



INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA BENEMÉRITA UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA DE PUEBLA

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN DISPOSITIVOS SEMICONDUCTORES

POSGRADO EN DISPOSITIVOS SEMICONDUCTORES

TITULO DE TESIS:

**SENSORES DE VISIÓN OMNIDIRECCIONAL CON BASE EN
SISTEMAS CATADIÓPTRICOS CON FOTORRECEPTORES
INFRARROJOS DISCRETOS PARA ROBÓTICA DE ENJAMBRE.**

TESIS SOMETIDA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN DISPOSITIVOS SEMICONDUCTORES

PRESENTADA POR: JOSE FERNANDO CONTRERAS MONSALVO

DIRIGIDA POR:

DR. VÍCTOR DOSSETTI ROMERO

DRA. BLANCA SUSANA SOTO CRUZ.

BUAP, MARZO 2026

TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS

BECA CONACYT 811750

Dedicatorias

Para ti, siempre vivirás en mi mente y corazón. No hay mejor título, que ser tu hijo. Te amo papá.

Agradecimientos

Gracias a dios por la oportunidad y la dicha que me da de cumplir mis sueños en la vida.

Gracias papá, por apoyarme siempre en mis metas y sueños. Siempre fuiste un ejemplo para mí de constancia, trabajo y de no conocer la palabra rendirse. Todo lo que soy es, en gran medida por ti, y siempre te estaré agradecido. Espero verte un día para abrazarnos y nunca más separarnos.

Gracias a mi madre por su apoyo, amor y paciencia, por estar en los momentos difíciles de mi vida.

Gracias a mi hermano Eduardo por su apoyo.

Gracias Bety, por tu amor incondicional, por tu apoyo constante y por haber regresado a mi vida en el momento perfecto. Eres una mujer única y excepcional, alguien a quien admiro profundamente y de quien he aprendido tanto. Tu fortaleza y tu manera de ver la vida me inspiran cada día. Te amo con todo mi corazón

Un extenso agradecimiento al Dr Victor Dossetti Romero y a la Dra. Blanca Susana Soto Cruz por todo su apoyo brindado durante el desarrollo de esta tesis.

Mi total agradecimiento al Dr. Salvador Alcantara Iniesta, a la Dra.

Reyna Galeazzi Isasmendi, al Dr. José Juan Martín Mozo Vargas, al Dr. Abraham Pacio Castillo y al Dr. Edgar Hernández Palafox por sus consejos y recomendaciones que hicieron mejor este trabajo.

Gracias a mis amigos incondicionales y leales, ody y nena, que son ángeles con colita.

Agradezco a CONACYT por la beca otorgada con número de registro: 811750.

Índice general

Capítulos	Página
Lista de figuras	6
1. Introducción	16
1.1. Organización de la tesis.	19
1.2. Justificación.	20
1.3. Objetivo General.	21
1.4. Objetivos particulares.	21
2. Marco Teórico.	23
2.1. Visión Robótica.	23
2.2. Cámaras no centrales	25
2.3. Cámaras centrales	26
2.4. Sensores catadióptricos	27
2.5. Óptica geométrica	30
2.6. Formación de imágenes y aproximación puntual.	32
2.6.1. Extracción y descripción de características locales . . .	33
2.6.2. Extracción y descripción de características globales . .	33

2.7. Materia activa	34
2.8. Interpolación spline	35
2.9. Robótica enjambre	37
3. Desarrollo experimental.	38
3.1. Prototipo robótico	38
3.2. Integración en CAD del prototipo robótico con el sensor de visión.	44
3.3. Caracterización de componentes discretos.	45
3.4. Diseño y fabricación de los espejos.	52
3.5. Caracterización de sensores.	60
4. Resultados y modelos matemáticos.	70
5. Conclusiones	78

Índice de figuras

2.1. Robot Goalie [29].	25
2.2. Cámaras catadióptricas no centrales [30].	26
2.3. Cámaras catadióptricas centrales [30].	27
2.4. Sensor catadióptrico [30].	28
2.5. Imagen omnidireccional obtenida con un espejo hiperbólico y una cámara de perspectiva convencional. Observe el predominio típico del cielo en la imagen [33].	29
2.6. Una imagen especular cónica que muestra una zona de césped, una zona pavimentada y parte de una chaqueta, tomada con una cámara de perspectiva convencional. La imagen especular completa muestra datos útiles. La punta del cono apuntaba hacia arriba [33].	30
2.7. Ley de la reflexión [37].	31
2.8. Simetrías que pueden surgir a partir de interacciones locales en sistemas de materia activa (a) isotrópica, (b) polar y (c) nemática [43].	35
2.9. Interpolación cúbica (Spline) [44].	36
2.10. Robotica enjambre: Kilobot [46].	37

3.1. Diagrama a bloques de los componentes de estado sólido que componen el prototipo de robot sobre el cual se integrará uno de los sensores de visión desarrollados en este trabajo.	40
3.3. Diseño esquemático del circuito de la placa inferior del prototipo robótico.	42
3.4. Vista superior de la placa inferior de circuito impreso	42
3.5. Vista inferior de la placa inferior de circuito impreso.	43
3.6. Integración en CAD de la placa inferior con diámetro de 66 mm del prototipo robótico con componentes discretos, partes mecánicas y eléctricas.	44
3.7. Integración en CAD de la placa inferior del prototipo robótico con componentes discretos, partes mecánicas y eléctricas. . . .	45
3.8. Foto de la pantalla donde se indica la distancia entre muescas (20mm). En (b), procesamiento de la fotografía en el software Fusión 360 para calcular diámetro de la luz incidente con la finalidad de calcular el ángulo de emisión de LED.	46
3.9. En (a) y (e), diseño CAD y dispositivo de prueba para la caracterización del cono de luz emitido por el LED IR, respectivamente. En (b), (c) y (d), fotografías tomadas con una cámara sensible a IR utilizando la pantalla de 0,6 mm de espesor a distancias de 20, 30 y 40 mm de la base del LED. En (f), (g) y (h), fotografías tomadas utilizando la pantalla de 0,8 mm de espesor a distancias de 20, 30 y 40 mm de la base del LED.	47

3.10. Diagrama esquemático utilizado para determinar el ángulo del cono θ_{fp} , así como la posición aparente x_{fp} del punto focal de la fuente de luz del LED a partir del diámetro ϕ_i del círculo que cubre el área iluminada en la pantalla (obtenido al analizar las fotografías de la Figura 3.9) a una distancia x_i desde el frente de la pantalla hasta la base del LED infrarrojo.	48
3.11. Riel de pruebas que se desarrolló para realizar todas las mediciones experimentales de este trabajo. Este arreglo experimental cuenta con un rodamiento lineal que nos permite variar la distancia entre dos bases que pueden girar 360° , brindándonos así un total de tres grados de libertad: uno longitudinal y dos rotacionales.	50
3.12. Los rodamientos, uno lineal montado en el tubo cuadrado superior y dos rotacionales, uno montado en uno de los postes del riel y el otro en el carro sobre el rodamiento lineal.	50
3.13. Patrones de recepción de PD (a) y de emisión de LED (b) medidos. Se obtuvo una lectura de la señal cada 1 cm a medida que aumentaba la distancia, y con una resolución angular correspondiente a 1 cm de arco, cubriendo 360° para cada caso. Las líneas verdes en (b) representan el cono de emisión del LED desde el ángulo obtenido con el análisis de las fotografías de la Figura 1, utilizando el arreglo con la pantalla móvil.	52
3.14. Sensor de visión con diseño vertical, donde los ocho PDs están dispuestos en un círculo y apuntando hacia arriba en el espejo.	53

3.15. Sensor de visión con diseño flor. Los ocho PD están dispuestos horizontalmente, paralelos al espejo y apuntando hacia afuera.	54
3.16. Diseños CAD para la estructura de los componentes discretos, un LED en el centro, apuntando hacia arriba al espejo, y ocho PD dispuestos en la base en un patrón circular y apuntando hacia arriba para el diseño vertical (a), y horizontalmente y apuntando hacia afuera para el diseño inferior (b). Los espejos están sostenidos por tres postes delgados en la parte superior de los componentes discretos.	55
3.17. Espejo de dos etapas para el diseño vertical: una etapa para el emisor y una segunda para los receptores apuntando hacia arriba.	56
3.18. Sección transversal y análisis óptico geométrico realizados en GeoGebra para el diseño vertical en (a) y (b) y para el diseño en forma de flor en (c). En (d) y (e), detalles de las dimensiones de los espejos, así como sus estructuras para el diseño vertical y en forma de flor, respectivamente. En (f), prototipos impresos en 3D de los espejos. En (g), resultados del proceso de alisado de los espejos después del pulido y pintado. En (h) e (i), pruebas de iluminación con los sensores integrados para los diseños vertical y en forma de flor, respectivamente. Estas fotografías fueron obtenidas con una cámara sensible a infrarrojo.	59

3.19. Montajes experimentales para la medición del patrón de emisión de un sensor integrado (a) y para el patrón de recepción (b). En el primer caso, un sensor integrado con un LED se coloca en la base en el poste de la plataforma de prueba, mientras que un PD (apuntando hacia el sensor) se monta en la base en el carro. En el segundo caso, un sensor integrado con un LED se coloca en el carro, iluminando un sensor completamente integrado colocado en la base en el poste de la plataforma de prueba.	62
3.20. Patrones de emisión medidos para el diseño vertical (a) y flor (b), respectivamente. Las sombras producidas por los tres postes que soportan los espejos son apreciables.	63
3.21. En (a), patrón de recepción acumulado para el diseño vertical. Un ejemplo de la señal medida para cada PD en función de la orientación se muestra en las curvas discontinuas con símbolos a una distancia de 70 mm para el camino libre (free path) en (b) y para el camino con obstáculo (post path) en (c) para el mismo diseño. Las curvas sólidas corresponden al modelo desarrollado en el Capítulo 4. En (d), patrón de recepción acumulado para el diseño flor. Un ejemplo de la señal medida de cada PD en función del ángulo de orientación se muestra con las curvas discontinuas con símbolos para una distancia de 70 mm para el camino libre (free path) en (b) y el camino con obstáculo (post path) en (c) para el mismo diseño. Las curvas sólidas corresponden al modelo desarrollado en el Capítulo 4. .	65

3.22. Patrones de recepción individuales medidos para cada fotodiodo para el diseño vertical con camino libre para la luz emitida por el LED y reflejada por el espejo.	66
3.23. Patrones de recepción individuales medidos para cada fotodiodo para el diseño vertical con camino con obstáculo (uno de los postes del soporte del espejo) para la luz emitida por el LED y reflejada por el espejo.	67
3.24. Patrones de recepción individuales medidos para cada fotodiodo para el diseño flor con camino libre para la luz emitida por el LED y reflejada por el espejo.	68
3.25. Patrones de recepción individuales medidos para cada fotodiodo para el diseño flor con camino con obstáculo (una de los postes de soporte del espejo) para la luz emitida por el LED y reflejada por el espejo.	69

4.1. En (a) y (f), gráficos dispersos representados con símbolos abiertos para los datos suavizados, centrados y de promedio de las señales brutas de los PD individuales de las trayectorias libres y con obstáculo combinadas, en función del ángulo de orientación y para distancias seleccionadas d para los diseños verticales y de flor, respectivamente. Las curvas sólidas corresponden a los mejores ajustes con la función pseudo-Voigt de la ecuación (4.1). En (b) a (e), muestra el ajuste no lineal en función de la distancia de los datos para los parámetros y_0 , A , μ y w de la función pseudo-Voigt para el diseño vertical. En (g) a (j), describe el ajuste no lineal en función de la distancia de los datos para los parámetros y_0 , A , μ y w de la función pseudo-Voigt para el diseño vertical.	72
4.2. Error absoluto medio que compara la distancia y orientación experimentales con las predichas al invertir el modelo, como función de la distancia d y promediada sobre la orientación θ para cada incremento en la distancia para los dos diseños: vertical con curvas rojas con círculos y con curvas sólidas negras con cuadrados.	77

Abstract

In this work, two omnidirectional vision sensor designs for swarm robotics, based on catadioptric arrays consisting of a rotationally symmetric mirror, eight discrete infrared photodiodes, and a single LED, were fabricated and studied to provide localization and navigation capabilities to mobile robotic agents. Two photodiode arrangements were considered: one pointing upwards toward the mirror, and one pointing outwards perpendicular to the mirror. To determine which design offers a better in-plane field of view, as well as distance and orientation detection between two agents, a three-degree-of-freedom test rail was additionally developed to experimentally and systematically measure the signal recorded by the photodiodes of a given sensor (in a single reading) from the light emitted by another as a function of distance and orientation. Subsequently, the experimental data were processed and analyzed to develop mathematical models for the average response of a photodiode in each design. Finally, the accuracy of both designs was compared by numerical inversion of the models. The results show that the design with the photodiodes pointing upwards best resolves distance, while the other design better resolves the orientation of the emitting agent; both provide an omnidirectional field of view.

Resumen

En este trabajo, se fabricaron y estudiaron dos diseños de sensores de visión omnidireccional para robótica de enjambre, basados en sensores catadióptricos que consisten en un espejo con simetría rotacional, ocho fotodiodos infrarrojos receptores discretos y un solo LED emisor. Con la finalidad de proporcionar capacidades de localización y navegación a agentes robóticos móviles. Se consideraron dos configuraciones para los ocho fotodiodos: una que apunta hacia arriba con dirección al espejo y otra que apunta hacia afuera en forma de pétalos de flor, que es perpendicularmente al espejo. Con la finalidad de determinar el diseño que ofrece un mejor campo de visión en el plano o superficie, así como la ubicación con base a la detección de la distancia y la orientación entre dos agentes robóticos. Se desarrolló un riel de prueba con tres grados de libertad para medir experimentalmente y sistemáticamente la señal registrada por los fotodiodos de un sensor dado (en una sola lectura) a partir de la luz emitida por el LED en función de la distancia y la orientación. Posteriormente, se realizó el procesamiento y análisis de los datos experimentales para desarrollar modelos matemáticos para determinar la respuesta media de un fotodiodo en cada diseño. Finalmente, mediante la inversión numérica de los modelos

matemáticos, se comparó la precisión con la que predice la localización en la que se encuentra uno de los agentes robóticos con respecto al otro de ambos diseños. Los resultados muestran que el diseño con los fotodiodos apuntando hacia arriba tiene mejor respuesta a la localización con respecto a la distancia, mientras que el otro obtiene mejor respuesta a la orientación con respecto al emisor. Ambos proporcionan un campo de visión omnidireccional.

Capítulo 1

Introducción

La localización es un factor clave para implementar la navegación y el control de movimiento en sistemas robóticos móviles autónomos. Existen muchos métodos que se pueden implementar para este propósito. Por ejemplo, el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) el cual es una solución simple, para robots que se mueven al aire libre. Por otro lado, los métodos basados en sensores internos (odometría), basados en mapas y Localización y Mapeo Simultáneos (SLAM), pueden ser más adecuados para robots que se mueven en interiores, donde los sistemas GPS son menos confiables [1, 2]. En cuanto a los sistemas internos de visión por computadora, si el tamaño, la potencia y las capacidades computacionales de los agentes robóticos lo permiten, los sensores catadióptricos basados en cámaras se han integrado habitualmente, durante muchos años, ya que algunos de ellos pueden proporcionar un campo de visión (FOV del inglés field of view) omnidireccional con detección de largo alcance [3, 4, 5, 6, 7, 8]. Como tal, se han desarrollado varios tipos de robots móviles, con diferentes tamaños y diseños, para diferentes aplicaciones

que abarcan la oficina, entornos militares, hospitales, la industria, entornos peligrosos, campos agrícolas, entre otros [9]. A pesar de todos los avances logrados con los sistemas de visión catadióptrica basados en cámaras, con respecto a la localización y navegación, la mayoría de ellos (si no todos) no son adecuados para una de las aplicaciones de gran interés como la robótica de enjambre. La robótica de enjambre es un enfoque técnico donde múltiples robots trabajan juntos para resolver múltiples problemas a la vez, o específicos, a través de la interacción (típicamente local) y cooperación de los agentes robóticos que forman el grupo [10, 11, 12]. Por lo general, todas las unidades del enjambre son del mismo diseño, tamaño y capacidades, y favorece el desarrollo de robots móviles pequeños y sencillos que son factibles de fabricar, hecho que permite el desarrollo de grupos con un gran número de unidades, como el desarrollado en [13], en donde se utilizaron miles de ellos. A lo largo de los años, se han desarrollado diferentes sistemas robóticos de enjambres (SRS del inglés *swarm-robotics systems*), desde diseños muy simples autopropulsados sin sensores para el estudio de comportamientos colectivos complejos [14], hasta la esterilización ultravioleta (UV) de espacios para ayudar a mantener estándares adecuados de limpieza e higiene [11]. En otras aplicaciones, por ejemplo, los SRS también se han utilizado para estudiar fenómenos como agregación y autoensamblado [13, 15, 16], así como el despliegue, en el mundo real, de enjambres de vehículos aéreos homogéneos descentralizados e independientes de la infraestructura sin comunicación explícita [17]. En cuanto a las plataformas diseñadas específicamente para la robótica de enjambre, se mencionan algunas como Jasmine [18, 19], Alice [15, 22], AMiR [20, 21] y Kilobot [13, 23], donde los principios de

movimiento, los mecanismos de actuación y las virtudes de velocidad del posicionamiento aproximado han sido el foco de estudios intensivos [24]. No obstante, estos sistemas se han basado típicamente en sistemas de visión infrarroja (IR) de corto alcance muy simples con receptores discretos, para detectar obstáculos, navegar por su entorno y/o implementar la comunicación entre los agentes. Específicamente, Jasmine emplea seis disposiciones de emisor/receptor IR distribuidos uniformemente alrededor del robot para detección de proximidad, detección de obstáculos, medición de distancia y comunicación. El rango de detección en este diseño se eligió para ser de aproximadamente 7 cm e implica que el robot se detenga y gire para formar una mejor imagen de un obstáculo encontrado. AMiR utiliza una topología similar. Por otro lado, Alice tiene cuatro sensores infrarrojos que permiten la detección de obstáculos pasivos a distancias de hasta 3 cm simultáneamente, con comunicación bidireccional de hasta 6 cm. En contraste, Kilobot explota varias opciones de diseño no convencionales, como reflejar la luz infrarroja de la superficie de la mesa para la comunicación y la detección de distancias de hasta 1 cm entre robots, con algunos desplazándose para determinar la orientación. Como tal, estos sistemas tienen capacidades de visión de corto alcance limitadas en comparación con diseños más complejos que incluyen sistemas catadióptricos basados en cámaras. Esto puede entenderse como que los SRS generalmente emplean microcontroladores para todas sus necesidades computacionales, incluido el control de movimiento, la visión, la navegación y la comunicación. En contraste, los sistemas catadióptricos convencionales son costosos y computacionalmente prohibitivos para su aplicación en robótica de enjambre, ya que esto requeriría prototipos más grandes y costosos,

con mayores requisitos de energía, lo que limita el número de unidades que podrían usarse en este contexto. En este proyecto de tesis, se ha desarrollado y estudiado dos diseños de sistemas de visión catadióptrica omnidireccional que consisten en un emisor IR, ocho receptores discretos y un espejo. Nuestro objetivo es proporcionar a un pequeño robot de robótica de enjambre una visión de 360 grados en el plano con detección de largo alcance con respecto a la distancia y la orientación de otros individuos, que pueda utilizarse también con fines de comunicación entre ellos. Los sensores de este tipo, con un número pequeño y discreto de receptores, están relacionados con sensores visuales de inspiración biológica capaces de realizar tareas de navegación con unos pocos "píxeles" [25, 26]. A lo largo de la tesis proporcionamos detalles sobre el diseño y fabricación de los sensores, así como las mediciones experimentales realizadas. También se explica el procesamiento de los datos experimentales. Además, considerando las limitaciones computacionales que puede tener un pequeño robot móvil para robótica de enjambre, desarrollamos un marco matemático simple con bajo costo computacional, que puede implementarse con un microcontrolador, para realizar dicha detección a partir de las señales obtenidas a través de los receptores IR en una sola lectura. Finalmente, se proporcionan detalles sobre la precisión de los dos diseños con respecto a las mediciones de distancia y orientación.

