S$  que depende de la distancia  $S_O$  y que es independiente de la potencia óptica  $P_O$ . A continuación presentamos el modelo

matemático desarrollado y el modelo matemático simplificado que describen el funcionamiento del sensor de distancias basados en los razonamientos antes descritos.

Sustituyendo (2.10) y (2.11) en (2.12) tenemos que

$$S = \frac{\frac{a^2 \left(1 + \frac{d_2}{S_o - d_2}\right)}{4S_o^2} P_o - \frac{a^2 \left(1 + \frac{d_1}{S_o - d_1}\right)}{4S_o^2} P_o}{\frac{a^2 \left(1 + \frac{d_2}{S_o - d_2}\right)}{4S_o^2} P_o + \frac{a^2 \left(1 + \frac{d_1}{S_o - d_1}\right)}{4S_o^2} P_o}$$

$$S = \frac{\left(\frac{a^2 P_o}{4s_o^2}\right) \left[ \frac{2d_2}{S_o - d_2} + \left(\frac{d_2}{S_o - d_2}\right)^2 - \frac{2d_1}{S_o - d_1} - \left(\frac{d_1}{S_o - d_1}\right)^2 \right]}{\left(\frac{a^2 P_o}{4s_o^2}\right) \left[ 2 + 2\frac{d_2}{S_o - d_2} + 2\frac{d_1}{S_o - d_1} + \left(\frac{d_2}{S_o - d_2}\right)^2 + \left(\frac{d_1}{S_o - d_1}\right)^2 \right]} \quad (2.13)$$

En la ecuación (2.13) podemos observar claramente cómo con estas operaciones sobre  $P_{D1}$  y  $P_{D2}$ , la señal  $S$  queda independiente de  $P_o$ . Por lo tanto, la ecuación final que describe a  $S$  es:

$$S = \frac{\left[ \frac{2d_2}{S_o - d_2} + \left(\frac{d_2}{S_o - d_2}\right)^2 - \frac{2d_1}{S_o - d_1} - \left(\frac{d_1}{S_o - d_1}\right)^2 \right]}{\left[ 2 + 2\frac{d_2}{S_o - d_2} + 2\frac{d_1}{S_o - d_1} + \left(\frac{d_2}{S_o - d_2}\right)^2 + \left(\frac{d_1}{S_o - d_1}\right)^2 \right]} \quad (2.14)$$

### 2.2.2 Modelo simplificado

El modelo matemático que acabamos de obtener, a pesar de describir adecuadamente el funcionamiento del sensor de distancias, es algo complicado. Si consideramos que la distancia  $S_o$  es muy grande comparada con  $d$  (como será el caso en la práctica), podemos realizar diversas simplificaciones que reducen el modelo matemático a una forma mucho más sencilla.

Primeramente consideremos que:

$$\frac{d}{S_o - d} = \frac{d}{S_o} \left[ 1 + \frac{d}{S_o} + \left(\frac{d}{S_o}\right)^2 + \left(\frac{d}{S_o}\right)^3 + \left(\frac{d}{S_o}\right)^4 + \dots \right] \quad (2.15)$$

pero como  $S_o \gg d$ , a primer orden en  $\frac{d}{S_o}$ , tenemos:

$$\frac{d}{S_o - d} \approx \frac{d}{S_o} \quad (2.16)$$

Simplificando las estructuras análogas a (2.16) en (2.14) podemos obtener que:

$$S \approx \frac{\left[ \frac{2d_2}{S_o} + \left(\frac{d_2}{S_o}\right)^2 - \frac{2d_1}{S_o} - \left(\frac{d_1}{S_o}\right)^2 \right]}{\left[ 2 + 2\frac{d_2}{S_o} + 2\frac{d_1}{S_o} + \left(\frac{d_2}{S_o}\right)^2 + \left(\frac{d_1}{S_o}\right)^2 \right]} \quad (2.17)$$

De este resultado, nuevamente podemos simplificar a primer orden en  $\frac{d}{S_o}$  obteniendo:

$$S \approx \frac{\left[ \frac{d_2 - d_1}{S_o} \right]}{\left[ 1 + \frac{d_2}{S_o} + \frac{d_1}{S_o} \right]} \quad (2.18)$$

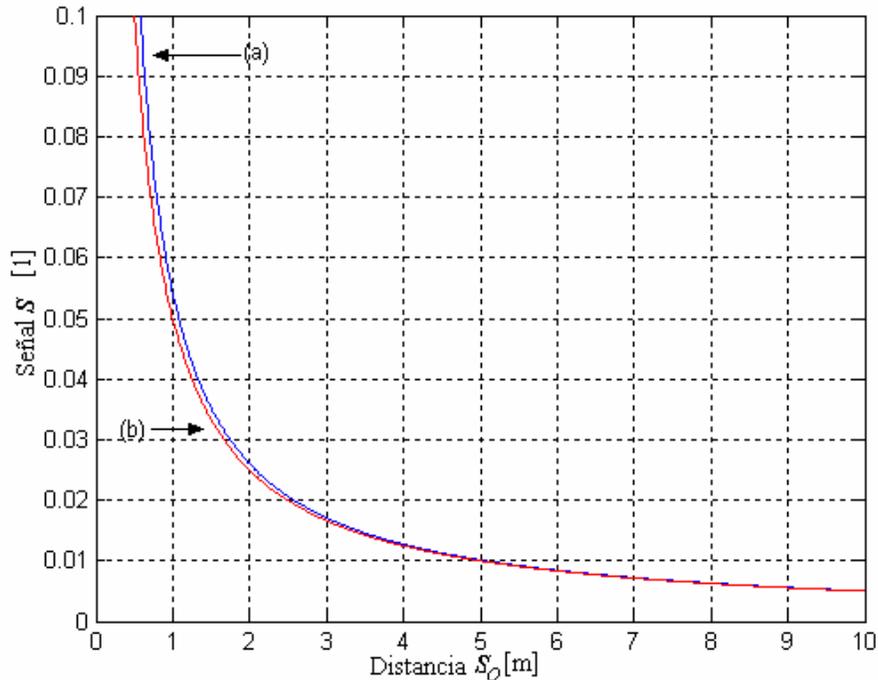
Como  $\frac{d_2}{S_o} + \frac{d_1}{S_o} \ll 1$  podemos decir, finalmente, que el modelo matemático más simple que podemos obtener estará dado por la siguiente relación:

$$\boxed{S \approx \frac{D}{S_o}} \quad (2.19)$$

donde  $D = d_2 - d_1$

### 2.2.3 Comparación de ambos modelos

En la gráfica 2.1 aparece  $S$  como función de  $S_0$  empleando, para un trazo, la ecuación (2.14) y, para el otro, la ecuación (2.19).



Gráfica 2.1: Comparación de los modelos teóricos que describen el funcionamiento del sensor de distancias, (a) Gráfica utilizando el modelo desarrollado utilizando la ecuación (2.14), donde  $d_2=10.5\text{cm}$  y  $d_1=5.5\text{cm}$ . (b) Gráfica utilizando el modelo simplificado utilizando la ecuación (2.19), donde  $D=5\text{cm}$ .

En esta gráfica podemos ver claramente que el modelo simplificado es una muy buena aproximación del modelo desarrollado. La sencillez de la ecuación del modelo simplificado brinda ventajas en el procesamiento de la señal obtenida y posibilidades para mejorar la parte optoelectrónica.

## 2.3 CONSIDERACIONES ADICIONALES

En todo el procedimiento anterior, consideramos cómo obtener la distancia de un objeto puntual que está ubicado sobre el eje óptico del sistema; sin embargo, este es un caso ideal. En principio, los objetos cuya distancia queremos determinar, en la realidad son fuentes extendidas y no siempre están sobre el eje óptico. En este sentido, tenemos que analizar qué porción de un objeto extenso puede ser captado por el sensor y qué sucede con una fuente puntual que no se encuentra sobre el eje óptico.

Otro aspecto importante que debemos de mencionar es lo que sucede en la imagen formada por la lente. El desarrollo anterior toma en cuenta lo que sucede con el objeto, el iris y la lente, pero deja a un lado lo que sucede en el plano imagen. Este aspecto es muy importante para poder integrar la parte optoelectrónica del sistema de forma adecuada.

Además de lo anterior, debemos de tomar en cuenta un último factor, que es determinante para prever el funcionamiento general de un sensor de distancias real: el ruido. El ruido,

además de afectar la respuesta del sensor produciendo ciertos errores, determina las características de alcance y resolución de éste<sup>3</sup>. Es por eso que en esta sección hacemos un breve análisis de los efectos del ruido sobre la respuesta del sensor de distancias.

### 2.3.1 El cono de visión

El área de un objeto que puede ser detectada por el sensor de distancias es limitada; esto se debe a lo siguiente: cada fuente en el plano objeto tiene su correspondiente imagen en el plano imagen, sin embargo, sólo los objetos cuyas imágenes estén dentro del área sensible del detector pueden ser “vistos” por el sensor. Así, esta “área de visión” está limitada por un cono de visión cuya magnitud depende del área sensible del fotodiodo y de la distancia a la que se encuentre ésta de la lente.

Para entender mejor esto, analicemos la figura 2.5. En ella podemos apreciar que el área de un objeto que puede ser detectada está limitada por un cono de visión cuya apertura es igual a dos veces el ángulo  $\alpha_v$ .

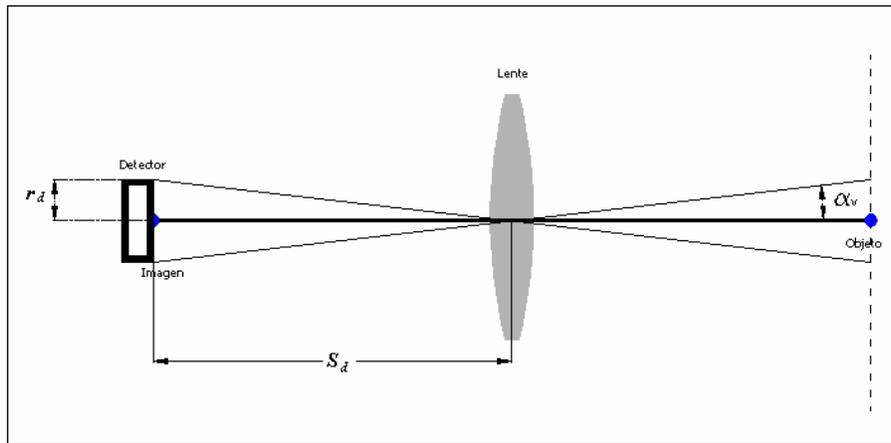


Figura 2.5 El cono de visión del sensor de distancias

Como podemos ver, este cono de visión está determinado por el radio del fotodiodo usado en el fotodetector  $r_d$ , y la distancia a la que éste se encuentra de la lente  $S_d$ . Claramente, vemos que el ángulo  $\alpha_v$  está dado por:

$$\alpha_v = \tan^{-1} \left( \frac{r_d}{S_d} \right) \quad (2.20)$$

Y este ángulo equivale a la mitad del ángulo de apertura del cono de visión. Así, el ángulo de apertura del cono de visión  $\alpha_{cono\_de\_visión}$  es igual indica cuál es la resolución angular de nuestro dispositivo y se puede calcular como:

$$\alpha_{cono\_de\_visión} = 2 \cdot \alpha_v \quad (2.21)$$

<sup>3</sup> En esta tesis, consideramos como alcance el valor máximo de  $S_o$  y como resolución la incertidumbre del parámetro  $S_o$ .

### 2.3.2 Fuentes puntuales fuera del eje óptico.

En general, podemos considerar que un objeto está formado por muchas fuentes puntuales de luz. Asimismo, muchas de las fuentes puntuales que están dentro del cono de visión no se encuentran en el eje óptico. En estos casos el comportamiento del sistema se puede ver representado en la figura 2.6.

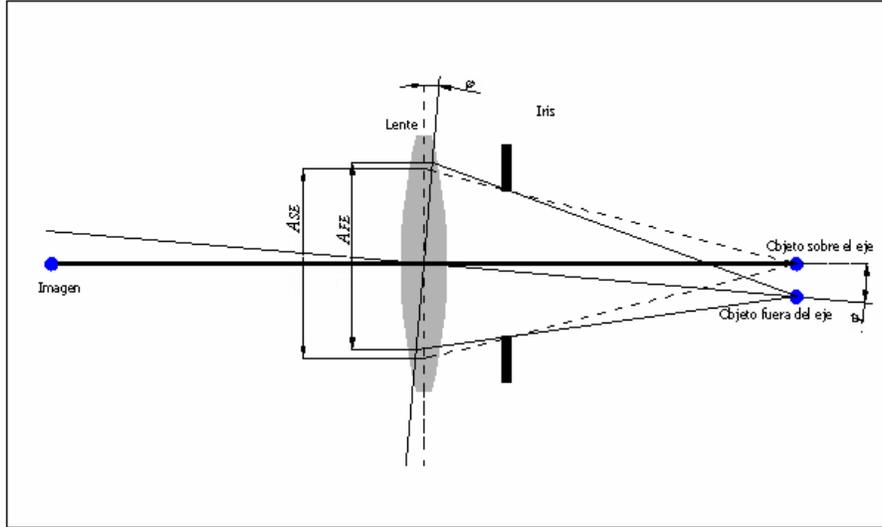


Figura 2.6

Aquí, se representan el diagrama de rayos de una fuente puntual sobre el eje óptico y el diagrama de rayos de una fuente puntual fuera de él. Como podemos notar, la fuente que está fuera del eje óptico ilumina un área  $A_{FE}$  que, para un ángulo de desviación  $\phi$  pequeño, es muy aproximada al área iluminada por una fuente puntual que se encuentra alineada sobre el eje óptico  $A_{SE}$ . Si consideramos que el cono de visión es muy reducido,  $\phi$  siempre será igual o menor que  $\alpha_v$ , y podemos afirmar que las desviaciones dentro de este cono, no implican una diferencia considerable en el análisis para una fuente puntual fuera el eje óptico con respecto al análisis hecho anteriormente.

### 2.3.3 Ubicación del detector

Toda la potencia óptica que llega a la lente es enfocada en el plano imagen del sistema, es por eso que para que podamos hacer una detección óptima debemos colocar el fotodiodo que recibe esta potencia óptica en dicho plano. Es importante reflexionar que para diferentes posiciones del objeto, la imagen se coloca a diferentes distancias  $S_I$ , según la ley de las lentes gaussianas [14]:

$$\frac{1}{S_o} + \frac{1}{S_I} = \frac{1}{f} \quad (2.22)$$

Las variables involucradas en la ecuación (2.21) se pueden apreciar en la siguiente figura:

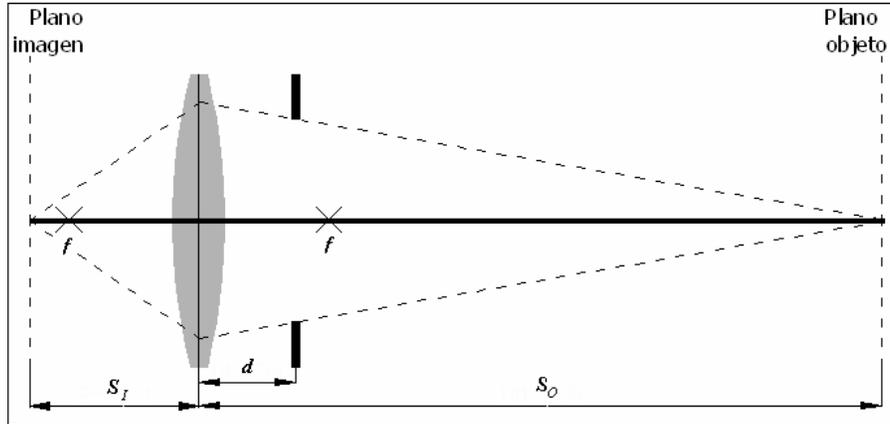
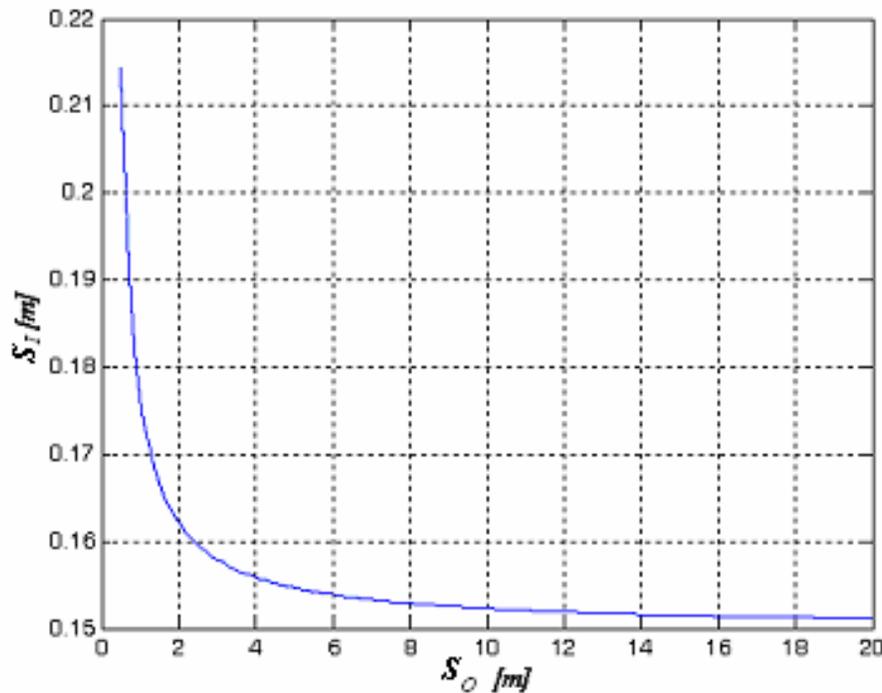


Figura 2.7 Ley de las lentes gaussianas

A pesar de que  $S_I$  varía para diferentes valores de  $S_O$ , tenemos que tomar en cuenta que, en general, las distancias  $S_O$  son muy grandes comparadas con la distancia focal  $f$ . En estas circunstancias,  $S_I$  tiene valores cercanos a  $f$  que varían muy poco. Para representar esto veamos la siguiente gráfica:



Gráfica 2.2: Gráfica de la distancia imagen  $S_I$  vs distancia objeto  $S_O$  utilizando la ley de las lentes gaussianas.

Como advertimos, las grandes diferencias en  $S_I$  se presentan cuando el objeto está muy cerca de la lente. Conforme éste se va alejando,  $S_I$  tiende al valor de  $f$ . Por lo tanto, la distancia óptima a la cual se debe de colocar el detector es a la distancia focal de la lente.

### 2.3.4 El ruido

El ruido electrónico siempre va a existir dentro de nuestro sensor de distancias, y a pesar de que éste se puede disminuir mucho, nunca se podrá eliminar totalmente, por lo que de una u otra forma es siempre una fuente de error en las mediciones. Por esta razón, al diseñar un dispositivo real, debemos de tomar en cuenta qué tanto de nuestra señal puede ser consecuencia del ruido, y qué tanto error induce al determinar una distancia. Así, es evidente que cuanto mayor sea la relación señal a ruido dentro de nuestro sistema, mayor será la precisión con la que determinaremos una distancia. En otras palabras, el ruido inherente del sensor de distancias es el factor principal que determina la resolución y el alcance de este sistema.

