

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIA

Departamento de Física



**Desarrollo de un sistema de posicionamiento
basado en comunicación por luz.**

Débora Rubí Aguirre Cabrera

Profesor Guía: Dr. Ismael Soto

**Tesis para optar al Título Profesional
de Ingeniera Física.**

Santiago - Chile

2018

Desarrollo de un sistema de posicionamiento basado en comunicación por luz

Débora Rubí Aguirre Cabrera

Este trabajo de titulación fue elaborado bajo la tutela y guía del profesor titular Dr. Ismael Soto y ha sido aprobado por la siguiente comisión calificadora.

Yolanda Vargas _____

Pablo Adasme _____

Claudio Valencia _____

Dr. Daniel Serafini
Jefe de Carrera

Resumen

Los sistemas de posicionamiento basados en comunicación óptica inalámbrica se han convertido en un área de investigación relevante dentro de las telecomunicaciones y los sistemas de posicionamiento. Este interés viene de la mano con la masificación de los dispositivos LEDs, que dentro de sus aspectos más relevantes está el bajo consumo de energía comparado con otros dispositivos de iluminación. Esto es importante, puesto que la iluminación es una de las mayores fuentes de consumo energético en el mundo. Aparte de esto, otros dispositivos lumínicos existentes, como las luces fluorescentes, contienen pequeñas cantidades de mercurio, por lo que manipular y desechar incorrectamente estos elementos implica un potencial peligro para la salud humana y el medio ambiente, y su erradicación permitiría eliminar una fuente de polución ambiental. Además, otro beneficio de las luces LEDs es que pueden ser moduladas a velocidades relativamente altas, lo que posiciona a los LEDs como un candidato para sistemas de comunicación inalámbrica. A medida que los sistemas de iluminación LED se encuentren disponibles en más lugares, el posicionamiento basado en luz podrá proveer servicios de posicionamiento dentro de un área de cobertura mucho mayor y con mejor precisión.

Al ser el posicionamiento por luz, un área de estudio relativamente nueva, existen pocas referencias bibliográficas de sistemas de posicionamiento experimentales y con miras a la construcción de prototipos funcionales. Se han realizado estudios de sistemas de posicionamiento utilizando diferentes topologías bajo simulación computacional, que han permitido comprender mejor el comportamiento de un canal óptico inalámbrico bajo distintas condiciones, y también se han desarrollado algunos sistemas de posicionamiento experimentales utilizando equipamiento de laboratorio, pero muy pocos de ellos son desarrollos enfocados a prototipos funcionales, sobre todo en lo que respecta a la movilidad y reducción de tamaño del sistema receptor, algo que es fundamental para permitir la movilidad que debe tener un usuario en un sistema de posicionamiento.

Este trabajo, por lo tanto, consiste en el desarrollo experimental de un sistema de posicionamiento 3D, basado en luz, cuya diferencia con otros trabajos es la búsqueda de la movilidad y reducción

de tamaño del sistema receptor, así como también la capacidad de realizar el análisis de señales necesario para obtener un retorno de la coordenada de la posición automático y al instante, y realizado por el mismo sistema, sin necesidad de un análisis de señales posterior.

El error de posicionamiento obtenido con este sistema, es de 15 cm en promedio, en una celda triangular de lado 2 m, y el arreglo de LEDs triangular está dispuesto a 1,5 m de altura. Se puede concluir que efectos en la fluctuación de la potencia lumínica del LED, debido a la reflexión multicamino y el modelo de LED , como también el arreglo de los LEDs dentro de la celda, pueden afectar el correcto desempeño del sistema.

Palabras clave: LED, Posicionamiento basado en luz (Visible Light Positioning), trilateración, intensidad de la señal recibida (RSS), Bias-Tee.

A la memoria de Diego Aguirre y Fresia Calcina

Agradecimientos

En primer lugar me gustaría agradecer al profesor Ismael Soto por darme la confianza e integrarme al laboratorio GETIC del departamento de Ingeniería Eléctrica, y también a mis compañeros, que compartieron desinteresadamente sus conocimientos conmigo, en especial gracias a Ricardo Navarrete y Cristian Soto, por hacer más grata mi estadía en el laboratorio.

También quiero agradecer a mi familia: a mis padres, mi hermano, mi tía Lupe y Paulina, por su amor incondicional y por caminar junto a mí durante todo este trayecto, sin importar las distancias que se interpusieron.