1.1. Organización de la tesis.

La presente tesis se estructura de la siguiente manera:

-
- Capítulo 1. Introducción. Se muestra el estado del arte de trabajos realizados que inspiran la realización de este proyecto de tesis
 - Capítulo 2. Marco teórico. Se describe conceptos básicos en el análisis y estudio de espejos para su aplicación en sensores de visión omnidireccional.
 - Capítulo 3. Desarrollo experimental. Se desarrolla la metodología para el diseño y fabricación de los espejos, así como la configuración para la obtención de dos diseños: vertical y flor.
 - Capítulo 4. Resultados y modelos matemáticos. Se desarrolla la obtención y análisis de los patrones de emisión y recepción de los sensores de visión omnidireccional obtenidos de las señales infrarrojas de ambos diseños. Además, se estudia los modelos matemáticos que se ajustan a los resultados obtenidos a través de ecuaciones matemáticas para su estudio y análisis de resultados.
 - Capítulo 5. Conclusiones.

1.2. Justificación.

En este trabajo se propone diseñar un sensor de visión omnidireccional para un sistema robótico escalable, el cual consiste en ocho fotorreceptores infrarrojos, un emisor infrarrojo LED y un espejo con simetría rotacional arreglados en un sistema catadióptrico. El sistema integrado de espejo, receptores y emisor permite un campo de visión amplio a los individuos, no solo para determinar la distancia con respecto a sus vecinos, sino también

para ubicar su dirección. Además, este sensor podría emplearse como sistema de comunicación para el intercambio de mensajes simples entre individuos con un protocolo de comunicación adecuado. Considerando la mejora respecto a localización que proponen los sensores a desarrollar en este trabajo de tesis en contraste con diseños anteriores que se pueden encontrar en la literatura, con base a la posición y orientación entre individuos. Esto hará posible que el enjambre robótico implemente algoritmos de comportamientos colectivos más complejos y de manera más eficiente, como resultado impactará directamente a un procesamiento de datos menos complejo, y un sensor de visión omnidireccional eficiente y de bajo costo.

1.3. Objetivo General.

Desarrollar sensores de visión omnidireccional con base en sistemas catadióptricos consistentes en un espejo con simetría rotacional y receptores y emisor infrarrojos para su aplicación en robótica de enjambre en un plano.

1.4. Objetivos particulares.

- Diseñar dos sensores de visión omnidireccional con rango de interacción local con base en sistemas catadióptricos consistentes en un espejo con simetría rotacional.
- Diseñar los espejos con simetría rotacional y realizar estudios de óptica geométrica en relación con el rango de interacción deseado.

-
- Desarrollar un proceso de fabricación de espejos alrededor de la fabricación aditiva con una impresora 3D.
 - Desarrollar un arreglo experimental para la caracterización y medición sistemática y automatizada de los patrones de emisión y recepción de los sensores de visión omnidireccional.
 - Desarrollar un modelo matemático para determinar la distancia y orientación entre sensores a partir del análisis de señales.

Capítulo 2

Marco Teórico.

Resumen

En este capítulo se desarrollan, de forma general, algunos aspectos teóricos relacionados con los objetivos de la tesis. Desde visión robótica y los diversos sistemas que se han estudiado, hasta aspectos de materia activa y robótica de enjambre, lo cuales inspiran y exponen la necesidad del desarrollo de sensores de visión como los introducidos en este trabajo.

2.1. Visión Robótica.

La geometría es importante en varios aspectos de la visión robótica omnidireccional, desde el diseño y modelado de sensores y cámaras, pasando por el análisis de imágenes, hasta la estructura a partir del movimiento. La principal motivación es la adquisición de imágenes con campo de visión muy amplio que puede ser panorámico, hemisférico, completamente esférico

o algo intermedio. Los objetivos son claros: un campo de visión tan amplio nos permite visualizar o analizar una escena de forma más completa en 2D y detectar obstáculos u objetos con los que interactuar, todo alrededor de un robot. También resulta que la estimación del movimiento es generalmente más estable y precisa con un campo de visión grande. Además de estos intereses prácticos, también puede haber otros, como la estética en el diseño [27]. Se han desarrollado varias soluciones técnicas para obtener imágenes omnidireccionales. Las primeras se basaban en girar una cámara convencional o hecha a medida sobre sí misma y unir las imágenes adquiridas durante la rotación para formar una imagen que representará un campo de visión extendido, un enfoque que hoy en día se proporciona como una característica básica en la mayoría de las cámaras digitales de consumo. Las desventajas obvias son que la adquisición de imágenes no es instantánea, lo que dificulta su funcionamiento en contextos dinámicos o su uso para la adquisición de vídeo omnidireccional, y que requiere un procesamiento de imágenes que puede no ser exitoso para todo tipo de imágenes. Por lo tanto, se desarrollaron soluciones alternativas, especialmente de dos tipos. Una consiste en desarrollar diseños de lentes capaces de proporcionar los grandes campos de visión buscados, en particular, objetivos de visión con campos de visión que hoy en día incluso superan los 180° . La otra, bastante popular en robótica en las últimas décadas, es utilizar espejos para mejorar el campo de visión de una cámara, dando lugar a sistemas bautizados como cámaras catadióptricas [27]. Los sistemas de visión omnidireccional ofrecen ventajas adicionales en comparación con los sistemas de visión convencionales. Las características que aparecen en las imágenes son más estables, ya que

permanecen más tiempo en el campo de visión a medida que el robot se mueve. Además, proporcionan información que permite estimar la posición del robot, independientemente de su orientación, y también permiten estimar dicha orientación. En general, los sistemas de visión omnidireccional pueden capturar una descripción más completa del entorno en una sola escena, lo que permite crear modelos exhaustivos del entorno con un número reducido de captura de imagen [28].



Figura 2.1. Robot Goalie [29].

2.2. Cámaras no centrales

En esta configuración no existe solo un punto focal, es decir, los rayos de luz que inciden en el espejo lo realizan en distintas direcciones dependiendo

de la geometría del sistema catadióptrico hasta interseccionar con un plano perpendicular nombrado plano de la imagen donde se ubica la cámara (Fig 2.2).

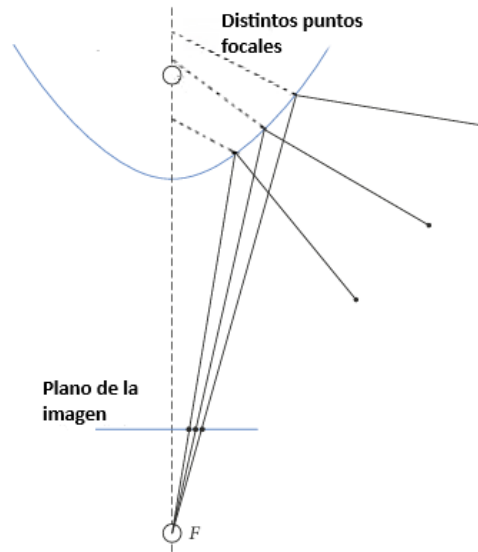


Figura 2.2. Cámaras catadióptricas no centrales [30].

2.3. Cámaras centrales

Al contrario de la cámara no central, en la cámara central los rayos de luz inciden en un punto focal con dirección a interseccionar en el plano plano de imagen que es perpendicular al espejo (Fig 2.3).

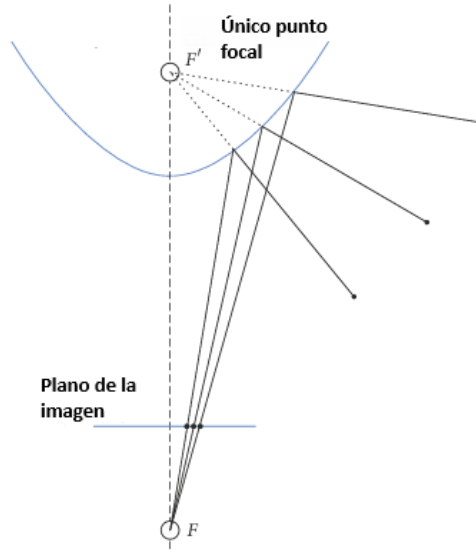


Figura 2.3. Cámaras catadióptricas centrales [30].

2.4. Sensores catadióptricos

Los sensores catadióptricos consisten en una cámara dióptrica fija, generalmente montada verticalmente, y un espejo fijo rotacionalmente simétrico suspendido por encima o por debajo de la cámara (Fig. 2.4). Las ventajas de los sensores catadióptricos residen en que, a diferencia de las cámaras rotatorias, su escaneo del entorno es casi instantáneo, siendo el tiempo de exposición de la cámara generalmente más corto que el tiempo de rotación mecánica de círculo completo. Un tiempo de exposición más corto implica menos problemas de captura de imágenes causados por el movimiento y la vibración de la cámara, o por objetos en movimiento [31]. Los elementos catadióptricos se emplean comúnmente en sensores de visión para capturar

imágenes panorámicas y multivista. Los primeros se obtienen principalmente mediante espejos curvos y los segundos mediante espejos multiplanos [32]. Sin embargo, el uso de espejos curvos conduce a sensores catadióptricos centrales (punto de vista único efectivo) solo bajo severas restricciones en la ubicación de la cámara con respecto al espejo. Los sensores catadióptricos no centrales aumentan la flexibilidad en el posicionamiento de los dispositivos de imagen, pero introducen dificultades en el modelado analítico de la función de mapeo [28]. El principal problema práctico de los sensores catadióptricos es que los detalles de la imagen pueden tener una resolución relativamente baja, ya que esta representa un área extensa. Desafortunadamente, este problema de resolución se agrava con los espejos cuyas formas presentan secciones transversales curvas. Estos espejos de curvatura radial incluyen los tres populares espejos de superficie cuadrática (elíptico, hiperbólico y parabólico), que se sabe que poseen un único punto de vista en sus focos [31]

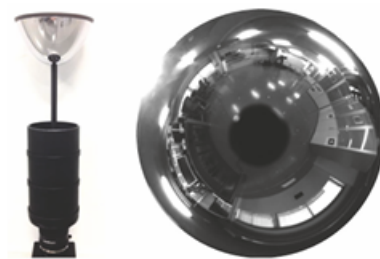


Figura 2.4. Sensor catadióptrico [30].

Los sensores catadióptricos son ampliamente utilizados en robótica y visión por computadora. Su popularidad es principalmente debido a su capacidad para adquirir imágenes de 360 grados con una sola toma. Se

han utilizado para la reconstrucción 3D de grandes entornos, robótica y videovigilancia. Además, el seguimiento humano en 3D en entornos complejos o desordenados, sigue siendo un problema difícil y desafiante a pesar del extenso trabajo de investigación realizado en la literatura [33]. En años recientes, los requerimientos para la realización de mediciones, a partir de sensores de visión, han aumentado y el escenario de medición ha llegado a ser más complejo. Requerimientos como bajo costo, tamaños más pequeños, ligeros, un campo más amplio de visión y una rápida medición se han impuesto sobre sensores catadióptricos [34].



Figura 2.5. Imagen omnidireccional obtenida con un espejo hiperbólico y una cámara de perspectiva convencional. Observe el predominio típico del cielo en la imagen [33].

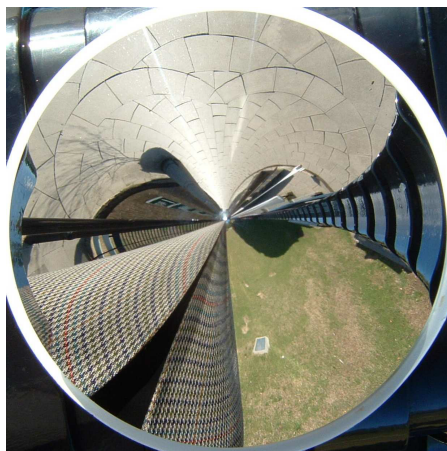


Figura 2.6. Una imagen especular cónica que muestra una zona de césped, una zona pavimentada y parte de una chaqueta, tomada con una cámara de perspectiva convencional. La imagen especular completa muestra datos útiles. La punta del cono apuntaba hacia arriba [33].

2.5. Óptica geométrica

La longitud de onda de la luz suele ser muy pequeña en comparación con el tamaño de obstáculos o aberturas que se encuentra a su paso. Esto permite en general despreciar los efectos de interferencia y difracción asociados al carácter ondulatorio de la luz. Sobre esta hipótesis se supone una propagación rectilínea de los rayos de luz dando lugar a la disciplina conocida como óptica geométrica. Los axiomas sobre los que se construye la óptica geométrica son [35]:

- Las trayectorias de los rayos de luz en los medios homogéneos e isótropos son rectilíneas.
- El rayo incidente, el refractado y la normal están en un mismo plano.

-
- Se cumple la ley de la reflexión.
 - Se cumple la ley de la refracción.
 - Las trayectorias de la luz a través de distintos medios son reversibles.
 - . No existe interacción entre los diferentes rayos.

El tipo clásico de reflexión de la luz es la reflexión especular, del latín *speculum* (espejo), o reflexión regular. Este tipo de reflexión se observa en superficies lisas, por ejemplo, en piezas de metal o vidrio pulido, incluyendo casos con reflexión interna total, o en superficies de líquidos. En este caso, el ángulo de la luz reflejada, medido respecto a la normal a la superficie, es igual al ángulo de la luz incidente. Esta situación suele presentarse con gran precisión en diversos tipos de espejos planos (Fig. 2.7). En superficies reflectantes curvas, también se obtiene una reflexión especular; los ángulos de incidencia y de salida se miden entonces respecto a la normal local [36].

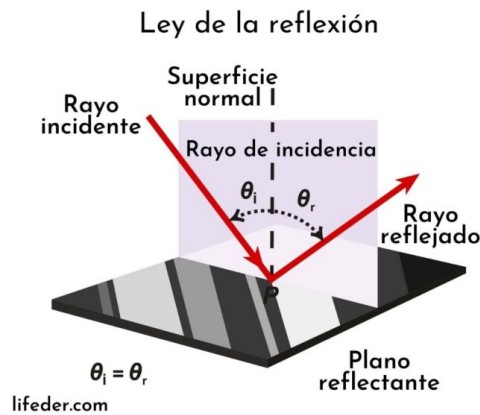


Figura 2.7. Ley de la reflexión [37].

La óptica geométrica tiene aplicación principalmente en la formación de imágenes por espejos y lentes, lo cual es base de la construcción de instrumentos ópticos tales como microscopios o telescopios.

2.6. Formación de imágenes y aproximación puntual.

La riqueza de la información visual implica importantes requisitos de memoria y computación para almacenar y procesar las escenas en tareas de navegación en tiempo real, esta cantidad de información puede resultar inmanejable. Los métodos utilizados para procesar esta información han evolucionado con el desarrollo de nuevos algoritmos y el aumento de las capacidades de los sistemas de percepción y computación. Como resultado, han surgido enfoques muy diversos que consideran distintos tipos de información sensorial y técnicas de procesamiento. Entre ellos, en los últimos años, el uso de sistemas de visión omnidireccional se ha popularizado en muchos trabajos sobre robots móviles, y merece la pena estudiar sus principales propiedades y aplicaciones en cartografía, localización y navegación [38]. Las imágenes son datos altamente dimensionales que cambian no solo cuando el robot se mueve, sino también ante cualquier cambio en el entorno, como cambios en las condiciones de iluminación o en la posición de algunos objetos. Teniendo en cuenta estos hechos, es necesario extraer información relevante de las escenas para poder resolver de forma robusta las tareas de mapeo y localización. Según el método utilizado para extraer esta información, las diferentes soluciones se pueden clasificar en dos

grupos: soluciones basadas en la extracción y descripción de características locales y soluciones basadas en la apariencia global [38].

2.6.1. Extracción y descripción de características locales

Los enfoques de características locales se basan en la extracción de un conjunto de puntos, objetos o regiones relevantes de cada escena. Los descriptores son calculados alrededor de los puntos de interés de la imagen y son asociados a los detectores de un punto de interés. Cada característica se describe mediante un descriptor, que suele no variar ante cambios en la posición y orientación del robot. Una vez extraídos y descritos, la solución al problema de localización se aborda generalmente en dos pasos . Primero, se rastrean las características extraídas a lo largo de un conjunto de escenas para identificar las zonas donde es probable que se encuentren en las imágenes más recientes. Segundo, se lleva a cabo un proceso de coincidencia de características para identificarlas [38].