A continuación haremos un breve análisis sobre los efectos que tiene el ruido dentro de nuestro sistema:

En el dispositivo real, la señal  $S$  es calculada a partir de los voltajes  $V_{D1}$  y  $V_{D2}$  obtenidos a la salida del sistema optoelectrónico del sensor de distancias. Es claro que estos voltajes  $V_{D1}$  y  $V_{D2}$  están relacionados con las potencias ópticas  $P_{D1}$  y  $P_{D2}$  capturadas por el detector en las diferentes posiciones del iris de la siguiente forma:

$$V_D = R \cdot A \cdot P_D \quad (2.23)$$

Donde  $R$  es la responsividad del fotodiodo [A/W] y  $A$  es la amplificación de transimpedancia del circuito amplificador [V/A] (ambos parámetros se discutirán en el siguiente capítulo). Por lo tanto, de la ecuación (2.12) vemos que la señal  $S$  puede ser calculada como:

$$S = \frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1} \quad (2.24)$$

Ahora bien, al tomar las dos mediciones existe, además de  $V$ , una señal de voltaje aleatoria y aditiva producida por el ruido electrónico. Este ruido  $\delta V$  en la señal  $V$ , causa también variaciones  $\delta S$  en la señal  $S$ . Para encontrar una relación entre  $\delta V$  y  $\delta S$ , incluimos en la ecuación anterior estas variables:

$$S + \delta S = \frac{V_2 - V_1 + \delta V}{V_2 + V_1 + \delta V} \quad (2.25)$$

Si desarrollamos la ecuación anterior tenemos que:

$$S + \delta S = \frac{V_2 - V_1 + \delta V}{(V_2 + V_1) \left(1 + \frac{\delta V}{V_2 + V_1}\right)} \quad (2.26)$$

Simplificando, tenemos:

$$S + \delta S \approx \frac{V_2 - V_1 + \delta V}{(V_2 + V_1)} \left( 1 - \frac{\delta V}{V_2 + V_1} \right) \quad (2.27)$$

Desarrollando el producto y dejando nuevamente sólo los términos de primer orden obtenemos:

$$S + \delta S \approx \frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1} + \frac{\delta V}{V_2 + V_1} \left( 1 - \frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1} \right) \quad (2.28)$$

Como

$$\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1} \ll 1 \quad (2.29)$$

Finalmente podemos decir que:

$$S + \delta S \approx \frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1} + \frac{\delta V}{V_2 + V_1} \quad (2.30)$$

$$\boxed{\delta S \approx \frac{\delta V}{V_2 + V_1}} \quad (2.31)$$

Con esta última ecuación tenemos la relación entre las variaciones de la señal  $S$ ,  $\delta S$ , debidas al ruido  $\delta V$ . A continuación desarrollaremos una serie de ecuaciones para saber cómo varía el error en la distancia objeto  $S_o$  debido a  $\delta S$ .

Del modelo teórico simplificado representado por la ecuación (2.19) podemos obtener la siguiente relación:

$$S_o + \delta S_o = \frac{D}{S + \delta S}$$

$$S_o + \delta S_o = \frac{D}{S} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\delta S}{S}} \quad (2.32)$$

Nuevamente, desarrollando en una serie geométrica y simplificando a primer orden tenemos que:

$$S_o + \delta S_o = \frac{D}{S} \left( 1 - \frac{\delta S}{S} \right) \quad (2.33)$$

De donde finalmente podemos encontrar la relación entre  $\delta S$  y  $\delta S_o$ :

$$\delta S_o = -\frac{D}{S} \cdot \frac{\delta S}{S} \quad (2.34)$$

o bien

$$\boxed{\frac{\delta S_o}{S_o} = -\frac{\delta V}{V}} \quad (2.35)$$

Si sustituimos (2.31) y (2.24) en (2.35) obtenemos:

$$\frac{\delta S_o}{S_o} = -\frac{\delta V}{V_2 - V_1} \quad (2.36)$$

Si ahora utilizamos la ecuación (2.23) en  $V_1$  y  $V_2$  tenemos que:

$$\frac{\delta S_o}{S_o} = -\frac{\delta V}{R \cdot A \cdot (P_{D2} - P_{D1})} \quad (2.37)$$

Por último, si sustituimos las ecuaciones (2.10) y (2.11) en  $P_{D1}$  y  $P_{D2}$  respectivamente obtenemos el siguiente resultado:

$$\boxed{\frac{\delta S_o}{S_o} = -\frac{S_o}{(d_2 - d_1)} \cdot \left( \frac{\delta V}{RA \cdot \frac{P_o a^2}{4S_o^2}} \right)} \quad (2.38)$$

Es importante aclarar que el ruido no tiene un valor constante, sino que es una función aleatoria que varía a lo largo del tiempo. Por lo tanto,  $\delta V$  es un valor representativo del ruido. Para obtener  $\delta V$ , se puede hacer un análisis estadístico y considerarlo como tres veces el valor rms de dicha función aleatoria (para obtener una probabilidad del 99.7 % de que el valor del ruido sea menor o igual a  $\delta V$ ) [15].

Esta ecuación es muy importante para entender el funcionamiento de nuestro dispositivo, cuando se considera el ruido que existe en el sistema. Al desglosar la ecuación (2.38) podemos hacer algunas observaciones interesantes:

- $\frac{\delta S_o}{S_o}$  Nos indica el error  $\delta S_o$  que tenemos al determinar una distancia  $S_o$  cuando el ruido durante las mediciones es  $\delta V$ . Así, este término de la ecuación puede ser considerado como la máxima resolución relativa que podemos tener cuando el ruido es igual a  $\delta V$ .
- $R \cdot A$  Son parámetros que dependen del sistema optoelectrónico, y, en forma general, indican qué tan sensible es este sistema a la potencia óptica que recibe. En el siguiente capítulo comentaremos más a fondo sobre estos parámetros.
- $\frac{P_o a^2}{4S_o^2}$  Es el valor promedio de la iluminación que se recibe en nuestro sistema.

Así, podemos ver que para que el sensor de distancias tenga mejor resolución se debe de buscar que el ruido sea mínimo, el sistema optoelectrónico sea más sensible a la potencia óptica o que el objeto (cuya distancia queremos determinar) brinde una mayor iluminación.

## 2.4 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

En este capítulo desarrollamos la teoría para entender el principio de funcionamiento del sensor de distancias propuesto en esta tesis. Así, encontramos las ecuaciones (2.14) y (2.19) que describen, de forma desarrollada y simplificada respectivamente, este principio de forma muy similar.

$$S = \frac{\left[ \frac{2d_2}{S_o - d_2} + \left( \frac{d_2}{S_o - d_2} \right)^2 - \frac{2d_1}{S_o - d_1} - \left( \frac{d_1}{S_o - d_1} \right)^2 \right]}{\left[ 2 + 2 \frac{d_2}{S_o - d_2} + 2 \frac{d_1}{S_o - d_1} + \left( \frac{d_2}{S_o - d_2} \right)^2 + \left( \frac{d_1}{S_o - d_1} \right)^2 \right]} \quad (2.14)$$

$$S \approx \frac{D}{S_o} \quad (2.19)$$

Por medio de estas ecuaciones podemos encontrar una señal de salida  $S$  adimensional que es función de la distancia a la que se encuentra el objeto cuya distancia queremos determinar  $S_o$ .

Otras conclusiones importantes a las que llegamos en este capítulo son:

- Para calcular el cono de visión empleamos las ecuaciones (2.20) y (2.21)

$$\alpha_v = \tan^{-1} \left( \frac{r_d}{S_d} \right) \quad (2.20)$$

$$\alpha_{cono\_de\_visión} = 2 \cdot \alpha_v \quad (2.21)$$

- Las fuentes puntuales fuera del eje óptico se pueden analizar de la misma manera que las fuentes puntuales que están sobre el eje óptico, permitiendo así generalizar el principio de funcionamiento para fuentes de luz extendidas, siempre que éstas se encuentren dentro del cono de visión.
- La distancia óptima a la cual se debe de colocar el detector de luz de la lente en las implementaciones del dispositivo, es igual a la distancia focal de la lente.
- El ruido en el sistema es un factor que determina el alcance y la resolución del dispositivo. Para encontrar la resolución relativa, que es limitada por el ruido, encontramos la ecuación (2.38).

$$\frac{\delta S_o}{S_o} = -\frac{S_o}{(d_2 - d_1)} \cdot \left( \frac{\delta V}{RA \cdot \frac{P_o a^2}{4S_o^2}} \right) \quad (2.38)$$

Como conclusión principal de este capítulo, tenemos que este principio de funcionamiento es válido para determinar la distancia a la que se encuentra cualquier objeto, sin importar la potencia óptica que reciba el sensor. Además, es válido par fuentes extendidas (objetos extensos) que cubran el cono de visión (el cual es definido por la estructura del sensor).

# CAPITULO 3

## DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Para probar el principio de funcionamiento del sensor de distancias descrito en el Capítulo 2, se diseñó un dispositivo experimental. En este capítulo describiremos el diseño de éste dispositivo y la forma en que se implementó. En general, proporcionaremos las características de cada uno de los elementos que conforman el sensor de distancias, su funcionamiento y la forma en que se integraron dentro del sistema completo.

### 3.1 EL SISTEMA ÓPTICO

Como mencionamos en el capítulo anterior, la parte óptica se compone principalmente de dos elementos: la lente y el iris. Para que estos elementos funcionen adecuadamente, en el dispositivo experimental agregamos un elemento más: el aislamiento óptico.

#### 3.1.1 La Lente

La lente que utilizamos para implementar el sensor de distancias experimental tiene las siguientes características:

Material	BK7
Diámetro [cm]	2.54
Índice de refracción (n)	1.5151 a $\lambda = 0.633$ [ $\mu\text{m}$ ]
Distancia focal [cm]	15

Tabla 3.1: Características de la lente

#### 3.1.2 El Iris

La principal característica del iris es su radio de apertura, ya que éste no debe de cortar el cono de visión en ningún momento, pero a la vez debe de limitar la luz incidente para que llegue únicamente a la lente.

Por otra parte, recordemos del Capítulo 2 que para obtener una señal dependiente de la distancia pero independiente de la potencia óptica, debemos obtener dos datos diferentes; cada dato corresponde a una posición diferente del iris. Por esta razón, en el dispositivo experimental el iris está colocado sobre un riel, de forma que se puede acercar y alejar de la lente quedando siempre alineado con el eje óptico. Así, otros datos importantes son las distancias  $d_1$  y  $d_2$  (distancias entre la lente y el iris) que se utilizaron en la realización de los experimentos.

A continuación se muestran las características del iris empleadas en la implementación del dispositivo:

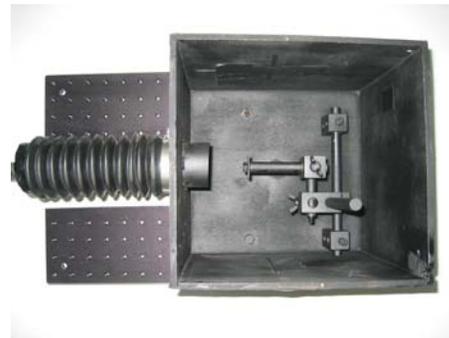
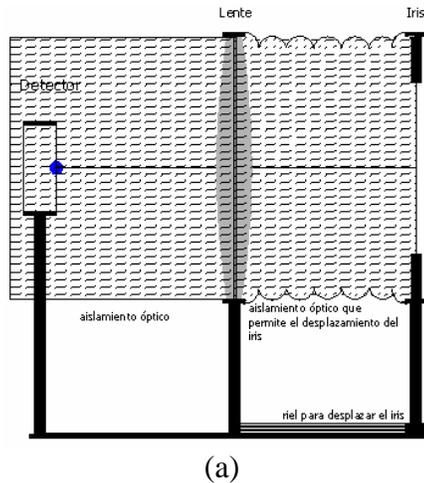
Radio de apertura [cm]	1.2
Distancia 1 ( $d_1$ ) [cm]	5.5
Distancia 2 ( $d_2$ ) [cm]	10.5

Tabla 3.2: Características del iris

### 3.1.3 El aislamiento óptico

El aislamiento óptico tiene como función impedir el paso de luz que no pertenece al cono de visión al detector. Este aislamiento del sistema óptico es importante porque asegura que la luz recibida por el fotodetector es la que proviene del objeto cuya distancia queremos determinar; por lo tanto, evita errores al procesar la señal recibida.

En la implementación del dispositivo experimental, entre la lente y el fotodiodo utilizamos como aislamiento óptico una caja de madera pintada de color negro; para aislar la luz entre el iris y la lente utilizamos un cilindro extensible de hule, que además permite la movilidad necesaria del iris. Este aislamiento se probó obstruyendo la entrada de luz por el iris y midiendo la respuesta del sistema; la señal de salida obtenida en estas condiciones es ruido electrónico. La figura 3.1 representa la implementación de la parte óptica en el dispositivo experimental.



(b<sub>1</sub>)



(b<sub>2</sub>)

Figura 3.1 (a) Representación del aislamiento óptico necesario para el sensor de distancias. (b) Fotografías del aislamiento óptico empleado en el dispositivo experimental implementado.

## 3.2 EL SISTEMA OPTOELECTRÓNICO

La parte optoelectrónica del sensor de distancias se compone de un fotodetector y un circuito electrónico amplificador. El fotodetector es el que se encarga de convertir la energía luminosa que recibe en una corriente eléctrica. Esta corriente eléctrica que sale del fotodetector entra en una etapa de amplificación que finalmente brinda una señal adecuada para ser medida y procesada.

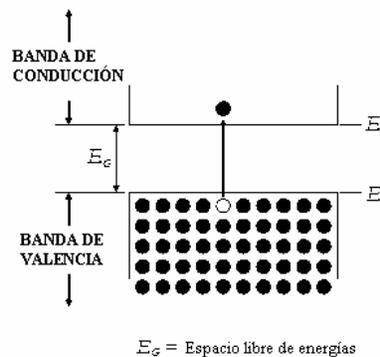
### 3.2.1 El fotodetector

#### *Conceptos generales de los detectores de luz*

Los detectores de luz actúan dentro de los sistemas optoelectrónicos transformando la energía de los fotones incidentes en energía de cargas eléctricas, es decir, en señales de corriente. Existe una gran variedad de detectores de luz, que difieren en su principio físico, su estructura y sus características de funcionamiento; por lo tanto, para cada sistema optoelectrónico se debe de escoger el tipo de detector mas apropiado de acuerdo a su aplicación. A continuación mencionaremos algunos de estos detectores de luz [17]:

- Detectores individuales:
  - Fotoceldas
  - Fotomultiplicadores
  - Detectores semiconductores o fotodiodos
  - Bolometros
- Arreglos de detectores:
  - Arreglos de una dimensión o lineales
  - CCD
  - Sensores de área CMOS

Para la construcción del dispositivo experimental utilizado en esta tesis utilizamos un detector semiconductor. Este tipo de detectores convierten la energía luminosa en una corriente eléctrica que se genera dentro del material semiconductor. Para entender el funcionamiento de este tipo de detectores observemos la figura 3.2.



**Figura 3.2 Diagrama de energía de un semiconductor intrínseco.**

Cuando la energía de un fotón excede la energía de la banda prohibida  $E_G$ , un portador en la banda de valencia tiene suficiente energía para pasar de ésta banda a la banda de

conducción cada vez que absorbe un fotón, formando así un par electrón-hueco. Bajo la influencia de un campo eléctrico éstos portadores de carga (electrones y huecos) se mueven a lo largo del semiconductor; originando un flujo de corriente eléctrica [18]. Entre los detectores semiconductores más comunes están los fotodiodos  $p-n$ , los fotodiodos  $p-i-n$ , los fotodiodos de avalancha y los fotodetectores MSM [18].

El funcionamiento de los fotodiodos  $p-n$  se puede explicar a partir de la figura 3.3

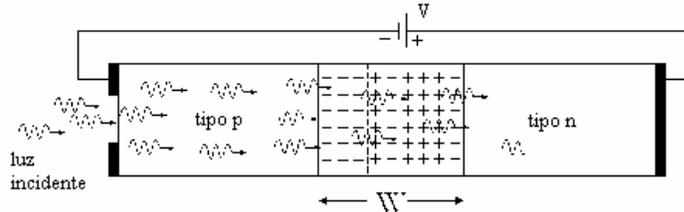


Figura 3.3: Diodo  $p-n$  de

El fotodiodo  $p-n$ , como su nombre lo indica, está formado por una unión  $p-n$  de dos semiconductores. Cuando esta juntura  $p-n$  se polariza inversamente, se crea una zona de agotamiento, en donde prácticamente no hay portadores de carga libres. Si, en estas condiciones, se ilumina por un lado la unión  $p-n$ , se comienzan a formar pares de electrones-huecos. En la zona de agotamiento, los electrones y los huecos formados se aceleran y se mueven rápidamente hacia los extremos  $n$  y  $p$  respectivamente. Este flujo de portadores es proporcional a la potencia óptica recibida [18].

El fotodiodo  $p-i-n$  trabaja bajo el mismo principio de funcionamiento del diodo  $p-n$ ; la diferencia principal que tiene es que incrementa la corriente generada ensanchando la región de agotamiento ( $W$  en la figura 3.3). Una forma de incrementar esta región es insertando una capa de material semiconductor no dopado (o dopado muy ligeramente) entre la unión  $p-n$ , como se muestra en la figura 3.4:

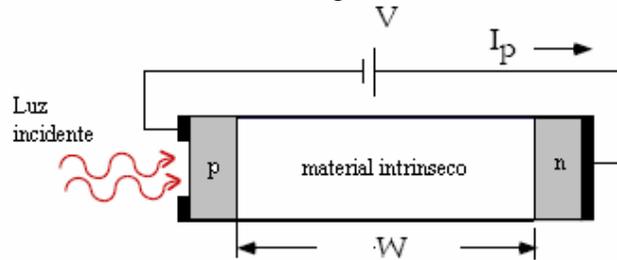


Figura 3.4 Fotodiodo  $p-i-n$

Todos los fotodetectores necesitan una potencia óptica mínima para que su respuesta sea confiable; por este motivo, para medir cantidades de luz pequeñas es preferible tener un detector con mayor responsividad.

La responsividad ( $R$ ) es una medida de la efectividad de un detector para producir una señal eléctrica. El producto de la luz incidente (en Watts) y la responsividad da como resultado una predicción de la salida del detector (en Amperes) [16]. Este parámetro varía con la temperatura [16] y es un valor dependiente espectralmente, ya que el detector es sensible (es decir, es capaz de absorber fotones y generar una cantidad correspondiente de electrones) a la radiación dentro de un intervalo finito de longitudes de onda. El intervalo de longitudes de onda donde  $R$  es apreciable se denomina como rango espectral de trabajo del detector [17]. Así, podemos decir que:

$$R = \frac{di_p}{dP} \tag{3.1}$$

donde  $i_p$  es la corriente del detector y  $P$  es la potencia óptica incidente.

Una desventaja importante de los diodos  $p-n$  y  $p-i-n$  es que están limitados en su responsividad [18]; por ese motivo, en algunas aplicaciones se prefieren los fotodiodos de avalancha. Los fotodiodos de avalancha tienen una mayor responsividad debido a que están diseñados para entregar una ganancia interna en corriente. Podemos ver la estructura representativa de los diodos de avalancha en la siguiente figura:

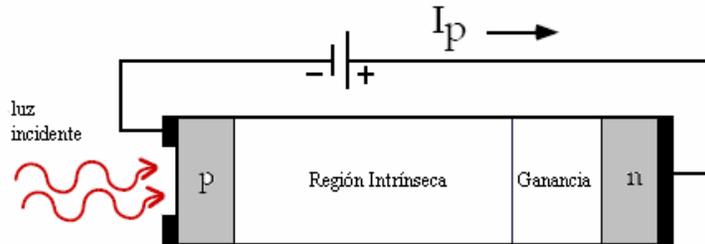


Figura 3.5 Fotodiodo de avalancha

Como podemos ver, en la estructura del fotodiodo de avalancha aparece una capa más en donde se genera la ganancia interna de corriente. Esta ganancia se da debido a un fenómeno físico llamado *ionización por impacto* (impact ionization) [18], en donde un electrones foto-generado adquieren suficiente energía para crear un muchos pares electrón-hueco secundarios, los cuales contribuyen a la corriente del fotodiodo. Es claro que, debido a esta estructura, los fotodiodos de avalancha tienen una responsividad mucho mayor.

Fotodiodo	Responsividad $R$ [A/W]		
	Si	Ge	InGaAs
p-i-n	0.4-0.6	0.5-0.7	0.6-0.9
avalancha	180-130	3-30	5-20

Tabla 3.3: Comparación de la responsividad común en los fotodiodos p-i-n y en los fotodiodos de avalancha. Los datos fueron obtenidas de [18].

