



**Universidad del Azuay**

**Facultad de Ciencia y Tecnología**

**Escuela de Ingeniería Electrónica**

*Desarrollo de un Sistema de Comunicación por Luz Visible para el Control de  
Robots Móviles en Ambientes Interiores*

**Trabajo de graduación previo a la obtención del título de  
Ingeniero Electrónico**

**Autor:** Gustavo Rafael Robalino Sánchez

**Director:** Ing. Daniel Iturralde Piedra Ph.D.

Cuenca, Ecuador

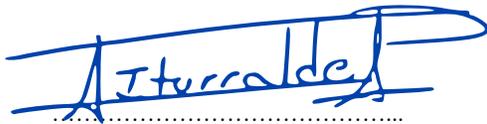
2021

# Desarrollo de un Sistema de Comunicación por Luz Visible para el Control de Robots Móviles en Ambientes Interiores

## RESUMEN

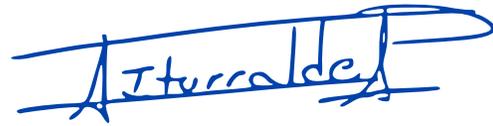
En este trabajo se desarrolló un sistema de comunicación por luz visible (VLC), cuyo propósito es realizar el control de robots móviles en ambientes interiores. Un aspecto importante para realizar el control del robot es determinar su posición, para la cual se utilizó el concepto de Identificación de Celda (Cell ID) en el sistema. Posteriormente, se le realizaron pruebas para conocer la eficiencia de la transmisión de datos y determinar el error de posicionamiento de dicho sistema.

**Palabras Clave:** VLC, Robots Móviles, Localización en interiores.



Ing. Daniel Iturralde Piedra Ph.D.

**Coordinador de carrera**



Ing. Daniel Iturralde Piedra Ph.D.

**Director de trabajo de Titulación**



Gustavo Rafael Robalino

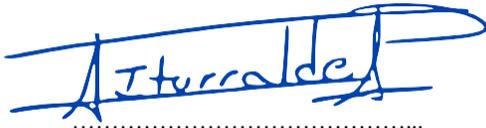
**Autor**

# Development of a Communication System by Visible Light for the Control of Mobile Robots in Indoor Environments

## ABSTRACT

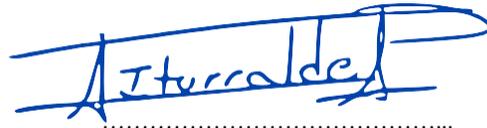
In this work, a visible light communication system (VLC) was developed, whose purpose is to control mobile robots in indoor environments. An important aspect to control the robot is to determine its position, for which the concept of Cell Identification (Cell ID) was used in the system. Subsequently, tests were carried out to determine the efficiency of the data transmission and determine the positioning error of the said system.

**Keywords:** VLC, Mobile Robots, Indoor Location.



Eng. Daniel Iturralde Piedra Ph.D.

**Faculty School Director**



Eng. Daniel Iturralde Piedra Ph.D.

**Thesis Director**



Gustavo Rafael Robalino

**Author**

**Translated by**



Gustavo Rafael Robalino

# *Desarrollo de un Sistema de Comunicación por Luz Visible para el Control de Robots Móviles en Ambientes Interiores*

Gustavo Rafael Robalino Sánchez  
Universidad Del Azuay  
Ingeniería Electrónica  
Cuenca, Ecuador  
[gustavorrs@es.uazuay.edu.ec](mailto:gustavorrs@es.uazuay.edu.ec)

Daniel Iturralde  
Universidad Del Azuay  
Ingeniería Electrónica  
Cuenca, Ecuador  
[diturralde@uazuay.edu.ec](mailto:diturralde@uazuay.edu.ec)

*Palabras Clave:* VLC, Robots Móviles, Localización en interiores.

**Resumen—** En este trabajo se desarrolló un sistema de comunicación por luz visible (VLC), cuyo propósito es realizar el control de robots móviles en ambientes interiores. Un aspecto importante para realizar el control del robot es determinar su posición, para la cual se utilizó el concepto de Identificación de Celda (Cell ID) en el sistema. Posteriormente se le realizaron pruebas para conocer la eficiencia de la transmisión de datos y determinar el error de posicionamiento de dicho sistema.

## I. INTRODUCCIÓN

El posicionamiento rápido y preciso de robots móviles en ambientes interiores se ve limitado por el uso de tecnologías de localización convencionales, como los sistemas de posicionamiento global (GPS). Esto se debe a la baja intensidad de las señales de radio y la incapacidad de penetración a través de paredes en edificios y casas. Los dispositivos con sistema GPS en interiores, tienden a dar errores de desplazamiento significativos como consecuencia de una conexión débil o nula con los satélites.

Los métodos más usados habitualmente, como puntos de referencia, ultrasonidos o sistemas de radiofrecuencia sufren de varias deficiencias. Por ejemplo, los puntos de referencia no son efectivos en ambientes con obstáculos, los sistemas basados en ultrasonido son limitados por la distancia y la ubicación del sensor en el robot, los sistemas que usan radiofrecuencia tienen problemas de refracción en superficies en ambientes interiores, lo que conlleva a errores de posicionamiento [1-3].

Como un nuevo y práctico método de comunicación inalámbrica, las Comunicaciones por Luz Visible (VLC) poseen ventajas en la transmisión de datos a altas velocidades, sin atenuaciones considerables, siendo una excelente opción para sistemas en los que se necesite la emisión o recepción de datos de forma segura y estable; razón por la cual, en este caso se propone como opción para aplicar al control de robots móviles. Además, cuando se utiliza la comunicación por luz

visible para transmitir información, esta no se ve afectada por las ondas electromagnéticas [1].

Investigaciones recientes en VLC han demostrado con éxito la transmisión de datos a más de 10 Gbps en un enlace de corto alcance, la tendencia es hacia una velocidad de datos y una cobertura aún mayor. Se anticipa que las actividades de investigación y desarrollo en curso abordarán los desafíos pendientes en VLC que abrirán nuevas posibilidades, particularmente para complementar los sistemas de comunicación de radio / microondas así como las tecnologías de iluminación [2].

En [3], se propone un método novedoso para la localización y navegación de múltiples robots móviles. Este método utiliza luz codificada superpuesta a una imagen visual y proyectada en los robots. Los robots localizan su posición al recibir y decodificar la luz proyectada, pueden seguir a un objetivo utilizando el campo de vector de velocidad codificado. Se evalúa experimentalmente la precisión de localización de este sistema tanto para robots estacionarios como móviles. Para ilustrar aún más la utilidad del sistema propuesto, se demuestra la navegación de múltiples robots móviles en campos vectoriales que varían tanto espacial como temporalmente.

En [4], se propone el desarrollo de un sistema de navegación interior con un robot utilizando la técnica de VLC. La dirección de movimiento del robot es seguida por la señal de control de movimiento transmitida desde cada lámpara LED (*Light Emitting Diode*). El sistema de planificación de ruta calcula la trayectoria desde la ubicación del usuario, el destino y los puntos seleccionados, en función de la configuración del usuario se determina la distancia más corta o la ruta de prioridad. El sistema contiene varias lámparas LED VLC, un robot VLC, un teléfono inteligente con aplicación de control de robot y un servidor.

Como estudio preliminar de la aplicación VLC, se desarrolla un sistema de control basado en VLC para un robot con ruedas, que incluye un transmisor y receptor VLC. El

transmisor y el receptor pueden codificar y decodificar las señales luminosas. Finalmente, se prueba la forma de onda de la señal del transmisor y del receptor, para luego evaluar el rendimiento del sistema en un robot de tubería real. Los resultados experimentales revelaron que el sistema VLC propuesto podría lograr una transmisión de señal confiable y proporcionar un buen control e iluminación para el robot en la tubería [5].