2.6.2. Extracción y descripción de características globales

Los enfoques basados en la apariencia global de las escenas trabajan con las imágenes en su conjunto, sin extraer información local. Cada imagen se representa mediante un descriptor único que contiene información sobre su apariencia global. Estos enfoques permiten algoritmos conceptualmente más simples, ya que cada escena se describe mediante un solo descriptor [38].

Tradicionalmente, los investigadores se han centrado en la primera familia de métodos, pero recientemente algunos algoritmos de apariencia global han demostrado ser también una alternativa robusta [38]. La idea básica de esta metodología es diseñar una estrategia de retroalimentación donde la información de las imágenes de la cámara, procesada mediante visión artificial, se utiliza para controlar el movimiento de la plataforma, con el objetivo típico de conducir el robot a una ubicación de referencia deseada. Otros comportamientos, como hacer que el robot siga una trayectoria determinada, también se han abordado con frecuencia [39]. Por ello, es necesario representar las imágenes mediante descriptores que reduzcan la información a un vector de características, pero que preserven la capacidad de reconocer la imagen en una base de datos [40].

2.7. Materia activa

La materia activa es una clase de sistemas fuera de equilibrio compuestos por un gran número de agentes autónomos. El rango de escala de estos agentes se encuentra desde nanomotores, micro enjambres, y células, hasta barbadas de peces, aves y humanos. Descifrar, predecir y controlar el comportamiento de la materia activa es verdaderamente un esfuerzo interdisciplinario en la interface de la biología, química, ecología, ingeniería, matemáticas y física. Recientemente existe un progreso en métodos experimentales, simulaciones y avances teóricos, esto permite una nueva visión dentro de este comportamiento, el cual debería conducir al diseño de novedosos agentes activos sintéticos y materiales [41]. La materia activa está

controlada por sistemas, los cuales suministran energía directa, isotrópica e independientemente a un nivel de forma individual a los constituyentes que lo conforman. Con esta energía, los individuos en materia activa logran alguna especie de movimiento sistemático o colectivo, típicamente a partir de interacciones locales. Los sistemas activos son persistentes fuera de equilibrio, debido al consumo continuo de energía por parte de los individuos. Esto implica la ausencia de equilibrio, por lo tanto, las teorías de materia activa tienen que ser construidas con base a simetrías como polar o nemática (ver Figura 2.8) que surgen de las interacciones de los agentes, así como leyes de conservación y reglas de la dinámica [42].

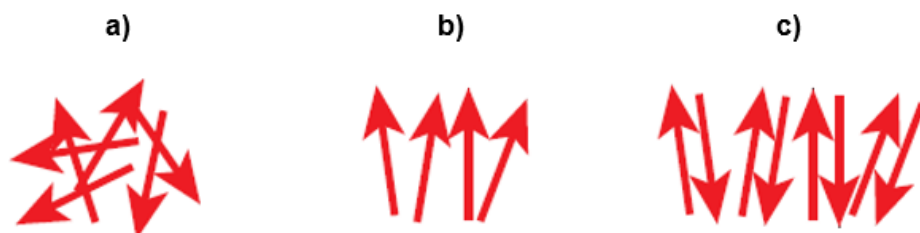


Figura 2.8. Simetrías que pueden surgir a partir de interacciones locales en sistemas de materia activa (a) isotrópica, (b) polar y (c) nemática [43].

2.8. Interpolación spline

La aproximación polinomial por tramos mas común usa polinomios cúbicos entre cada par sucesivo de nodos y recibe el nombre de interpolación spline cúbico. Un polinomio cubico general implica cuatro constantes, por lo que existe suficiente flexibilidad en el procedimiento de spline cubico para garantizar que el interpolante no sólo es continuamente diferenciable en el

intervalo, sino también tiene una segunda derivada continua. Definición: dada una función f definida en $[a,b]$ y un conjunto de nodos $a = x_0 < x_1 < \dots x_n = b$, un interpolante spline cúbico S para f es una función que satisface las siguientes condiciones [44]:

- a) $S(x)$ es un polinomio cúbico, que se denota $S_j(x)$, en el subintervalo $[x_j, x_{j+1}]$ para cada $j = 0, 1, \dots, n-1$;
- b) $S_j(x_j) = f(x_j)$ y $S_j(x_{j+1}) = f(x_{j+1})$ para cada $j = 0, 1, \dots, n-1$;
- c) $S_{j+1}(x_{j+1}) = S_j(x_{j+1})$ para cada $j = 0, 1, \dots, n-2$; (implícito en b).)
- d) $S_{j+1}'(x_{j+1}) = S_j'(x_{j+1})$ para cada $j = 0, 1, \dots, n-2$;
- e) $S_{j+1}''(x_{j+1}) = S_j''(x_{j+1})$ para cada $j = 0, 1, \dots, n-2$;
- f) Uno de los siguientes conjuntos de condiciones de frontera se satisface:
 - i) $S(x_0) = S(x_n) = 0$ (frontera natural) (o libre) ; ii) $S(x_0) = f(x_0)$ y $S(x_n) = f(x_n)$ (frontera condicionada).

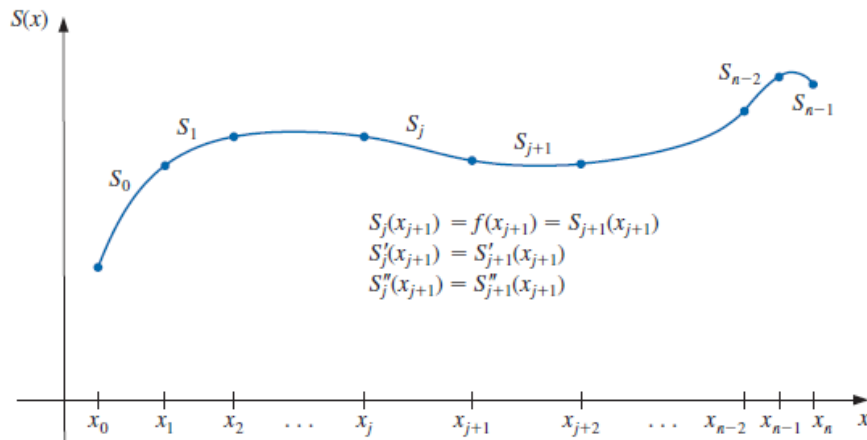


Figura 2.9. Interpolación cúbica (Spline) [44].

2.9. Robótica enjambre

La robótica de enjambre se refiere a un paradigma de diseño que emplea el comportamiento colectivo inteligente de un grupo de robots para realizar una tarea específica. Se inspira en enjambres inteligentes naturales, como colonias de insectos y bancos de peces, que pueden recopilar información eficazmente de agentes con capacidades individuales limitadas y mostrar comportamientos colectivos complejos sin mecanismos de control centralizado. La toma de decisiones colectiva es un campo dentro del estudio de la inteligencia de enjambre, que se centra en el proceso mediante el cual un enjambre de agentes inteligentes logra una decisión global mediante interacciones locales entre sí y con el entorno. Este campo de estudio se origina en el intento de modelar y comprender enjambres inteligentes naturales y también se ha utilizado cada vez más para construir estrategias de toma de decisiones para enjambres de inteligencia artificial [45].

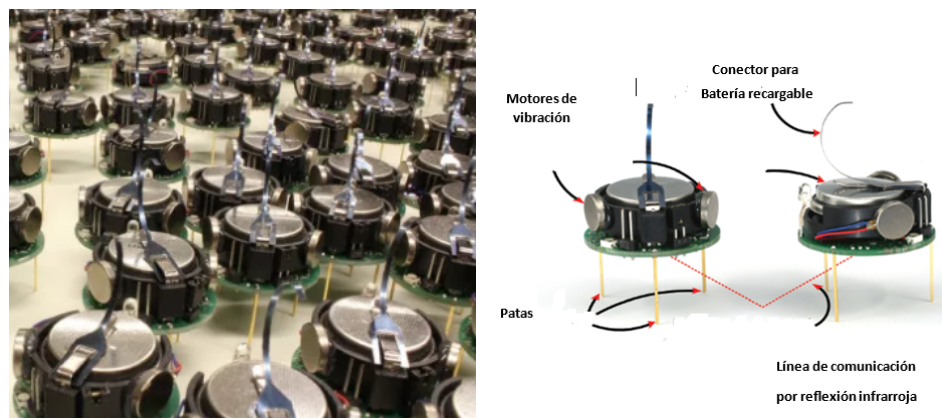


Figura 2.10. Robotica enjambre: Kilobot [46].

Capítulo 3

Desarrollo experimental.

En este capítulo se muestra el proceso de diseño de los espejos para los dos sensores introducidos en este trabajo, su fabricación e integración con el emisor y receptores infrarrojos, así como detalles en la realización de las mediciones experimentales. Sin embargo, el capítulo comienza con los avances que se han realizado en el desarrollo de un prototipo robótico para estudios de autoensamblado y autoorganización en robótica de enjambre, el cual recibirá uno de los sensores de visión. Esto para proveer un contexto de las capacidades y limitaciones del prototipo robótico, hecho que impone ciertas restricciones sobre el desarrollo de los sensores de visión.

3.1. Prototipo robótico

El prototipo robótico sobre el cual se ha estado trabajando en forma paralela a los sensores de visión, consta de dos placas de circuito impreso circulares (placa inferior y placa superior), con un diámetro de 66 mm. En

la placa inferior se concentran los sistemas de potencia, propulsión y control, con componentes de estado sólido y un microcontrolador ATmega328P como unidad de cómputo, que permitirán al prototipo tener movilidad, además de tener la capacidad de seguimiento de bordes. En la placa superior se integrará uno de los sensores de visión desarrollados en este trabajo (ver sección 3.2). Los componentes utilizados se muestran en el diagrama de bloques de la figura 3.1. Es importante hacer notar que el sensor de visión, una vez integrado sobre una placa de circuito impreso, incluirá también un convertidor analógico/digital de ocho canales modelo MCP3008-I/P de Microchip, el cual se conectará a través de un bus con la placa inferior haciendo uso del puerto SPI del microcontrolador ATmega328P. El procesamiento final de las señales medidas sobre los ocho fotorreceptores infrarrojos se hará con dicho microcontrolador. Esto será importante a considerar más adelante en el desarrollo de los modelos matemáticos, el procesamiento de datos y la inversión del modelo para determinar la distancia y orientación entre agentes robóticos.

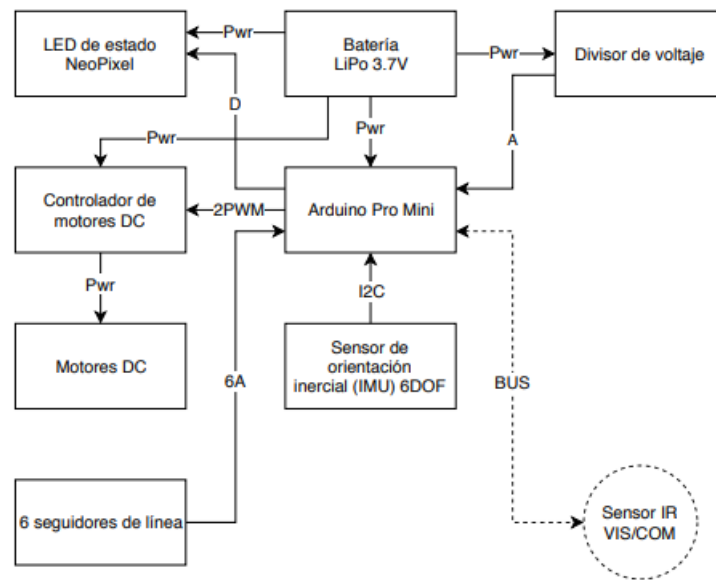
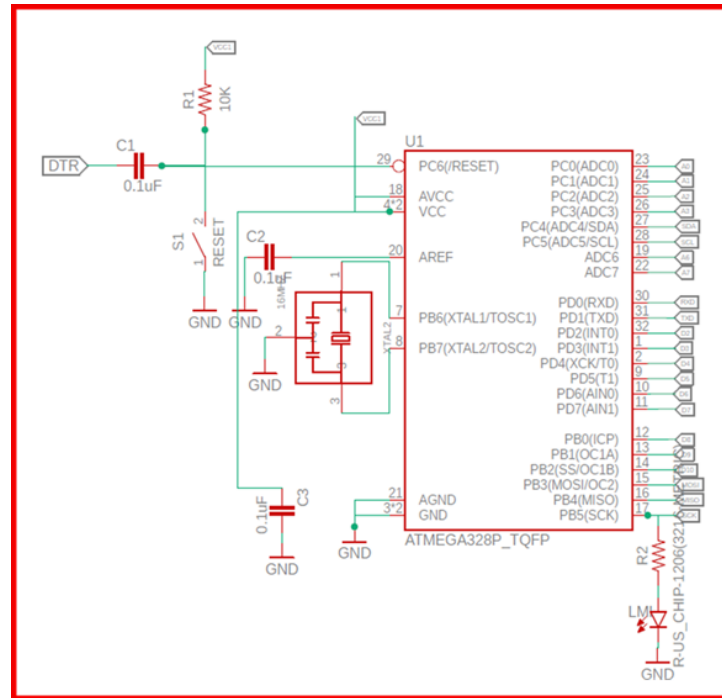


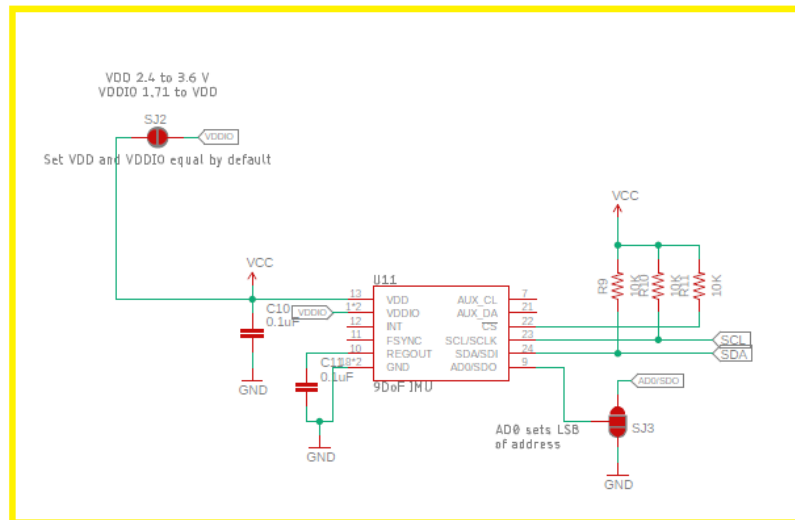
Figura 3.1. Diagrama a bloques de los componentes de estado sólido que componen el prototipo de robot sobre el cual se integrará uno de los sensores de visión desarrollados en este trabajo.

En la figura 3.3 se muestra el diseño esquemático del circuito de la placa inferior del prototipo robótico. El software en el que se realizaron los diseños es Fusion 360 de Autodesk, el cual permitió desarrollar los diseños en tres etapas: esquemático, placa de circuito impreso y partes mecánicas en CAD. En la misma figura se puede apreciar que el prototipo robótico incluirá un Neopixel, que es un LED tipo RBG para indicar el estado del robot, además de que éste empleará una batería LiPo de 3.7 V como fuente de energía. Por otra parte, las figuras 3.4 y 3.5 muestran las caras superior e inferior de esta placa, generadas en Fusion 360 con base en el diseño esquemático de la figura 3.3, respetando las reglas de diseño de los diferentes dispositivos semiconductores, así como su conexión y optimización capacitancias parásitas

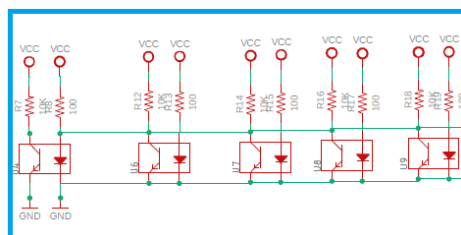
o ruido excesivo, considerando que se trata de una placa a dos caras.



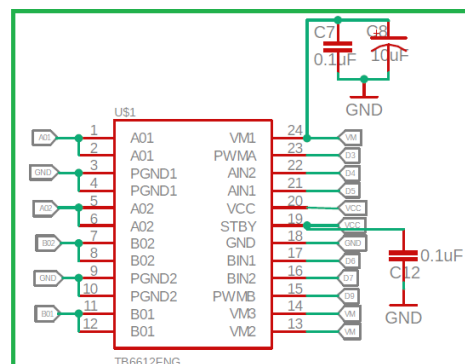
(a) Microcontrolador ATMEGA328P



(b) Acelerometro MPU6050



(a) Sensores de reflectancia



(b) Driver para motores

Figura 3.3. Diseño esquemático del circuito de la placa inferior del prototipo robótico.

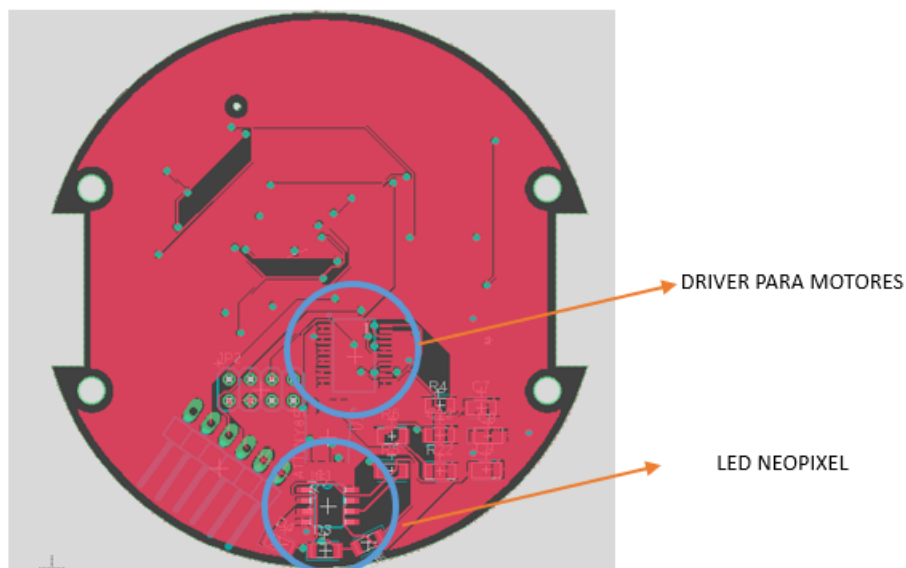


Figura 3.4. Vista superior de la placa inferior de circuito impreso .