Por último, hablaremos del fotodiodo MSM. Este fotodiodo está compuesto por una capa de material semiconductor absorbente en medio de las capas de metal. Esta estructura resulta tener inherentemente una capacitancia parásita muy baja, por lo que permite operarlo a altas velocidades. En la siguiente figura mostramos el esquema de un fotodiodo MSM.

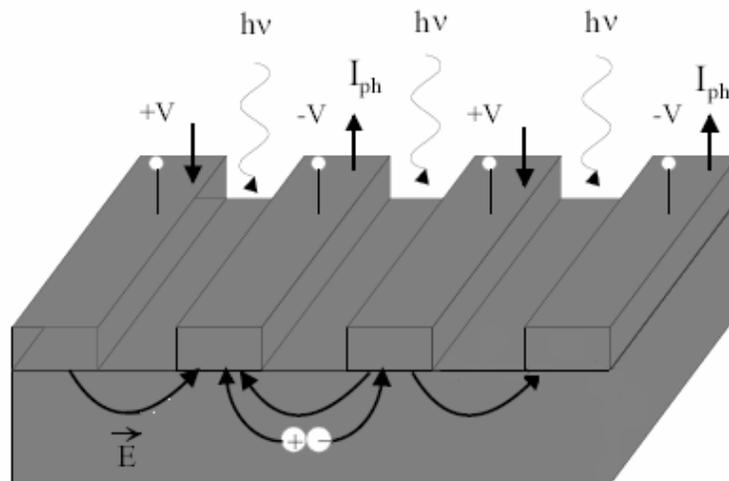


Figura 3.6: Sección transversal de un fotodiodo MSM.  $h\nu$  representa la energía de los fotones incidentes.  $+V$  y  $-V$  es el voltaje de polarización aplicado en los electrodos metálicos.  $I_{ph}$  es la fotocorriente generada.

En este esquema, se ve cómo la energía luminosa ( $h\nu$ ) incide desde la parte superior hacia el material semiconductor; en el cual se generan pares electrón-hueco. Si se aplica un voltaje de polarización ( $+V$  y  $-V$ ) en los contactos metálicos, comienza a haber un flujo de electrones en la banda de conducción (y de huecos en la banda de valencia). Estos portadores son recolectados en las placas de metal, y una corriente  $I_{ph}$  es detectada en el circuito externo [19].

### Curva característica y modos de operación del fotodiodo

Para obtener la curva característica de un fotodiodo se hace un barrido de voltajes a través del dispositivo y se mide en una de sus terminales. Éste procedimiento es equivalente al que se realiza para obtener las curvas características de un diodo de propósito general, con la única diferencia de que para el fotodiodo se tiene que tomar en cuenta la corriente interna que se genera en el dispositivo.

En la siguiente figura podemos ver la curva característica de un fotodiodo cuando no hay potencia óptica incidiendo en él ( $P=0$ ) y cuando se ilumina con múltiplos de una cantidad específica de potencia óptica  $P_e$ .

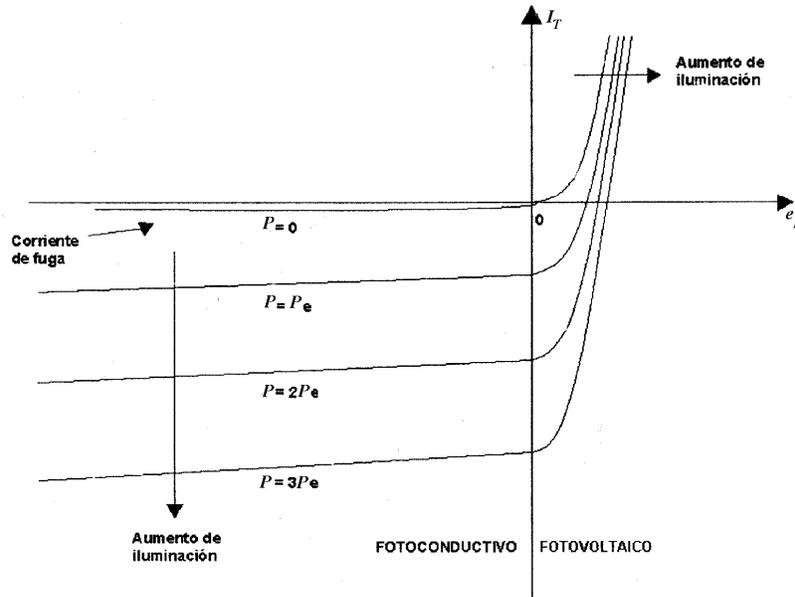


Figura 3.7 Curva características del fotodiodo [20]

Como podemos ver, el voltaje  $e_p$  es el voltaje de prueba aplicado a través del dispositivo; mientras tanto, la corriente  $I_T$  es la corriente que se obtiene en las terminales del fotodiodo. Cuando  $e_p$  es cero o el dispositivo está polarizado en inversa, la corriente medida directamente es prácticamente la corriente foto-generada (adicionalmente tenemos la corriente “oscura”, pero generalmente es menor a  $10^{-9}$  A). En estas condiciones, si  $P_e = 0$ , la corriente  $I_T$  es igual a la corriente de fuga (dark current), y en cuanto aumenta la iluminación  $P_e$  la corriente  $I_T$  incrementa linealmente.

Por otra parte, si la polarización es directa, la respuesta del diodo ya no refleja sólo la corriente interna foto-generada, debido a que se añade a la respuesta el comportamiento del diodo cuando está encendido. En estas condiciones, es mejor no aplicar una polarización externa, sino dejar que la corriente foto-generada sea la corriente total del fotodiodo y monitorear  $e_p$  como señal de salida [20].

Una vez que observamos cómo se comporta el fotodiodo, podemos entender que existen dos modos de operación para este dispositivo. Por una parte está el modo fotoconductor (cuando la polarización es cero o inversa) y el modo fotovoltaico (cuando no hay voltaje de polarización).

El modo de operación fotoconductor es mucho más apropiado para aplicaciones de alta frecuencia debido a que su polarización inversa permite una respuesta lineal y un tiempo de respuesta mucho más rápido. Sin embargo, esta polarización también tiene desventajas como aumentar la corriente de fuga y el ruido.

Por su parte, el modo de operación fotovoltaico elimina la corriente de fuga como fuente de ruido debido a que no necesita polarización. Por esta razón, este modo es más conveniente

para la detección de señales más pequeñas, aunque tiene la desventaja de variar su responsividad para diferentes longitudes de onda [21].

**Características del fotodetector utilizado**

El fotodetector utilizado es un fotodiodo *p-i-n* de silicio, un tiempo rápido de respuesta y una baja capacitancia. Los parámetros de este detector son:

<b>Área Activa</b> [mm <sup>2</sup> ]	44.0
<b>Responsividad R</b> [A/W] a 970nm	0.65
<b>Potencia de Ruido Equivalente NEP</b> [W/Hz <sup>1/2</sup> ] a -10V, 970nm.	2.8x10 <sup>-14</sup>
<b>Detectividad D</b> [cmHz <sup>1/2</sup> /W] a -10V, 970nm	2.37x10 <sup>13</sup>
<b>Capacitancia</b> [pF] a 0V y -10V	700 y 130
<b>Corriente de Oscuridad I<sub>d</sub></b> [nA] a -10V	1
<b>Voltaje de Ruptura BDV<sub>max</sub></b> [V]	30
<b>Tiempo de elevación T<sub>R</sub></b> [ns] -10V/50Ω, 632nm	24
<b>Temperatura de Operación</b> [°C]	-40° a 100°
<b>Montura</b>	TO-8

Tabla 3.4: Parámetros del detector de silicio de Edmund Optics. Datos obtenidos de [16]

**3.2.2 El circuito electrónico amplificador**

Después de que el fotodetector recibe la potencia óptica y la transforma en una señal de corriente, ésta última tiene que ser amplificada para poder procesarla adecuadamente. Para esta etapa de amplificación utilizamos un amplificador electrométrico de transimpedancia.

Se denomina amplificador electrométrico a todo sistema de medida que posea una impedancia de entrada mayor a 1TΩ y una corriente de entrada inferior a 1pA, aproximadamente [22]. Elegimos este tipo de amplificador para la señal de nuestro fotodiodo debido a que las cantidades de luz que recibe son muy pequeñas. Asimismo, por medio de esta etapa de amplificación realizamos una conversión de corriente a voltaje.

**Análisis del circuito amplificador**

A continuación vemos el diseño de la etapa de amplificación de nuestro sistema optoelectrónico. Para analizar este circuito, dividámoslo en dos partes; además, en la siguiente figura, la corriente generada en el fotodiodo se representa por medio de una fuente de corriente *I<sub>f</sub>*.

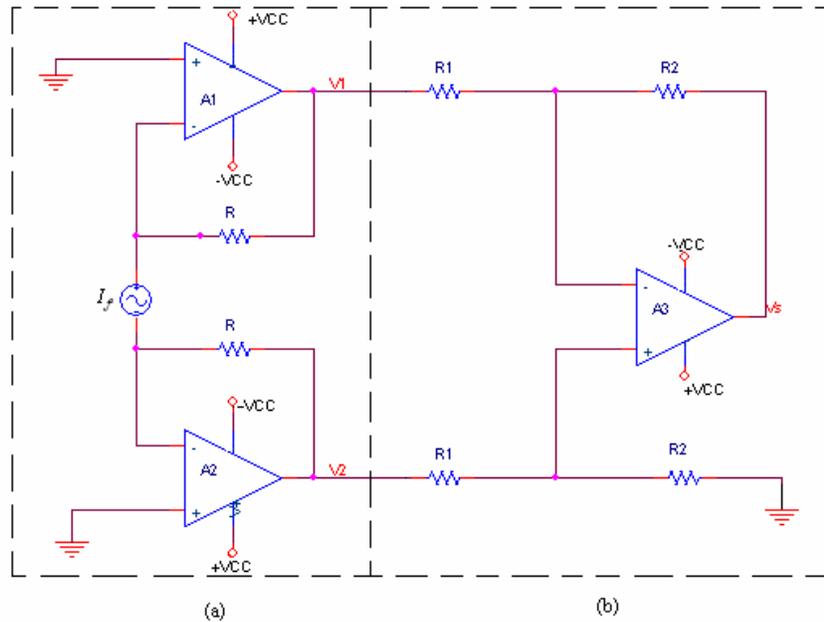


Figura 3.8 Amplificador de transimpedancia

Como podemos observar, las terminales del fotodiodo están conectadas a las entradas inversoras del amplificador operacional, cuando las entradas no inversoras están conectadas a tierra. Por consiguiente, el voltaje a través del fotodiodo está confinado en una región muy cercana al cero, por lo que opera bajo el modo fotoconductor.

En la parte (a), podemos ver que la corriente  $I_f$  formada en el fotodiodo genera, a la salida de los amplificadores operacionales  $A_1$  y  $A_2$ , los voltajes  $V_1$  y  $V_2$ , que están dados por:

$$\begin{aligned} V_1 &= -R \cdot I_f \\ V_2 &= R \cdot I_f \end{aligned} \quad (3.2)$$

Estos voltajes  $V_1$  y  $V_2$  entran a la segunda parte del circuito, que está representado en (b). Esta segunda parte es, claramente, un amplificador restador; por lo tanto, a la salida tendremos un voltaje  $V_s$  dado por:

$$V_s = \frac{R_2}{R_1} (V_2 - V_1) \quad (3.3)$$

Sustituyendo (3.2) en (3.3) tenemos:

$$V_s = 2 \cdot \frac{R_2}{R_1} R \cdot I_f \quad (3.4)$$

La amplificación de transimpedancia está dada por:

$$A = \frac{V_s}{I_f} = 2 \cdot \frac{R_2}{R_1} R \quad (3.5)$$

*El circuito amplificador empleado en el dispositivo experimental*

Los componentes del circuito amplificador que se utilizó para realizar las pruebas experimentales tienen las siguientes características:

Resistencia	
Nombre	Valor
R	74.9 [KΩ]
R1	9.97 [KΩ]
R2	9.97 [KΩ]

(a)

Amplificador Operacional	Circuito Integrado
A1, A2	TL082CP
A3	TL081CP

(b)

Amplificación Obtenida (A)
149800 [V/A]

(c)

**Tabla 3.5: Características del amplificador de transimpedancia empleado en el dispositivo experimental: (a) Valores de las resistencias. (b) Circuitos integrados utilizados (c) Amplificación obtenida.**

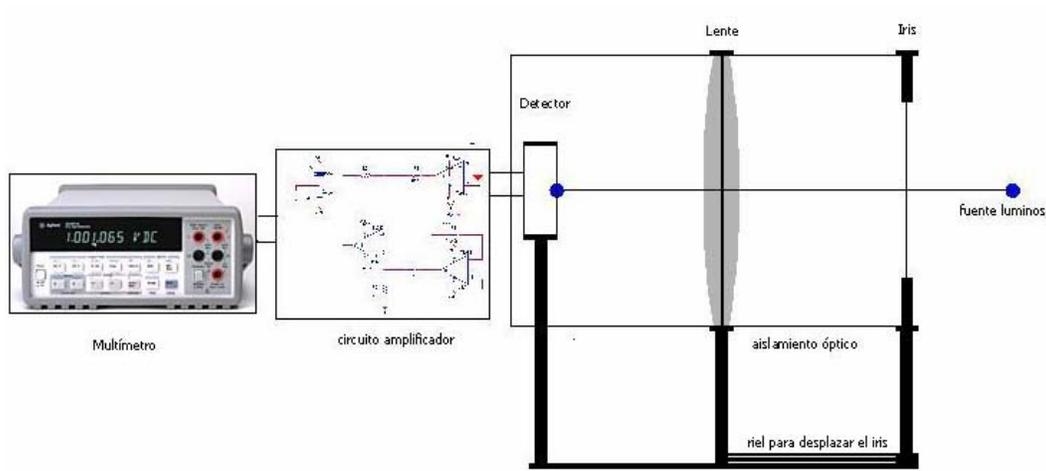
**3.3 DESCRIPCIÓN DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL COMPLETO**

Como ya mencionamos anteriormente, el dispositivo experimental está formado de dos partes principales: la parte óptica (sección 3.1) y la parte optoelectrónica (sección 3.2). Además de estas dos partes, el sensor de distancias requiere de una interfaz con el usuario que le permita conocer la señal *S*. Para los experimentos realizados en esta tesis utilizamos un multímetro, ya que únicamente necesitamos probar el principio de funcionamiento del sistema óptico. Sin embargo, es claro que para un desarrollo posterior (un SESDV), se tendrá que usar otra interfaz más adecuada.

El multímetro que utilizamos para poder capturar la respuesta del dispositivo experimental fue el Fluke 45 dual display multimeter.

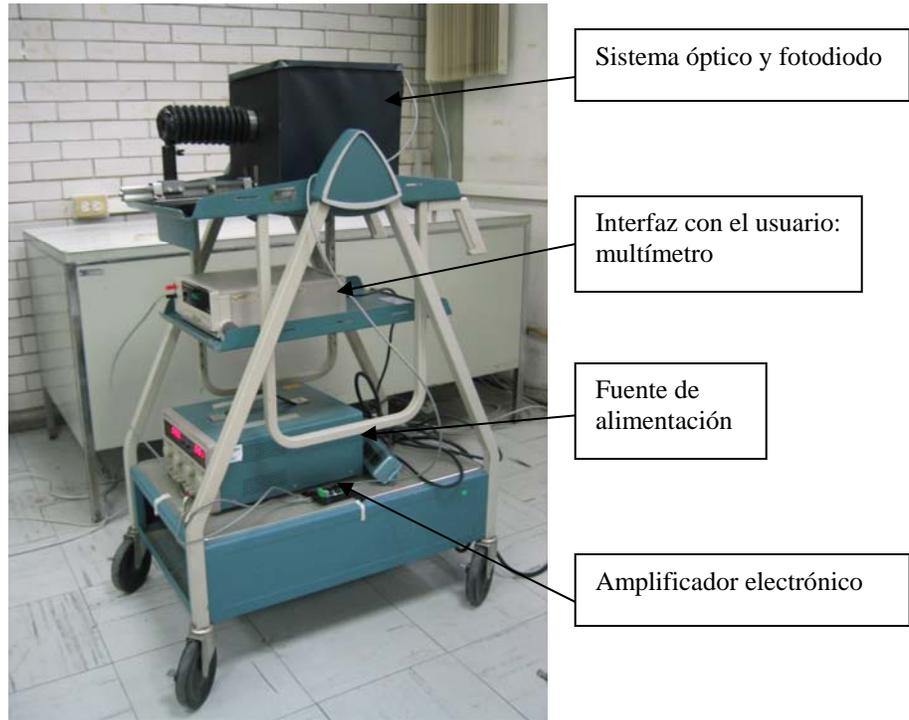
*Diagrama del dispositivo completo*

El dispositivo experimental que se utilizó para probar el principio de funcionamiento del sensor de distancias se puede representar mediante el siguiente esquema:



**Figura 3.9: Esquema completo del dispositivo experimental para el sensor de distancias**

En la siguiente fotografía podemos ver cómo se implementó el prototipo experimental para probar el principio de funcionamiento.



**Figura 3.10: Prototipo experimental.**

### 3.4 ALINEACIÓN DE LOS COMPONENTES

Sin duda, un factor extremadamente importante para la implementación del dispositivo experimental es la alineación de los componentes de la parte óptica. Debido a que el principio de funcionamiento del dispositivo depende de la variación de un solo parámetro (la distancia  $d$ ), es deseable que ningún otro parámetro varíe durante las mediciones; así, entre más exacta sea la alineación del dispositivo, menor será la posibilidad de errores.

En el dispositivo experimental se cuidó que el detector, la lente y el iris estuvieran centrados sobre el mismo eje óptico. En cuanto al detector, éste debe de estar colocado a una distancia igual a la distancia focal de la lente. Por su parte, para las posiciones del iris, se debe de considerar que entre mayor sea la diferencia entre estas dos posiciones, mayor cambio en la señal se puede detectar; conjuntamente, se debe de cuidar que en ninguna de las posiciones el iris corte el cono de visión. Estas condiciones resultan en un compromiso en el diseño del dispositivo que se deberá de maximizar. En este trabajo no se intentó maximizar el diseño si no que se utilizaron los componentes que se disponibles; sin embargo, los resultados obtenidos dan información valiosa sobre cómo optimizar el dispositivo, y se comentarán al final de esta tesis.

La alineación en el dispositivo experimental se muestra en la siguiente figura:

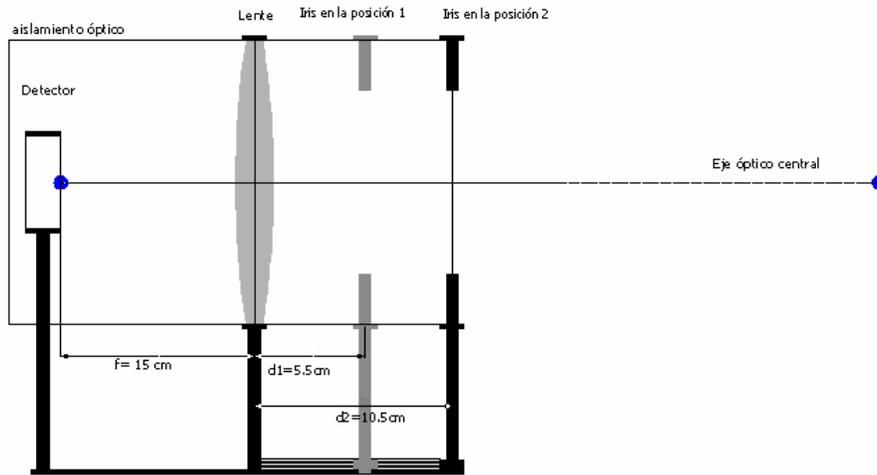


Figura 3.11 Posición de los elementos del sistema óptico

Una vez que tenemos todas las características de los componentes utilizados y las medidas empleadas en la alineación de los componentes, podemos sustituir en las ecuaciones (2.20) y (2.21) para obtener el ángulo de apertura del cono de visión teórico:

$$\begin{aligned} \alpha_{cono\_de\_visión} &= 2 \cdot \alpha_v \\ \alpha_{cono\_de\_visión} &= 2 \cdot \tan^{-1} \left( \frac{3.74 \times 10^{-3} [m]}{150 \times 10^{-3} [m]} \right) \\ \alpha_{cono\_de\_visión} &= 2.8565^\circ \end{aligned} \tag{3.6}$$

### 3.5 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

El propósito principal de este capítulo fue describir cómo fue implementado el prototipo experimental que se utilizó para realizar las pruebas necesarias para comprobar el principio de funcionamiento.