La estructura del presente trabajo está compuesta de la siguiente manera: En la sección I consta la problemática y estados del arte que son bases para explicar y justificar el planteamiento de este trabajo, en la sección II se presenta el marco teórico que abarca conceptos fundamentales para el presente trabajo, la sección III describe el hardware y software que se desarrolló para el sistema propuesto, la sección IV muestra los resultados obtenidos y por último en la sección V se detallan las conclusiones.

## II. MARCO TEÓRICO

### A. Concepto de VLC

El concepto de VLC se introdujo por primera vez hace más de 20 años en Japón. En los últimos años, se ha presentado una creciente investigación en VLC para comunicaciones de datos y localización en interiores.

Esta tecnología utiliza lámparas fluorescentes para transmitir señales a una velocidad de 10 kbit/s, o LED que pueden alcanzar velocidades de hasta 500 Mbit/s. Existen dispositivos diseñados para recibir señales de fuentes de luz mediante un fotodiodo que lleva incorporado.

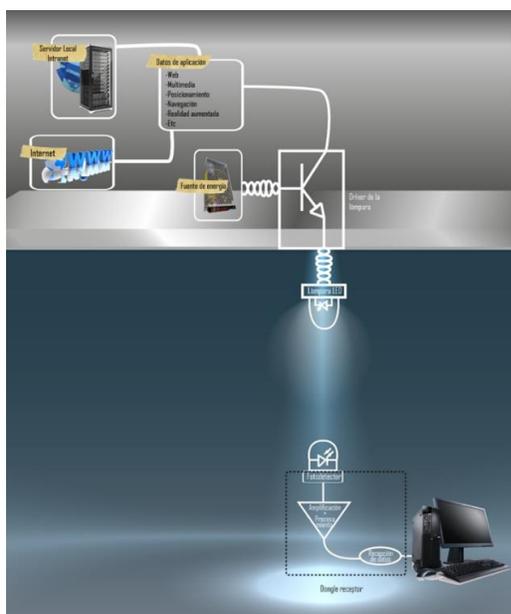


Fig. 1. Principio de funcionamiento de VLC.

Únicamente se necesita un modulador en el transmisor que apagará y encenderá la lámpara rápidamente, creando así los ceros y unos binarios, y, un fotodiodo en la parte de recepción que recogerá los cambios de luz y los pasará otra vez al dominio eléctrico [6].

### B. Robots Móviles

Un robot móvil se define como un sistema electromecánico capaz de desplazarse de manera autónoma sin estar sujeto físicamente a un solo punto. Normalmente su control es en lazo cerrado. El desplazamiento de estos es proporcionado mediante dispositivos de locomoción, tales como ruedas, patas, orugas, etc.

A partir de la década de los setenta, la investigación y diseño de robots móviles creció de manera exponencial; por ejemplo, destacan el Lunar Rover, diseñado particularmente para la exploración planetaria. A finales de esa década, Moravec desarrolló el Stanford Cart, capaz de seguir una trayectoria delimitada por una línea establecida en una superficie, en la Universidad de Stanford. Raibert fue desarrollado en el MIT3, un robot de una sola pata diseñado para estudiar la estabilidad de estos sistemas y brindar un conocimiento más profundo acerca de este tipo de locomoción. A principios de la década de los noventa, Vos et al. desarrollaron un robot "uniciclo" (una sola rueda, similar a la de una bicicleta) en el MIT.

Los robots móviles se clasifican por el tipo de locomoción utilizado; en general, los tres medios de movimiento son: por ruedas, por patas y por orugas. Si bien la locomoción por patas y orugas ha sido ampliamente estudiada, el mayor desarrollo está en los Robots Móviles con Ruedas (RMR), esto es debido a las ventajas que presentan las ruedas respecto a las patas y a las orugas. Dentro de los atributos más relevantes de los RMR, destacan su eficiencia en cuanto a energía en superficies lisas y firmes, a la vez que no causan desgaste en la superficie donde se mueven y requieren un número menor de partes, normalmente menos complejas en comparación con los robots de patas y de orugas, lo que permite que su construcción sea más sencilla. La Figura 2 muestra los distintos tipos de locomoción [7].

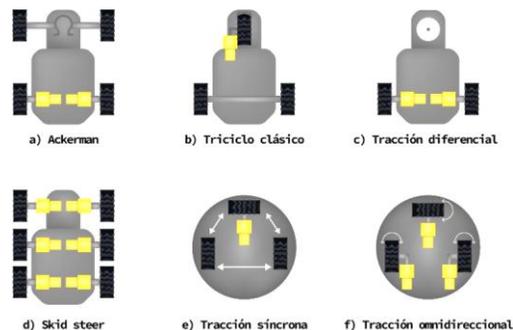


Fig. 2. Clasificación de robots móviles con ruedas.

Típicamente una plataforma móvil de tracción diferencial cuenta con dos pares de ruedas: dos ruedas de tracción que tienen acoplados dos motores DC, dos ruedas de estabilización que mantienen el balance del vehículo como se puede apreciar en la Figura 3 [8].

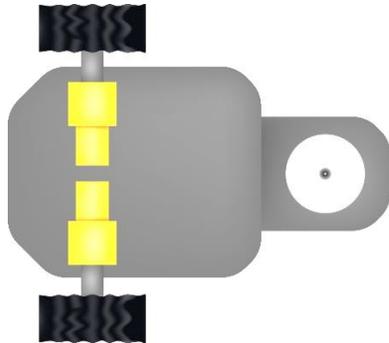


Fig. 3. Tracción diferencial.

### C. Ubicación por Identificación de Celda (Cell ID)

La identificación de celda, también denominada ID de celda (CID), es una técnica de localización que estima la ubicación de las Estaciones Móviles mediante la posición de los puntos de referencia fijos (FRP) a los que están conectadas dichas estaciones. En la práctica, "ID de celda" significa una medición real obtenida en el sistema de posicionamiento. El ID de celda luego se indexa en una base de datos para determinar la posición y el rango de precisión del FRP. Por lo tanto, la precisión de esta técnica está limitada por el rango de comunicación física de los FRP [9].

La identificación de celda, Figura 4, se usa a menudo en combinación con otros tipos de información, como mediciones de rango y/o ángulo, información de mapas de cobertura entre otros.

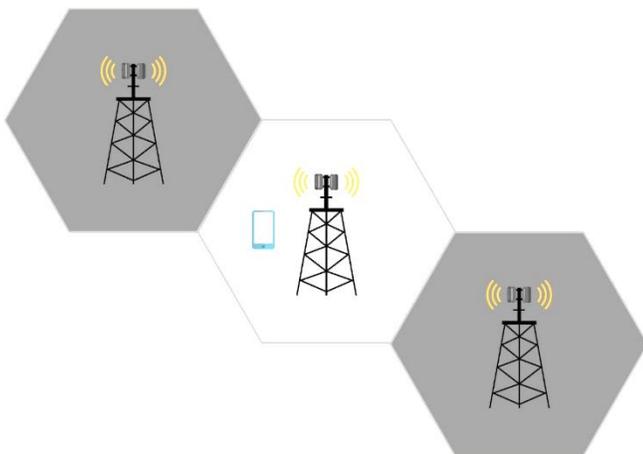


Fig. 4. Ubicación por Identificador de Celda.

## III. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

Para la descripción del sistema, se ha considerado dividirlo en dos áreas, el hardware, que son los elementos eléctricos y electrónicos que lo conforman, en cuya descripción constan los diagramas de conexión y el funcionamiento de los mismos; por otra parte, la segunda área es el software empleado, donde consta los diagramas de flujo y la funcionalidad del mismo. La Figura 5 muestra el esquema completo del sistema.