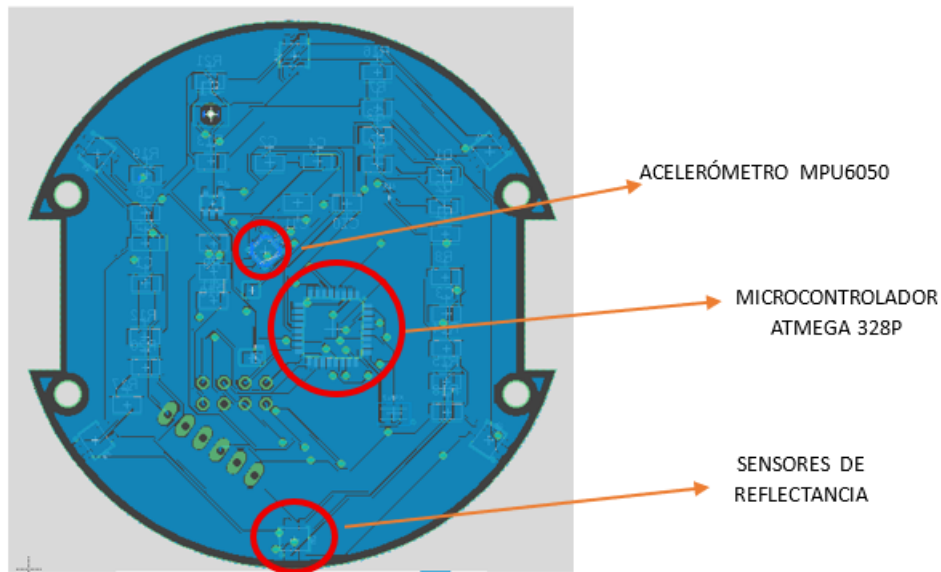


Figura 3.5. Vista inferior de la placa inferior de circuito impreso.

La figura 3.6 muestra la integración final, en CAD (Computer Asisted Design), de la placa inferior del prototipo robótico con los dispositivos semiconductores discretos, microcontrolador, driver de los motores y partes mecánicas y eléctricas. Como se puede observar en la figura, los dispositivos semiconductores están distribuidos de tal manera que no interfieren con las partes mecánicas. La distribución de los distintos dispositivos se hizo de forma cuidadosa para lograr un óptimo aprovechamiento del área disponible en la placa.

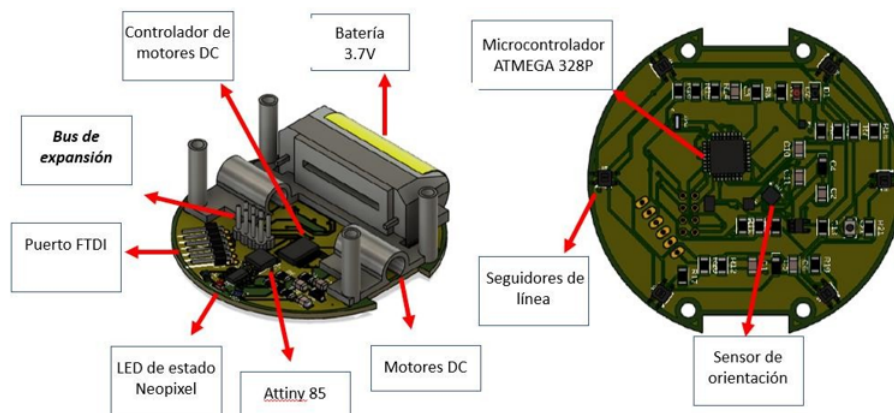


Figura 3.6. Integración en CAD de la placa inferior con diámetro de 66 mm del prototipo robótico con componentes discretos, partes mecánicas y eléctricas.

3.2. Integración en CAD del prototipo robótico con el sensor de visión.

Adelantándonos un poco y para proveer al lector con una mejor idea del diseño final de prototipo robótico que se desea obtener, en la figura 3.7 se muestra la integración en CAD de la placa inferior descrita en la sección anterior con los dos diseños de sensor de visión omnidireccional que se desarrollaron en este trabajo. Como se observa en la figura, cada sensor consta de un espejo con simetría rotacional, ocho fotorreceptores infrarrojos distribuidos en forma circular alrededor de la base cilíndrica del espejo. Dentro de la base cilíndrica está ubicado un LED infrarrojo como emisor. La región de interacción que se busca tiene un radio de cinco diámetros de robot y se encuentra directamente relacionada con la geometría del espejo.

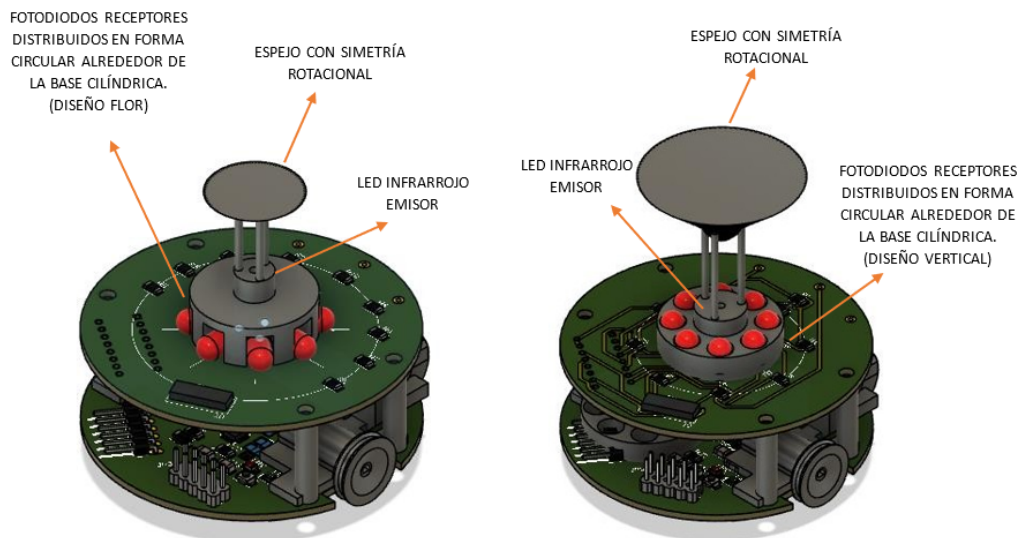


Figura 3.7. Integración en CAD de la placa inferior del prototipo robótico con componentes discretos, partes mecánicas y eléctricas.

3.3. Caracterización de componentes discretos.

Como se mencionó antes, cada sensor de visión consta de un emisor IR (infrarrojo), ocho receptores discretos y un espejo. Por lo tanto, se eligieron fotodiodos (PDs) emisores y receptores infrarrojos de venta libre, que son muy accesibles y económicos. Así, se eligió como emisor el diodo emisor de luz infrarroja (LED) IR333C de 5 mm y su receptor complementario, el fotodiodo infrarrojo PD333-3B/H0/L2 tipo PIN de silicio de 5 mm (PD) con longitud de onda de pico de emisión y sensibilidad de 940 nm, respectivamente, ambos de la marca Everlight. Estos dispositivos se caracterizaron en cuanto al cono de luz emitido por el LED, así como el ángulo de visión del PD (fotodiodo)

seleccionado. Primero, para el cono de luz emitido por el LED IR se diseñó e imprimió en 3D un arreglo de prueba, donde el LED se colocó en un orificio en el centro de la pared posterior del arreglo y apuntando hacia adelante, como se muestra en la figura 3.8(a). El arreglo cuenta con tres ranuras para colocar una pantalla impresa en 3D blanca, mostrada en la figura 3.9(e) a distancias de 20, 30 y 40 mm medidas desde la base del LED. La pantalla cuenta con dos muescas a 20 mm entre ellas, como se muestra en la figura 3.9(a) con el fin de calibrar la escala de la imagen para su posterior procesamiento en el software Fusion 360 como se muestra en la figura 3.9(b). Además, se emplearon dos pantallas con un espesor de 0.6 y 0.8 mm. En las figuras 3.9(b), 3.9(c) y 3.9(d) se puede observar cómo la zona iluminada por el LED sobre la pantalla de 0.6 mm, crece a medida que la pantalla intersecta el cono de luz a distancias crecientes. Lo mismo se puede apreciar en las figuras 3.9(f), 3.9(g) y 3.9(h) para la pantalla con un espesor de 0.8 mm.

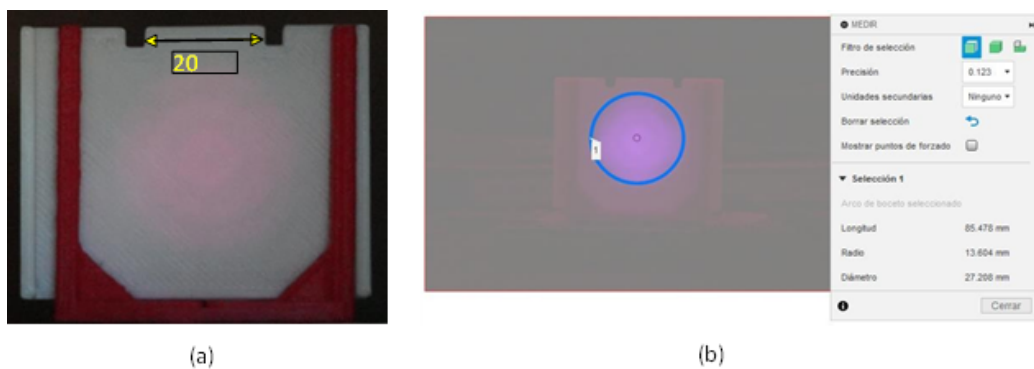


Figura 3.8. Foto de la pantalla donde se indica la distancia entre muescas (20mm). En (b), procesamiento de la fotografía en el software Fusión 360 para calcular diámetro de la luz incidente con la finalidad de calcular el ángulo de emisión de LED.

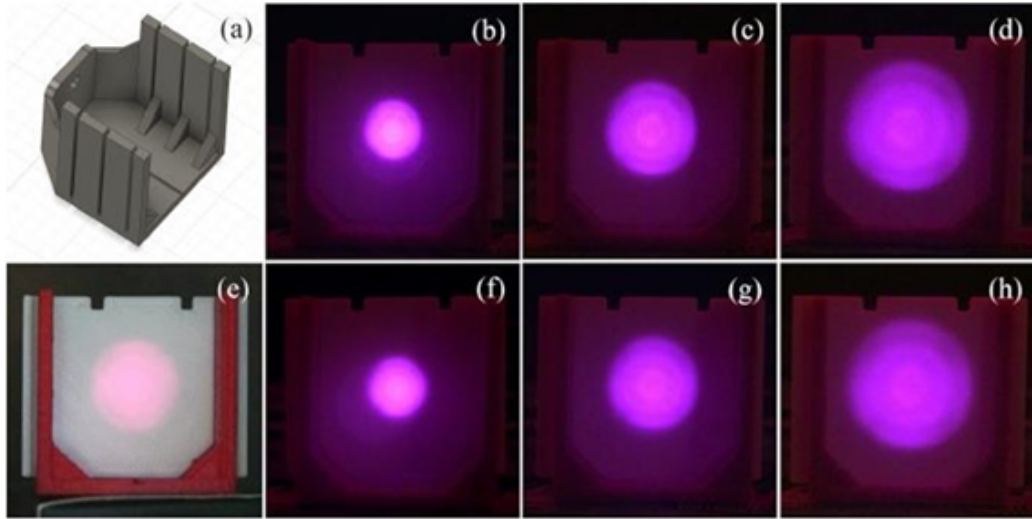


Figura 3.9. En (a) y (e), diseño CAD y dispositivo de prueba para la caracterización del cono de luz emitido por el LED IR, respectivamente. En (b), (c) y (d), fotografías tomadas con una cámara sensible a IR utilizando la pantalla de 0,6 mm de espesor a distancias de 20, 30 y 40 mm de la base del LED. En (f), (g) y (h), fotografías tomadas utilizando la pantalla de 0,8 mm de espesor a distancias de 20, 30 y 40 mm de la base del LED.

En total, se procesaron y analizaron dos fotografías por cada caso con el software Autodesk Fusion 360, es decir, dos fotografías para cada distancia del LED a la pantalla y para cada espesor de pantalla. Para ello, se ajustó la escala de cada fotografía con la distancia entre las dos muescas de la pantalla y se trazó un círculo que encierra la zona iluminada con el fin de determinar su diámetro en función de la distancia x_i a la base del LED. Esta distancia considera el espesor de la pantalla correspondiente utilizada para obtener una distancia total. Posteriormente, estas medidas se utilizaron en pares (x_1, ϕ_1) y (x_2, ϕ_2) en todas las combinaciones posibles, correspondiendo la medida con subíndice 1 a la más cercana al LED y la medida con subíndice 2 a

la más lejana, para determinar el ángulo del cono del punto focal θ_{fp} y la posición aparente x_{fp} del punto focal de la fuente de luz como se muestra en el diagrama de la figura 3.10 y en las ecuaciones 3.1 y 3.2, donde el subíndice i corresponde a la medida 1 o 2 de un par dado. Finalmente, se obtuvo el promedio de los resultados con la finalidad de obtener el ángulo medio del cono como $\theta_{mfp} \simeq 18,4^\circ$, mientras que la posición aparente media del punto focal del LED arrojó $x_{mfp} \simeq 0$, es decir, en la base del LED.

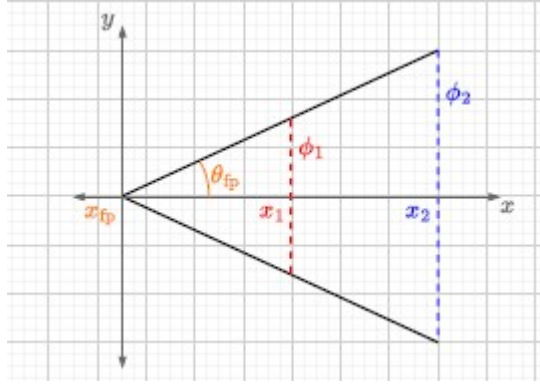


Figura 3.10. Diagrama esquemático utilizado para determinar el ángulo del cono θ_{fp} , así como la posición aparente x_{fp} del punto focal de la fuente de luz del LED a partir del diámetro ϕ_i del círculo que cubre el área iluminada en la pantalla (obtenido al analizar las fotografías de la Figura 3.9) a una distancia x_i desde el frente de la pantalla hasta la base del LED infrarrojo.

$$\theta_{fp} = \arctan\left[\frac{\phi_2 - \phi_1}{2(x_2 - x_1)}\right] \quad (3.1)$$

$$x_{fp} = x_i + \frac{\phi_i}{\tan\theta_{fp}} \quad (3.2)$$

Por otro lado, el ángulo de visión de los fotodiodos IR fue experimentalmente medido con un riel de prueba diseñado y construido

en casa. Consiste en un riel con una estructura formada por dos tubos cuadrados de aluminio, soportados por dos apoyos impresos en 3D con soportes. Tres motores paso a paso para proporcionar tres grados de libertad, uno longitudinal con una resolución de 0.2 mm, y dos rotacionales con una resolución de $360 / 4096$ o $0,087890625^\circ$ cada uno, como se muestra en la figura 3.11. Se ha utilizado una tarjeta de desarrollo Arduino MEGA 2560 Rev3 para el control y adquisición de datos, y se han desarrollado placas de circuito impreso a medida para la gestión de la energía y para alojar los drivers de los motores paso a paso y diversas conexiones. Los rodamientos, uno lineal montado en el tubo cuadrado superior y dos rotacionales, uno montado en uno de los postes del riel y el otro en el carro sobre el rodamiento lineal, también se realizaron con piezas impresas en 3D y balines Airsoft de 6 mm de diámetro (ver figura 3.12). Mediante la impresión 3D de diferentes adaptadores, se puede montar LEDs individuales o PDs, así como los sensores integrados para la caracterización experimental de sus patrones de emisión y recepción en función de la distancia total del tubo de rodamiento lineal (con un rango de 860 mm) y la orientación rotaria (con un rango de 360°).

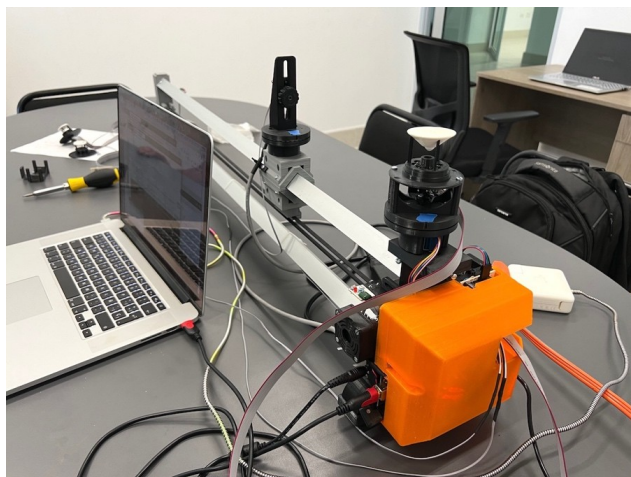


Figura 3.11. Riel de pruebas que se desarrolló para realizar todas las mediciones experimentales de este trabajo. Este arreglo experimental cuenta con un rodamiento lineal que nos permite variar la distancia entre dos bases que pueden girar 360° , brindándonos así un total de tres grados de libertad: uno longitudinal y dos rotacionales.