Finalmente quiero agradecer a los amigos que hice durante este período, en orden alfabético y no de preferencia, Carolina, Francisca, Makarena y Yelnith. Mención especial a Carlos, que con su conocimiento y buena voluntad me permitió salir del estancamiento en algunos pasajes del desarrollo de este trabajo.

Y por qué no, también gracias a Roberta, Potipot y Pipa (QEPD), por acompañarme en la soledad de esta enorme ciudad.

Tabla de contenidos

Resumen

1. Fundamentos de comunicación óptica inalámbrica	4
1.1. LEDs	5
1.1.1. LED drivers	8
1.1.2. Combinación de señales y biasing	10
1.1.3. Parpadeo de la luz LED y posibles problemas a la salud humana	12
1.2. Fotodetectores	14
2. Modelo del canal óptico	17
2.1. Modelo del canal	17
2.2. Respuesta al impulso de LOS	18
2.3. Respuesta al Impulso de reflejos múltiples (NLOS)	19
3. Posicionamiento en interiores	22
3.1. Análisis de Escena	23
3.2. Proximidad	23
3.3. Triangulación	23
3.4. Angulación	24
3.4.1. Ángulo de Llegada (AOA) o Angulación	24
3.5. Lateración Hiperbólica	24
3.5.1. Diferencia de Tiempo de Llegada (TDOA)	24
3.6. Lateración Circular	24
3.6.1. Tiempo de Llegada (TOA)	24
3.6.2. Lateración mediante Intensidad de la Señal Recibida	25
4. Simulación e implementación	28
4.1. Simulación de un canal óptico inalámbrico	29
4.2. Simulación del sistema de posicionamiento	33

4.3. Implementación del sistema de posicionamiento	39
4.3.1. Adquisición de datos	41
4.3.1.1. Primer prototipo: Raspberry Pi + MCP3008	41
4.3.1.2. Segundo prototipo: Raspberry Pi + XMOS	44
4.3.2. Implementación del LED emisor	45
4.3.2.1. Comparación entre Bias-Tee y Circuito de transistores	47
4.4. Localización	52
4.4.1. Modelo del canal para localización	52
4.4.1.1. Relación Potencia versus Distancia LED-fotodetector	53
4.4.1.2. Relación Potencia versus Ángulo	55
4.4.2. Algoritmo de localización	58
4.4.3. Resultados de posicionamiento	60
5. Conclusiones y perspectivas	70
Anexo	75

Índice de tablas

3.1. Tabla comparativa de métodos matemáticos utilizados para localización	27
4.1. Parámetros simulación de la respuesta al impulso del canal	32
4.2. Procedimiento de localización	37
4.3. Parámetros de simulación	38
4.4. Parámetros de los filtros pasabanda	38
4.5. Promedio y desviación estándar de la potencia de la señal para cada distancia, utilizando ambos circuitos de las Fig. 1.6 y 1.7	49
4.6. Procedimiento de localización	61

Índice de Ilustraciones

1.1. Operación de un LED	6
1.2. Curva característica de un diodo	7
1.3. Potencia óptica en función de la corriente del LED	8
1.4. Fuente de corriente	9
1.5. Combinación de señales AC y DC	10
1.6. Bias-Tee	11
1.7. Circuito de combinación de señales	12
1.8. Parpadeo de un LED	13
1.9. Generación de portadores de carga	14
1.10. Coeficiente de absorción y responsividad espectral	15
1.11. Curva característica de un fotodiodo	16
2.1. Enlace óptico IM/DD	18
2.2. Geometría de un enlace óptico	19
2.3. Geometría del sistema NLOS	21
3.1. Métodos de posicionamiento.	22
4.1. Respuesta al impulso LOS y NLOS	33
4.2. Esquema del cálculo de potencia de un LED	34
4.3. Puntos de intersección en trilateración	36
4.4. Resultados de la simulación de localización	39
4.5. Diagrama de la implementación del sistema	40
4.6. Diagrama de conexión del ADC MCP3008 y Raspberry Pi	41
4.8. Inconsistencia en frecuencia de muestreo de Raspberry Pi	42
4.7. Mediciones de la potencia media del LED	43
4.9. Potencia lumínica con sistema Raspberry Pi + XMOS	45
4.10. Diagrama de adquisición de datos de potencia	46