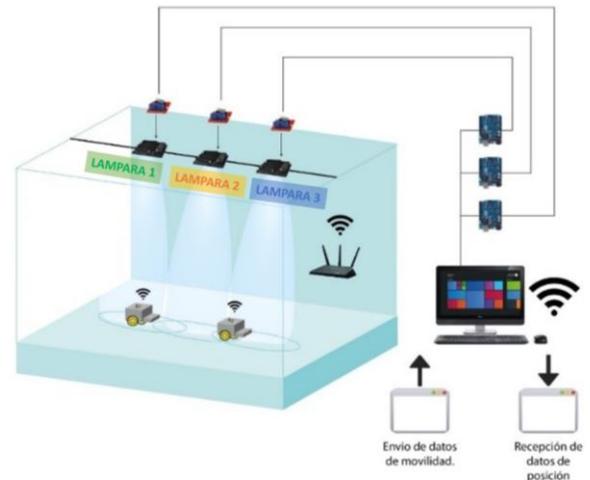


Fig. 5. Esquema del sistema desarrollado.

### A. Hardware

Los sistemas que se aplicaron fueron divididos en 3 áreas, las cuales son: VLC, definida como el transmisor de datos; Robot Móvil, que es el que receptorá la señal de los transmisores y ejecutará la función designada por el comando recibido; finalmente, el módulo Wi-Fi que se encargará de la recepción del dato enviado y transmitirá información que indique las ubicaciones de los robots dentro del área de trabajo. A continuación, se detalla el desarrollo que se llevó a cabo en cada una de las áreas.

- VLC

El sistema VLC está compuesto de tres lámparas o reflectores LED de 10W de potencia colocados a un metro de la superficie de incidencia del área de trabajo, un módulo IRF520, que sirve para la codificación de información que es enviada desde un microprocesador Arduino UNO, un convertor AC/DC que estará conectado a la red eléctrica de 120V.

La energía proporcionada por el convertor AC/DC ingresará al módulo IRF520, el funcionamiento de este elemento se basa en MOSFET, por lo que actuará como un

interruptor que será accionado cada vez que reciba información desde el Arduino UNO.

La información será transmitida hacia las lámparas LED, que cambiarán de estado (prendido/apagado) de acuerdo a los bits de información transmitida. El sistema VLC al estar conformado por 3 lámparas LED podrá enviar distinta información por cada una de ellas. Como se puede ver en la Figura 6, existe un microcontrolador por cada lámpara lo que facilita la transmisión de información.

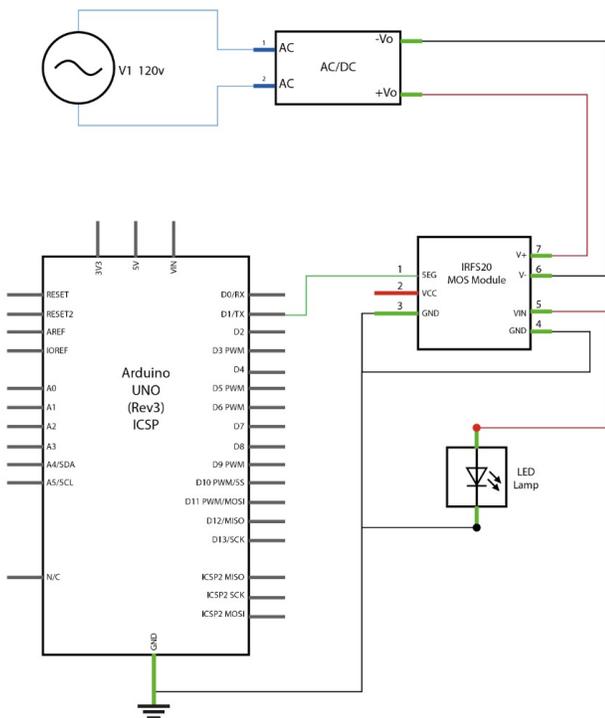


Fig. 6. Diagrama esquemático del Sistema VLC (transmisor).

- **Robot Móvil**

El robot empleado, es un robot de tracción diferencial, con la capacidad de moverse en el entorno determinado. El diseño del robot se basa en tres ruedas, proporciona una buena estabilidad, con la ventaja de ser mecánicamente más simple ya que este no necesita unión entre las ruedas direccionales.

Los componentes del robot móvil son: un controlador Arduino Nano, un módulo de luz de fotodiodo (receptor), un módulo WI-Fi ESP8266 (transmisor), un módulo Puente H L298N, dos motores de 5v DC, una rueda orientable no centrada y una batería de 7,4v DC. En la figura 7 se puede ver el circuito de todos los elementos electrónicos conectados.

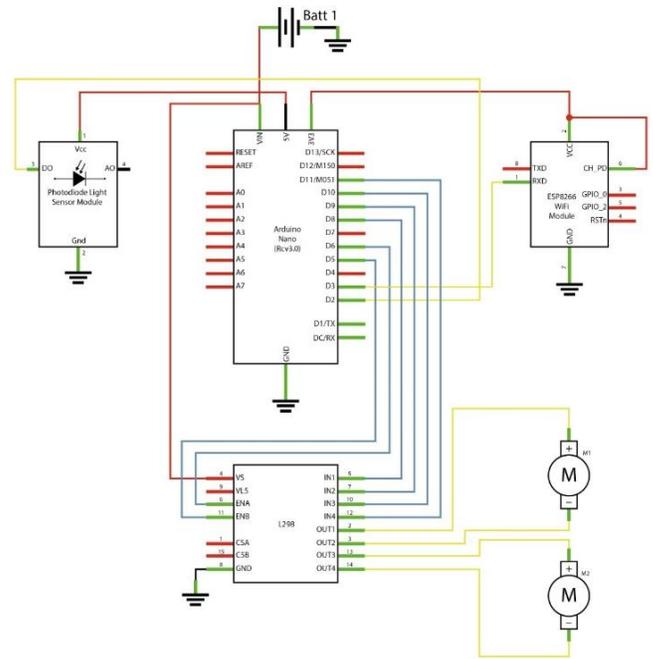


Fig. 7. Diagrama esquemático del Robot Móvil.

El módulo de luz de fotodiodo recibirá las variaciones de luz producidas por las lámparas LED, estas variaciones serán transformadas a variaciones de voltaje, que corresponde a los bits de información para luego ser enviadas al microcontrolador para que procese los datos recibidos. Es importante realizar una correcta calibración para que este sensor pueda identificar las variaciones de luz.

Los datos recibidos corresponden a una trama de tres valores, el microprocesador identificará los datos y ejecutará los comandos que hayan sido especificados en el software. El módulo WI-Fi ESP8266 transmitirá un único dato específico que corresponde a la información de la ubicación del robot, al iniciar o finalizar su desplazamiento. El último dato de la trama recibida indicará el movimiento que el robot debe hacer por lo que el módulo de puente H controlará los dos motores para que el robot pueda hacer el desplazamiento.

**B. Software**

- **VLC**

El programa que se usa para el sistema VLC, se basa en el envío de una trama de datos. La trama está compuesta de 3 diferentes datos que corresponden a la identificación de la lámpara que envía la información, el segundo dato es la identificación del robot destinatario y el último dato es el que contiene el comando para el robot.

El primer dato, Figura 8, que corresponde a la identificación de la lámpara, será predeterminado al momento de realizar la concatenación de la trama, ya que previamente se escoge el terminal del microcontrolador que está conectado a una de las 3 lámparas.

ID LAMPARA	ID ROBOT	COMANDO
1		

Fig. 8. Primer dato ingresado.