Así, describimos las características de cada componente que conforma el sistema óptico de este prototipo: la lente, el iris, el aislamiento óptico. Por otra parte, dimos las características de los elementos usados en el sistema optoelectrónico (el fotodiodo y el circuito amplificador), y brindamos una breve explicación teórica sobre ellos. Con respecto al fotodiodo, brindamos una explicación general de los diferentes tipos de detectores y encontramos que el parámetro de mayor interés para nuestra aplicación, es la responsividad  $R$  de éstos (ecuación 3.1). En cuanto al circuito amplificador, encontramos que el parámetro más importante es la amplificación de transimpedancia  $A$  que está dada por la ecuación (3.5).

$$A = \frac{V_s}{I_f} = 2 \cdot \frac{R_2}{R_1} R \tag{3.5}$$

Finalmente, presentamos diagramas y fotografías sobre la implementación completa del prototipo experimental. Asimismo, describimos cómo fue alineado, y hallamos que el ángulo de apertura del cono de visión teórico es igual a  $2.8565^\circ$

# CAPÍTULO 4

## PRUEBAS Y RESULTADOS

En este capítulo presentaremos todas las pruebas experimentales que se hicieron para comprobar el principio de funcionamiento del sensor de distancias descrito en el capítulo 2. Además de probar el principio de funcionamiento, estos experimentos tuvieron la finalidad de caracterizar el dispositivo experimental descrito en el capítulo 3 y así poder prever la implementación de un dispositivo adecuado para la construcción de un Sistema Electrónico Sensorial para los Discapacitados Visuales (SESDV) funcional.

### 4.1 PRUEBA GENERAL PARA DETERMINAR LA CURVA DE RESPUESTA DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Como vimos en la sección 2.2, el funcionamiento del dispositivo está descrito por el modelo matemático de la ecuación (2.14), en donde una señal  $S$  adimensional es función de la distancia  $S_0$  a la que se encuentra el objeto. Para comprobar que este modelo matemático describe adecuadamente el principio de funcionamiento del sensor de distancias y que existe la posibilidad práctica de realizar un dispositivo basado en este principio, realizamos el siguiente experimento:

- Colocamos el sensor de distancias en una posición fija.
- A partir de la ubicación de la lente, fijamos las posiciones  $S_{01}, S_{02}, S_{03}$ , etc., tratando que éstas estuvieran sobre el eje óptico.
- Situamos una fuente luminosa en la posición  $S_{01}$  y tomamos la señal de salida del fotodetector (restando el *off-set* de éste) para cada una de las dos posiciones del iris. En la posición 1 (iris a 5.5 cm de la lente), se obtuvo la señal 1 ( $V_1$ ) y en la posición 2 (iris a 10.5 cm de la lente) se obtuvo la señal 2 ( $V_2$ ).
- Calculamos la señal  $S$  a partir de  $V_1$  y  $V_2$  utilizando la ecuación (2.24).
- Repetimos este procedimiento para cada una de las demás posiciones de  $S_0$ .
- Finalmente graficamos la señal  $S$  experimental contra las diferentes posiciones  $S_0$ .

Los resultados de los experimentos se muestran a continuación.

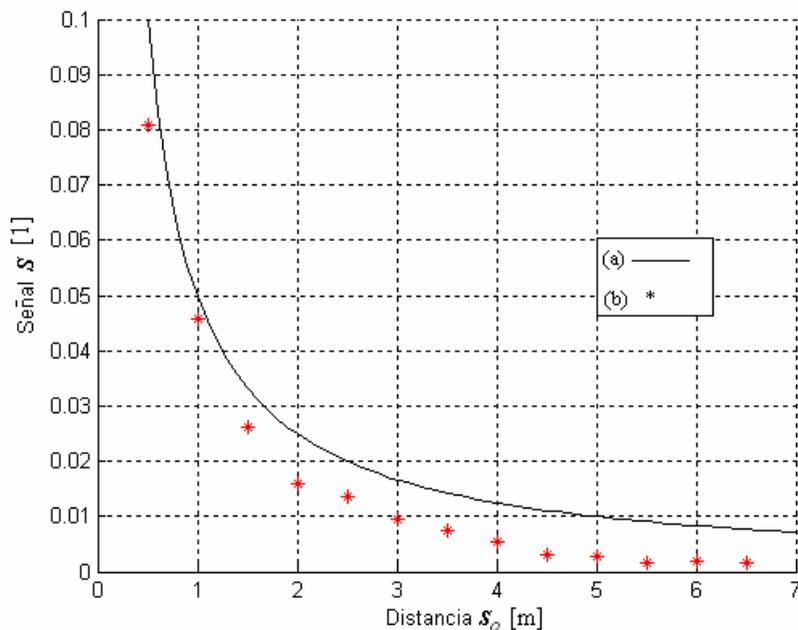
*Experimentos 1 y 2: Utilizando un LED rojo como fuente luminosa.*

Posición	Distancia[m]	Experimento	Señal 1 $V_1$ [mV]	Señal 2 $V_2$ [mV]	Señal $S$ [1]
$S_{01}$	0.5	1	694.670	816.070	0.0804
		2	693.970	816.070	0.0809
$S_{021}$	1.0	1	173.240	189.870	0.0458
		2	173.200	189.860	0.0459
$S_{03}$	1.5	1	73.590	77.580	0.0264
		2	73.530	77.500	0.0263
$S_{04}$	2.0	1	40.900	42.320	0.0171
		2	40.870	42.200	0.0160

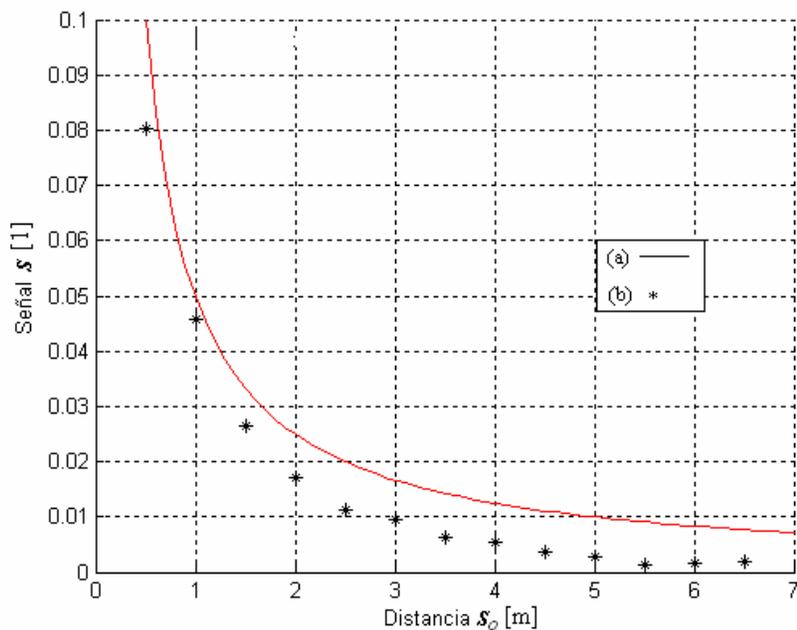
$S_{05}$	2.5	1	23.491	24.022	0.0112
		2	23.456	24.096	0.0135
$S_{06}$	3.0	1	16.960	17.290	0.0096
		2	16.960	17.289	0.0096
$S_{07}$	3.5	1	12.590	12.75	0.0063
		2	12.570	12.76	0.0075
$S_{081}$	4.0	1	9.652	9.757	0.0054
		2	9.650	9.756	0.0055
$S_{09}$	4.5	1	7.960	8.017	0.0036
		2	7.956	8.004	0.0030
$S_{010}$	5.0	1	6.543	6.579	0.0027
		2	6.549	6.586	0.0028
$S_{011}$	5.5	1	4.462	4.475	0.0015
		2	4.461	4.475	0.0016
$S_{012}$	6.0	1	3.993	4.005	0.0015
		2	3.974	3.988	0.0018
$S_{013}$	6.5	1	2.947	2.958	0.0019
		2	2.951	2.960	0.0015

Tabla 4.1: Resultados de los experimentos 1 y 2 de la prueba general para determinar la curva de respuesta del dispositivo experimental

En las siguientes gráficas se muestran los resultados obtenidos en estos dos primeros experimentos. Asimismo se muestra la curva teórica dada por la ecuación (2.19) donde  $D$  es igual a 5 cm.



Gráfica 4.1: Experimento 1 (a) Curva teórica dada por la ecuación (2.19) con  $D = 5$  cm. (b) Resultados experimentales obtenidos con un LED rojo como fuente luminosa.

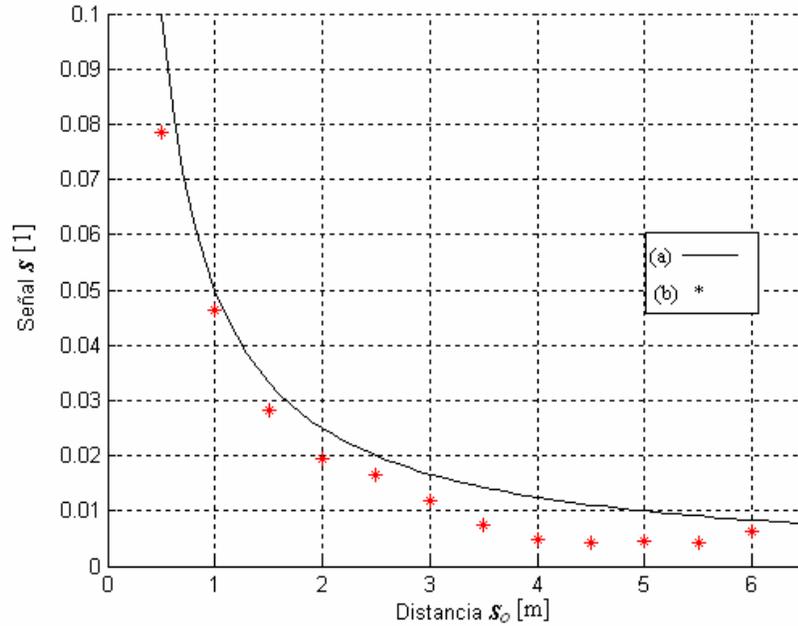


Gráfica 4.2: Experimento 2. (a) Curva teórica dada por la ecuación (2.19) con  $D = 5$  cm. (b) Resultados experimentales obtenidos con un LED rojo como fuente luminosa.

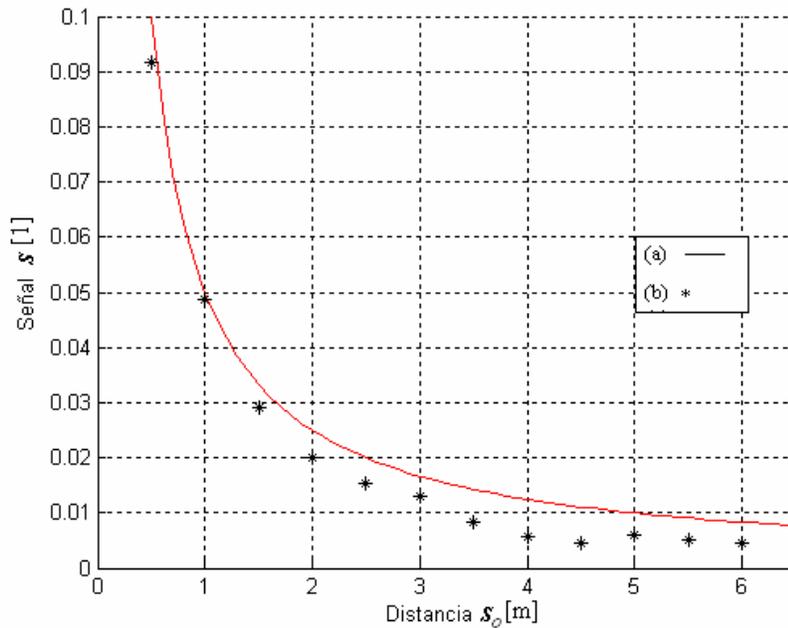
**Experimentos 3 y 4: Utilizando un LED azul como fuente luminosa.**

Posición	Distancia[m]	Experimento	Señal 1 $V_1$ [mV]	Señal 2 $V_2$ [mV]	Señal $S$ [1]
$S_{01}$	0.5	3	113.395	136.295	0.0917
		4	113.245	132.565	0.0786
$S_{021}$	1.0	3	37.415	41.240	0.0486
		4	37.435	41.062	0.0462
$S_{03}$	1.5	3	18.189	19.279	0.0291
		4	18.152	19.210	0.0283
$S_{04}$	2.0	3	9.554	9.947	0.0202
		4	9.555	9.935	0.0195
$S_{05}$	2.5	3	6.302	6.500	0.0155
		4	6.285	6.495	0.0164
$S_{06}$	3.0	3	4.203	4.313	0.0129
		4	4.191	4.292	0.0119
$S_{07}$	3.5	3	3.038	3.089	0.0083
		4	3.040	3.085	0.0073
$S_{081}$	4.0	3	2.394	2.422	0.0058
		4	2.388	2.411	0.0048
$S_{09}$	4.5	3	1.610	1.625	0.0046
		4	1.607	1.621	0.0043
$S_{010}$	5.0	3	1.359	1.375	0.0059
		4	1.360	1.372	0.0044
$S_{011}$	5.5	3	1.104	1.115	0.0050
		4	1.096	1.105	0.0041
$S_{012}$	6.0	3	0.864	0.872	0.0046
		4	0.864	0.875	0.0063

Tabla 4.2: Resultados de los experimentos 3 y 4 de la prueba general para determinar la curva de respuesta del dispositivo experimental



Gráfica 4.3: Experimento 3. (a) Curva teórica dada por la ecuación (2.19) con  $D = 5$  cm. (b) Resultados experimentales obtenidos con un LED azul como fuente luminosa.



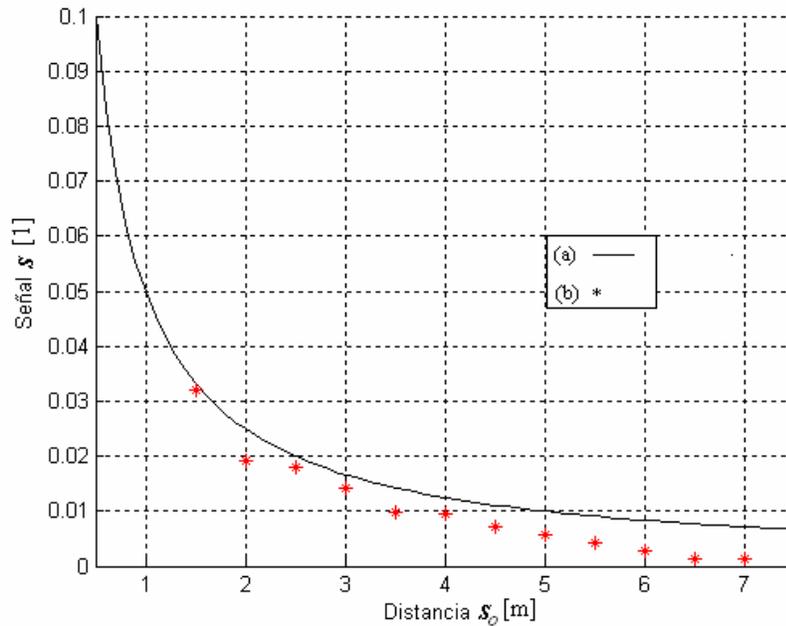
Gráfica 4.4: Experimento 4. (a) Curva teórica dada por la ecuación (2.19) con  $D = 5$  cm. (b) Resultados experimentales obtenidos con un LED azul como fuente luminosa.

*Experimentos 5 y 6: Utilizando un foco incandescente como fuente luminosa.*

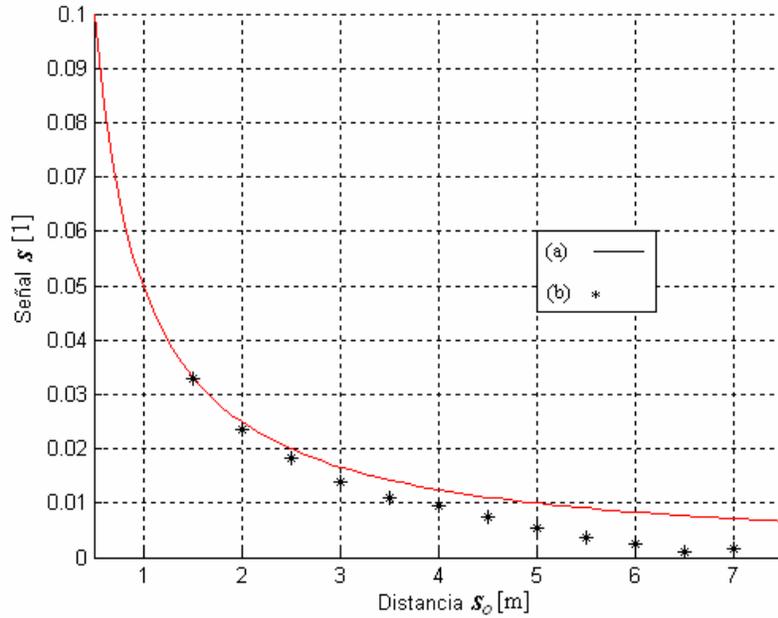
Posición	Distancia[m]	Experimento	Señal 1 $V_1$ [V]	Señal 2 $V_2$ [V]	Señal $S$ [1]
$S_{01}$	1.5	5	4.3250	4.6200	0.0330
		6	4.3230	4.6090	0.0320
$S_{02}$	2.0	5	2.4770	2.5970	0.0236

		6	2.5490	2.6480	0.0190
$S_{03}$	2.5	5	1.6470	1.7080	0.0182
		6	1.6450	1.7050	0.0179
$S_{04}$	3.0	5	1.1120	1.1430	0.0137
		6	1.1150	1.1470	0.0141
$S_{05}$	3.5	5	0.8240	0.8425	0.0111
		6	0.8259	0.8422	0.0098
$S_{06}$	4.0	5	0.6401	0.6525	0.0096
		6	0.6400	0.6521	0.0094
$S_{07}$	4.5	5	0.5039	0.5114	0.0074
		6	0.5053	0.5127	0.0073
$S_{08}$	5.0	5	0.4125	0.4170	0.0054
		6	0.4119	0.4166	0.0057
$S_{09}$	5.5	5	0.3397	0.3421	0.0035
		6	0.3397	0.3425	0.0041
$S_{010}$	6.0	5	0.2844	0.2859	0.0026
		6	0.2842	0.2857	0.0026
$S_{011}$	6.5	5	0.6512	0.6527	0.0012
		6	0.6509	0.6525	0.0012
$S_{012}$	7.0	5	0.2214	0.2221	0.0016
		6	0.2216	0.2222	0.0014

Tabla 4.3: Resultados de los experimentos 5 y 6 de la prueba general para determinar la curva de respuesta del dispositivo experimental



Gráfica 4.5: Experimento 5. (a) Curva teórica dada por la ecuación (2.19) con  $D = 5$  cm. (b) Resultados experimentales obtenidos con un foco incandescente como fuente luminosa.