4.11. Fotografía del circuito de un LED emisor	47
4.12. Potencia recibida por Bias-Tee y circuito de transistores	50
4.13. Circuito del LED emisor.	51
4.14. Configuración para determinar parámetros de la Eq. 2.6.	53
4.16. Montaje medición potencia vs. distancia	54
4.15. Potencia vs d , con ψ y ϕ fijos	54
4.17. Potencia recibida versus ángulo $\phi = \psi$	55
4.18. Montaje medición potencia vs. ángulo	57
4.19. Fotografía de montaje medición potencia vs. ángulo	58
4.20. Montaje experimental	62
4.21. Celda triangular para la configuración 1.	63
4.22. Fotografía del arreglo de LEDs	63
4.23. Fotografía del sistema receptor	64
4.24. Medición de posiciones para la primera configuración	64
4.25. Distribución del error de posicionamiento.	65
4.26. Frecuencia acumulada del error de posicionamiento.	66
4.27. Celda triangular para la configuración 2.	67
4.28. Distribución del error de posicionamiento.	68
4.29. Frecuencia acumulada del error de posicionamiento.	68
5.1. Fluctuación de iluminación de distintos LEDs	72

Introducción

Cuando se habla de posicionamiento, el sistema más conocido y utilizado es el Sistema de Posicionamiento Global (GPS). Al estar incorporado en prácticamente todas las nuevas tecnologías, en términos de cobertura y costo no tiene competencia. Sin embargo, dicho sistema no es infalible debido a la dispersión multicamino y la dificultad intrínseca de tener un desempeño adecuado en ambientes cerrados [1]. Se han desarrollado distintas tecnologías para complementar la localización por GPS, utilizando WiFi, Bluetooth y análisis de imágenes, con el consiguiente aumento en la precisión de la localización *indoor*, pero también aumentando el costo de implementación. Es en este contexto que surge una nueva técnica de posicionamiento para sitios cerrados, basada en comunicación por luz.

El posicionamiento basado en *Visible Light Communications* (VLC), utiliza señales luminosas de fuentes de Diodos Emisores de Luz (LED) para determinar la posición de dispositivos móviles. La ventaja con respecto a otras tecnologías de posicionamiento, es utilizar la infraestructura lumínica existente con solo algunas modificaciones para realizar el posicionamiento, sin necesidad de añadir costos extra de implementación. Se puede mencionar adicionalmente que el posicionamiento por luz se puede utilizar en lugares donde las señales de radiofrecuencia no están permitidas, por ejemplo, en hospitales con escáner por resonancia magnética (MRI), o minas subterráneas [2]. Además, la popularidad de la iluminación LED ha aumentado significativamente los últimos años, debido en gran parte a su mayor tiempo de vida, capacidad de ser modulada a altas frecuencias y bajo consumo comparada con otros dispositivos de iluminación artificial [3].

A pesar de que el Posicionamiento por Luz (VLP), está estrechamente relacionado con la Comunicación por Luz (VLC), el primero no ha conseguido acaparar niveles similares de atención. Así, mientras es posible encontrar cientos de publicaciones referidas a Comunicación por Luz, existe una cantidad menor de publicaciones relacionadas con el Posicionamiento por Luz [1].

Los algoritmos de posicionamiento propuestos hasta el momento se pueden categorizar en: Triangulación, Análisis de Escena y Proximidad. La Triangulación utiliza propiedades geométricas

de los triángulos para la estimación de la localización y contiene dos ramas: Lateración y Angulación. Los métodos de Lateración estiman la posición del fotodetector midiendo la Potencia de la Señal Recibida (RSS), el Tiempo de Llegada (TOA, TDOA) y la Angulación mide el Ángulo de Llegada (AOA) para medir indirectamente la distancia entre el fotodetector y los puntos de referencia fijos (LEDs). También se han reportado algoritmos híbridos que incorporan dos o más técnicas que trabajan en conjunto.

La presente investigación profundizará en algoritmos de posicionamiento basados en la potencia de la señal recibida (RSS) y utilizando multiplexación por división de frecuencias (FDM). La mayoría de los algoritmos de posicionamiento propuestos hasta el momento, y basados en RSS y FDM se prueban bajo simulación computacional, entregando un error que fluctúa entre 1.5 cm y 53 cm [4], [5]. Entre los pocos trabajos experimentales existentes, se reporta una precisión en la localización de entre 30 a 70 cm. [6] [7] [8]. Sin embargo, cada una de estas investigaciones se hizo bajo condiciones muy diferentes, algunos en espacios de menos de $1 m^3$ y otros de cientos de m^2 .