El segundo dato, Figura 9, corresponde a la identificación del robot, lo que quiere decir es que se puede elegir a qué robot se le enviará el comando, existen dos robots móviles a los cuales se les puede enviar la información.

ID LAMPARA	ID ROBOT	COMANDO
1	1	

Fig. 9. Segundo dato ingresado.

El tercer dato, Figura 10, corresponde al comando que indicará el movimiento que ha de realizar el robot, Ya con este último dato se realiza la concatenación y se realiza la transmisión.

ID LAMPARA	ID ROBOT	COMANDO
1	1	3

Fig. 10. Tercer y último dato.

En la Figura 11, se muestra el diagrama de flujo correspondiente al programa para el ingreso de los tres datos y la concatenación de estos, una vez que este procedimiento se haya completado, la trama será transmitida.

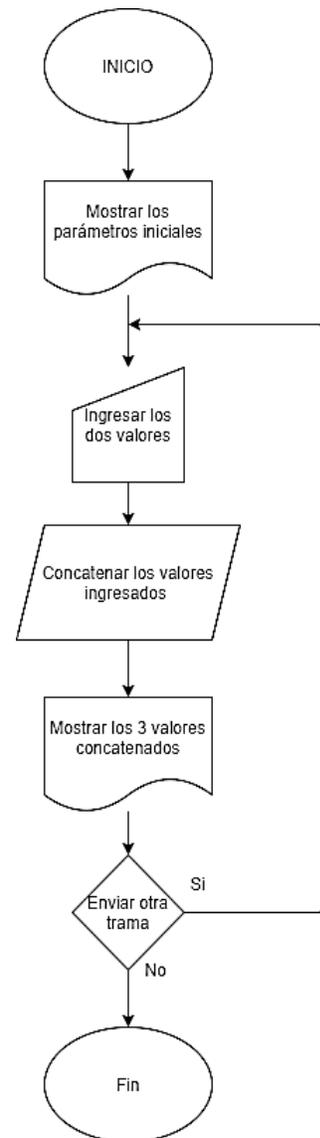


Fig. 11. Diagrama de Flujo del programa para enviar datos.

- *Robot Móvil*

La programación del robot es la más compleja, ya que contiene el proceso de recepción de datos, de ejecución de comandos y de envío de datos de ubicación. El proceso empieza verificando si hay datos receptados, luego se realiza un proceso de desconcatenar la trama de datos.

El primer dato será enviado inmediatamente por el módulo Wi-Fi, esta información servirá para determinar la ubicación del robot dentro de un área de incidencia. El siguiente dato es el que va a establecer si la información que se receiptó es para el robot 1 ó el robot 2, si el dato corresponde al robot que receiptó la señal entonces se pasa al siguiente y último dato. Este último dato contiene la orden que el robot ha de ejecutar, lo que quiere decir que dependiendo del dato receiptado este realizará un movimiento ya programado.

A continuación, en la Figura 12 se muestran las instrucciones que se podrían ejecutar:

Función	Comando
Adelante	1
Atrás	2
Derecha	3
Izquierda	4
Detener	0

Fig. 12. Opciones de funciones y comandos para ejecutar.

En la Figura 13, se ve el diagrama de flujo del programa empleado.

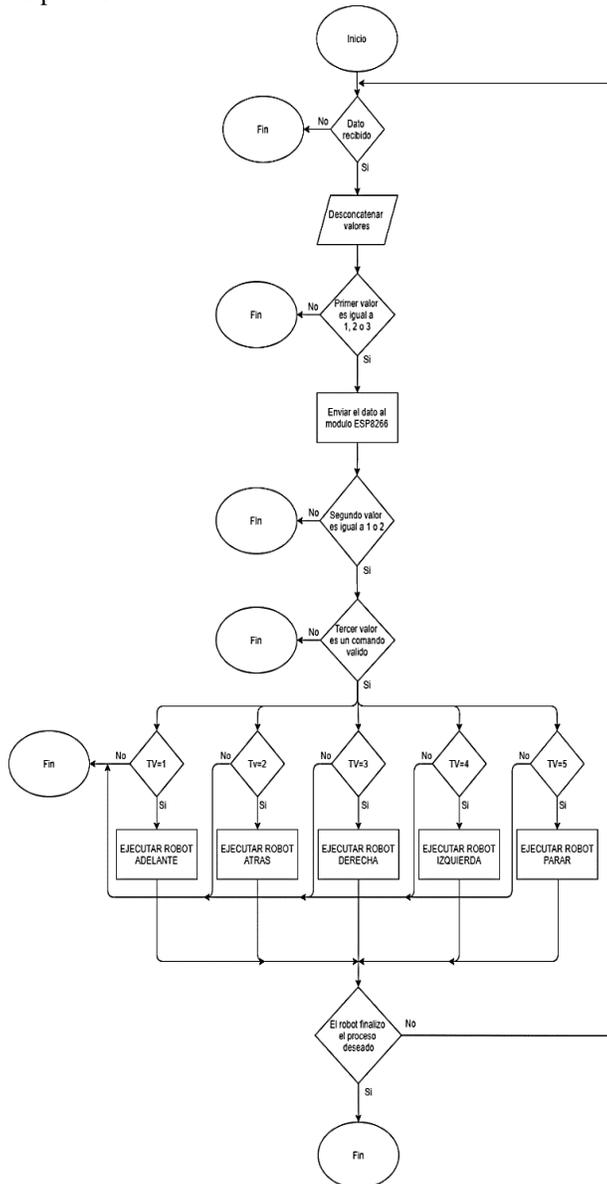


Fig. 13. Diagrama de flujo del programa del Robot móvil.

- *Wi-Fi*

El programa para esta parte concierne a la recepción del primer dato, de la identificación de la lámpara, que corresponde a la ubicación del robot.

El programa es sencillo, el dato recibido se enviará por medio de lenguaje HTML, para crear un servidor web, en el cual se podrá ver el dato de la lámpara y por ende la ubicación inicial y ubicación final que tiene el robot. En la Figura 14 se detalla el diagrama de flujo del programa aplicado.

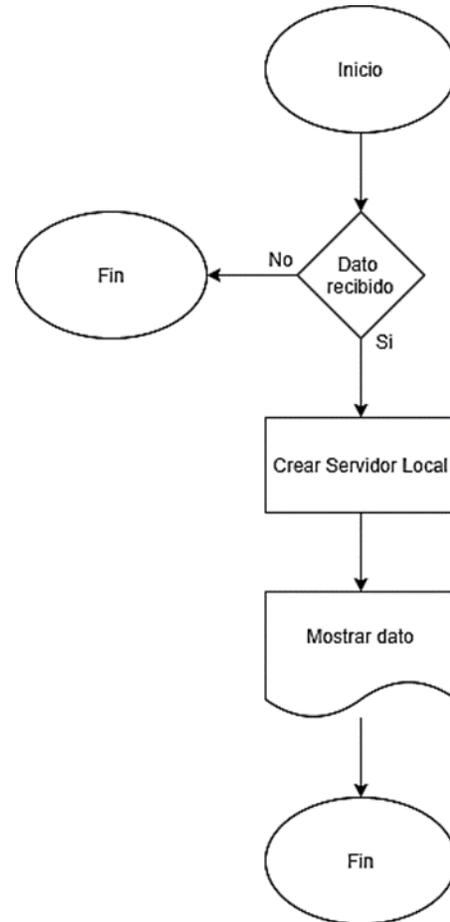


Fig. 14. Diagrama de flujo del programa Wi-Fi

#### IV. RESULTADOS

Se realizaron varias pruebas de funcionamiento del sistema, se consideró la eficiencia de la transmisión de datos en relación al ángulo de haz de luz y el error de posicionamiento que tiene el sistema aplicando el método de identificación de celdas. A continuación, se explican los datos obtenidos de cada uno de estos parámetros.