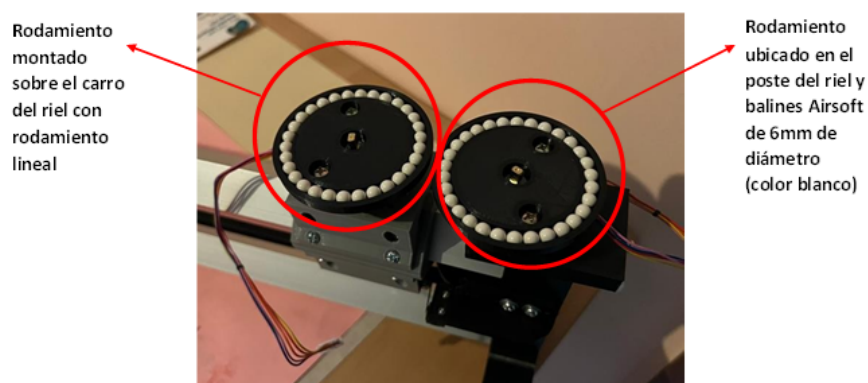


Figura 3.12. Los rodamientos, uno lineal montado en el tubo cuadrado superior y dos rotacionales, uno montado en uno de los postes del riel y el otro en el carro sobre el rodamiento lineal.

De esta manera, para caracterizar el patrón de recepción de los PD, se

montó un fotodiodo en la base giratoria del poste y un LED en la otra base giratoria del riel lineal. Esto permitió medir la señal recibida por el PD, en diferentes ángulos, ya que un LED apuntando directamente hacia el PD se alejaba cada vez más para registrar la dependencia de la distancia. Los resultados se muestran en la figura 3.13(a), donde el color rojo indica una señal más fuerte, mientras que el azul corresponde a una señal cercana a cero. La señal recibida por el PD se midió con una resolución de distancia de 1 cm y una resolución angular correspondiente a 1 cm de arco. Además, también se caracterizó el patrón de emisión de un LED con la misma resolución, colocando el LED en la base giratoria en el poste y un PD en la base en el carro, apuntando directamente hacia el LED. Estos resultados se muestran en la figura 3.13(b), donde las líneas verdes representan el cono de emisión determinado a partir de nuestro estudio con el arreglo con la pantalla móvil. Estas mediciones guiaron el diseño de los dos sensores de visión introducidos en este trabajo, en cuanto a la disposición de los componentes discretos, así como la geometría y colocación de los espejos.

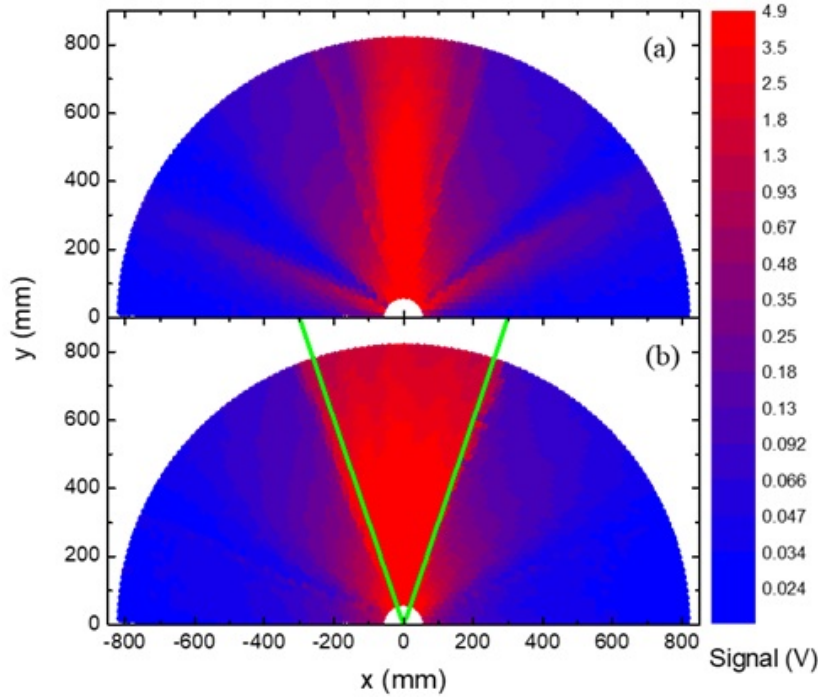


Figura 3.13. Patrones de recepción de PD (a) y de emisión de LED (b) medidos. Se obtuvo una lectura de la señal cada 1 cm a medida que aumentaba la distancia, y con una resolución angular correspondiente a 1 cm de arco, cubriendo 360 para cada caso. Las líneas verdes en (b) representan el cono de emisión del LED desde el ángulo obtenido con el análisis de las fotografías de la Figura 1, utilizando el arreglo con la pantalla móvil.

3.4. Diseño y fabricación de los espejos.

Para el desarrollo de los sensores de visión, se consideraron dos diseños diferentes como se mencionó antes. En el primero, cuenta con ocho PDs los cuales están dispuestos en un círculo, apuntando hacia arriba con respecto al espejo como se muestra en la figura 3.14. Por esta razón, en adelante nos referiremos a este como el diseño vertical.

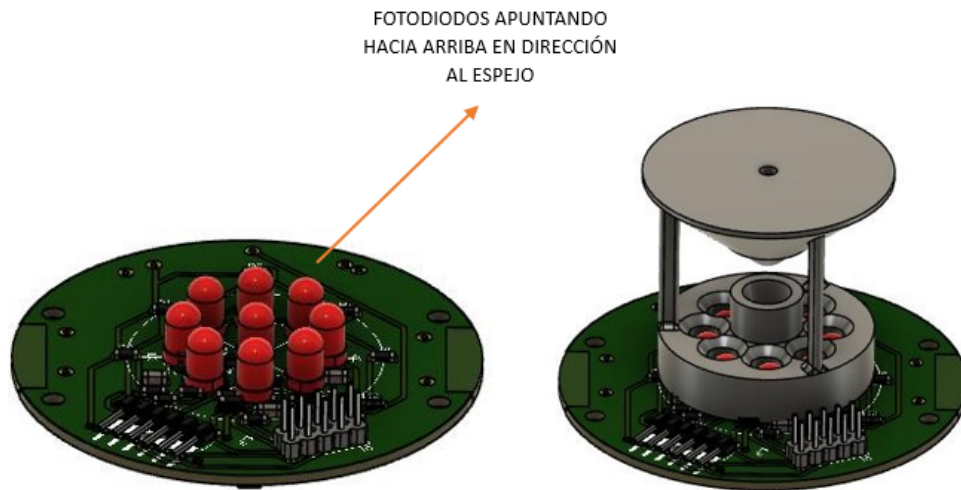


Figura 3.14. Sensor de visión con diseño vertical, donde los ocho PDs están dispuestos en un círculo y apuntando hacia arriba en el espejo.

En el segundo se muestra en la figura 3.15, con los ocho PDs dispuestos horizontalmente, paralelos al espejo y apuntando hacia afuera en un patrón de pétalos de flor. Por lo tanto, nos referiremos a esta como el diseño flor.

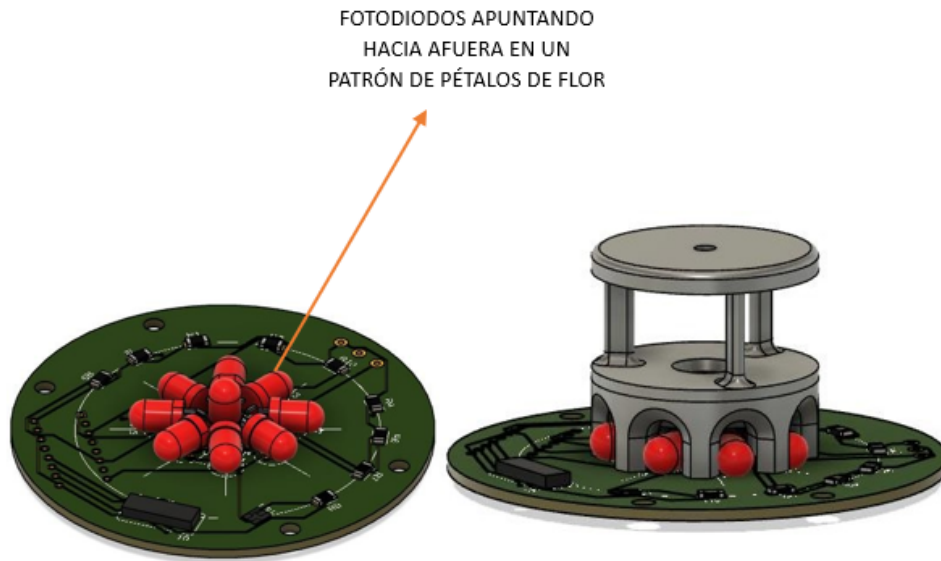


Figura 3.15. Sensor de visión con diseño flor. Los ocho PD están dispuestos horizontalmente, paralelos al espejo y apuntando hacia afuera.

El LED infrarrojo se colocó en el centro de cada arreglo de PDs y apunta hacia el espejo en ambos casos, mientras que el espejo se encuentra sostenido por tres postes delgados por encima de los componentes discretos (fotodiodos). La figura 3.16 muestra diseños CAD para los dos casos. El objetivo con el desarrollo de estos dos diseños es contrastar la resolución en distancia vs Orientación. Se intuye, que uno de ellos puede favorecer una mejor detección de la distancia , sacrificando resolución en orientación, mientras que lo opuesto es cierto para el otro diseño. Al final, como se expuso en la secciones 3.1 y 3.2, el objetivo es desarrollar un prototipo robótico completo con capacidad de visión y comunicación de largo alcance (aproximadamente 330 mm o 5 diámetros de robot).

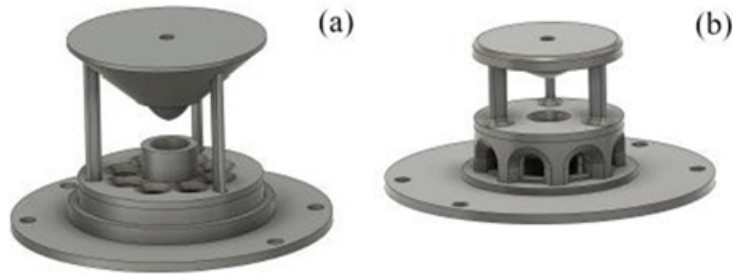


Figura 3.16. Diseños CAD para la estructura de los componentes discretos, un LED en el centro, apuntando hacia arriba al espejo, y ocho PD dispuestos en la base en un patrón circular y apuntando hacia arriba para el diseño vertical (a), y horizontalmente y apuntando hacia afuera para el diseño inferior (b). Los espejos están sostenidos por tres postes delgados en la parte superior de los componentes discretos.

Independientemente del objetivo final sobre el desarrollo de un prototipo robótico completo, que va más allá del alcance de este trabajo, los métodos introducidos aquí con respecto al desarrollo de sensores de visión catadióptricos sin cámara, pueden resultar útiles para prototipos robóticos más pequeños o más grandes y con cualquier rango de interacción deseado como se muestra a continuación. Vale la pena mencionar que el circuito típico para conectar un PD a un convertidor analógico a digital (ADC) incluye una resistencia de $10\text{ k}\Omega$ en serie. En la caracterización de los PDs se observó una gran variabilidad en la señal pico producida por diferentes PDs, así como una disminución de la señal recibida una vez que la luz del LED es reflejada por el espejo. Así que, para aumentar la intensidad de la señal recibida y compensar la sensibilidad variable de los PD, a la resistencia de $10\text{ k}\Omega$ se añadió también una resistencia variable de $100\text{ k}\Omega$ en serie. Lo anterior, permitió calibrar la intensidad del pico de la señal para que fuera la misma para los ocho PDs utilizados en un sensor. Posteriormente

se elaboró el procedimiento de diseño y fabricación de los espejos, que tienen requisitos diferentes para cada diseño. Como los espejos deben tener simetría rotacional para un campo de visión omnidireccional en el plano, solo será necesario trabajar con sus secciones transversales. Para el diseño de los espejos se empleó el software GeoGebra, que incluye herramientas para análisis de óptica geométrica gráfica y matemática. En particular, GeoGebra permite definir líneas que representan los rayos de luz entrantes y la reflexión especular de ellos sobre un perfil que se puede definir con cualquier función. De esta manera, el sensor con el diseño vertical requiere un espejo de dos etapas: una etapa para el emisor y una segunda para los receptores apuntando hacia arriba como se muestra en la figura 3.17.

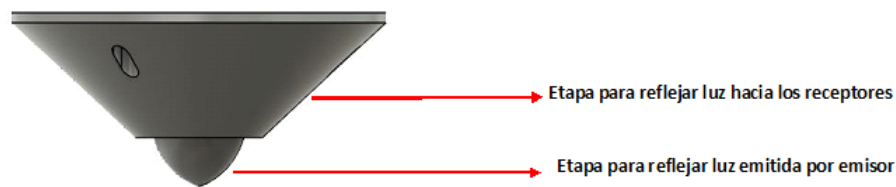


Figura 3.17. Espejo de dos etapas para el diseño vertical: una etapa para el emisor y una segunda para los receptores apuntando hacia arriba.

La forma de cada etapa se ajustó dentro de GeoGebra usando interpolación segmentaria cúbica (cubic splines en inglés) [47]. La etapa que refleja la luz emitida por el LED requiere una forma convexa para que el haz reflejado cubra el rango de interacción deseado, mientras que la forma de la segunda etapa debe ser ligeramente cóncava para que la luz entrante de otros sensores se concentre en el anillo donde se encuentran ubicados los PD. Las figuras 3.18(a) y 3.18(b) muestran la sección transversal de este

espejo de dos etapas (forma llena en gris sólido), así como su análisis óptico geométrico. En las figuras, la línea vertical violeta con dos círculos debajo del haz (llena en rojo translúcido) representa un PD receptor. La Figura 3.18(a) muestra el análisis para un sensor colocado a una distancia de 70 mm del emisor, de centro a centro, mientras que la Figura 3.18(b) para un sensor receptor a 330 mm del emisor, de centro a centro también. Vale la pena mencionar que la base de cada sensor tiene un diámetro de 66 mm dentro de GeoGebra. Al exportar el perfil de la sección transversal del espejo, se genera un sólido de revolución en Fusion 360, donde se integra el espejo con la estructura para los componentes discretos: un LED y ocho PDs. Los detalles de las dimensiones del espejo y la estructura de soporte se presentan en la Figura 3.18(d). Por otro lado, el espejo para el diseño flor requiere solo una etapa convexa para que la luz del LED se refleje sobre el rango de interacción deseado. En este caso, los PDs se encuentran dispuestos de manera horizontal alrededor del LED y apuntando hacia afuera, recibiendo así la luz reflejada directamente desde el espejo como se muestra en la Figura 3.18(c), donde las líneas horizontales violetas con dos círculos representan PDs, mientras que las líneas verticales violetas con dos círculos representan LEDs emisores. También se puede apreciar la sección transversal del espejo (forma llena en gris sólido) junto con el análisis de óptica geométrica, con el haz de luz correspondiente a las áreas llenas en rojo translúcido. Asimismo, el sólido de revolución y la integración con la estructura para los componentes discretos se realizaron en Fusion 360. Los detalles de las dimensiones del espejo y su estructura se muestran en la figura 3.18(e). Posteriormente, los espejos se imprimieron en 3D en ABS con una resolución de capa de 0.1

mm de altura como se muestra en la Figura 3.18(f). Para proporcionar a los espejos impresos en 3D una superficie lisa y reflejante, se llevo a cabo este proceso con los siguientes pasos:

- Se cuelga el espejo en un recipiente cerrado sobre unos mililitros de acetona líquida para que reciba un baño de vapor de acetona durante 45 minutos.
- Se rocía el espejo con una capa uniforme de esmalte acrílico 2 en 1 y se deja secar durante 30 minutos.
- Se monta el espejo en un taladro eléctrico de mano y se pule con papel de lija de grano 200.
- Se repiten los pasos 2 y 3 al menos tres veces hasta lograr una superficie lisa.
- Se rocía una capa final de pintura sobre el espejo y se deja secar durante una hora.

El resultado final se muestra en la figura 3.18(g). Se tomaron fotografías de los espejos integrados con la estructura de soporte y los componentes discretos con una cámara sensible a infrarrojo para garantizar que estén completamente iluminados por el LED la primera etapa del espejo para el diseño vertical, como se muestra en la figura 3.18(h), y el espejo para el diseño flor, que se muestra en la figura 3.18(i). Este logro es resultado de haber caracterizado los patrones individuales de los componentes discretos: el cono de emisión del LED y el patrón de recepción del fotodiodo.

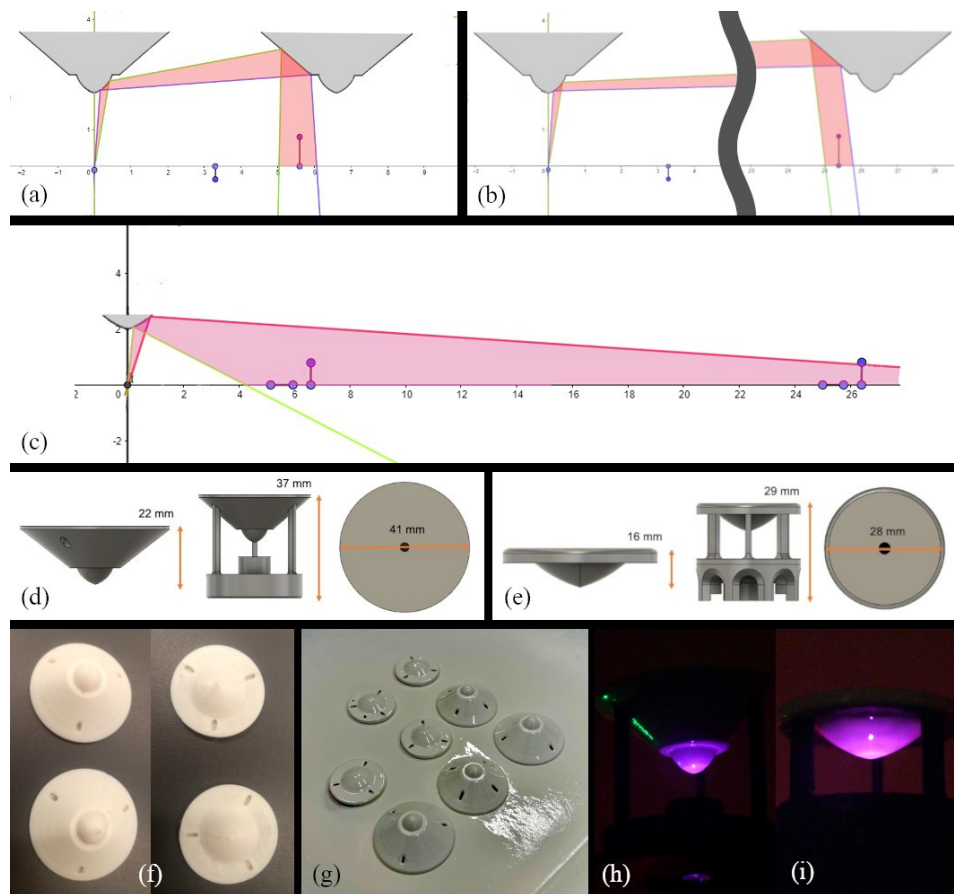


Figura 3.18. Sección transversal y análisis óptico geométrico realizados en GeoGebra para el diseño vertical en (a) y (b) y para el diseño en forma de flor en (c). En (d) y (e), detalles de las dimensiones de los espejos, así como sus estructuras para el diseño vertical y en forma de flor, respectivamente. En (f), prototipos impresos en 3D de los espejos. En (g), resultados del proceso de alisado de los espejos después del pulido y pintado. En (h) e (i), pruebas de iluminación con los sensores integrados para los diseños vertical y en forma de flor, respectivamente. Estas fotografías fueron obtenidas con una cámara sensible a infrarrojo.