Aún así, investigaciones sobre posicionamiento *indoor*, contrastadas con datos experimentales son escasas, y más aún investigaciones en donde se propongan prototipos funcionales para realizar el posicionamiento.

La contribución de esta investigación se enfoca el trabajo experimental y prototipado de sistemas de posicionamiento por luz, utilizando para ello un algoritmo de Lateración en conjunto con un sistema híbrido de RSS y fingerprint.

En el capítulo 1 se exponen de los fundamentos de la comunicación inalámbrica, que abarca funcionamiento y modulación de LEDs, funcionamiento de fotodetectores y una sección referida al parpadeo de LEDs y sus posibles consecuencias a la salud humana. En el capítulo 2, se introduce el modelo de canal óptico *Line of Sight* LOS y NLOS *No Line of Sight*. En el capítulo 3, se realiza una reseña de los distintos sistemas de posicionamiento en interiores, mientras que al final del capítulo y en mayor profundidad, el sistema utilizado en este trabajo, Lateración por intensidad de la señal recibida. En el capítulo 4, se detalla el trabajo de simulación y los distintos prototipos de la implementación del sistema de posicionamiento, como también los resultados experimentales obtenidos. Finalmente, en el capítulo 5 se indican las conclusiones, y perspectivas para futuros trabajos.

Objetivos

Objetivo general

- Desarrollar un prototipo experimental capaz de identificar automáticamente la posición de un fotodetector en un sitio cerrado (indoor), a partir de señales ópticas y utilizando lateración circular e intensidad de la señal recibida.

Objetivos específicos

- Estudiar distintos métodos de localización utilizando señales ópticas
- Realizar una simulación computacional de un canal óptico inalámbrico para estudiar la respuesta al impulso del canal con distintas configuraciones LED-fotodetector
- Realizar una simulación computacional de un sistema de posicionamiento usando lateración circular e intensidad de la señal recibida
- Desarrollar circuitos driver para LEDs capaces de realizar combinación de señales AC y DC
- Desarrollar un sistema receptor que realice adquisición de datos, análisis de señales y trilateración
- Determinar los parámetros de Lambert para el LED utilizado
- Medir la posición del fotodetector con el sistema realizado en distintas configuraciones

Capítulo 1

Fundamentos de comunicación óptica inalámbrica

Se le llama comunicación óptica inalámbrica a aquella que involucra transmisión y recepción de señales cuya onda portadora se encuentra en el dominio óptico, y por lo tanto, las antenas de emisión y recepción son fuentes emisoras y receptoras de luz respectivamente. Se distinguen dos fuentes luminosas como emisores: LEDs y láser. Ambos dispositivos requieren de un circuito *driver* que produce una corriente proporcional a la forma de onda modulada, y que confiere a los LEDs o láser los cambios de intensidad de la luz que son emitidos. Luego de irradiar luz en un canal óptico, esta señal debe ser recibida y los receptores utilizados en sistemas ópticos inalámbricos son usualmente llamados fotodetectores. La salida de los fotodetectores es una corriente proporcional a la intensidad de la luz que es irradiada en el área de detección del fotodetector. A este tipo de transmisión se le llama Modulación de Intensidad/Detección Directa (IM/DD).

En el presente capítulo se abordará el funcionamiento de los LEDs, y algunos circuitos utilizados como *driver*. Posteriormente se trata el parpadeo de LEDs y fuentes luminosas desde una perspectiva de salud y finalmente se explica el funcionamiento de los fotodetectores.

1.1. LEDs

Los LEDs reciben su nombre por la sigla en inglés *Light-Emitting Diode*, o Diodo Emisor de Luz. Los diodos son dispositivos electrónicos que utilizan semiconductores de tipo p , dopado para añadir portadores de carga positiva o huecos y tipo n con un mayor número de portadores de carga negativa, o electrones. Ambos semiconductores se acoplan para dar lugar a una unión $p-n$, en donde las concentraciones desiguales de cargas dan lugar a una difusión de electrones desde el lado n al lado p , hasta establecer un equilibrio. Los electrones no pueden, sin embargo, propagarse lejos de la unión al no ser el semiconductor un buen conductor, creando una barrera de potencial a través de la unión que impide la difusión posterior.