##### A. Transmisión de datos

El ángulo del haz de luz máximo que tiene el sistema estará en función del módulo receptor, y ya que se trata de un

fotodiodo, permitirá un haz máximo de  $16,64^\circ$ . En la figura 15 se observa la representación de una celda que se aplica al sistema, a partir de este se realizará el cálculo de los radios para ángulos menores a  $16^\circ$ .

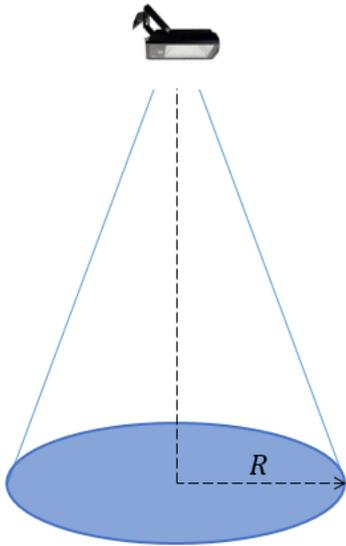


Fig. 15. Representación de una Celda del Sistema.

Para determinar los radios, se plantea realizar las pruebas a  $0^\circ, 4^\circ, 8^\circ, 12^\circ$  y  $16^\circ$ . La altura  $h$  es un valor fijo de 100 cm, ya que esta longitud fue establecida desde la construcción del sistema. En la Figura 16 se puede ver la representación geométrica de la celda, con lo que facilitará el cálculo para determinar el radio.

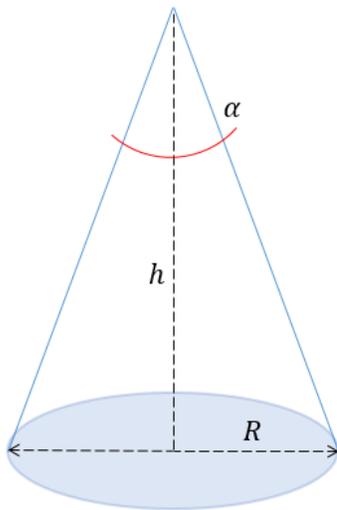


Fig. 16. Representación geométrica de la celda.

Como el sistema consta de tres celdas, se tomaron los datos de cada una de ellas. El proceso para la adquisición de estos se basó en enviar una trama de datos, el robot era colocado en un punto conforme al ángulo predeterminado y se comprobó si este ejecutaba el comando enviado. Si el robot realizaba el desplazamiento ordenado entonces se decía que era un dato receptado con éxito, si el robot realizaba un desplazamiento diferente al ordenado o no realizaba ninguno se señalaba que era un dato erróneo o perdido.

A continuación, se muestran las tablas con los datos adquiridos de cada una de las lámparas

- Lámpara N°1

Las tablas I, II, III, IV y V, que se muestran a continuación, corresponden a los datos receptados de la lámpara cuyo identificador de celda es 1.

TABLA I. Resultados de los datos en la Lámpara 1 a un ángulo de  $0^\circ$ .

ÁNGULO	$0^\circ$
DATOS ENVIADOS	50
DATOS PERDIDOS	1
DATOS RECEPTADOS	49
PORCENTAJE DATOS RECEPTADOS	98%
PORCENTAJE DATOS NO RECEPTADOS	2%

TABLA II. Resultados de los datos en la Lámpara 1 a un ángulo de  $4^\circ$ .

ÁNGULO	$4^\circ$
DATOS ENVIADOS	50
DATOS PERDIDOS	2
DATOS RECEPTADOS	48
PORCENTAJE DATOS RECEPTADOS	96%
PORCENTAJE DATOS NO RECEPTADOS	4%

TABLA III. Resultados de los datos en la Lámpara 1 a un ángulo de 8°.

ÁNGULO	8°
DATOS ENVIADOS	50
DATOS PERDIDOS	2
DATOS RECEPTADOS	48
PORCENTAJE DATOS RECEPTADOS	96%
PORCENTAJE DATOS NO RECEPTADOS	4%

TABLA IV. Resultados de los datos en la Lámpara 1 a un ángulo de 12°.

ÁNGULO	12°
DATOS ENVIADOS	50
DATOS PERDIDOS	3
DATOS RECEPTADOS	47
PORCENTAJE DATOS RECEPTADOS	94%
PORCENTAJE DATOS NO RECEPTADOS	6%

TABLA V. Resultados de los datos en la Lámpara 1 a un ángulo de 16°.

ÁNGULO	16°
DATOS ENVIADOS	50
DATOS PERDIDOS	3
DATOS RECEPTADOS	47
PORCENTAJE DATOS RECEPTADOS	94%
PORCENTAJE DATOS NO RECEPTADOS	6%

Se puede ver que, a medida que el haz va incrementando, los datos receptados con éxito son menores y esto se debe al principio de funcionamiento del fotodiodo y al ángulo de visión.

- Lámpara N°2

Las tablas VI, VII, VIII, IX y X, que se muestran a continuación, corresponden a los datos receptados de la lámpara cuyo identificador de celda es 2.

TABLA VI. Resultados de los datos en la Lámpara 2 a un ángulo de 0°.

ÁNGULO	0°
DATOS ENVIADOS	50
DATOS PERDIDOS	0
DATOS RECEPTADOS	50
PORCENTAJE DATOS RECEPTADOS	100%
PORCENTAJE DATOS NO RECEPTADOS	0%

TABLA VII. Resultados de los datos en la Lámpara 2 a un ángulo de 4°.

ÁNGULO	4°
DATOS ENVIADOS	50
DATOS PERDIDOS	2
DATOS RECEPTADOS	48
PORCENTAJE DATOS RECEPTADOS	96%
PORCENTAJE DATOS NO RECEPTADOS	4%

TABLA VIII. Resultados de los datos en la Lámpara 2 a un ángulo de 8°.

ÁNGULO	8°
DATOS ENVIADOS	50
DATOS PERDIDOS	2
DATOS RECEPTADOS	48
PORCENTAJE DATOS RECEPTADOS	96%
PORCENTAJE DATOS NO RECEPTADOS	4%

TABLA IX. Resultados de los datos en la Lámpara 2 a un ángulo de 12°.

ÁNGULO	12°
DATOS ENVIADOS	50
DATOS PERDIDOS	2
DATOS RECEPTADOS	48
PORCENTAJE DATOS RECEPTADOS	96%
PORCENTAJE DATOS NO RECEPTADOS	4%

TABLA X. Resultados de los datos en la Lámpara 2 a un ángulo de 16°.

ÁNGULO	16°
DATOS ENVIADOS	50
DATOS PERDIDOS	3
DATOS RECEPTADOS	47
PORCENTAJE DATOS RECEPTADOS	94%
PORCENTAJE DATOS NO RECEPTADOS	6%

- Lámpara N°3

Las tablas XI, XII, XIII, XIV y XV, que se muestran a continuación, corresponden a los datos receptados de la lámpara cuyo identificador de celda es 3.

TABLA XI. Resultados de los datos en la Lámpara 3 a un ángulo de 0°.

ÁNGULO	0°
DATOS ENVIADOS	50
DATOS PERDIDOS	1
DATOS RECEPTADOS	49
PORCENTAJE DATOS RECEPTADOS	98%
PORCENTAJE DATOS NO RECEPTADOS	2%

TABLA XII. Resultados de los datos en la Lámpara 3 a un ángulo de 4°.