3.5. Caracterización de sensores.

A continuación, se realizaron mediciones de los patrones de emisión y recepción sobre los sensores de visión integrados. Para ello, se empleó el riel de pruebas (figura 3.13) para obtener el patrón de emisión de un sensor dado, es decir, la luz proveniente del LED emisor y reflejada por el espejo. Se colocó el sensor en la base giratoria en el poste de la plataforma de prueba y un PD en la base del carro, apuntando hacia el sensor. La altura del PD se ajustó para apuntar a la segunda etapa del espejo para el diseño vertical, y al nivel de los PD para el diseño flor (figura 3.19(a)). La señal del PD montado en el carro se midió durante una rotación completa del sensor ubicado en la base giratoria con incrementos angulares correspondientes a 10 mm de arco. Iniciando desde una distancia $d = 35$ mm desde el centro del sensor y con incrementos posteriores de 10 mm hasta completar una distancia $d = 450$ mm. Los resultados se presentan en las figuras 3.20(a) y 3.20(b) para los diseños vertical y flor, respectivamente. En las figuras, las sombras producidas por los tres postes que soportan los espejos son evidentes.

En cuanto a la medición de los patrones de recepción, se montaron en la plataforma de prueba dos sensores de visión omnidireccional completamente integrados del mismo diseño, ya sea diseño vertical o diseño flor. Uno de ellos se ubicó en la base del poste y el otro como fuente de luz en la base del carro como se muestra en la Figura 3.19(b). La señal de cada uno de los ocho PD del sensor en la base del poste se midió durante una rotación completa con incrementos angulares correspondientes a 10 mm de arco, luego, se aumentó la distancia entre los sensores en 10 mm, alejando el sensor del carro, y se midió otra rotación completa del sensor del poste en las mismas condiciones.

El rango en distancia abarca desde 70 a 450 mm, medidos de centro a centro entre los dos sensores. Se consideraron dos casos para la medición de los patrones de recepción de los sensores: uno en el que la luz LED reflejada por el espejo tiene un camino libre (free path en las figuras) a través de dos de los tres postes que sostienen el espejo, y otro en el que uno de los postes obstruye la luz (post path en las figuras). Para esto, la orientación del sensor montado en el carro del riel fue ajustado de manera correspondiente para obtener estos dos casos, es decir, se ajustó manualmente para que la señal de infrarrojo librará el poste del soporte del espejo (free path) o para que llegara a ser un obstáculo (post path).

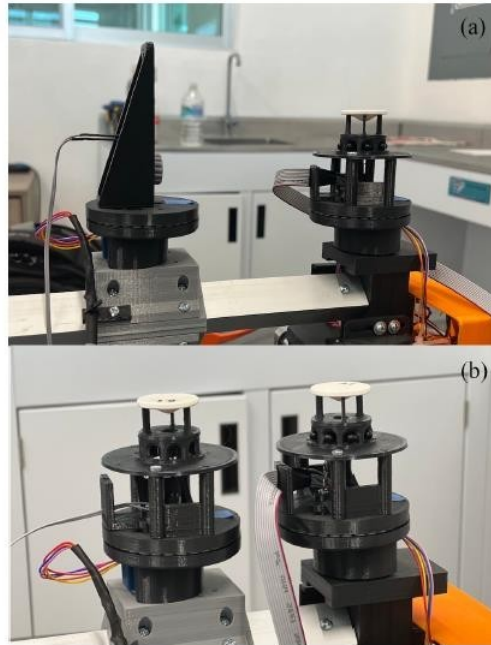


Figura 3.19. Montajes experimentales para la medición del patrón de emisión de un sensor integrado (a) y para el patrón de recepción (b). En el primer caso, un sensor integrado con un LED se coloca en la base en el poste de la plataforma de prueba, mientras que un PD (apuntando hacia el sensor) se monta en la base en el carro. En el segundo caso, un sensor integrado con un LED se coloca en el carro, iluminando un sensor completamente integrado colocado en la base en el poste de la plataforma de prueba.

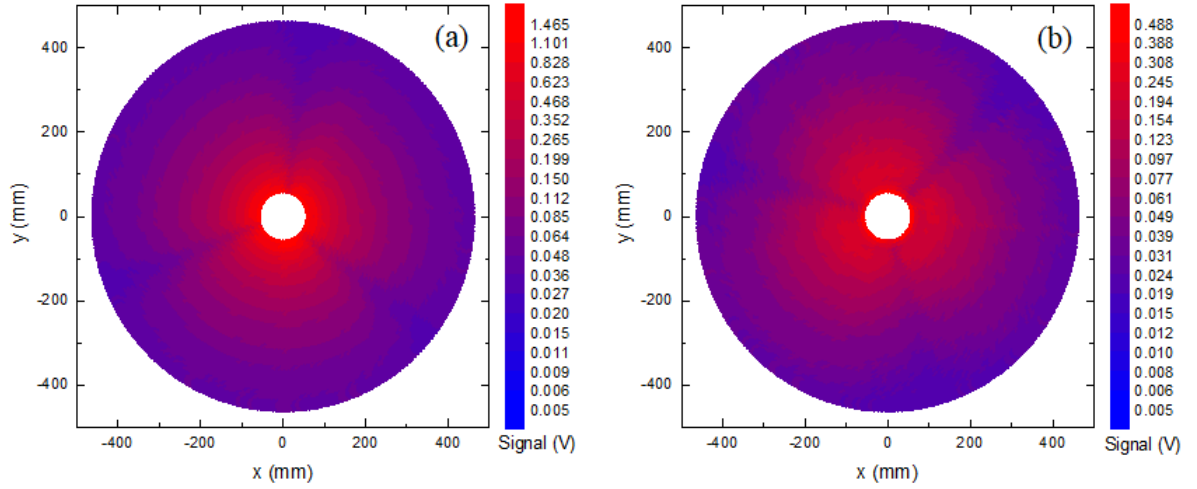


Figura 3.20. Patrones de emisión medidos para el diseño vertical (a) y flor (b), respectivamente. Las sombras producidas por los tres postes que soportan los espejos son apreciables.

El resultado de estas mediciones se presenta en la figura 3.21. En la figura 3.21(a) se muestra el patrón de recepción acumulado para el diseño vertical. La señal acumulada para este patrón se obtuvo sumando las señales individuales de los ocho PDs para una distancia d y ángulo de orientación θ dados, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$S_{acc}(d, \theta) = \sum_{i=1}^8 S_i(d, \theta) \quad (3.3)$$

En las figuras 3.21(b) y 3.21(c) se presentan ejemplos de las señales S_i medidas de los ocho PDs como función de θ para $d=70$ mm (curvas discontinuas señaladas con símbolos) para los casos libre (free path) y con obstáculo (post path), respectivamente. Los resultados correspondientes para el diseño flor se presentan en las figuras 3.21(d), 3.21(e) y 3.21(f). En las

figuras 3.21(a) y 3.21(d) es posible distinguir que el patrón de recepción acumulado para el diseño vertical es más homogéneo con respecto al ángulo de orientación θ en comparación con el diseño flor. En particular, para el diseño flor se puede observar una recepción pronunciada en la dirección en la que se encuentran los PDs, ya que estos se encuentran orientados de forma horizontal, perpendicular al espejo y apuntando hacia afuera. De manera adicional, en las figuras 3.22 a 3.25 se presentan los patrones de recepción individuales medidos para cada diodo. En las figuras 3.22 y 3.23 se muestran los patrones para el diseño vertical con camino libre (free path) y con obstáculo (post path), respectivamente. Para el diseño flor, estos resultados se muestran en las figuras 3.24 y 3.25 para el camino libre (free path) y con obstáculo (post path), respectivamente.

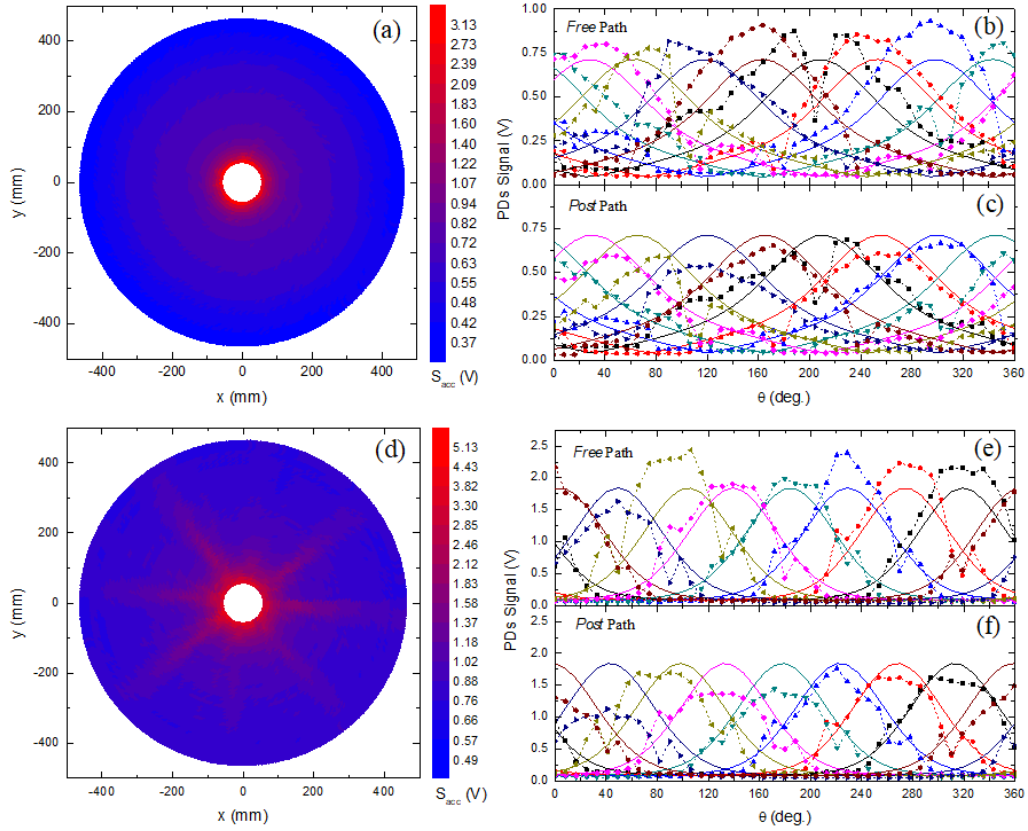


Figura 3.21. En (a), patrón de recepción acumulado para el diseño vertical. Un ejemplo de la señal medida para cada PD en función de la orientación se muestra en las curvas discontinuas con símbolos a una distancia de 70 mm para el camino libre (free path) en (b) y para el camino con obstáculo (post path) en (c) para el mismo diseño. Las curvas sólidas corresponden al modelo desarrollado en el Capítulo 4. En (d), patrón de recepción acumulado para el diseño flor. Un ejemplo de la señal medida de cada PD en función del ángulo de orientación se muestra con las curvas discontinuas con símbolos para una distancia de 70 mm para el camino libre (free path) en (b) y el camino con obstáculo (post path) en (c) para el mismo diseño. Las curvas sólidas corresponden al modelo desarrollado en el Capítulo 4.

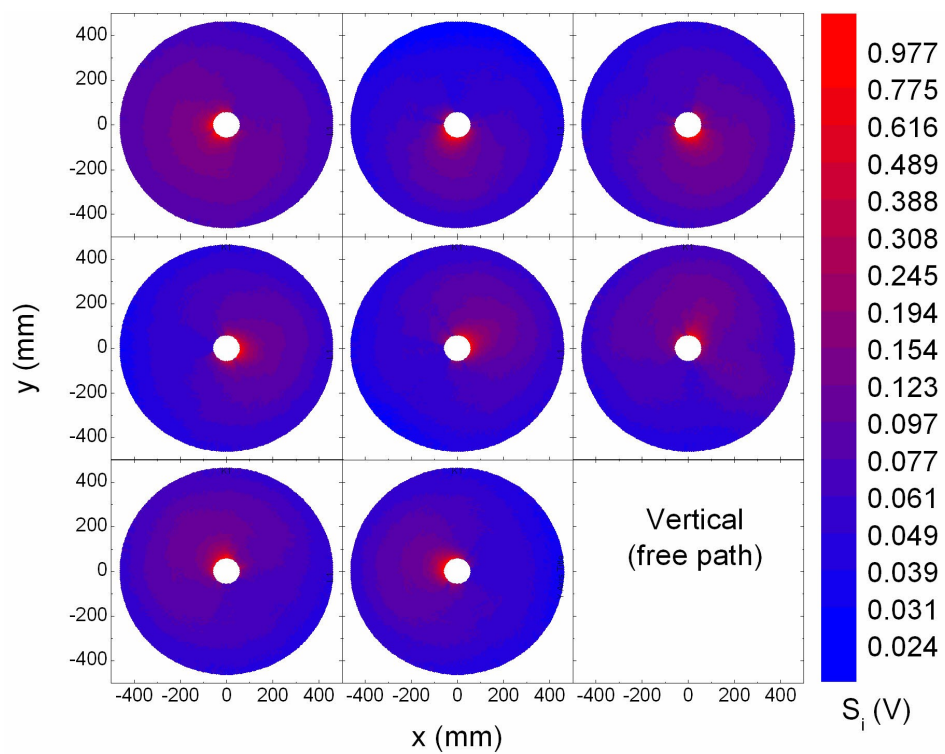


Figura 3.22. Patrones de recepción individuales medidos para cada fotodiodo para el diseño vertical con camino libre para la luz emitida por el LED y reflejada por el espejo.

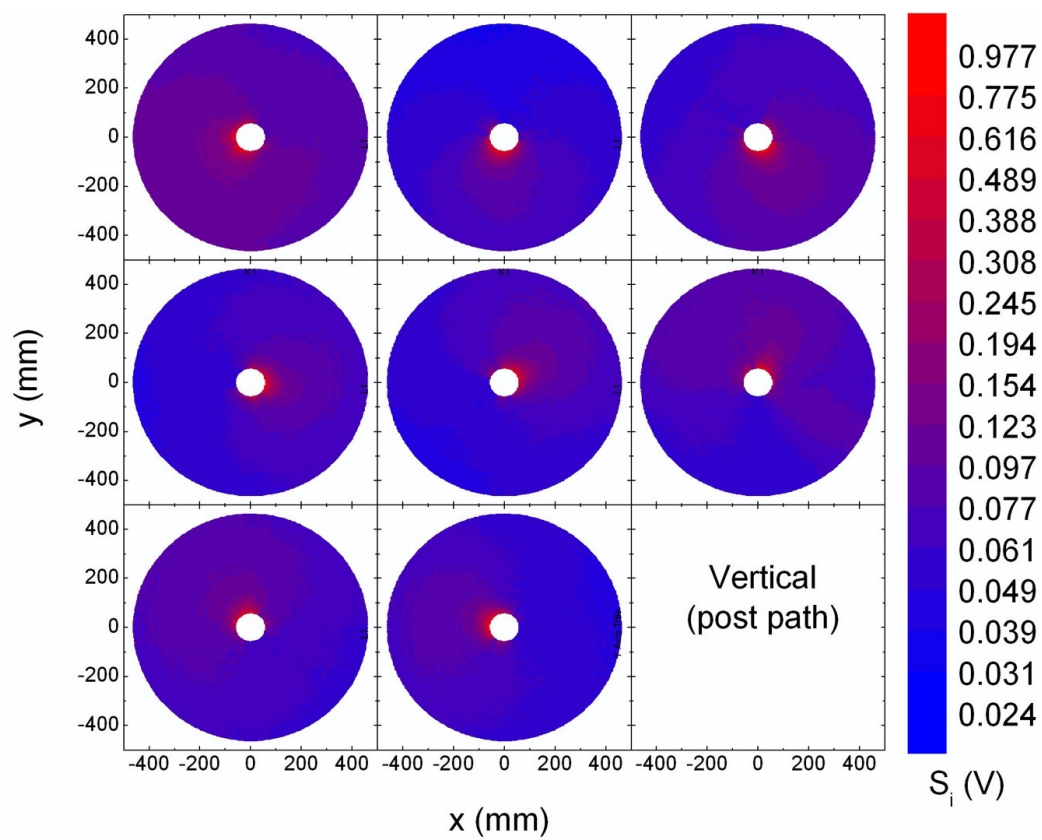


Figura 3.23. Patrones de recepción individuales medidos para cada fotodiodo para el diseño vertical con camino con obstáculo (uno de los postes del soporte del espejo) para la luz emitida por el LED y reflejada por el espejo.