Al aplicar una diferencia de potencial a través de la unión pn , con el terminal positivo conectado al lado p de la unión, se dice que la unión está en *polarización directa*. En este tipo de polarización, se incrementa la difusión de electrones y huecos, disminuyendo el potencial a través de la unión y permitiendo el paso de la corriente eléctrica.

Existe una diferencia de energía entre el nivel energético del electrón en la banda de conducción y el nivel que posteriormente ocupa al recombinarse con el hueco en la banda de valencia. Esta diferencia de energía es emitida como un fotón en caso de ser una recombinación de tipo radiativa, o emitida como un fonón, en caso de recombinación no radiativa. Por el contrario, si el terminal positivo está conectado al lado n , se dice que la unión está en *polarización inversa*, lo que incrementa la diferencia de potencial de la unión, no permitiendo el paso de la corriente eléctrica.

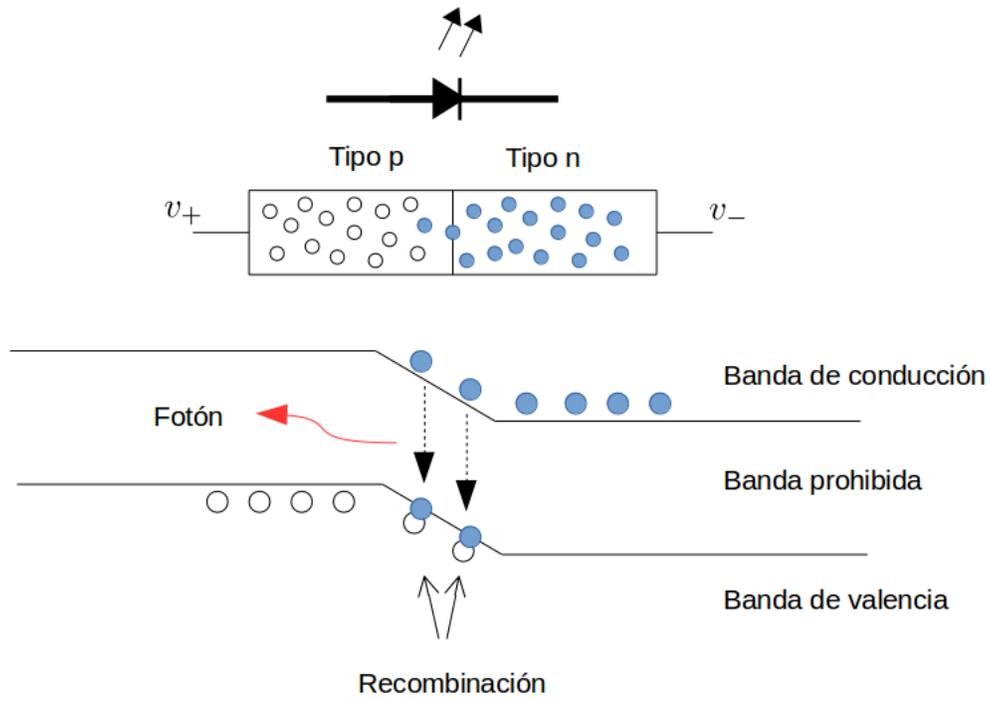


Figura 1.1: Operación de un LED. Figura de elaboración propia

La curva Voltaje-Corriente característica de un LED viene dada por

$$I_D = I_0 \left(\exp \frac{eV_D}{k_B T} - 1 \right) \quad (1.1)$$

Donde I_0 es la corriente de fuga del dispositivo cuando está en polarización inversa ($V_D < 0$), e es la carga del electrón $1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$, k_B es la constante de Boltzmann $1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$, y T es la temperatura en K .