ÁNGULO	4°
DATOS ENVIADOS	50
DATOS PERDIDOS	1
DATOS RECEPTADOS	49
PORCENTAJE DATOS RECEPTADOS	98%
PORCENTAJE DATOS NO RECEPTADOS	2%

TABLA XIII. Resultados de los datos en la Lámpara 3 a un ángulo de 8°.

ÁNGULO	8°
DATOS ENVIADOS	50
DATOS PERDIDOS	2
DATOS RECEPTADOS	48
PORCENTAJE DATOS RECEPTADOS	96%
PORCENTAJE DATOS NO RECEPTADOS	4%

TABLA XIV. Resultados de los datos en la Lámpara 3 a un ángulo de 12°.

ÁNGULO	12°
DATOS ENVIADOS	50
DATOS PERDIDOS	2
DATOS RECEPTADOS	48
PORCENTAJE DATOS RECEPTADOS	96%
PORCENTAJE DATOS NO RECEPTADOS	4%

TABLA XV. Resultados de los datos en la Lámpara 3 a un ángulo de 16°.

ÁNGULO	16°
DATOS ENVIADOS	50
DATOS PERDIDOS	4
DATOS RECEPTADOS	46
PORCENTAJE DATOS RECEPTADOS	92%
PORCENTAJE DATOS NO RECEPTADOS	8%

En la Figura 17 se ve un gráfico de columnas con los resultados de los datos adquiridos con el fin de poder comparar los valores de las distintas lámparas entre si.

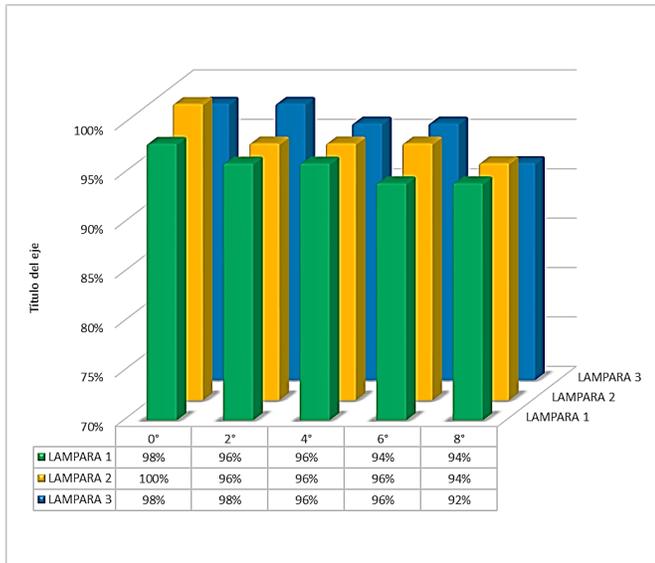


Fig. 17. Gráfica de los resultados adquiridos de las lámparas.

En la sección de anexos se encuentran las tablas XVI, XVII y XVIII, donde constan los datos que se adquirieron, los comandos enviados y la verificación de la ejecución de los mismos.

### B. Error de posicionamiento

Para encontrar el error de posicionamiento, se determinan las distancias que son de interés, por lo que se debe conocer el valor de los puntos centrales de cada celda y de las zonas de intersección de las mismas. El radio de cada celda es de 14 cm, cómo se determina en la ecuación 1 y fueron colocadas de tal forma que exista una distancia de 18 cm de centro a centro, como se puede ver en la ecuación 2. En la figura 18, se definen los puntos de interés y aplicando geometría euclidiana se realiza el cálculo de las distancias de dichos puntos.

Los radios de las celdas son:

$$R_1 = R_2 = R_3 = 14cm \quad (1)$$

Las distancias desde el centro de una celda a la siguiente se determinan en la ecuación 2, siendo:

$$\overline{AB} = \overline{BC} = 18cm \quad (2)$$

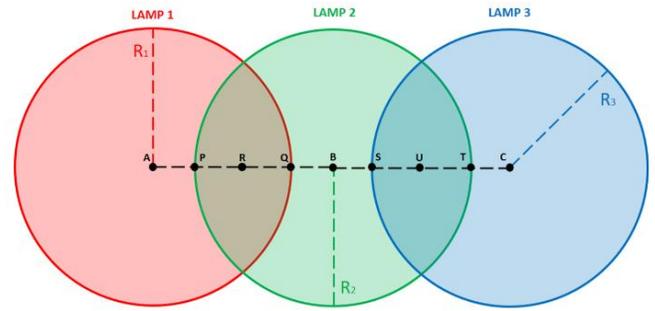


Fig. 18. Celdas del sistema.

Cada sección tiene un punto centro, por lo que será el punto de referencia para la posición de la celda, dentro de esta será colocado el robot en varios puntos aleatorios para luego calcular la distancia entre estos dos puntos y con ello encontrar el error de posicionamiento.

A continuación, se muestran los resultados del error, separados por secciones y una gráfica que representa la función de distribución acumulativa empírica en cada una de ellas.

- Sección 1

Esta sección corresponde a la celda con identificador 1, cuyo centro son las coordenadas del punto A  $(x, y) = (14, 14)$ , como se indicó anteriormente será el punto de posición de la celda, como se puede observar en la Figura 19.

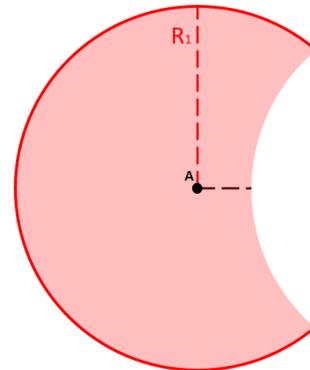


Fig. 19. Área de la Sección 1.

Los puntos que indican las posiciones del robot en esta sección, fueron generados de forma aleatoria, posteriormente se realizó el cálculo de las distancias entre el punto del robot y el punto central de la sección, con esto se determina el error de posicionamiento. En la tabla XIX, en la sección de Anexos, se pueden ver los puntos y el error de cada uno de ellos.

Con el resultado de los errores, se realizó una gráfica de la función de distribución empírica, ya que está asociada con la medida empírica de una muestra donde se usan datos

aleatorios. En la Figura 20 se muestra el resultado de esta sección.

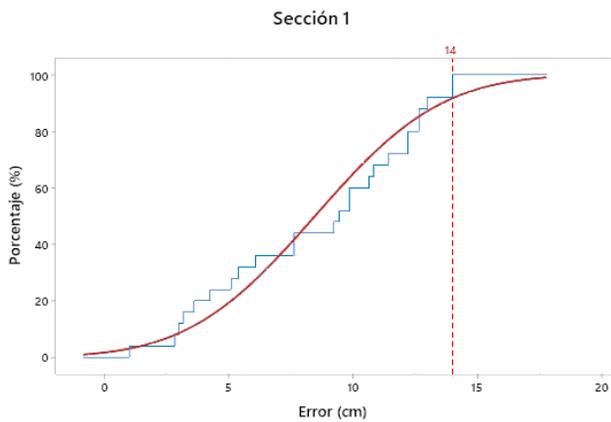


Fig. 20. CDF empírica de la Sección 1.

- Sección 2

Esta sección corresponde a la intersección de la celda con identificación 1 y la celda con identificación 2, cuyo centro son las coordenadas del punto R  $(x, y) = (23,14)$ , que es el punto intermedio de esta sección, como se puede observar en la Figura 21.

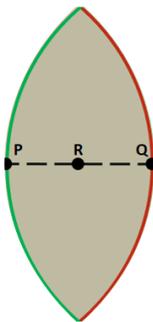


Fig. 21. Área de la Sección 2.

En la tabla XX, se puede ver el cálculo de las distancias entre los puntos aleatorios del robot y el punto centro en esta sección.