**Gráfica 4.6: Experimento 6. (a) Curva teórica dada por la ecuación (2.19) con  $D = 5$  cm. (b) Resultados experimentales obtenidos con un foco incandescente como fuente luminosa.**

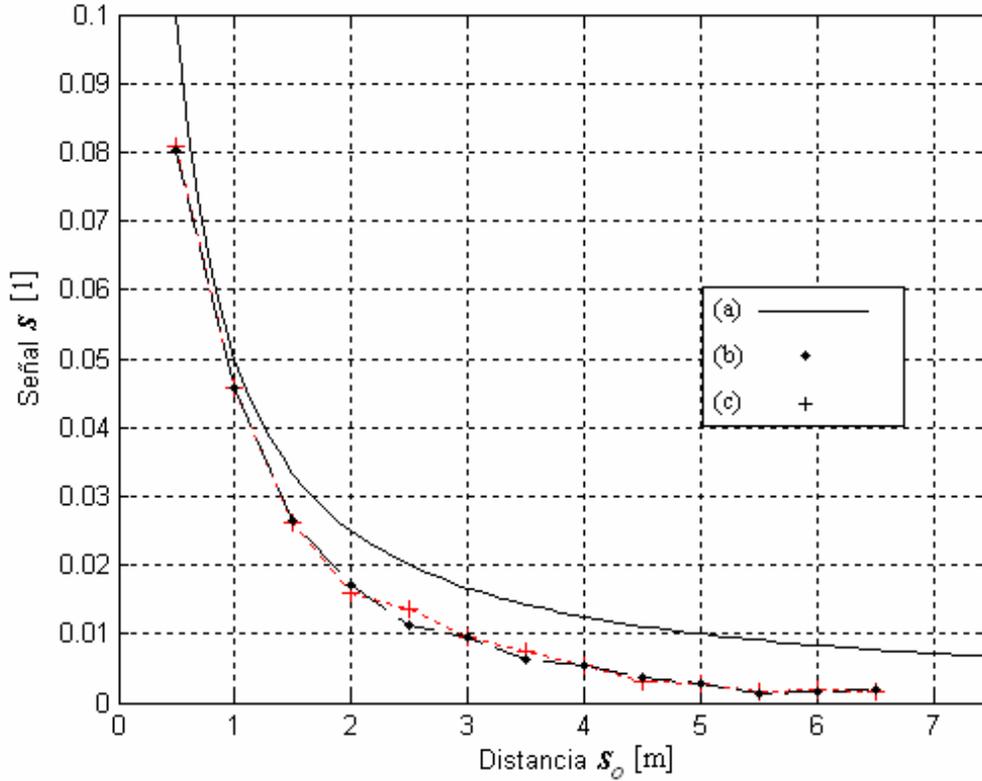
Después de revisar los resultados obtenidos, podemos decir que, si bien la curva experimental no coincide perfectamente con nuestra predicción teórica, sí nos da la posibilidad de fabricar un sensor capaz de brindar una señal que es función de la distancia de forma eficaz. Sin embargo, vale la pena señalar diversos aspectos en cuanto a la respuesta de este dispositivo.

En primer lugar, se aprecia que en los seis casos la curva de respuesta experimental está por debajo de la teórica. Este desplazamiento puede ser consecuencia de los errores de alineación en los componentes del dispositivo, así como de las inexactitudes del sistema mecánico para desplazar el iris. A pesar de este error, es posible tener un sensor de distancias que funcione efectivamente si los resultados muestran repetibilidad, ya que en este caso se puede ajustar una curva experimental, calibrando la señal de salida del dispositivo.

En segundo lugar, cuando la intensidad de luz es menor, el ruido del sistema puede provocar errores importantes. Esto se puede apreciar si observamos las mediciones a distancias más grandes (donde la intensidad de luz disminuye). En el caso de los LEDs aparecen errores importantes, debido a que la relación señal a ruido disminuye. Por otra parte, al utilizar el foco incandescente, la señal recibida aumenta, por lo que la relación señal a ruido aumenta y también disminuyen los errores; como consecuencia, aún en las distancias más alejadas, la diferencia en las señales es claramente apreciable.

4.1.1 Repetibilidad en los experimentos

Comparemos los resultados obtenidos en los primeros dos experimentos, que se realizaron con una misma fuente luminosa.



Gráfica 4.7: Comparación de los resultados en los experimentos 1 y 2  
 (a) Curva teórica dada por la ecuación (2.19) con  $D = 5$  cm.  
 (b) Resultados del experimento 1. (c) Resultados del experimento 2

Podemos observar que los resultados fueron bastante similares en cada valor de  $S_0$ , aunque en algunos puntos existieron ciertas diferencias. A continuación se presentan las diferencias  $\Delta S$  encontradas en esta prueba:

Parámetro	Distancia a la que se encontró $S_0$ [m]	Variación de $S$ [1]
$\Delta S_{max}$	2.5	0.00230
$\Delta S_{min}$	3.0	0.00000
$\Delta S_{prom}$	-----	0.00053

Tabla 4.4. Diferencias  $\Delta S$  entre la señal  $S$  de los experimentos 1 y 2.  $\Delta S_{max}$  corresponde al valor máximo,  $\Delta S_{min}$  corresponde al valor mínimo y  $\Delta S_{prom}$  corresponde al valor promedio.

Estas diferencias, muestran pequeños errores en la repetibilidad de los experimentos, y nos indican que el dispositivo puede presentar dificultades para diferenciar cambios pequeños

de distancias; en otras palabras, la diferencia entre una medición y otra para una misma distancia es uno de los factores que determina la resolución de nuestro sensor (esto lo analizaremos en la siguiente sección).

En el caso de estos experimentos, los errores en la repetibilidad se deben al ruido, a las fluctuaciones de luz de la fuente luminosa o de luz externa, a la inexactitud del sistema mecánico y a la alineación de la fuente puntual, principalmente. Sin lugar a dudas, los errores mencionados anteriormente se pueden disminuir considerablemente con un mejor diseño y una fabricación más precisa de dispositivo, utilizando el mismo principio.

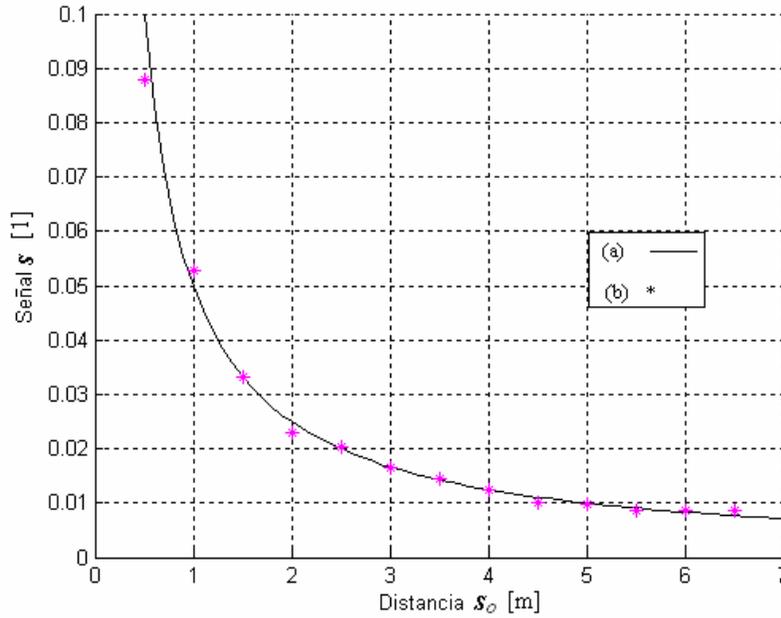
#### **4.1.2 Análisis de la curva de respuesta y de los errores en el prototipo experimental**

Podemos advertir claramente en los resultados de estos seis experimentos que el dispositivo tiene una respuesta que sigue la forma del modelo teórico, aunque está desplazada sobre el eje de las ordenadas; esto se puede apreciar claramente si agregamos un valor fijo (*off-set*) a las respuestas experimentales de nuestro dispositivo. Esto nos indica, en primer lugar, que el principio de funcionamiento es correcto y se puede utilizar favorablemente para implementar un sensor de distancias funcional. En segundo lugar, nos muestra que nuestro prototipo experimental sólo requiere calibrarse para que su respuesta corresponda al modelo matemático que desarrollamos anteriormente.

Aunque no es parte del objetivo de esta tesis caracterizar el prototipo experimental (ya que no se intentó realizar un dispositivo funcional), es interesante hacer un análisis de los errores en la respuesta de este sistema. Este análisis, con los datos que tenemos actualmente, puede dar resultados poco realistas sobre el desempeño de nuestro dispositivo debido a que sólo se utilizaron dos experimentos para ello (y se requerirían de muchas más muestras para resultados más certeros). Sin embargo, pretendemos mostrar un procedimiento valioso para evaluar futuras implementaciones.

Primeramente, comparamos la curva experimental con la teórica y analizamos las diferencias que existen entre ellas; para esto, utilizamos la curva de respuesta que obtuvimos en el experimento 1. Algo importante que debemos de comentar es que no podemos generalizar estos resultados a todos los experimentos, debido a los errores en la reproducibilidad causados por la inestabilidad mecánica de esta implementación.

Si agregamos un valor de 0.007 (valor que podemos considerar como la calibración de nuestro dispositivo) a la señal  $S$  experimental obtenida en el experimento 1, la respuesta que obtenemos es la siguiente:



**Gráfica 4.8: Respuesta del experimento 1 desplazada sobre el eje de las ordenadas.**  
**(a) Curva teórica dada por la ecuación (2.19) con  $D = 5$  cm. (b) Resultados del experimento 1 con un desplazamiento en  $S$  de 0.007.**

Como podemos ver, una vez hecho este ajuste, la curva experimental coincide casi perfectamente con la curva teórica. Los errores en  $S$ ,  $\Delta S$ , que encontramos con respecto a la curva teórica se presentan en la siguiente tabla:

Distancia $S_o$ [m]	Valor de $S$ teórico	Valor de $S$ experimental	Error absoluto	Porcentaje de Error de Exactitud (%EE)
0.5	0.1000	0.0874	0.01260	12.6
1	0.0500	0.0528	0.00280	5.6
1.5	0.0333	0.0334	0.00006	0.2*
2	0.0250	0.0241	0.00090	3.6
2.5	0.0200	0.0182	0.00180	9.0
3	0.0167	0.0166	0.00006	0.4
3.5	0.0143	0.0133	0.00098	6.9
4	0.0125	0.0124	0.00010	0.8
4.5	0.0111	0.0106	0.00051	4.6
5	0.0100	0.0097	0.00030	3.0
5.5	0.0091	0.0085	0.00059	6.5
6	0.0083	0.0085	0.00017	2.0
6.5	0.0077	0.0089	0.00121	15.7**

**Tabla 4.5: Análisis del error de exactitud obtenido en el experimento 1.**  
 \*Error mínimo obtenido. \*\*Error máximo obtenido

A continuación podemos estimar el alcance y la resolución de nuestro dispositivo tomando en cuenta los errores en la repetibilidad de nuestro sistema. Para ésta estimación utilizamos los resultados del experimento 1 y 2, ya que estos se realizaron en condiciones muy similares (fuente de luz, tiempo, etc.). Así, calculamos la desviación estándar  $\sigma_S$  de los valores experimentales y la incertidumbre  $I_S$  a cada distancia, por medio de las siguientes fórmulas:

$$\text{Desviación Estándar} = \sigma S = \pm \left[ \frac{\sum_{j=1}^n (S_{ref} - S_j)^2}{n-1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.1)$$

$$\text{Incertidumbre} = I_S = \frac{\pm \sigma S}{\sqrt{n}} \quad (4.2)$$

Donde  $S_{ref}$  es el valor de referencia, en este caso el valor teórico dado por la ecuación (2.19),  $S_j$  es cada una de las señales  $S$  experimentales obtenidas y  $n$  es el número de datos obtenidos.

Distancia $S_o$ [m]	Valor de $S$ teórico	Valor de $S$ experimento 1	Valor de $S$ experimento 2	Desviación Estándar ( $\sigma S$ )	Incertidumbre de $S$ ( $I_S$ )
0.5	0.1000	0.0874	0.0879	0.01747	0.01235
1	0.0500	0.0528	0.0529	0.00403	0.00285
1.5	0.0333	0.0334	0.0333	0.00007	0.00005
2	0.0250	0.0241	0.0230	0.00219	0.00155
2.5	0.0200	0.0182	0.0205	0.00187	0.00132
3	0.0167	0.0166	0.0166	0.00009	0.00006
3.5	0.0143	0.0133	0.0145	0.00101	0.00071
4	0.0125	0.0124	0.0125	0.00010	0.00007
4.5	0.0111	0.0106	0.0100	0.00122	0.00086
5	0.0100	0.0097	0.0098	0.00036	0.00025
5.5	0.0091	0.0085	0.0086	0.00077	0.00054
6	0.0083	0.0085	0.0088	0.00049	0.00035
6.5	0.0077	0.0089	0.0085	0.00145	0.00103

Tabla 4.6 Cálculo de algunas características numéricas encontradas con los datos de los experimentos 1 y 2.

Una vez que tenemos la incertidumbre de los valores de  $S$  ( $I_S$ ), podemos estimar un intervalo en  $S$  dentro del cual puede existir error en nuestra medición. Este intervalo va desde  $S+I_S$  hasta  $S-I_S$ . Después, a partir de éste intervalo de  $S$  podemos calcular un intervalo en las distancias  $S_o$  dentro del cual no podemos discriminar (debido a los errores en  $S$ ). Estos intervalos se muestran en la siguiente tabla.

Intervalo de $S$ [1]	Intervalo de distancias $S_o$ [m]
0.0876 - 0.112	0.4450 - 0.5705
0.0471 - 0.0529	0.9461 - 1.0605
0.0333 - 0.0334	1.4976 - 1.5024
0.0234 - 0.0265	1.8832 - 2.1323
0.0187 - 0.0213	2.3451 - 2.6768
0.0166 - 0.0167	2.9880 - 3.0120
0.0136 - 0.0150	3.3336 - 3.6839
0.0124 - 0.0126	3.9776 - 4.0228
0.0102 - 0.0120	4.1750 - 4.8798
0.0097 - 0.0103	4.8757 - 5.1308
0.0085 - 0.0096	5.1899 - 5.8495
0.0080 - 0.0087	5.7579 - 6.2634

0.0067 - 0.0087	5.7342 - 7.5019
-----------------	-----------------

Tabla 4.7: Intervalos en  $S$  y en  $S_0$  basados en la incertidumbre  $\Delta S$  del prototipo experimental.

Como podemos observar de este análisis, podríamos medir confiablemente hasta 5.5 metros, con una resolución de 0.5 m con este prototipo experimental.

## 4.2 PRUEBA PARA DETERMINAR LA INMUNIDAD DE LA SEÑAL A DIFERENTES INTENSIDADES LUMINOSAS

Una de las principales ventajas que sugiere el principio de funcionamiento de nuestro sistema, es que la señal  $S$  es independiente de la intensidad luminosa del objeto cuya distancia queremos determinar. Para comprobar esto realizamos el siguiente experimento:

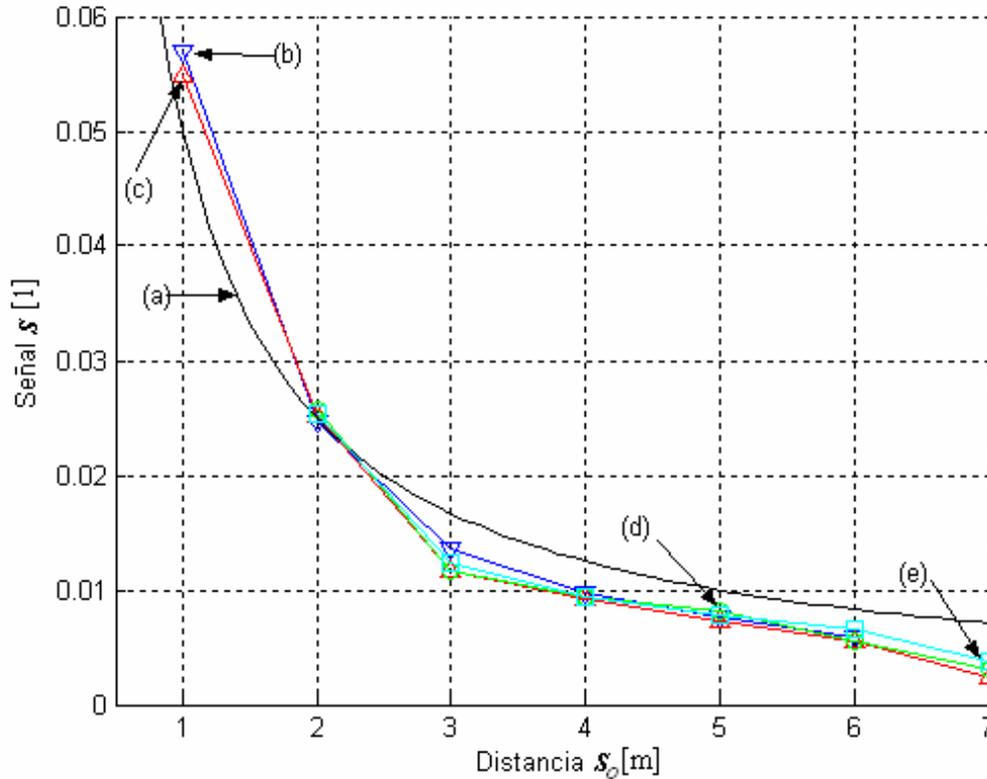
- Utilizamos como objeto un foco de halógeno de 50W.
- Realizamos cuatro experimentos, variando en cada uno la potencia de dicho foco.
- Para cada uno de los experimentos determinamos la señal  $S$  cuando el blanco estaba a diferentes distancias  $S_0$ .
- Graficamos las curvas de respuesta para cada experimento.

Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

RESPUESTA CUANDO EL FOCO DE HALÓGENO ES ALIMENTADO CON 5 V				
Posición	Distancia[m]	Señal 1 $V_1$ [V]	Señal 2 $V_2$ [V]	Señal S [1]
$S_{01}$	1	3.2660	3.6700	0.05824
$S_{02}$	2	0.9767	1.0260	0.0246
$S_{03}$	3	0.4540	0.4659	0.0129
$S_{04}$	4	0.2425	0.2479	0.0110
$S_{05}$	5	0.1438	0.1465	0.0093
$S_{06}$	6	0.1113	0.1131	0.0080
RESPUESTA CUANDO EL FOCO DE HALÓGENO ES ALIMENTADO CON 6 V				
Posición	Distancia[m]	Señal 1 $V_1$ [V]	Señal 2 $V_2$ [V]	Señal S [1]
$S_{01}$	1	5.6890	6.3900	0.0580
$S_{02}$	2	1.6680	1.7499	0.0240
$S_{03}$	3	0.7759	0.7952	0.0123
$S_{04}$	4	0.4084	0.4169	0.0103
$S_{05}$	5	0.2766	0.2813	0.0084
$S_{06}$	6	0.1899	0.1917	0.0048
$S_{07}$	7	0.1227	0.1237	0.0041
RESPUESTA CUANDO EL FOCO DE HALÓGENO ES ALIMENTADO CON 7 V				
Posición	Distancia[m]	Señal 1 $V_1$ [V]	Señal 2 $V_2$ [V]	Señal S [1]
$S_{01}$	2	2.6500	2.7800	0.0239
$S_{02}$	3	2.6340	2.7730	0.0257
$S_{03}$	4	1.1720	1.2050	0.0139
$S_{04}$	5	1.1770	1.2047	0.0116
$S_{05}$	6	0.6683	0.6803	0.0089
$S_{06}$	7	0.6565	0.6689	0.0094
RESPUESTA CUANDO EL FOCO DE HALÓGENO ES ALIMENTADO CON 8 V				
Posición	Distancia[m]	Señal 1 $V_1$ [V]	Señal 2 $V_2$ [V]	Señal S [1]
$S_{01}$	2	3.7390	3.9400	0.0262
$S_{02}$	3	1.7500	1.7950	0.0127
$S_{03}$	4	0.9650	0.9830	0.0092

$S_{04}$	5	0.6193	0.6290	0.0078
$S_{05}$	6	0.4421	0.4474	0.0060
$S_{06}$	7	0.3128	0.3151	0.0037

Tabla 4.8: Resultados de la prueba para determinar la inmunidad de la señal a diferentes intensidades luminosas.