Como se mencionó anteriormente, parte de la corriente I que pasa a través del diodo LED directamente polarizado, se convierte en luz. Si η_{tot} es la eficiencia de la conversión, entonces la corriente de fotones que emerge desde el diodo está definida por 1.2

$$I_{ph} = \eta_{tot} \frac{I}{e} \quad (1.2)$$

La eficiencia cuántica η_{tot} depende de la corriente inyectada, por lo que la relación $I_{ph} - I$ no es lineal. Sin embargo, esta dependencia es débil en un LED y la curva característica $I_{ph} - I$ es casi lineal [9] como se muestra en la figura 1.3

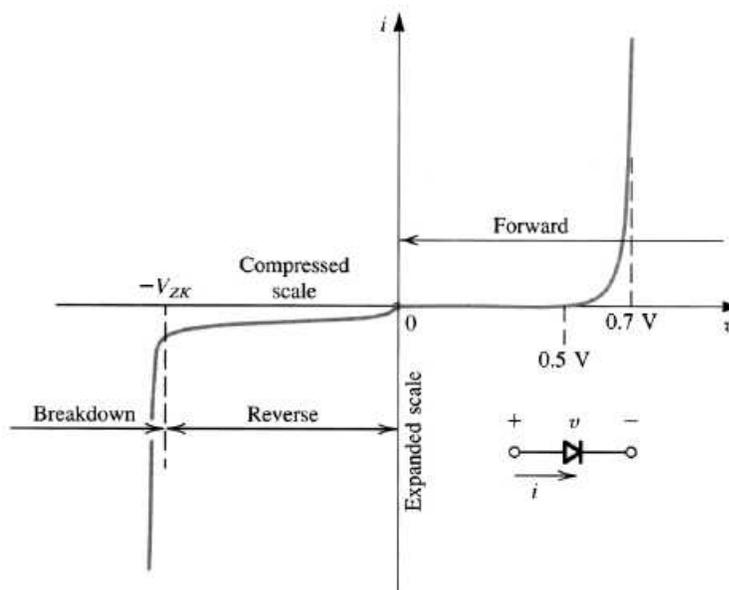


Figura 1.2: Curva característica de un diodo. Imagen extraída de *Electronic Devices and Circuits*, R. Victor Jones

1.1.1. LED drivers

Puesto que la potencia óptica irradiada por un LED es directamente proporcional a la corriente, es importante tener control sobre la corriente que pasa por un LED, a fin de controlar su luminosidad. Para aplicaciones LED sencillas, es suficiente utilizar una resistencia para limitar la corriente que pasa por el LED, pero para aplicaciones más complejas existe la desventaja de que, cualquier fluctuación en el voltaje provocará una fluctuación en la corriente, (como por ejemplo, fluctuaciones debidas a la temperatura) y un aumento en la corriente que circula por el LED puede dañarlo indefinidamente o acortar su vida útil. La función principal del LED-driver, es impedir que existan fluctuaciones de corriente.

En la figura 1.4 se observa una fuente de corriente que puede utilizarse como LED-driver. La entrada inversora del amplificador operacional toma muestras de la tensión en la resistencia R_s y la compara con la tensión v_+ de la entrada no inversora. Como el amplificador tiene la configuración de un seguidor de voltaje, el voltaje de salida del amplificador será el mismo voltaje de entrada. Este voltaje de salida resiste a los cambios de tensión, a menos que la tensión de entrada cambie, de este modo, si el voltaje de entrada se mantiene estable en algún valor, la tensión de salida hace lo posible para mantener el mismo voltaje de entrada. Si la corriente que pasa por el drenaje (*drain*) y la fuente (*source*) del transistor cambia, la salida de voltaje del amplificador operacional también