En la Figura 22 se muestra la gráfica de la función de distribución empírica de los resultados y con un punto de referencia que muestra el error máximo de esta sección.

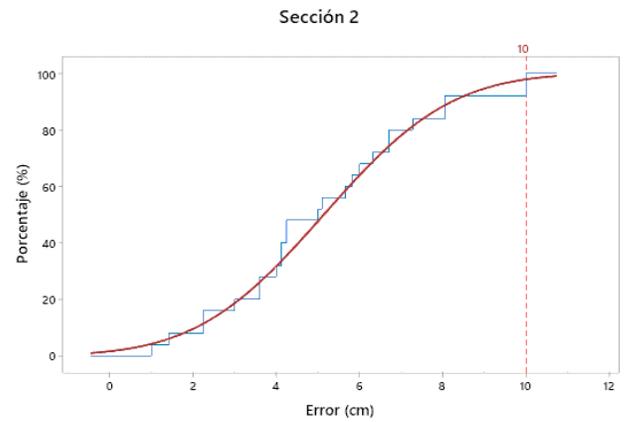


Fig. 22. CDF empírica de la Sección 2.

- Sección 3

Esta sección corresponde a la celda con identificación 2, cuyo centro son las coordenadas del punto B  $(x, y) = (32,14)$ , que es la posición de esta celda, como se puede observar en la Figura 23.

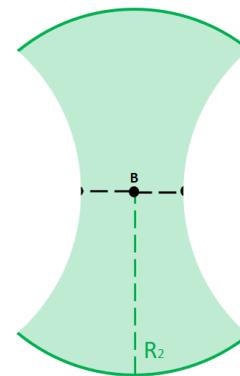


Fig. 23. Área de la Sección 3.

En la Figura 24 se muestra la gráfica de la función de distribución empírica de los resultados y con un punto de referencia que muestra el error máximo de esta sección que corresponde al valor del radio de la celda.

Los datos de los puntos aleatorios de la posición del robot se pueden ver en la tabla XXI, así como la distancia entre estos puntos y el punto centro de esta sección.

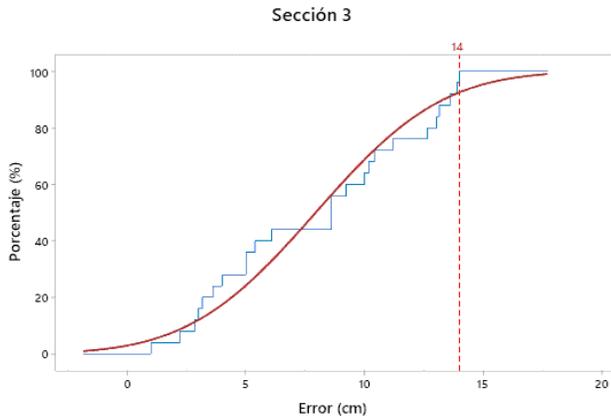


Fig. 24. CDF empírica de la Sección 3.

- Sección 4

En la Figura 25 se muestra la sección que corresponde a la intersección de la celda con Identificación 2 y la celda con Identificación 3, cuyo centro son las coordenadas del punto  $U(x, y) = (41, 14)$ , que es la posición de esta celda.

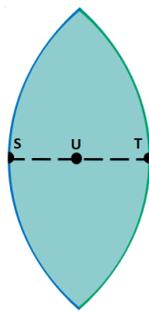


Fig. 25. Área de la Sección 4.

En la Figura 26 se muestra la gráfica de la función de distribución empírica de los datos de los errores que se puede ver en la tabla XXII.

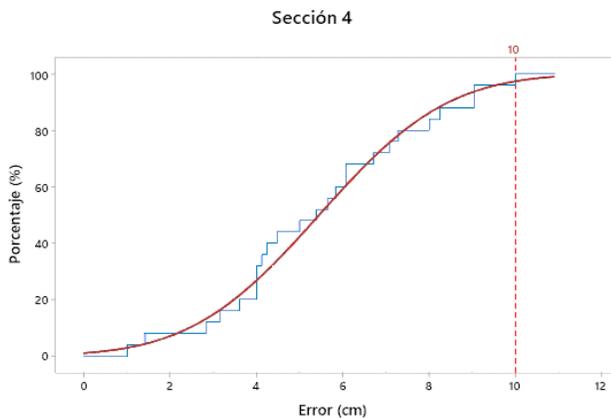


Fig. 26. CDF empírica de la Sección 4.

- Sección 5

Esta sección corresponde a la celda con identificación 3, cuyo centro son las coordenadas del punto  $C(x, y) = (50, 14)$ , que es la posición de esta celda, como se puede en la Figura 27.

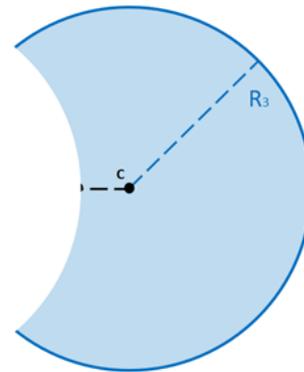


Fig. 27. Área de la Sección 5.

En la tabla XXIII, que se encuentra en la sección de Anexos, están los datos de las distancias entre los puntos aleatorios de la posición del robot en esta sección y el punto centro de la celda. Con estos datos se graficó la función de distribución empírica de los datos mencionados. Como se puede ver en la Figura 28.

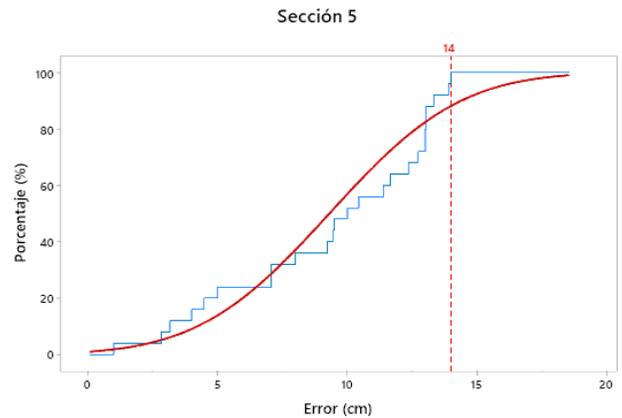


Fig. 28. CDF empírica de la Sección 5.

En la Figura 29 se puede ver una gráfica con las funciones de distribución empírica de los datos de todas las secciones en cuestión, en la que se puede hacer una comparación de los errores y determinar zonas con mayor precisión que podrían servir para realizar futuros trabajos.

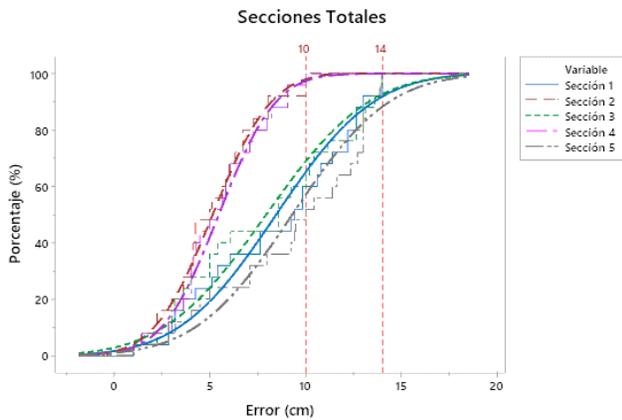


Fig. 29. CDF empírica de todas las Secciones.

## V. CONCLUSIONES

En conclusión, luego de haber realizado las pruebas de la transmisión de datos, se puede afirmar que la tasa de datos receptados con mayor éxito se produce cuando el trasmisor (lámpara) y el receptor (robot) están completamente alineados y que a medida que el robot se desplaza y aumenta el ángulo de visión, con respecto al trasmisor, la tasa de datos receptados con éxito disminuye.