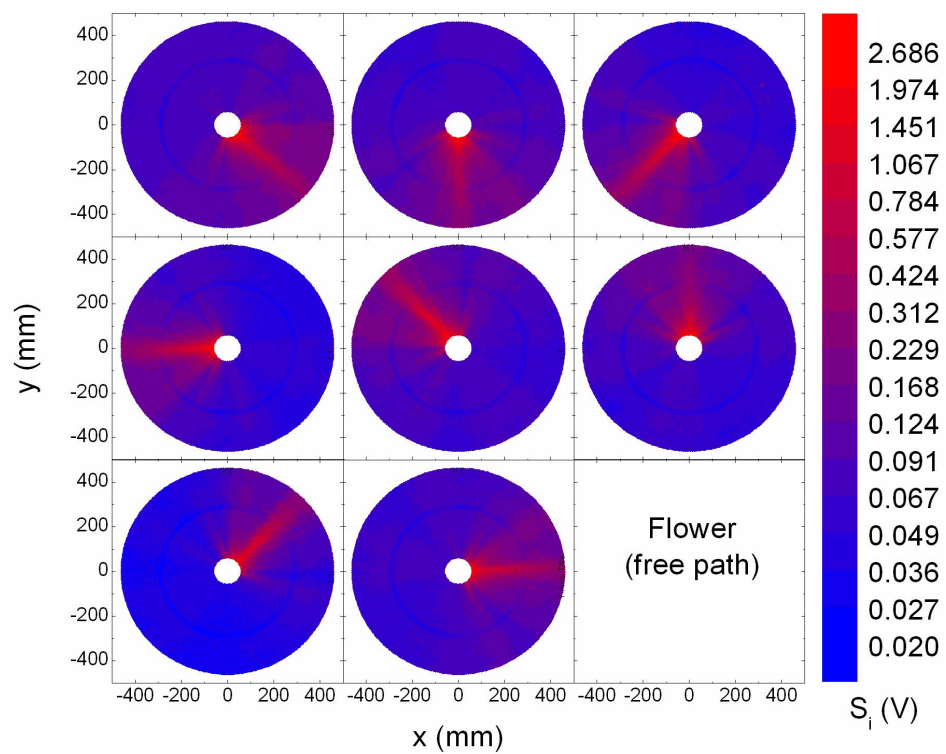


Figura 3.24. Patrones de recepción individuales medidos para cada fotodiodo para el diseño flor con camino libre para la luz emitida por el LED y reflejada por el espejo.

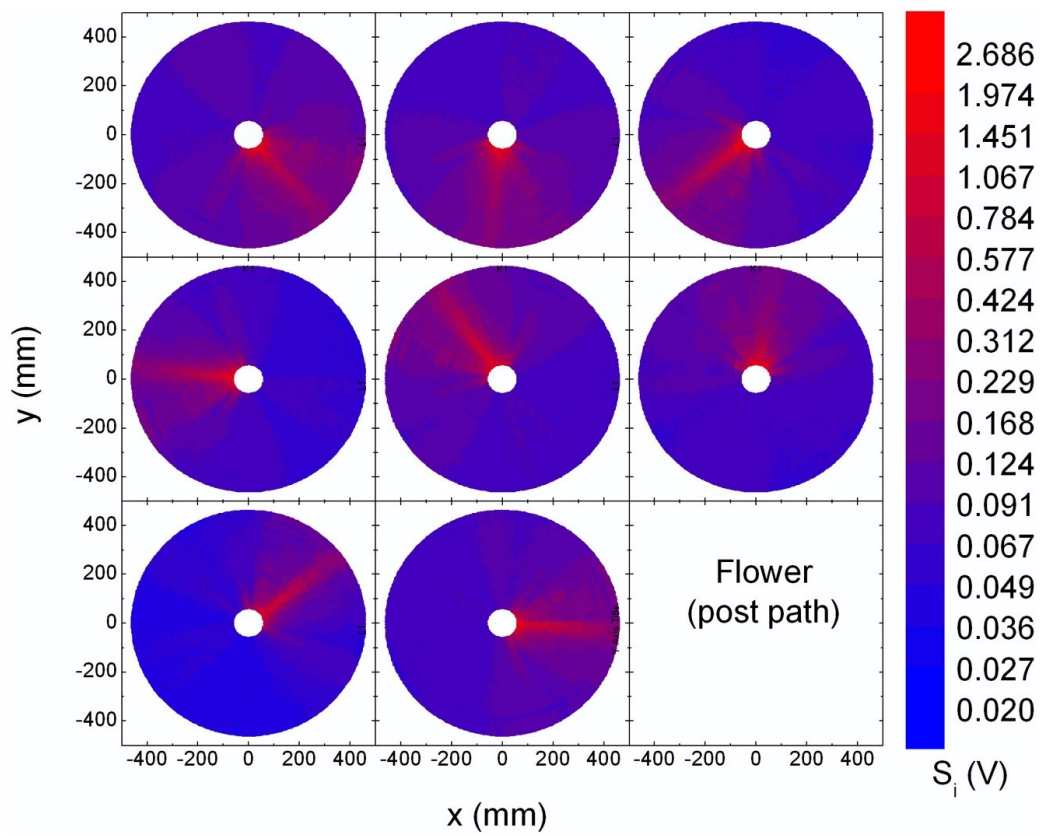


Figura 3.25. Patrones de recepción individuales medidos para cada fotodiodo para el diseño flor con camino con obstáculo (una de los postes de soporte del espejo) para la luz emitida por el LED y reflejada por el espejo.

En el siguiente capítulo se desarrollan modelos matemáticos con los que se podrá comparar el desempeño de cada sensor para detectar distancia y orientación.

Capítulo 4

Resultados y modelos matemáticos.

Para poder comparar el desempeño entre los dos diseños, en cuanto a su precisión para detectar distancia y orientación, se ha desarrollado un modelo matemático para la respuesta media de un PD para cada diseño. Para esto, primero se estimó el desfase en la orientación para cada conjunto de datos; recuerde que se obtuvo un conjunto de datos para el camino libre (free path) y uno para el camino con obstáculo (post path) para cada diseño. Para esto, se eligió un PD de cada conjunto de datos cuyo pico de su señal se encuentra lo más cerca posible a $\theta=180^\circ$. Empleando los datos medidos para todas las distancias para ese PD seleccionado, se ajustó una función Gaussiana para determinar el ángulo de compensación θ_{off} con respecto a 180° . Este ángulo de compensación se utilizó después para desplazar θ en todos los demás PDs en el mismo conjunto de datos, de tal manera que el pico de la señal del PD seleccionado quedó centrado alrededor de 180° . El pico de las señales de

los otros PD se encuentran ubicados en múltiplos de 45° alrededor de este PD, que es consistente con su posición en los sensores. Tomando esto en cuenta, para cada incremento de distancia en las mediciones, se procedió a centrar el pico de la señal de cada PD individual alrededor de 180° sumando o restando el múltiplo apropiado de 45° , dependiendo de su posición relativa con respecto al PD seleccionado. Como ejemplo, para la distancia $d=70$ mm, los datos centrados para los casos de camino libre y con obstáculo se presentan los detalles en las figuras 4.1(a) y 4.1(b) para el diseño vertical y flor, respectivamente. Consecuente a esto, para suavizar los datos centrados, el rango $\theta \in [0^\circ, 360^\circ]$ se dividió en 40 celdas y la señal promedio en cada celda se calculó, incluyendo los datos para los casos de camino libre y poste. En total, se procesaron un total de 16 señales para cada distancia, ocho de los datos para el caso de camino libre y ocho de los datos para el camino con obstáculo por cada diseño. La figura 4.1 muestra los resultados del centrado y el suavizado con el promedio sobre celdas para distancias seleccionadas en el rango $d \in [70 \text{ mm}, 400 \text{ mm}]$ con los gráficos dispersos representados con símbolos abiertos. La función que mejor se ajusta a estos datos es la función pseudo-Voigt [48, 49],

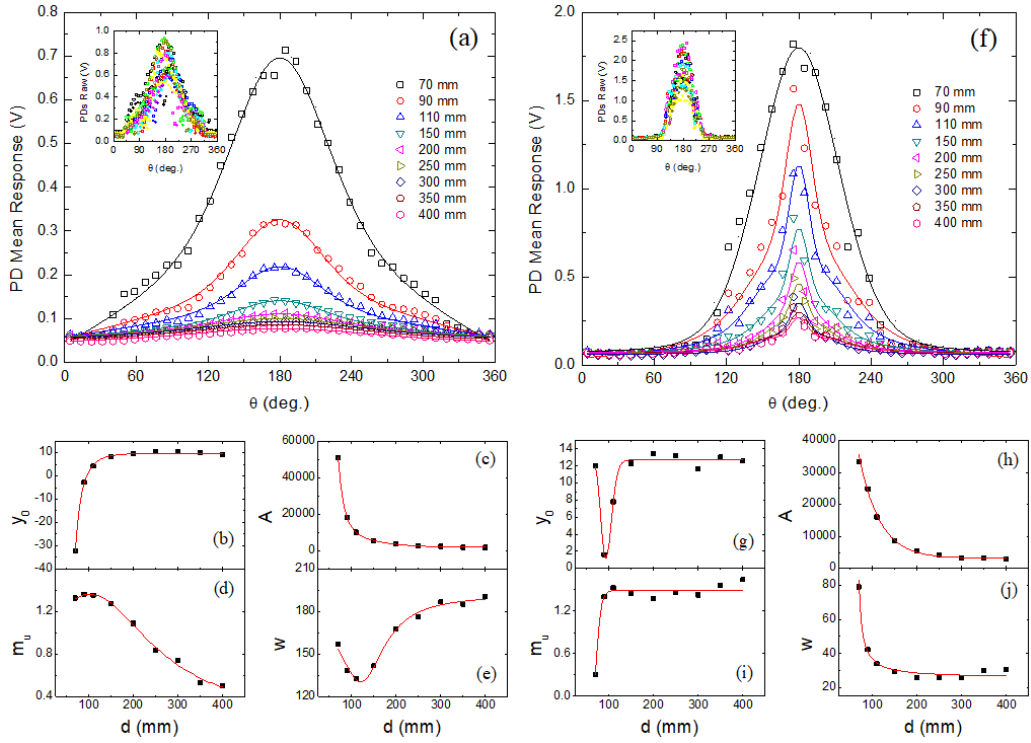


Figura 4.1. En (a) y (f), gráficos dispersos representados con símbolos abiertos para los datos suavizados, centrados y de promedio de las señales brutas de los PD individuales de las trayectorias libres y con obstáculo combinadas, en función del ángulo de orientación y para distancias seleccionadas d para los diseños verticales y de flor, respectivamente. Las curvas sólidas corresponden a los mejores ajustes con la función pseudo-Voigt de la ecuación (4.1). En (b) a (e), muestra el ajuste no lineal en función de la distancia de los datos para los parámetros y_0 , A , m_u y w de la función pseudo-Voigt para el diseño vertical. En (g) a (j), describe el ajuste no lineal en función de la distancia de los datos para los parámetros y_0 , A , m_u y w de la función pseudo-Voigt para el diseño vertical.

$$pV(d, \theta) = y_o(d) + A(d) \left[m_u \frac{2w(d)}{\pi[4(\theta - \theta_o)^2]} + [1 - m_u] \sqrt{\frac{4\log_2}{\pi w^2(d)}} e^{\left(\frac{-4\log_2}{w^2(d)} (\theta - \theta_o)^2\right)} \right] \quad (4.1)$$

De esta manera, para cada distancia fija seleccionada, ajustamos la función pseudo-Voigt a los datos centrados y suavizados como una función θ , con $\theta_0 = 180^\circ$, como se muestra en las figuras 4.1(a) y 4.1(b) con las curvas sólidas para los diseños vertical y flor, respectivamente. La dependencia del modelo sobre la distancia (d), queda codificada en la dependencia de los parámetros de ajuste y_0 , A , m_u y w sobre esta variable. Las figuras 4.1(b) a 4.1(e) muestran los ajustes no lineales de los parámetros y_0 , A , m_u y w de la función pseudo-Voigt sobre los datos, como función de la distancia, para el diseño vertical. Las funciones usadas para ajustar estos datos son la función logística para y_0 ,

$$y_0 = \frac{A_1 - A_2}{1 + (\frac{d}{d_0})^p} + A_2 \quad (4.2)$$

con los parámetros de ajuste A_1 , A_2 , d_0 , y p . Una función con dos términos de decaimiento exponencial para A ,

$$A(d) = A_0 + A_1 e^{\frac{-d}{t_1}} + A_2 e^{\frac{-d}{t_2}} \quad (4.3)$$

con parámetros de ajuste A_0 , A_1 , t_1 , A_2 y t_2 . La función de Lorentz se usó para m_u ,

$$m_u(d) = A_0 + \frac{2A_1 w_1}{\pi[4(d - d_0)^2 + w_1^2]} \quad (4.4)$$

con parámetros de ajuste A_0 , A_1 , w_1 y d_0 . La función de Lorentz también se usó para ajustar los datos de $w(d)$. Por otra parte, las figuras 4.1(g) a 4.1(j) muestran los ajustes no lineales sobre los datos para los parámetros y_0 , A , m_u y w de la función pseudo-Voigt, como función de la distancia, para el

diseño flor. Las funciones utilizadas para ajustar los datos correspondientes incluyen la función log-normal para y_0 ,

$$y_0 = A_0 + \frac{A_1}{\sqrt{2\pi w_1^2 d^2}} \exp\left[-\frac{(\log \frac{d}{d_0^2})^2}{2w_1^2}\right] \quad (4.5)$$

con parámetros de ajuste A_0, A_1, w_1 y d_0 . Un simple decaimiento exponencial se usó para ajustar los datos de A,

$$A(d) = A_0 + A_1 e^{\frac{-d}{t_1}} \quad (4.6)$$

con parámetros de ajuste A_0, A_1 y t_1 . La función de Chapman se usó para ajustar los datos de m_u ,

$$m_u(d) = a(1 - e^{-bd})^c \quad (4.7)$$

con parámetros de ajuste a, b y c. La función racional se usó para ajustar los datos de w,

$$w(d) = \frac{b + cd}{1 + ad} \quad (4.8)$$

con parámetros de ajuste a, b y c. El modelo resultante para la respuesta promedio de un PD para el diseño vertical se muestra en las figuras 3.21(b) y 3.21(c) para una distancia $d=70$ mm, donde este modelo se graficó sobre los datos medidos para cada PD y centrado alrededor de la posición correspondiente del receptor, para los datos de los casos de camino libre en la figura 3.21(b) y camino con obstáculo figura 3.21(c). De la misma forma, para el diseño flor, el modelo para la respuesta promedio de un PD se graficó sobre los datos medidos para cada PD para los casos de camino

libre en la figura 3.21(e) y el caso de camino con obstáculo en la figura 3.21(f), también para una distancia $d=70$ mm. Armados con estos modelos para la respuesta promedio de los PDs para cada diseño, se realizó una comparación sobre la detección de la distancia d y el ángulo de orientación θ predichos por el modelo correspondiente contra los datos medidos, obtenidos en una única lectura de los ocho PDs en nuestras mediciones experimentales, es decir, qué tan bueno es el modelo para estimar la distancia y la orientación a partir de las señales medidas para las cuales conocemos estas cantidades. Es importante hacer notar que los modelos son altamente no lineales, haciendo imposible invertirlos de forma explícita, por lo tanto, un análisis numérico es necesario para obtener esta información. Varios métodos numéricos se pueden considerar para esta tarea [50]. Por ejemplo, ajustar la señal medida de los ocho PDs con el modelo correspondiente utilizando un método de mínimos cuadrados no lineales en múltiples dimensiones, con d y θ como parámetros de ajuste. Sin embargo, este método requiere la derivada del propio modelo. Por el contrario, métodos que no requieren las derivadas, como el método Nelder-Mead en múltiples dimensiones, puede ser computacionalmente pesado; es necesario considerar que este análisis debe ser computacionalmente ligero, lo suficiente para ser implementado en un microcontrolador como los que se emplean típicamente en el desarrollo de prototipos de robots móviles para estudios en robótica de enjambre. Por esta razón, se eligió un enfoque simplificado que minimiza la función,

$$\chi_{sq} = \sum_{i=1}^8 [S_i(d, \theta) - pV_i(d, \theta)]^2 \quad (4.9)$$

Donde S_i corresponde a la señal medida experimentalmente para cada

PD y pV_i corresponde al modelo relevante, centrado alrededor de la posición de cada PD conforme a su posición en el sensor. Primero minimizamos esta cantidad con un barrido grueso dentro de los rangos $d \in [70 \text{ mm}, 450 \text{ mm}]$ y $\theta \in [0^\circ, 360^\circ]$, con una resolución de 10 mm en distancia y aproximadamente 10 de arco en orientación, sobre todos los puntos de nuestras mediciones experimentales. Después, realizamos una segunda minimización sobre todos los datos experimentales con un barrido fino alrededor de los mínimos para d y θ obtenidos a partir del barrido grueso, con un rango de ± 30 mm en distancia y $\pm 30^\circ$ en orientación. Finalmente, calculamos los errores absolutos medios [51] como función de la distancia d , promediando sobre la orientación θ para cada incremento de distancia en los datos experimentales. En las ecuaciones, los subíndices se refieren a los datos de las mediciones experimentales y la predicción del modelo, mientras que n_θ corresponde al número de puntos con diferente orientación para una distancia dada. Debemos mencionar que el error absoluto medio se calculó sobre todos los datos experimentales medidos para un diseño dado, vertical o flor, incluyendo ambos conjuntos de datos para camino libre y con obstáculo. Los resultados se presentan en la figura 4.2 donde se puede apreciar que el diseño vertical resuelve mejor la distancia en comparación con el diseño flor, mientras que el diseño flor tiene una mejor resolución en orientación en comparación con el diseño vertical. En general, la precisión de los dos diseños disminuye con la distancia.

$$d_{MAE} = \frac{\sum_{i=1}^{n_\theta} |d_{exp} - d_{mod}|}{n_\theta} \quad (4.10)$$

$$\theta_{MAE} = \frac{\sum_{i=1}^{n_\theta} |\theta_{exp} - \theta_{mod}|}{n_\theta} \quad (4.11)$$

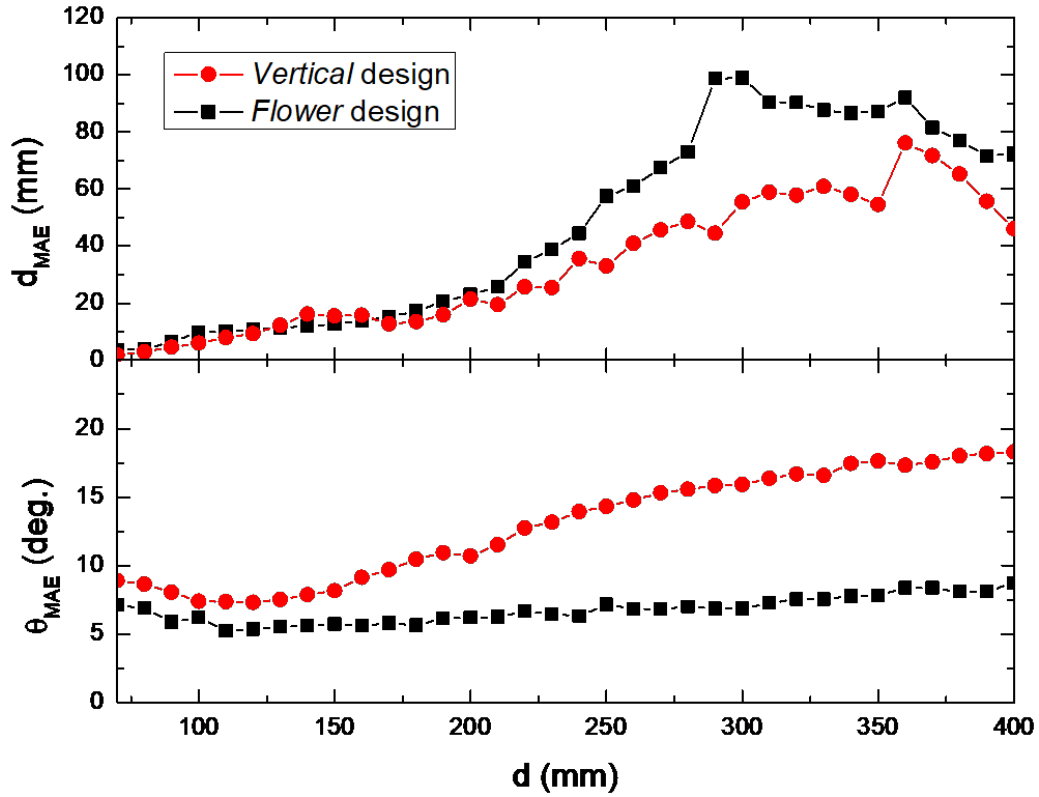


Figura 4.2. Error absoluto medio que compara la distancia y orientación experimentales con las predichas al invertir el modelo, como función de la distancia d y promediada sobre la orientación θ para cada incremento en la distancia para los dos diseños: vertical con curvas rojas con círculos y con curvas sólidas negras con cuadrados.