Gráfica 4.9: Resultados de la prueba para determinar la inmunidad de la señal a diferentes intensidades luminosas

(a) Curva teórica dada por la ecuación (2.19) con  $D = 5$  cm. Los resultados experimentales cuando la fuente luminosa es alimentada con diferentes voltajes se presentan en (b), (c), (d) y (e).

(b) Foco alimentado con 5V. (c) Foco alimentado con 6V. (d) Foco alimentado con 7V. (e) Foco alimentado con 8 V.

En la gráfica 4.9 se representan todos los resultados mostrados en la tabla 4.8: la respuesta del sistema con diferentes intensidades de luz. Aquí podemos ver que el comportamiento es independiente de la intensidad luminosa del objeto, ya que las curvas son muy similares, y los errores que se presentan son parecidos a los obtenidos al comparar diferentes experimentos con una misma intensidad de luz (Repetibilidad en los experimentos, Gráfica 4.7).

### 4.3 PRUEBA PARA DETERMINAR EL CONO DE VISIÓN

Como comentamos en la sección 2.3.1, el sensor de distancias puede funcionar adecuadamente siempre y cuando el objeto cuya distancia queremos determinar esté dentro del cono de visión, aún cuando éste se encuentre fuera del eje óptico. Para comprobar esto, diseñamos el siguiente experimento:

- Colocamos la fuente luminosa (foco de halógeno) a una distancia  $S_o = 3\text{m}$  sobre el eje óptico. Tomamos esta posición como referencia (0 cm).

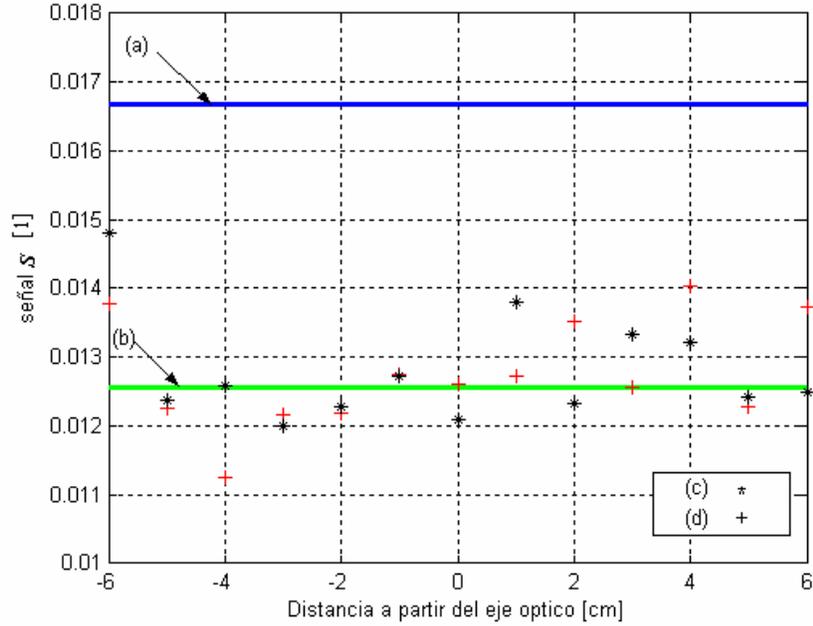
- Determinamos la señal  $S$  para esta posición.
- A partir de esta referencia, movimos la fuente luminosa sobre un eje perpendicular al eje óptico en intervalos de 1 cm.
- Calculamos las señales  $S$  para cada una de las posiciones.
- Este experimento se realizó dos veces.
- Finalmente calculamos el cono de visión experimental.

Resultados:

Para un rango entre -6 y 6 cm, la imagen del objeto estaba enfocada dentro del detector. Las señales obtenidas se muestran en la siguiente tabla.

Distancia[cm ]	Experimento	Señal 1 $V_1$ [V]	Señal 2 $V_2$ [V]	Señal $S$ [I]
-6	1	350.8500	361.4000	0.0148
	2	350.7500	360.5500	0.0138
-5	1	366.8500	376.0500	0.0124
	2	366.6500	375.7500	0.0123
-4	1	368.9500	378.3500	0.0126
	2	368.9500	377.3500	0.0113
-3	1	370.2500	379.2500	0.0120
	2	369.8500	378.9500	0.0122
-2	1	372.7500	382.0200	0.0123
	2	373.0500	382.2500	0.0122
-1	1	376.1500	385.8500	0.0127
	2	375.7500	385.4500	0.0127
0	1	376.7500	385.9800	0.0121
	2	376.2500	385.8500	0.0126
1	1	375.4500	385.9500	0.0138
	2	376.0500	385.7500	0.0127
2	1	417.9100	428.3500	0.0123
	2	417.5500	429.0000	0.0135
3	1	410.4500	421.5400	0.0133
	2	412.3500	422.8500	0.0126
4	1	405.3000	416.1500	0.0132
	2	406.1800	417.7500	0.0140
5	1	405.5500	415.7500	0.0124
	2	406.3000	416.4000	0.0123
6	1	387.0500	396.8400	0.0125
	2	387.9500	398.7500	0.0137

Tabla 4.9: Resultados de la prueba para determinar el cono de visión



**Gráfica 4.10: Determinación experimental del cono de visión. (a) Señal  $S$  teórica para una distancia de 3 metros utilizando la ecuación (2.19) con  $D=5\text{cm}$ . (b) Promedio de las señales  $S$  obtenidas experimentalmente. (c) Resultados del experimento 1. (d) Resultados del experimento 2.**

Primeramente, podemos observar la repetibilidad en esta prueba si comparamos los resultados entre los experimentos 1 y 2 de esta prueba. En la siguiente tabla, podemos observar las diferencias en  $S$ ,  $\Delta S$ , obtenidos:

Parámetro	Distancia a la que se encontró [cm]	Variación de $S$ [1]
$\Delta S_{max}$	-4	0.00130
$\Delta S_{min}$	-1	0.00000
$\Delta S_{prom}$	----	0.00064

**Tabla 4.10: Diferencias  $\Delta S$  entre la señal  $S$  en la determinación experimental del cono de visión.  $\Delta S_{max}$  corresponde al valor máximo,  $\Delta S_{min}$  corresponde al valor mínimo y  $\Delta S_{prom}$  corresponde al valor promedio.**

Con los datos obtenidos podemos también calcular algunas características numéricas de nuestros resultados. Para esto podemos emplear las fórmulas (4.1) y (4.2), utilizando como señal de referencia el valor promedio de las señales  $S$  obtenidas en este experimento. Para calcular esta señal promedio podemos utilizar la siguiente fórmula:

$$\text{Promedio} = S_{prom} = \frac{\sum_{j=1}^n S_j}{n} \quad (4.3)$$

Donde  $S_j$  es cada una de las señales  $S$  experimentales obtenidas y  $n$  es el número total de datos obtenidos. Las características numéricas correspondientes a los resultados obtenidos en esta prueba se muestran a continuación, en la tabla 4.11.

Característica Numérica	Valor obtenido
Valor promedio de las lecturas $S_{prom}$	0.0126
Desviación estándar $\sigma S$	$8.1019 \times 10^{-4}$
Incertidumbre $\Delta S$	$1.5889 \times 10^{-4}$

**Tabla 4.11: Características numéricas obtenidas de los resultados de la prueba experimental para calcular el cono de visión.**

Podemos observar que los errores en la repetibilidad de esta prueba son muy pequeños y similares a los encontrados en la sección 4.1.1. Además, podemos ver que la dispersión en nuestros datos también es pequeña. Por lo tanto, podemos decir que dentro del cono de visión la señal es casi constante; es decir, que la señal de salida de nuestro detector es aproximadamente la misma cuando la fuente está fuera del eje óptico que cuando está sobre él. De esta manera, podemos comprobar la teoría dada en las secciones 2.3.1 y 2.3.2.

Con los resultados obtenidos, también calculamos el ángulo de apertura del cono de visión experimental como:

$$\alpha_{cono\_de\_vision} = 2 \cdot \tan^{-1} \left( \frac{0.06[m]}{3[m]} \right) = 2.2915^\circ \quad (4.4)$$

En la sección 3.4 calculamos el cono de visión teórico (ecuación 3.6), basándonos en la alineación de los componentes de nuestro prototipo experimental. Como podemos ver, ambos resultados son muy similares.

Cono de visión calculado teóricamente ( $\alpha_{cono\_de\_vision\_teórico}$ )	Cono de visión obtenido experimentalmente ( $\alpha_{cono\_de\_vision\_experimental}$ )
2.8565°	2.2915°

**Tabla 4.12: Comparación de los valores del cono de visión para el prototipo experimental**

Por último, vale la pena comentar, que a pesar de que son pequeñas, estas variaciones dentro del cono de visión se deben de disminuir al máximo para poder mejorar la resolución de nuestro sistema.

#### 4.4 PRUEBA PARA DETERMINAR EL ALCANCE Y LA RESOLUCIÓN DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

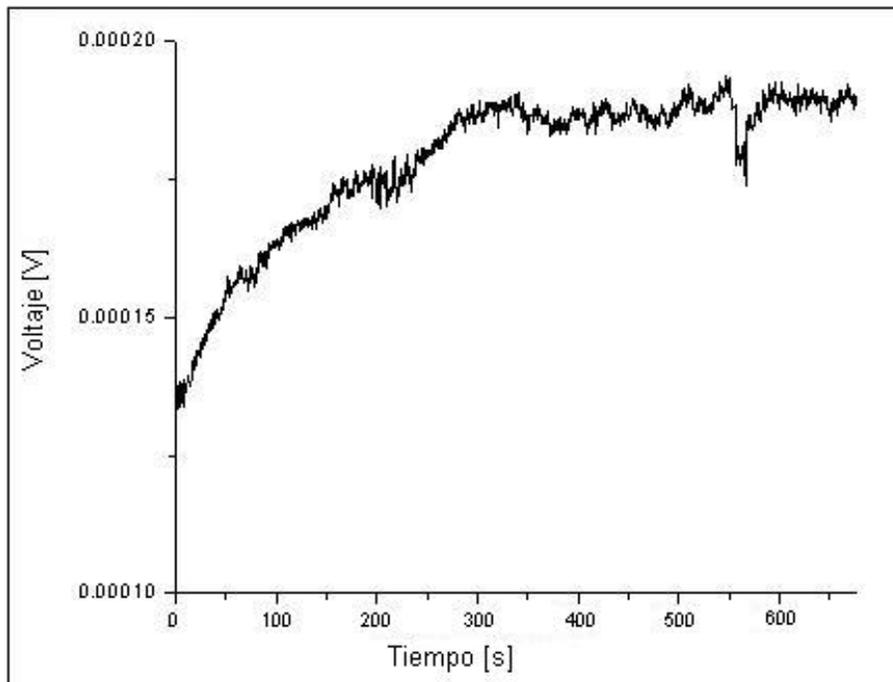
Como vimos en la sección 2.3.4 el ruido desempeña un papel muy importante en el funcionamiento del sensor de distancias. También comentamos anteriormente en este capítulo, cómo es que el ruido determina la máxima resolución que podemos tener en nuestro sistema y la señal a ruido mínima que necesitamos para poder tener un alcance determinado. En esta sección haremos un breve análisis del ruido presente en nuestro dispositivo experimental y de cómo afecta los parámetros de nuestro dispositivo.

#### 4.4.1 Determinación del ruido presente en el dispositivo experimental

Para determinar el ruido presente en nuestro dispositivo experimental realizamos la siguiente prueba:

- Obstruimos la abertura del iris para evitar la entrada de luz a nuestro sistema.
- Utilizando el programa BenchLink Meter para capturar las lecturas del multímetro monitoreamos la señal de salida del sensor de distancias.
- Tomamos 1695 lecturas, una cada 0.4 segundos, dando un total de 11 minutos y 18 segundos.
- Generamos una gráfica representativa del ruido presente en el sistema.
- Determinamos experimentalmente el valor de  $\delta V$  (descrito en la sección 2.3.4).

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:



Gráfica 4.11: Ruido monitoreado durante 11 minutos con el programa BenchLink.

Para el calcular  $\delta V$  utilizamos el siguiente procedimiento:

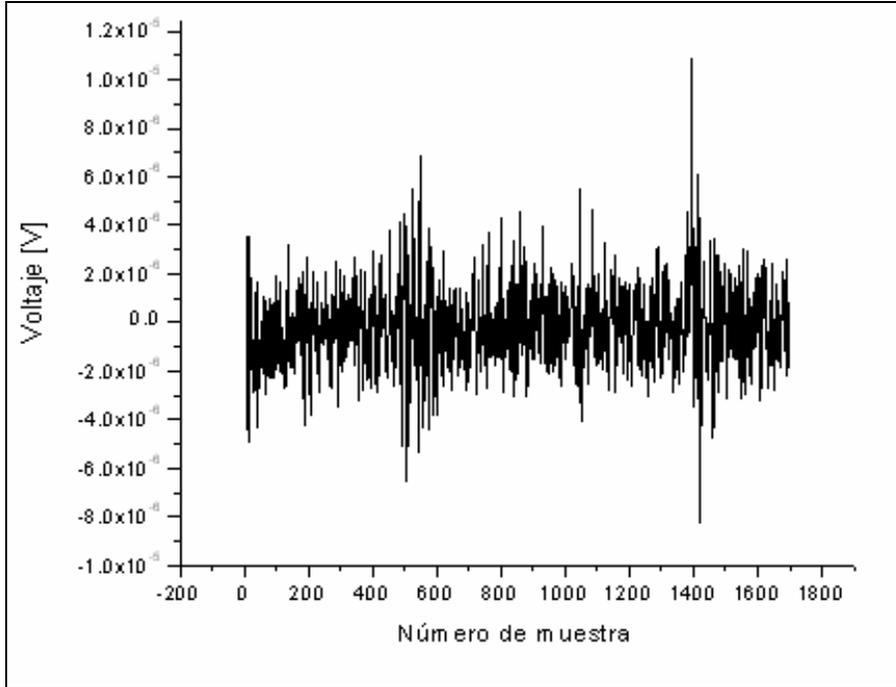
- Consideramos que el tiempo que tardamos en tomar las lecturas de  $V_1$  y  $V_2$  para cada medición es aproximadamente de 2 segundos.
- Supusimos que el ruido en  $V_1$  y en  $V_2$  es el mismo, por lo que tomamos los mismos datos para calcular el ruido instantáneo  $\delta V_{1\_inst}$  y  $\delta V_{2\_inst}$ . Dichos datos son los que obtuvimos en el monitoreo del ruido total del sistema.
- $\delta V_{1\_inst}$  se consideró como un dato en el tiempo  $t$  específico, mientras que  $\delta V_{2\_inst}$  se consideró como otro dato dos segundos antes. Por lo tanto, para calcular  $\delta V_{\_inst}$  hicimos la resta dato a dato de cada muestra en un tiempo  $t$  menos su

correspondiente en  $(t- 2s)$ . Para realizar esta operación utilizamos el programa Origin 6.1.

- Finalmente, estimamos  $\delta V$  como tres veces la desviación estándar de los datos obtenidos después de la operación.

$$\delta V = 3 \cdot (\delta V_{-inst})_{rms} \quad (4.5)$$

Los resultados se muestran a continuación:



Gráfica 4.12: Cálculo experimental de  $\delta V_{inst}$ , realizando la resta dato a dato de la gráfica 4.11 entre los valores obtenidos en un tiempo  $t$  y su correspondiente en un tiempo  $t$  dos segundos antes.

Los datos estadísticos de esta gráfica son:

Valor Mínimo $V_{min}$ [V]	Valor Máximo $V_{max}$ [V]	Valor Promedio $V_{mean}$ [V]	Desviación Estándar $\sigma_V$ [V]	Rango $V_{min}-V_{max}$ [V]
-8.181E-6	1.0826E-5	-1.56216E-7	1.63226E-6	1.9007E-5

Tabla 4.13: Datos estadísticos del ruido

De la ecuación (4.5), podemos obtener lo siguiente:

$$\begin{aligned} \delta V &= 3 \cdot \sigma_V \\ \delta V &= 3 \cdot (1.63226 \times 10^{-6}) [V] \\ \delta V &= 4.89678 \times 10^{-6} [V] \end{aligned} \quad (4.5)$$

El ruido  $\delta V$  calculado experimentalmente tiene un valor de  $4.89678 \times 10^{-6}$  [V].

**4.4.2 Determinación de la resolución alcanzable en un dispositivo funcional**

Es claro que las características de resolución y alcance del dispositivo experimental dependen fuertemente de las condiciones en las cuales se realizaron las pruebas, como lo muestra la ecuación (2.38). Por ejemplo, en los experimentos realizados, la forma de obtener mejores resultados en el dispositivo fue utilizar fuentes luminosas como blancos; así, se puede alcanzar una mejor resolución y un mayor alcance. Por otra parte, en un dispositivo que se planea usar en condiciones arbitrarias de iluminación y con cualquier blanco, no se podrá obtener la misma resolución a menos que se modifiquen los parámetros del sistema óptico y del optoelectrónico.

Con el valor estimado en la sección 4.4.1 y con los valores del dispositivo experimental ( $D=5\text{cm}$ ), podemos hacer algunos cálculos para ejemplificar la máxima resolución (incertidumbre mínima) posible del sistema en ciertas condiciones en la relación señal a ruido, considerando como única fuente de error el ruido electrónico. En la tabla 4.14 podemos ver la resolución obtenida cuando la relación señal a ruido es igual a 80dB.

Distancia [m]	$\frac{S_o}{2 \cdot D}$	Relación Señal a ruido [dB]	Señal promedio recibida [mV]	$\frac{\delta S_o}{S_o}$ [1]	$\delta S_o$ [m]
0.5	5	80	49.0	$5.00 \times 10^{-4}$	$2.50 \times 10^{-4}$
1	10	80	49.0	$1.00 \times 10^{-3}$	$1.00 \times 10^{-3}$
1.5	15	80	49.0	$1.50 \times 10^{-3}$	$2.25 \times 10^{-3}$
2	20	80	49.0	$2.00 \times 10^{-3}$	$4.00 \times 10^{-3}$
2.5	25	80	49.0	$2.50 \times 10^{-3}$	$6.25 \times 10^{-3}$
3	30	80	49.0	$3.00 \times 10^{-3}$	$9.00 \times 10^{-3}$
3.5	35	80	49.0	$3.50 \times 10^{-3}$	$1.23 \times 10^{-2}$
4	40	80	49.0	$4.00 \times 10^{-3}$	$1.60 \times 10^{-2}$
4.5	45	80	49.0	$4.50 \times 10^{-3}$	$2.03 \times 10^{-2}$
5	50	80	49.0	$5.00 \times 10^{-3}$	$2.50 \times 10^{-2}$
5.5	55	80	49.0	$5.50 \times 10^{-3}$	$3.03 \times 10^{-2}$
6	60	80	49.0	$6.00 \times 10^{-3}$	$3.60 \times 10^{-2}$
6.5	65	80	49.0	$6.50 \times 10^{-3}$	$4.23 \times 10^{-2}$
7	70	80	49.0	$7.00 \times 10^{-3}$	$4.90 \times 10^{-2}$
7.5	75	80	49.0	$7.50 \times 10^{-3}$	$5.63 \times 10^{-2}$

**Tabla 4.14: Cálculo de la resolución relativa del dispositivo experimental cuando la relación señal a ruido es igual a 80dB.**

En la siguiente tabla se muestra la relación señal a ruido necesaria para tener una resolución relativa igual a 0.001.