Al realizar las pruebas para determinar el error de posicionamiento del sistema se pudo determinar que el error aumenta a medida que más distante está del punto central de cada sección. También cabe recalcar que al comparar los resultados de estos errores se pudo ver que, el error en las secciones donde las dos celdas hacían una intersección era menor a las otras.

Con estos resultados se puede afirmar que el sistema de comunicación por luz visible es óptimo para el control de robots móviles en ambientes interiores.

## VI. REFERENCIAS

[1] Y.-H. Hsueh, P.-C. Su, Y.-F. Lin, H.-H. Huang y T.-C. Liu, «Robot Indoor Navigation Using Visible Light Communication,» National Yunlin University of Science and Technology, Yunlin, 2018.

[2] I. S. Igboanusi, C. I. Nwakanma, J. M. Lee y D.-S. Kim, «VLC-UWB Hybrid (VUH) Network for Indoor Industrial Robots at Military Warehouses / Distribution Centers,» Networked System Laboratory, Gumi, 2019.

[3] D. Konings, B. Parr, C. Waddell, F. Alam, K. M. Arif y E. M.-K. Lai, «HVLP: Hybrid Visible Light

Positioning of a Mobile Robot,» Auckland University of Technology, Auckland, 2017.

[4] X. Liu, E. Umino y H. Makino, «Basic Study on Robot Control in an Intelligent Indoor Environment using Visible Light Communication,» 6th IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing, Budapest, 2009.

[5] R. Murai, T. Sakai, H. Kawano, Y. Matsukawa, Y. Kitano, Y. Honda y K. C. Campbell, «A Novel Visible Light Communication System for Enhanced Control of Autonomous Delivery Robots in a Hospital,» International Symposium on System Integration (SII), Fukuoka, 2012.

[6] W. P. S. R. Z. Ghassemlooy, Optical Wireless Communications, Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2018.

[7] J. R. G. S. D. R. S. O. Víctor Ricardo Barrientos Sotelo, «Robots Móviles: Evolución y Estado del Arte,» Instituto Politécnico Nacional, México, 2007.

[8] A. M. O. L. H. R. Jhonny Valencia V., «Modelo Cinemático de un Robot Móvil Tipo Diferencial y Navegación,» Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, 2009.

[9] S. F. João Figueiras, «Mobile Positioning and Tracking,» John Wiley & Sons Ltd, Denmark, 2010.

[10] J. Hu, C. Gong y Z. Xu, «Demonstration of A Robot Controlling and Positioning System Based on Visible Light,» University of Science and Technology of China, Anhui, 2016.

[11] T. Hiraki, S. Fukushima y T. Naemura, «Projection-based Localization and Navigation Method for Multiple Mobile Robots with Pixel-level Visible Light Communication,» IEEE/SICE International Symposium, Sapporo, 2016.





TABLA XIX. Errores de la Sección 1.

SECCION 1				
POSICION CELDA		POSICION REAL		ERROR (DISTANCIA)
x (cm)	y (cm)	x (cm)	y (cm)	cm
14	14	14	27	13.00
14	14	10	26	12.65
14	14	8	23	10.82
14	14	10	23	9.85
14	14	19	22	9.43
14	14	12	19	5.39
14	14	3	17	11.40
14	14	7	17	7.62
14	14	17	17	4.24
14	14	12	16	2.83
14	14	0	14	14.00
14	14	15	14	1.00
14	14	8	13	6.08
14	14	17	13	3.16
14	14	5	12	9.22
14	14	11	12	3.61
14	14	15	9	5.10
14	14	4	7	12.21
14	14	11	7	7.62
14	14	7	6	10.63
14	14	18	5	9.85
14	14	21	4	12.21
14	14	10	2	12.65
14	14	14	11	3.00
14	14	14	0	14.00

TABLA XXI. Errores de la Sección 3.

SECCION 3				
POSICION CELDA		POSICION REAL		ERROR (DISTANCIA)
x (cm)	y (cm)	x (cm)	y (cm)	cm
32	14	34	27	13.15
32	14	25	25	13.04
32	14	35	24	10.44
32	14	30	23	9.22
32	14	38	22	10.00
32	14	27	21	8.60
32	14	32	19	5.00
32	14	31	17	3.16
32	14	34	16	2.83
32	14	30	15	2.24
32	14	33	14	1.00
32	14	36	14	4.00
32	14	35	12	3.61
32	14	28	11	5.00
32	14	32	11	3.00
32	14	30	9	5.39
32	14	33	8	6.08
32	14	27	7	8.60
32	14	37	7	8.60
32	14	27	4	11.18
32	14	34	4	10.20
32	14	28	1	13.60
32	14	36	2	12.65
32	14	39	2	13.89
32	14	32	0	14.00

TABLA XX. Errores de la Sección 2.

SECCION 2				
POSICION CELDA		POSICION REAL		ERROR (DISTANCIA)
x (cm)	y (cm)	x (cm)	y (cm)	cm
23	14	23	24	10.00
23	14	22	22	8.06
23	14	20	20	6.71
23	14	25	20	6.32
23	14	22	19	5.10
23	14	23	18	4.00
23	14	20	17	4.24
23	14	26	17	4.24
23	14	19	15	4.12
23	14	24	15	1.41
23	14	20	14	3.00
23	14	24	14	1.00
23	14	28	14	5.00
23	14	27	13	4.12
23	14	20	12	3.61
23	14	22	12	2.24
23	14	24	12	2.24
23	14	25	11	3.61
23	14	19	10	5.66
23	14	20	9	5.83
23	14	23	8	6.00
23	14	26	8	6.71
23	14	21	7	7.28
23	14	22	6	8.06
23	14	23	4	10.00

TABLA XXII. Errores de la Sección 4.

SECCION 4				
POSICION CELDA		POSICION REAL		ERROR (DISTANCIA)
x (cm)	y (cm)	x (cm)	y (cm)	cm
41	14	41	24	10.00
41	14	42	23	9.06
41	14	41	22	8.00
41	14	40	21	7.07
41	14	43	21	7.28
41	14	38	20	6.71
41	14	44	19	5.83
41	14	41	18	4.00
41	14	37	17	5.00
41	14	44	17	4.24
41	14	43	16	2.83
41	14	38	15	3.16
41	14	41	15	1.00
41	14	45	14	4.00
41	14	37	13	4.12
41	14	40	13	1.41
41	14	45	12	4.47
41	14	43	11	3.61
41	14	37	10	5.66
41	14	39	9	5.39
41	14	40	8	6.08
41	14	42	8	6.08
41	14	43	6	8.25
41	14	40	5	9.06
41	14	41	10	4.00

TABLA XXIII. Errores de la Sección 5.

SECCION 5				
POSICION CELDA		POSICION REAL		ERROR (DISTANCIA)
x (cm)	y (cm)	x (cm)	y (cm)	cm
50	14	50	28	14.00
50	14	53	26	12.37
50	14	43	25	13.04
50	14	56	24	11.66
50	14	59	23	12.73
50	14	49	21	7.07
50	14	58	19	9.43
50	14	48	18	4.47
50	14	54	17	5.00
50	14	63	17	13.34
50	14	59	16	9.22
50	14	46	14	4.00
50	14	51	14	1.00
50	14	63	14	13.00
50	14	52	12	2.83
50	14	49	11	3.16
50	14	60	11	10.44
50	14	55	9	7.07
50	14	58	8	10.00
50	14	61	7	13.04
50	14	50	6	8.00
50	14	47	5	9.49
50	14	53	3	11.40
50	14	45	2	13.00
50	14	57	2	13.89