Capítulo 5

Conclusiones

- Se construyeron dos diseños de sensores de visión catadióptricos omnidireccionales sin cámara, fabricados con componentes discretos: un LED y ocho fotodiodos infrarrojos, y un espejo hecho a medida con simetría rotacional.
- Se desarrollaron los métodos necesarios para diseñar y fabricar los espejos, lo que permite cubrir el rango de interacción de un diámetro de robot (66 mm) hasta cinco diámetros de robots (330 mm).
- Los sensores de visión desarrollados son adecuados para prototipos de robots móviles para estudios en robótica de enjambre sobre un plano y podrían emplearse fácilmente para implementar comunicaciones si se implementa un protocolo de comunicación entre ellos adecuado en el método de detección.
- A partir de los resultados, se puede observar que el diseño vertical tiene un mejor nivel de detalle o precisión con el que un robot puede medir o

determinar su posición para determinar la distancia a partir de una sola lectura de las señales de los ocho fotodiodos, mientras que el diseño flor es más adecuado para determinar la orientación entre agentes robóticos.

- Se podrían lograr mejoras en su precisión implementando técnicas utilizadas previamente por otras plataformas, donde los robots se detienen y realizan un barrido de mediciones para disminuir el ruido en las señales recibidas y aumentar el número de datos para su procesamiento.
- Este tipo de sensores, inspirados en sensores de visión que se pueden encontrar en sistemas biológicos, con un número determinado de receptores, son populares y necesarios en el desarrollo de plataformas robóticas para estudios en robótica de enjambre. Dados los resultados obtenidos en esta tesis, los diseños y métodos pueden resultar útiles para futuras aplicaciones en este campo, ya que el procesamiento de datos para determinar la posición del robot es menos complejo y de bajo costo.

Referencias

- [1] Li L, Liu Y-H and Wang K 2014 An adaptive algorithm for position and linear velocity estimation of mobile robots using inertial sensors and omnidirectional vision Proceeding of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation 952-957
- [2] Ke X, Huang F, Zhang Y, Tu Z and Song W 2021 3D scene localization and mapping based on omnidirectional SLAM IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 783 012143
- [3] Spacek L 2005 A catadioptric sensor with multiple viewpoints Robot. Auton. Syst. 51 3-15
- [4] Tang Y, Li Y F and Luo J 2014 Geometric neighborhood model for visual tracking in central catadioptric omnidirectional vision IEEE/ROBIO 1817-1822
- [5] Barone S, Carulli M, Neri P, Paoli A and Razonale A 2018 An omnidirectional vision sensor based on a spherical mirror catadioptric system Sensors 18 408
- [6] Chen S, Xiang Z, Zou N Chen Y and Qiao C 2020 Multi-stereo 3D reconstruction with a single-camera multi-mirror catadioptric system Meas. Sci. Technol. 31 015102

-
- [7] Patruno C, Ren V, Nitti M, Mosca N, di SummaMand Stella E 2024 Vision-based omnidirectional indoor robots for autonomous navigation and localization in manufacturing industry *Heliyon* 10 e26042
- [8] Hadjidemetriou S 2024 Regiomontanus angle maximization for catadioptric sensors with paraboloidal mirrors *Sci. Rep.* 14 18532
- [9] Luo R C and Su K L 2003 A multiagent multisensor based real-time sensory control system for intelligent security robot *IEEE Int. Conf. Robot. Autom.* 2394-2399
- [10] Elamvazhuthi K and Berman S 2020 Mean-eld models in swarm robotics: a survey *Bioinspir. Biomim.* 15 015001
- [11] Dushing R B, Jagtap S A, Kumar P, Patil G G, Pal P and Singh S K 2022 Swarm Robotics for Ultra-Violet Sterilization Robot *IEEE/INCOFT* 1-5
- [12] Shahzad M M, Saeed Z, Akhtar A, Munawar H, Yousaf M H, Baloach N K and Hussain F A 2023 Review of Swarm Robotics in a NutShell *Drones* 7 269
- [13] Rubenstein M, Cornejo A and Nagpal R 2014 Programmable self-assembly in a thousand-robot swarm *Science* 345 795
- [14] Deblais A, Barois T, Guerin T, Delville P H, Vaudaine R, Lintuvuori J S, Boudet J F, Baret J C and Kellay H 2018 Boundaries Control Collective Dynamics of Inertial Self-Propelled Robots *Phys. Rev. Lett.* 120 188002
- [15] Evans W C, Mermoud G and Martinoli A 2010 Comparing and modeling distributed control strategies for miniature self-assembling robots *IEEE Int. Conf. Robot. Autom.* 1438-1445
- [16] Lim S, Wang S, Lennox B and Arvin F 2021 BeeGround -

An Open-Source Simulation Platform for Large-Scale Swarm Robotics Applications IEEE Int. Conf. Robot. Autom. 75-79

[17] Petracek P, Walter V, Baca T and Martin S 2021 Bio-inspired compact swarms of unmanned aerial vehicles without communication and external localization Bioinspir. Biomim. 16 026009

[18] Kornienko S, Kornienko O, Constantinescu C, Pradier M and Levi P 2005 Cognitive micro-Agents: individual and collective perception in microrobotic swarm Proc. of the IJCAI-05 Workshop on Agents in real-time and dynamic environment 33-42

[19] <http://www.swarmrobot.org>

[20] Arvin, F, Samsudin K and Ramli A R 2009 Development of a miniature robot for swarm robotic application IJCEE 1 436-442

[21] Arvin F, Samsudin K and Ramli A R 2009 A Short-Range Infrared Communication for Swarm Mobile Robots 2009 International Conference on Signal Processing Systems 454-458

[22] Caprari G and Siegwart R 2005 Mobile micro-robots ready to use: Alice 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 3295-3300

[23] Rubenstein M, Ahler C and Nagpal R 2012 Kilobot: A low cost scalable robot system for collective behaviors IEEE Int. Conf. Robot. Autom. 3293-3298

[24] Vartholomeos P and Papadopoulos E 2006 Analysis, design and control of a planar micro-robot driven by two centripetal-force actuators IEEE Int. Conf. Robot. Autom. 649-654

[25] Serres J R and Viollet S 2018 Insect-inspired vision for autonomous

vehicles *Current Opinion in Insect Science* 30 46-51

[26] Fuller S B and Murray R M 2011 A hovercraft robot that uses insect- inspired visual autocorrelation for motion control in a corridor *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics* 1474-1481

[27] Vasseur, P., Y Morbidi, F. (Eds.). (2024). *Omnidirectional vision: From theory to applications*. ISTE

[28] Barone, S., Carulli, M., Neri, P., Paoli, A., and Razionale, A. (2018). An omnidirectional vision sensor based on a spherical mirror catadioptric system. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 18(2), 408. <https://doi.org/10.3390/s18020408>

[29] Xiong, D., Xiao, J., Lu, H., Zeng, Z., Yu, Q., Huang, K., Yi, X., and Zheng, Z. (2016). The design of an intelligent soccer-playing robot. *The Industrial Robot*, 43(1), 91–102. <https://doi.org/10.1108/ir-05-2015-0092>

[30] L. Payá, A. Gil, and O. Reinoso. (2017). A State of the Art Review on Mapping and Localization of Mobile Robots Using Omnidirectional Vision Sensors. *Hindawi, Journal of Sensors*, Volume 2017, Article ID 3497650, 20 pages.

[31] Spacek, L. (2005). A catadioptric sensor with multiple viewpoints. *Robotics and Autonomous Systems*, 51(1), 3–15. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2004.08.009>

[32] Liu, Y., Zhou, F., Zhang, W., Yang, L., Guo, Z., and Tan, H. (2024). Flexible calibration method for a quad-directional stereo vision sensor based on unconstraint 3-D target. *IEEE sensors journal*, 24(3), 3499–3512. <https://doi.org/10.1109/jsen.2023.3344594>

[33] Fakhreddine Ababsa et al.(2020) 3D Human Pose Estimation with

a Catadioptric Sensor in Unconstrained Enviroments Using an Annealed Particle Filter.MDPI,20,1-17.

[34] Yuanzen Chen et al.(2021). A Novel Mirrores Binocular Vision Sensor Based on Spherical Catadioptric Mirrors.IEEE,21,18870-18681.

[35] Miyagi, Y. (s.f.). 6. Óptica Geométrica.

[36] Dr. Rüdiger Paschotta. Reflection of light where the angle of reflected light equals the angle of incident light, but on the opposite side of the surface normal.https://www.rp-photonics.com/specular_reflection.html

[37] Lifeder. (30 de marzo de 2021). Reflexión de la luz.<https://www.lifeder.com/reflexion-de-la-luz/>.

[38] L. Payá, A. Gil, and O. Reinoso. (2017).A State of the Art Review on Mapping and Localization of Mobile Robots Using Omnidirectional Vision Sensors.Hindawi, Journal of Sensors, Volume 2017, Article ID 3497650, 20 pages.

[39] Aranda, M., López-Nicolás, G., and Sagüés, C. (2017). Control of multiple robots using vision sensors (1a ed.). Springer International Publishing.

[40] Amoros, F., Paya, L., Mayol-Cuevas, W., Jimenez, L. M., and Reinoso, O. (2020). Holistic descriptors of omnidirectional color images and their performance in estimation of position and orientation. IEEE access: practical innovations, open solutions, 8, 81822–81848. <https://doi.org/10.1109/access.2020.2990996>

[41] Gompper, G., Winkler, R. G., Speck, T., Solon, A., et. al. (2020). The 2020 motile active matter roadmap. Journal of Physics. Condensed Matter: An Institute of Physics Journal, 32(19), 193001.

<https://doi.org/10.1088/1361-648X/ab6348>

[42] T., Lauga, E., Poon, W. C. K., DeSimone, A., Muiños-Landin, S., Fischer, A., Söker, N. A., Cichos, F., Kapral, R., ... Kale, S. (2020). The 2020 motile active matter roadmap. *Journal of Physics. Condensed Matter: An Institute of Physics Journal*, 32(19), 193001. <https://doi.org/10.1088/1361-648X/ab6348>

[43] Jülicher, F., Grill, S. W., Salbreux, G. (2018). Hydrodynamic theory of active matter. *Reports on Progress in Physics. Physical Society (Great Britain)*, 81(7), 076601. <https://doi.org/10.1088/1361-6633/aab6bb>

[44] Burden, R. L. (2011). *Analisis Numerico* (9a ed.). Cengage Learning Editores S.A. de C.V.

[45] Shan, Q., and Mostaghim, S. (2023). Noise-resistant and scalable collective preference learning via ranked voting in swarm robotics. *Swarm Intelligence*, 17(1–2), 5–26. <https://doi.org/10.1007/s11721-022-00214-z>

[46] Xiong, D., Xiao, J., Lu, H., Zeng, Z., Yu, Q., Huang, K., Yi, X., and Zheng, Z. (2016). The design of an intelligent soccer-playing robot. *The Industrial Robot*, 43(1), 91–102. <https://doi.org/10.1108/ir-05-2015-0092>

[47] Wolberg F and Alfey I 1999 Monotonic cubic spline interpolation *Proceedings Computer Graphics International* 188-195

[48] Wertheim G K, Butler M A, West K W and Buchanan D N E 1974 Determination of the Gaussian and Lorentzian content of experimental line shapes *Rev. Sci. Instrum.* 45 13691371

[49] Sanchez-Bajo F and Cumbrera F L 1997 The Use of the Pseudo-Voigt Function in the Variance Method of X-ray Line-Broadening Analysis *J. Appl. Cryst.* 30 427-430

[50] Press W H, Teukolsky S A, Vetterling W T and Flannery B P 1997 Numerical Recipes in Fortran 77: The Art of Scientific Computing (Vol. 1 of Fortran Numerical Recipes) 2nd edn (United States of America: Cambridge University Press)

[51] Willmott C J and Matsuura K 2005 Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance *Climate Research*. 30 7982

[52] G. Dogangil, B. L. Davies, and F. Rodriguez y Baena, A review of medical robotics for minimally invasive soft tissue surgery, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part H J. Eng. Med.*, vol. 224, no. 5, pp. 653–679, 2010

[53] M. Cenk Çavuşoğlu, W. Williams, F. Tendick, and S. Shankar Sastry, “Robotics for telesurgery: second generation Berkeley/UCSF laparoscopic telesurgical workstation and looking towards the future applications,” *Ind. Robot An Int. J.*, vol. 30, no. 1, pp. 22–29, 2003

[54] Gompper, G., Winkler, R. G., Speck, T., Solon, A., Nardini, C., Peruani, F., Löwen, H., Golestanian, R., Kaupp, U. B., Alvarez, L., Kjørboe, T., Lauga, E., Poon, W. C. K., DeSimone, A., Muiños-Landin, S., Fischer, A., Söker, N. A., Cichos, F., Kapral, R., ... Kale, S. (2020). The 2020 motile active matter roadmap. *Journal of Physics. Condensed Matter: An Institute of Physics Journal*, 32(19), 193001. <https://doi.org/10.1088/1361-648X/ab6348>

[55] R. O’Grady, R. Groß, F. Mondada, M. Bonani, and M. Dorigo, “Self-assembly on Demand in a Group of Physical Autonomous Mobile Robots Navigating Rough Terrain,” in *Advances in Artificial Life*, T. J. Capcarrère Mathieu S., Freitas Alex A., Bentley Peter J., Johnson Colin

G., Ed. Springer, 2005, pp. 272–281

[56] Rubenstein, M., Cornejo, A., Y Nagpal, R. (2014). Robotics. Programmable self-assembly in a thousand-robot swarm. *Science* (New York, N.Y.), 345(6198), 795–799

[57] M. Cenk Çavuşoğlu, W. Williams, F. Tendick, and S. Shankar Sastry, “Robotics for telesurgery: second generation Berkeley/UCSF laparoscopic telesurgical workstation and looking towards the future applications,” *Ind. Robot An Int. J.*, vol. 30, no. 1, pp. 22–29, 2003

[58] Alikhani, A., Osner, S., Dehghani, S., Busam, B., Inagaki, S., Maier, M., Navab, N., and Nasser, M. A. (2023). RCIT: A robust catadioptric-based instrument 3D tracking method for microsurgical instruments in a single-camera system. *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Annual International Conference*, 2023, 1–5. <https://doi.org/10.1109/EMBC40787.2023.10340955>

[59] Chen, N., Kong, F., Xu, W., Cai, Y., Li, H., He, D., Qin, Y., and Zhang, F. (2023). A self-rotating, single-actuated UAV with extended sensor field of view for autonomous navigation. *Science Robotics*, 8(76), eade4538. <https://doi.org/10.1126/scirobotics.ade4538>

[60] Dai, W., Lu, H., Xiao, J., and Zheng, Z. (2019). Task allocation without communication based on incomplete information game theory for multi-robot systems. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 94(3–4), 841–856. <https://doi.org/10.1007/s10846-018-0783-y>

[61] Javierre, P., Alvarado, B. P., and de la Puente, P. (2019). Particle filter localization using visual markers based omnidirectional vision and

a laser sensor. 2019 Third IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC).

[62] Kholodilin, I., Li, Y., and Wang, Q. (2020). Omnidirectional vision system with laser illumination in a flexible configuration and its calibration by one single snapshot. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, 69(11), 9105–9118. <https://doi.org/10.1109/tim.2020.2998598>

[63] Seok, H., and Lim, J. (2020). ROVINS: Robust Omnidirectional Visual Inertial Navigation System. *IEEE robotics and automation letters*, 5(4), 6225–6232. <https://doi.org/10.1109/lra.2020.3010457>