Distancia [m]	$\frac{S_o}{2 \cdot D}$	$\frac{\delta S_o}{S_o}$	$\delta S_o$ [m]	Señal promedio recibida [mV]	Relación Señal a ruido [dB]
0.5	5	0.001	$5.00 \times 10^{-4}$	24.5	74.0
1	10	0.001	$1.00 \times 10^{-3}$	49.0	80.0
1.5	15	0.001	$1.50 \times 10^{-3}$	73.5	83.5
2	20	0.001	$2.00 \times 10^{-3}$	97.9	86.0
2.5	25	0.001	$2.50 \times 10^{-3}$	122.0	88.0
3	30	0.001	$3.00 \times 10^{-3}$	147.0	89.5

## Capítulo 4

3.5	35	0.001	$3.50 \times 10^{-3}$	171.0	90.9
4	40	0.001	$4.00 \times 10^{-3}$	196.0	92.0
4.5	45	0.001	$4.50 \times 10^{-3}$	220.0	93.1
5	50	0.001	$5.00 \times 10^{-3}$	245.0	94.0
5.5	55	0.001	$5.50 \times 10^{-3}$	269.0	94.8
6	60	0.001	$6.00 \times 10^{-3}$	294.0	95.6
6.5	65	0.001	$6.50 \times 10^{-3}$	318.0	96.3
7	70	0.001	$7.00 \times 10^{-3}$	343.0	96.9
7.5	75	0.001	$7.50 \times 10^{-3}$	367.0	97.5

**Tabla 4.15: Cálculo de la relación señal a ruido necesaria para obtener una resolución relativa de 0.001**

En los cálculos anteriores, se toma el ruido electrónico como única fuente de error. A pesar de que en el dispositivo implementado, existían fuentes de error más grandes, como la baja estabilidad de sus componentes mecánicas y el ruido introducido por las variaciones de la luz, estos errores se pueden disminuir o, incluso, eliminar (con un diseño como el propuesto en el siguiente capítulo). Así, los resultados obtenidos muestran la resolución alcanzable siempre que se garantice una determinada relación señal a ruido.

Finalmente, en la siguiente tabla tomaremos como ejemplo los valores obtenidos en el experimento 1 para observar la relación señal a ruido que teníamos (considerando el mismo valor de ruido calculado en la ecuación (4.5)) y la resolución alcanzable si la única fuente de error hubiera sido el ruido electrónico.

Distancia [m]	$\frac{S_o}{2 \cdot D}$	Ruido [ $\mu$ V]	Señal promedio recibida [V]	Relación Señal a ruido [dB]	$\frac{\delta S_o}{S_o}$	$\delta S_o$ [m]
0.5	5	4.90	755.370	104	$3.24 \times 10^{-5}$	$1.62 \times 10^{-5}$
1	10	4.90	181.555	91.4	$2.70 \times 10^{-4}$	$2.70 \times 10^{-4}$
1.5	15	4.90	75.585	83.8	$9.72 \times 10^{-4}$	$1.46 \times 10^{-3}$
2	20	4.90	41.610	78.6	$2.35 \times 10^{-3}$	$4.71 \times 10^{-3}$
2.5	25	4.90	23.756	73.7	$5.15 \times 10^{-3}$	$1.29 \times 10^{-2}$
3	30	4.90	17.125	70.9	$8.58 \times 10^{-3}$	$2.57 \times 10^{-2}$
3.5	35	4.90	12.670	68.3	$1.35 \times 10^{-2}$	$4.73 \times 10^{-2}$
4	40	4.90	9.704	65.9	$2.02 \times 10^{-2}$	$8.07 \times 10^{-2}$
4.5	45	4.90	7.988	64.3	$2.76 \times 10^{-2}$	$1.24 \times 10^{-1}$
5	50	4.90	6.561	62.5	$3.73 \times 10^{-2}$	$1.87 \times 10^{-1}$
5.5	55	4.90	4.468	59.2	$6.03 \times 10^{-2}$	$3.31 \times 10^{-1}$
6	60	4.90	3.999	58.2	$7.35 \times 10^{-2}$	$4.41 \times 10^{-1}$
6.5	65	4.90	2.952	55.6	$1.08 \times 10^{-1}$	$7.01 \times 10^{-1}$

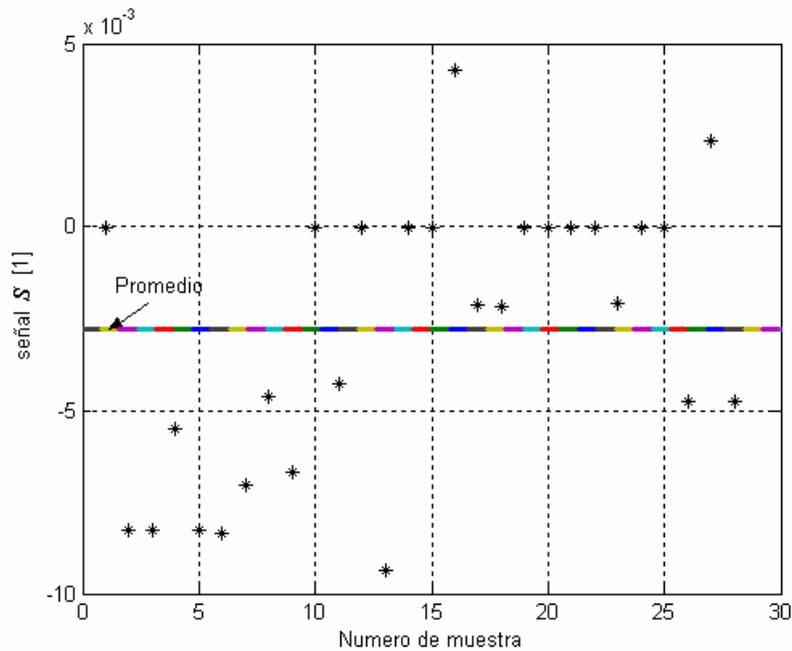
**Tabla 4.16: Estimación de la resolución relativa alcanzable durante el experimento 1 de la prueba para determinar la curva de respuesta experimental.**

#### 4.5 PRUEBA PARA DETERMINAR EL LÍMITE DE MEDICIÓN EXPERIMENTAL DEL DISPOSITIVO (CUANDO EL BLANCO ES MUY LEJANO)

Idealmente, el sensor de distancias recibe una señal igual a cero cuando el objeto está en el infinito. En la práctica, el dispositivo experimental brinda una señal  $S$ , que puede ser diferente de cero a partir de una distancia suficientemente grande, y es importante que esta señal no limite el posible alcance de nuestro dispositivo. Así, en el siguiente experimento encontramos la señal  $S$  límite que da el detector cuando apunta a un objeto muy lejano.

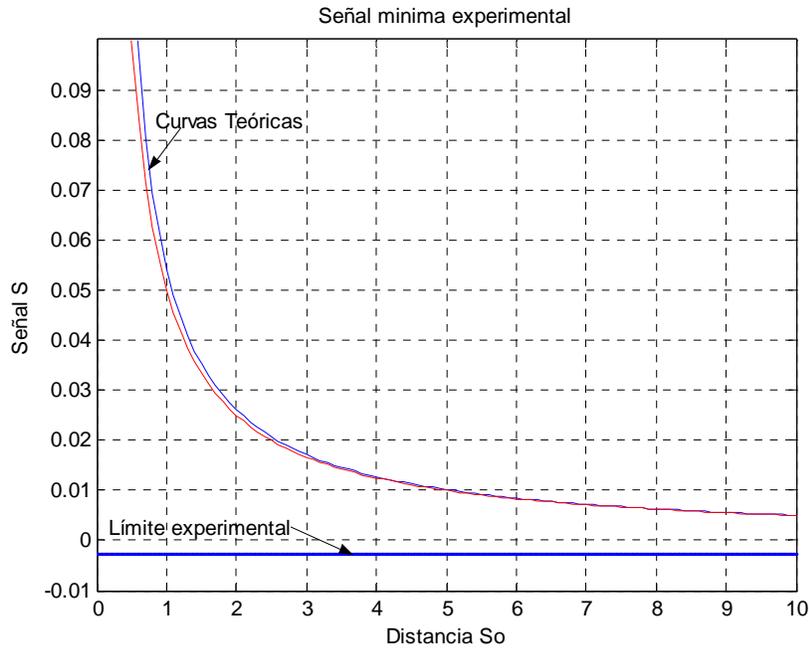
- Apuntamos nuestro sensor hacia un blanco cuya distancia de la lente era 40.5m.
- Tomamos 28 muestras de las señales variando la posición del iris. .
- Calculamos la señal  $S$ .
- Tomamos un promedio de todas las señales obtenidas.

Los resultados se muestran en la siguiente gráfica:



Gráfica 4.13: Muestras tomadas para calcular el límite experimental del sistema.

El promedio de todas estas muestras nos da una señal  $S$  límite de  $-0.0028$ . Este límite se puede ver claramente en la siguiente gráfica:



Gráfica 4.14: Representación del límite experimental.

#### 4.6 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

Los resultados presentados en este capítulo muestran una respuesta adecuada del sistema, ya que ninguno de los errores discutidos aquí es intrínseco al principio de funcionamiento que proponemos para desarrollar el dispositivo. Estos errores dependen de la estructura del dispositivo, de su mecánica, su electrónica y su alineación.

Así, los resultados nos demuestran que el principio de funcionamiento es correcto, y que además, es independiente de la intensidad luminosa del objeto cuya distancia queremos determinar.

Por otra parte, determinamos datos específicos del prototipo experimental utilizado, como la repetibilidad, los errores, el cono de visión y el ruido electrónico del sistema. En este sentido llegamos a los siguientes datos:

<b>Alcance Máximo [m]</b>	5.5
<b>Resolución [m]</b>	0.5
<b>Ruido Electrónico <math>\delta V[V]</math></b>	$4.89678 \times 10^{-6}$
<b>Cono de visión [°]</b>	2.2915

Tabla 4.17: Resumen de los datos experimentales obtenidos en la sección 4.

Es importante comentar que el dispositivo que se armó para esta tesis estuvo limitado al uso de componentes disponibles en el laboratorio en ese momento, y por cuestiones prácticas se decidieron hacer los primeros experimentos para probar este principio, armando el dispositivo mecánico descrito en el capítulo 3. Sin embargo, es factible mejorar considerablemente las características de este diseño para poder implementar un prototipo funcional con un mejor alcance y una mejor resolución. Por este motivo, se desarrolló la

sección 4.4, en donde analizamos las características alcanzables de implementaciones optimizadas. Las mejoras que podemos proponer, basadas en la experiencia adquirida durante la realización de esta tesis se expondrán en el siguiente capítulo.

## CAPITULO 5

### ANÁLISIS DE RESULTADOS Y OPTIMIZACIÓN DEL DISPOSITIVO

En el capítulo anterior mostramos todas las pruebas experimentales realizadas. En este capítulo nos dedicaremos a analizar los resultados obtenidos en dichas pruebas. También comentaremos los errores y las dificultades que se presentaron al implementar el dispositivo experimental y propondremos cómo optimizar los parámetros del sistema para crear un mejor prototipo. Finalmente, con base en los resultados obtenidos en la realización de esta tesis, aportaremos ideas para una futura implementación de un Sistema Electrónico Sensorial para Discapacitados Visuales.

#### 5.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Si observamos las pruebas experimentales para determinar la curva de respuesta experimental, podemos notar que en todos los casos el dispositivo experimental fue capaz de brindar una respuesta  $S$  representativa para cada distancia  $S_0$ . En este sentido, las pruebas experimentales comprueban que es posible desarrollar un dispositivo basado en el principio propuesto. Además de esto, las pruebas experimentales nos indicaron otras características interesantes del sistema. En primer lugar, muestran que la respuesta del dispositivo experimental se apega al modelo teórico, ya que los puntos experimentales describen la misma ecuación que (2.19), con la única diferencia de que la curva experimental presenta un desplazamiento constante sobre el eje de las ordenadas. En este sentido, podemos decir que los modelos teóricos descritos en el capítulo 2 describen adecuadamente el principio de funcionamiento de nuestro sensor de distancias. En segundo lugar, podemos notar que la repetibilidad en los experimentos cuando se realizaban consecutivamente era buena, pero que disminuía considerablemente cuando no podíamos asegurar una alineación idéntica en diferentes experimentos. Estas observaciones nos pueden llevar a una tercera característica interesante: tanto la falta de precisión como el desplazamiento de la curva experimental se pueden atribuir mayoritariamente a los errores sistemáticos en la implementación del dispositivo experimental. Indiscutiblemente, los errores sistemáticos con mayor impacto en nuestro sistema fueron los debidos a la inexactitud del sistema mecánico empleado, lo cual provoca una desalineación del sistema y variaciones de las condiciones al realizar los experimentos. Por supuesto, a pesar de ser la principal fuente de error, no todos los errores se pueden atribuir a las inexactitudes antes descritas. Indudablemente otra fuente de error importante es el ruido (tanto óptico como electrónico). Cuando los experimentos se realizaban en condiciones de alineación muy similares aún existían imprecisiones en la respuesta de nuestro dispositivo, que se debían al ruido existente en el sistema.

Otro resultado importante se obtuvo de la prueba para determinar la inmunidad del sistema a diferentes intensidades luminosas. Como vimos en la teoría, la respuesta del sistema debe de ser independiente de la naturaleza del objeto; es decir, no debe de ser afectada por el

color, el material ni la intensidad luminosa de éste. Siguiendo este principio, siempre que las dos mediciones se tomaran con una intensidad luminosa constante proveniente del objeto, no debía de importar la magnitud de ésta; así, las curvas de respuesta de nuestro sistema, cuando lo único que variaba era la intensidad luminosa proporcionada por el objeto, debían de ser iguales. En las pruebas experimentales estas curvas no fueron completamente iguales, pero presentaban errores muy similares a los errores en las pruebas de repetibilidad realizados con una misma fuente y una sola intensidad; por lo tanto, podemos decir que la causa de estos errores es nuevamente el ruido y la inexactitud mecánica y no una dependencia a la intensidad luminosa del objeto.

A pesar de que los resultados, cuando la intensidad luminosa variaba, fueron favorables para comprobar la inmunidad de la respuesta del sensor de distancias a la naturaleza del objeto, hubiera sido interesante comparar las curvas de respuesta cuando las fuentes luminosas eran diferentes. Sin embargo, esta comparación no se puede hacer directamente con los resultados que obtuvimos en nuestros experimentos, debido a que entre cada experimento (con diferente fuente luminosa) las condiciones de alineación no fueron las mismas. Esta comparación solo se podrá realizar una vez que se implemente un dispositivo experimental mucho más exacto.

En cuanto al cono de visión, en el capítulo 3 calculamos el cono de visión teórico para los parámetros del dispositivo experimental (ecuación (3.6)) y en el capítulo 4 lo determinamos experimentalmente; ambos resultados fueron similares:  $2.85^\circ$  teóricamente y  $2.29^\circ$  experimentalmente. Una observación importante que hicimos en este experimento fue que la estructura misma del fotodiodo es otra fuente de error. Cuando un objeto está en el límite del cono de visión, y por lo tanto la imagen está en el límite del área sensible del detector, se pueden producir errores importantes debido a la luz que incide en la parte metálica del detector. Indudablemente, esto se puede corregir aislando óptimamente la parte del detector que produce reflexiones indeseadas. Una posibilidad sería colocar un iris justo frente al detector que bloquee la luz que incide alrededor del área sensible y así evitar reflexiones en esta zona.

Por otro lado, realizamos un breve análisis de otro factor innegablemente importante: el ruido. Una parte del ruido que se introduce a nuestro dispositivo experimental se debe a las fluctuaciones en la intensidad de luz en las fuentes luminosas. En realidad, existe un tiempo considerable entre la toma de los voltajes de una medición y otra, que es el tiempo que se lleva desplazar el iris de una posición a otra. En este tiempo, el objeto puede cambiar la iluminación que brinda a nuestro sistema debido a fluctuaciones de luz que, en general, no se pueden evitar. Estas fluctuaciones de luz son capturadas por nuestro sensor y propician que la señal de salida de nuestro dispositivo presente errores. Estos errores, sin embargo, se pueden disminuir considerablemente (o incluso eliminar) si el tiempo entre las mediciones se hace muy pequeño (o nulo); de hecho hay varias posibilidades para diseñar sistemas que disminuyan este ruido, como lo comentaremos más adelante en la sección 5.2.3. Otra parte muy importante del ruido se genera en el sistema optoelectrónico de nuestro dispositivo: en el fotodiodo. Esto se debe a que la forma en que se generan portadores de energía eléctrica no es constante y a que en todo el circuito detector aparecen variaciones principalmente debidas a los cambios de temperatura.

A través de un monitoreo de la respuesta del sistema, nos pudimos dar una idea de la cantidad de ruido que existe en él. Éste dato es importante, ya que no indica el límite que tiene nuestro dispositivo tanto en resolución como en alcance: para poder determinar adecuadamente una distancia o una diferencia de distancias, únicamente debemos de cuidar que la señal recibida se pueda diferenciar claramente del ruido existente, es decir, debemos de tener una relación señal a ruido suficiente.

Como ejemplo de lo anterior podemos ver el experimento realizado en la sección 4.4. Aquí encontramos que en nuestro sistema teníamos ruido con un valor aproximado de  $4.89678 \times 10^{-6}$  [V]. De acuerdo con la ecuación (2.37), si recibiéramos una cantidad de señal igual a la del ruido no podríamos medir ninguna distancia porque no podríamos distinguir entre la señal y el ruido del sistema. En cambio, si el voltaje de nuestra señal es diez mil veces más grande que el ruido (una relación señal a ruido de 80dB) y considerando que el este ruido es la única limitante del sistema, podríamos alcanzar una resolución de 0.25 milímetros cuando la distancia  $S_0$  es alrededor de 0.5 metros y de 5.63 centímetros cuando la distancia  $S_0$  es de 7.5 metros (Tabla 4.7). Asimismo, si quisiéramos obtener una resolución relativa de 0.001 con un alcance de hasta 7.5 metros tendríamos que tener una señal a ruido de por lo menos 97.5 dB (tabla 4.8). Debemos de tener presente que los resultados obtenidos con respecto al ruido corresponden específicamente al dispositivo usado en estas pruebas experimentales; no obstante, un análisis similar se puede hacerse en cualquier implementación de este principio y se puede esperar que los resultados sean al menos parecidos.

El último experimento realizado corresponde al límite experimental del dispositivo. Como describimos en la sección 4.5, en este experimento se dirigió el sensor de distancias hacia un blanco muy lejano. Primeramente vemos que teóricamente la señal  $S$  en estas condiciones debe de dar 0, en cambio, experimentalmente da un valor negativo. De éste resultado, podemos ver nuevamente que la respuesta experimental está por debajo de la teórica, indicándonos que existe un error sistemático constante en la implementación del dispositivo. Por otro lado, el comportamiento de este dispositivo a distancias muy grandes es bueno ya que, si bien nuestro dispositivo nunca va a tener un alcance infinito, va a poder indicar que el objeto está a una distancia mayor que el alcance máximo de éste (a pesar de no poder determinar específicamente en dónde).

Recordemos que el objetivo para realizar esta tesis fue proponer un principio físico que nos permitiera desarrollar un dispositivo para determinar distancias a partir de técnicas fotométricas y probarlo experimentalmente. Finalmente, la conclusión más importante que podemos obtener después de los resultados obtenidos es que el objetivo de esta tesis se cumplió satisfactoriamente.

## 5.2 OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS

### 5.2.1 Principales fuentes de error en el dispositivo experimental

Gracias a las pruebas experimentales pudimos identificar dos factores que tienen suma importancia en el desempeño del dispositivo funcional que utiliza el principio de funcionamiento descrito en esta tesis: el ruido y la alineación de los componentes.

Como vimos en la sección 2.3.4 un factor primordial para poder determinar correctamente la distancia a un objeto es la relación señal a ruido que tengamos. El análisis del ruido presente en el sistema experimental muestra que éste no produce errores significativos siempre que la relación señal a ruido es suficientemente grande. En nuestros experimentos conseguimos una relación señal a ruido adecuada para poder medir correctamente aumentando la cantidad de luz emitida por el objeto; no obstante, en un dispositivo práctico la forma de obtener la relación suficiente es optimizando los parámetros de este sistema. Por otra parte, debemos de considerar que en las pruebas donde estimamos el ruido del sistema, el dispositivo estaba completamente estático. En la realidad, al tomar las mediciones el sistema no está fijo, por lo que aparece otra fuente de ruido: las fluctuaciones de la luz recibida mientras se hacen las mediciones. Es por esto que es muy recomendable que la recolección de datos y el sistema encargado de mover el iris sean suficientemente rápidos para evitar este ruido debido a los cambios en la intensidad de la luz proveniente de la fuente. Idealmente, ambos datos deberían de ser tomados simultáneamente con las posiciones del iris exactamente idénticas cada vez que se realice una medición.

Por otra parte, la alineación imprecisa de los componentes resultó ser la principal fuente de error en nuestro dispositivo experimental y, a pesar de que estos errores no nos impidieron demostrar el principio de funcionamiento del sensor de distancias, resultarían desastrosos si no se eliminan al implementar un dispositivo funcional cuya aplicación fuera formar parte de un SESDV. Así, una alineación adecuada incluiría las especificadas en el capítulo 2, considerando un sistema mecánico muy preciso que permitiera posiciones del iris exactamente iguales cada vez que se realice una medición.

Algunas de las principales consideraciones, en cuanto a la alineación, que se debe hacer son:

- Mantener constantes las posiciones del iris. Esto se puede lograr si se utiliza un sistema mecánico muy preciso para ubicar al iris en sus dos posiciones.
- Cuidar las fronteras del cono de visión alineando el fotodiodo de forma adecuada. Si el fotodiodo no está perfectamente alineado con la lente y el iris, el cono de visión se puede ver recortado o desalineado con respecto al eje óptico, y por lo tanto puede tener errores en las mediciones.
- Cuidar los errores producidos por las señales fuera del cono de visión que llegan al detector. Como mencionamos anteriormente, debido a estructura del fotodiodo, algunas de las señales que están fuera del cono de visión llegan al detector por reflexiones en la montura del fotodiodo, pero no tocan (o están en el límite) del área sensible. Dichas señales pueden producir errores considerables; ante esto, se puede tratar de aislar ópticamente el área no sensible del detector.

Colocar el fotodiodo a la distancia focal de la lente. Como vimos en la sección 2.3.3, la ubicación ideal para el fotodiodo es a la distancia focal de la lente sobre el eje óptico. Si no se coloca en esta posición pueden producirse algunos errores, sobre todo a distancias cortas.

### 5.2.2 Optimización de los parámetros del sistema óptico

Una forma para mejorar la relación señal a ruido es la optimización de los parámetros ópticos. Al optimizar estos parámetros, también debemos de tomar en cuenta que tanto los elementos ópticos como su disposición en el dispositivo determinan el volumen del sistema. Esta característica es muy importante si consideramos que la aplicación deseada de este dispositivo es formar parte de un SESDV, y que, por lo tanto, parte de su éxito consistirá en las facilidades que brinde al usuario para ser transportado.

En primer lugar consideremos las características de la lente. Para mejorar el desempeño del dispositivo, debemos de buscar que la lente sea suficientemente delgada y no tenga dependencia al color de la luz recibida (acromática); de esta forma, el dispositivo experimental se apegará mucho más a las consideraciones teóricas de nuestro principio de funcionamiento. En cuanto al volumen del sistema, un parámetro que se puede mejorar en la lente es su distancia focal, ya que es mas conveniente que esta distancia sea más corta para disminuir el espacio requerido por el sistema. Además, reduciendo su distancia focal, se conseguiría una menor diferencia entre el plano imagen y el plano focal a distancias más cortas.

Además de lo anterior, podemos mejorar la relación señal a ruido en nuestro sistema cambiando algunos de los parámetros ópticos. Podemos utilizar una lente cuyo radio sea mayor y aumentar la apertura del iris; con esto la iluminación recibida en la lente (y por lo tanto el flujo luminoso capturado por el detector) será mayor. En consecuencia, la señal aumentará y la relación señal a ruido en nuestras mediciones de voltaje también. Sin embargo, al hacer esto tenemos que considerar lo siguiente: cuanto mayor sea la apertura del iris, mayor luz fuera del cono de visión se filtrará al sistema. Siempre que se tenga buen aislamiento óptico dentro del sistema (por ejemplo evitar que la superficie metálica del detector reciba mucha luz y evitar superficies que reflejen luz dentro del dispositivo) es conveniente aumentar la apertura del iris.

Por otra parte, podemos aumentar la distancia  $D$  que es igual a la separación entre las dos posiciones del iris. De esta forma la diferencia entre las señales  $V_1$  y  $V_2$  al hacer las mediciones será mucho más notoria y se disminuirá el efecto del ruido. Por ejemplo, si la distancia  $D$  es igual a 30 centímetros y la relación señal a ruido es de 80dB, podríamos tener una resolución de 41.7 micrómetros a 0.5 metros y de 9.38 milímetros a 7.5 metros. En este sentido existe un compromiso, por una parte es bueno aumentar  $D$ , pero por otra, esta distancia determina las dimensiones del dispositivo. Como mencionamos anteriormente, entre más pequeño sea el dispositivo, más fácil será para un usuario transportarlo.

### 5.2.3 Optimización de la estructura del dispositivo: Un sistema instantáneo

Como ya hemos mencionado anteriormente la implementación actual del dispositivo trae grandes problemas: primeramente, el desplazamiento mecánico requiere produce grandes errores; en segundo lugar, el tiempo que tardamos en mover el iris entre sus posiciones introduce ruido y hace lento al sistema. Una forma de eliminar estos problemas sería crear un dispositivo fijo con dos sistemas idénticos, que sólo difirieran en la distancia  $d$  entre el iris y la lente. En este dispositivo, los sistemas ópticos recibirían la misma iluminación proveniente del mismo blanco. Esto se puede lograr por medio de un divisor de haz y a continuación dos irises, dos lentes, dos detectores y dos circuitos amplificadores idénticos.

La creación de un dispositivo con dos sistemas eliminaría los errores ocasionados por las variaciones erróneas en las posiciones del iris debido a que éste ocuparía lugares fijos. De esta forma, únicamente se deben de alinear cuidadosamente los elementos del sistema una vez y procurar que no se muevan. Por otra parte, otra ventaja es que las mediciones de  $V_1$  y  $V_2$  se podrían tomar simultáneamente para obtener la señal  $S$ , garantizando así que las fluctuaciones en la luz recibida no causan ningún error.

Evidentemente, este diseño doble también trae algunas consideraciones adicionales. Por una parte, aumenta el volumen del dispositivo; por otra, aparecerán pequeños errores debido a las pequeñas diferencias entre los fotodiodos y los circuitos electrónicos del sistema fotodetector. Sin embargo, las ventajas que traería la implementación de este diseño serían mucho mayores que los errores ocasionados por estos efectos.

### 5.2.4 Optimización de los parámetros del sistema optoelectrónico.

Innegablemente, la clave para mejorar la relación señal a ruido de nuestro sistema (y en consecuencia la resolución y el alcance de éste) está en el sistema optoelectrónico. En general existen dos parámetros que podemos mejorar en este sistema: la responsividad del fotodiodo y la amplificación en el circuito amplificador de salida.

Para mejorar la responsividad del fotodiodo, se puede utilizar un fotodiodo de avalancha. Como vimos en la sección 3.2.1 este tipo de fotodetectores tiene genera una mayor corriente eléctrica que un diodo  $p-i-n$  cuando reciben energía por parte de los fotones incidentes.

En cuanto al circuito amplificador, es deseable que tenga una ganancia muy grande, mucho mayor que la empleada en el prototipo utilizado si se quiere determinar distancias cuando la luz disponible sea la luz ambiente. Sin embargo, una ganancia demasiado grande provocaría que el circuito se sature fácilmente si se apunta a zonas muy iluminadas, por lo que el diseño ideal de este amplificador debe de incluir una ganancia ajustable.

Por último, si se implementa un sistema doble (descrito en la sección 5.2.3) otra mejoría que se puede hacer es agregar un circuito electrónico que realice las operaciones entre las salidas de los dos circuitos amplificadores para obtener directamente la señal  $S$ .

### 5.3 PERSPECTIVAS

Como comentamos en el capítulo 1 el propósito de esta tesis es proponer un sistema sensor de distancias que pueda formar parte de un SESDV para evasión de obstáculos. También vimos que las tecnologías usadas actualmente en esta aplicación son el sonar y el láser. De esta forma, un objetivo más específico de esta investigación es brindar otra posible alternativa en la realización de un SESDV. Algo muy importante que se debe de considerar es que este principio de funcionamiento tiene parámetros de rango, resolución y cono de visión diferentes a los sensores de distancias existentes, por lo tanto, la información sería novedosa a una persona con discapacidad visual; sin embargo, se necesitaría hacer un estudio más exhaustivo para saber si esta información es realmente útil para una persona con estas necesidades visuales especiales.

Con respecto a las ventajas que potencialmente podría brindar un dispositivo que siguiera el principio de funcionamiento de esta tesis podemos decir que:

- El costo sería reducido: Debido a la simplicidad del principio de funcionamiento y la naturaleza de sus componentes, el costo sería accesible. Esta ventaja es algo sumamente importante, sobre todo para las personas con discapacidad visual en nuestro país.
- Rapidez de respuesta. En este dispositivo, el tiempo de respuesta no está limitado por ningún movimiento mecánico (considerando un sistema doble) ni por la necesidad de procesamiento de la señal (si se envía un estímulo táctil o sonoro directamente de la señal  $S$  de salida). De esta forma, el usuario recibiría una señal inmediata proporcional a la distancia a la que se encuentra el objeto más cercano en dirección a donde apunte este dispositivo con la mano y podría hacer un barrido rápido sobre un área de interés, logrando así reconocer ciertos ambientes.
- Posibilidad de mayor alcance. Actualmente los sensores de distancia empleados en SESDVs tienen rangos máximos de 4 metros. Si se garantiza una iluminación adecuada en nuestro sistema (siguiendo las optimizaciones antes propuestas) es posible superar este alcance. Además, si consideramos que la mayoría de las personas en nuestro país utilizan únicamente el bastón blanco, este dispositivo (de ser accesible) podría extender considerablemente su rango de percepción.
- Cono de visión reducido. El cono de visión es menor a  $3^\circ$ , por lo que de hacer un barrido apuntando el dispositivo a diferentes zonas del área de un objeto extenso (una pared, un cuarto) podría percibir detalles en la distribución de los objetos que tiene enfrente.

Las desventajas que este dispositivo puede tener son:

- Podría ser un dispositivo ligero pero no muy pequeño: La distribución que se necesita de los elementos que conforman este sistema pueden causar que no se pueda crear un SESDV demasiado pequeño.
- Necesita de cierta iluminación mínima para funcionar. Esto quiere decir que en zonas muy oscuras el rango de visión sea muy limitado. Ante esta situación se podría agregar un dispositivo que ilumine cuando la cantidad de luz sea limitada (por ejemplo, una lámpara de mano).

Hasta ahora hemos hablado del sistema sensor de distancias, pero otra parte fundamental para la construcción de un SESDV es la interfaz con el usuario. En realidad, esta parte queda completamente fuera del objetivo de esta tesis, no obstante es interesante aportar algunas ideas al respecto:

El principio de funcionamiento podría incorporarse a otros sistemas ya desarrollados para brindar información a una persona con discapacidad visual. La interfaz más sencilla consistiría en un circuito electrónico que brindara una señal proporcional a la señal *S* del sistema. Esta señal podría ser una vibración a través de un brazalete, lo cual ya está implementado en algunos SESDV. De esta forma, no causaría interferencia con las señales auditivas que la persona invidente puede recibir del medio ambiente y el brazalete ayudaría a sostener el dispositivo.

Además, es importante comentar que, por las características del sensor de distancias, difícilmente el SESDV propuesto podría sustituir al bastón blanco o al perro guía, ya que el cono de visión reducido y la necesidad mínima de luz no garantizarían total seguridad al usuario de este dispositivo. No obstante, este dispositivo sería valioso como instrumento complementario, ya que es capaz de brindarle información adicional acerca del ambiente en el que se encuentra y le da mayor alcance a lo que puede percibir. Por otra parte, también se podría emplear para implementar funciones adicionales a otros dispositivos de ayuda a invidentes. Por ejemplo, para detectar bajadas con mayor anticipación si se incorpora en el bastón blanco o como detector de obstáculos próximos a la altura de la cabeza si se incorpora en algún sombrero o sobre el hombro.

### **5.4 COMENTARIOS ADICIONALES**

La motivación principal de esta tesis fue iniciar el desarrollo de una tecnología alternativa a las existentes actualmente. Este trabajo, intenta ser el primer paso en el desarrollo de un sensor de distancias que brinde ventajas sobre los existentes actualmente y que pueda ser altamente útil en aplicaciones benéficas a la sociedad.

Es claro que en la actualidad, fuera del contexto de los SESDVs, existen sensores de distancias con características de alcance y resolución mucho mayores, que se basan en otros principios físicos. Pero también tenemos que tomar en cuenta que el desarrollo de estas tecnologías han tomado décadas para poder llegar al estado en el que están. En ese sentido, la principal ventaja que brindaría un sensor de distancias basado en este principio físico es la sencillez de su implementación y la posibilidad de ser un dispositivo muy barato; además de que puede alcanzar características que le permitan ser un instrumento útil en muchas aplicaciones.

## CONCLUSIONES

Este trabajo tuvo como objetivo principal contribuir al desarrollo de un sensor óptico pasivo para determinar distancias. Específicamente, tuvo como propósito proponer y probar un principio físico para desarrollar un dispositivo que determine distancias a partir de técnicas fotométricas, cuya principal aplicación fuera la ayuda a personas con discapacidad visual.

Así, la primera parte de este trabajo consistió en investigar sobre los principales dispositivos de ayuda a invidentes que existen y obtener una idea general de las necesidades visuales especiales. Describimos el estado del arte de los SESDVs y ubicamos este trabajo en el contexto deseado de acuerdo a su posible aplicación.

A continuación explicamos teóricamente el funcionamiento de la parte óptica del detector de distancias; para esto, obtuvimos un modelo teórico en el que se relaciona una señal  $S$  adimensional con la distancia  $S_o$  a la que se encuentra el objeto. Con respecto a este modelo, obtuvimos dos expresiones: una desarrollada y una simplificada, que nos brindan una aproximación muy buena al comportamiento del sistema.

Por otra parte, analizamos casos específicos que nos permitieron concluir que teóricamente este principio de funcionamiento sirve para realizar un sensor de distancias que no depende de las propiedades del objeto analizado, ni de la intensidad luminosa.

Después explicamos cómo está implementado el dispositivo experimental que sirvió para comprobar el principio de funcionamiento del sensor de distancias. Analizamos cada uno de los componentes del sensor, describiendo sus características más importantes dentro del sistema y explicando su funcionamiento dentro de éste. Asimismo resaltamos la importancia de una buena alineación de los componentes de la parte óptica para un buen funcionamiento del detector de distancias.

La parte primordial de este trabajo fue la comprobación experimental de nuestro análisis teórico. En esta parte pudimos obtener una curva de respuesta experimental, así como el funcionamiento práctico en diferentes condiciones. Estas pruebas experimentales nos permitieron confirmar que es posible desarrollar un sensor de distancias, con características favorables en la aplicación deseada, basado en el principio teórico propuesto. Además, mediante la experimentación pudimos identificar las principales deficiencias del diseño de nuestro prototipo inicial, permitiéndonos entender y evaluar las principales fuentes de error inherentes a la implementación del dispositivo.

Finalmente, todo este procedimiento nos permitió llegar a una serie de conclusiones y propuestas que pretenden brindar información valiosa para poderle dar continuidad a este trabajo.

De esta forma, podemos decir que se cumplieron satisfactoriamente los objetivos de esta tesis.

## REFERENCIAS

- [1] Comisión Nacional de los Derechos Humanos. “Los Derechos Humanos de las personas con discapacidad visual.” *Cartillas Sobre Grupos Vulnerables*, [Documento electrónico] (2002), disponible en HTTP: <http://www.cndh.org.mx/losdh/cartillas/dvisual.pdf>
- [2] Centro de desarrollo Visual. “Visión: un conjunto de habilidades” [Documento electrónico],[2006 feb 23], Disponible en HTTP: <http://www.centrodedesarrollovisual.com/vistaovision.htm>
- [3] Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. “Estadísticas Sociodemográficas de la población con discapacidad”, *XII Censo General de Población y Vivienda 2000*, [Sitio de Internet], Disponible en HTTP: <http://www.inegi.gob.mx>
- [4] The National Academy of Sciences. Electronic Travel Aids: New Directions for Research. Washington, D.C.: National Academy Press, 1986.
- [5] S. Shoval, S. Ulrich, I. Borenstein, “ Computerized Obstacle Avoidance System for the Blind and Vidually Impaired.” Invited chapter in Intelligent System and Tehnologies in Rehabilitation Engineering. 26 dic, pp.414-418, 2000.
- [6] “Escuela para Entrenamiento de Perros Guía para Ciegos I.A.P.” [Sitio de Internet] Disponible en HTTP: <http://www.perrosguia.org.mx/>
- [7] B. Andó, “Electronic Sensory System for the Visually Impaired.” IEEE Instrumentation and Measurement Magazine, Jun., 2003.
- [8] J.Gill, “Developments in electronic mobility systems.” *New Beacon*, [revista digital] 81(959), (1997 dic), Disponible en HTTP: [http://www.rnib.org.uk/xpedio/groups/public/documents/visugate/public\\_nbdec97.hcsp#P3\\_90](http://www.rnib.org.uk/xpedio/groups/public/documents/visugate/public_nbdec97.hcsp#P3_90)
- [9] D. Hsi Yen, “ Electronic Travel Aid” [Recurso electrónico], (2005 Sep 21), [citado 2006 feb 22], Disponible en HTTP: <http://www.noogenesis.com/eta/current.html>
- [10] L. Ball, “Down with dogs and canes? A real life guide to the new electronic mobility gizmos for visually impaired people “ *Ouch!*, [Artículo electrónico], Disponible en HTTP: <http://www.bbc.co.uk/ouch/closeup/gizmo.shtml>
- [11] J. Brabyn, “Technology as a support system for orientation and mobility-Orientation and Mobility for Blind People.”, American Rehabilitation, autumn-winter, 1997.

- [12] E. García, H. Lamela. “Low-cost three-dimensional vision system based on a low-power semiconductor laser rangefinder and a single scanning mirror” Optical Engineering, vol. 40, num.1, Ene., 2001.
- [13] P. Tippens, Física, Conceptos y Aplicaciones, México: McGraw-Hill, 1988.
- [14] E. Hecht, A. Zajac, Óptica, E.U.A.: Fondo Educativo Interamericano, 1977.
- [15] J.L. Devore Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias, México, Internacional Thomson Editores, S.A., 2001.
- [16] Edmund Optics “Silicon Detectors”, Optics and Optical Instrument Catalog 2005, pp.201.
- [17] N. Menn, Practical Optics, E.U.A., Elsevier Academic Press, 2004.
- [18] G.P. Agrawal, Fiber-Optic Communication Systems, New York, John Wiley & Sons, Inc, 2002
- [19] K. Honkanen, “Fabrication and Modelling of SOI and GaAs MSM Photodetectors and a GaAs-based Integrated Photoreceiver”, Reportes en Física Electrónica, Helsinki University of Technology Reports 2001/29. Espoo, October 2001
- [20] A. Guadarrama, “Desarrollo de Fotodetectores Electrónicos”, Reporte Técnico del CCADET, 2005.
- [21] T. Kennedy, “Basic Principles of Silicon Detectors” *Edmund Industrial Optics Technical Support*, [Artículo de Internet], disponible en HTTP: <http://www.edmundoptics.com/techsupport>.
- [22] R. Pallás, Sensores y acondicionadores de señal, México: Alfaomega Grupo Editor, 2001.