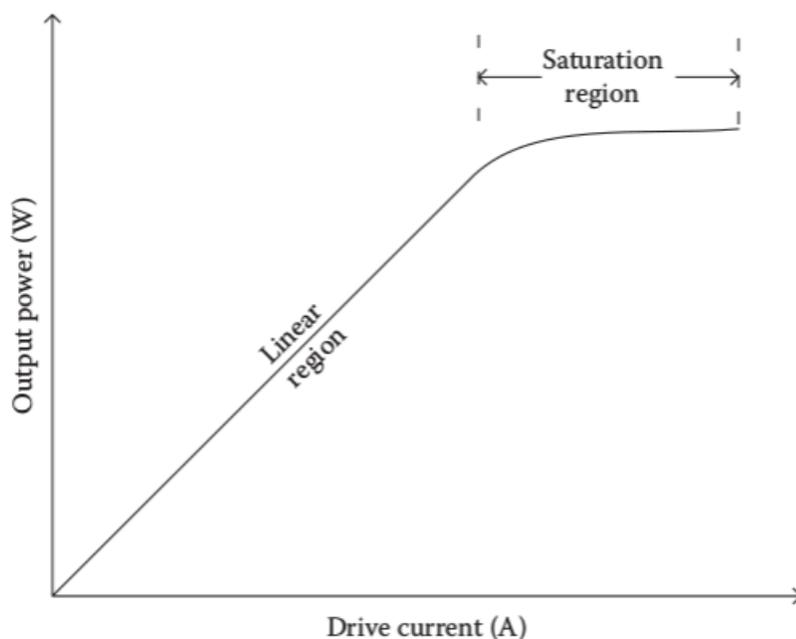


Figura 1.3: Ilustración de la potencia óptica irradiada en función de la corriente de un LED. Imagen extraída de *Visible Light Communications - theory and applications*, Z. Ghassemlooy. [10].

cambia para ajustarse a este cambio de corriente, de forma que el voltaje a través de la resistencia R_s es constante.

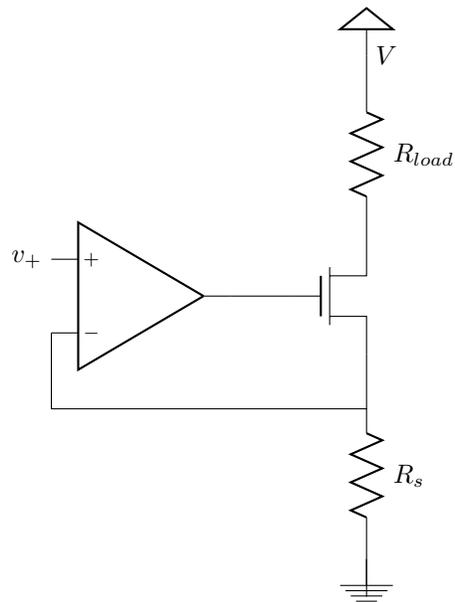


Figura 1.4: Fuente de corriente con un amplificador operacional y un MOSFET. Imagen de elaboración propia.

1.1.2. Combinación de señales y biasing

Dentro de los mayores beneficios de utilizar LEDs para realizar localización en sitios cerrados está el poder usar la luminaria existente y añadir la función de posicionamiento, utilizando los mismos dispositivos e infraestructura, y la capacidad de los LEDs de cambiar de estado rápidamente, lo que les permite ser modulados y enviar información en forma de onda [11].

La manera de usar los LEDs para cumplir ambas funciones, se logra manteniendo una corriente constante con un LED-driver para que el LED cumpla la labor de iluminación, y combinarla con una señal distinta, que sirva como identificación de cada luz LED. Esto puede lograrse utilizando distintas aproximaciones; con un Bias-Tee, o con un circuito dedicado con componentes activos que pueda otorgar control independiente de ambas funciones.

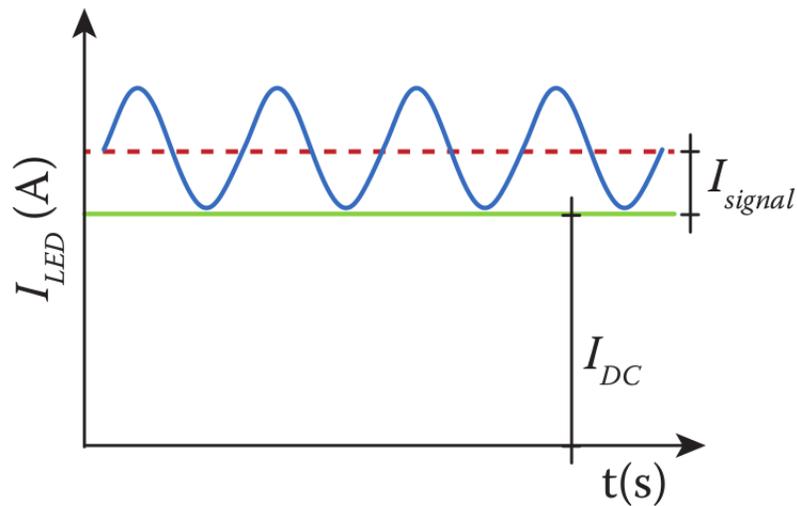


Figura 1.5: Combinación de señal AC y DC. Imagen extraída de *Visible Light Communications - theory and applications*, Z. Ghassemlooy. [10].

El Bias-Tee es un circuito utilizado en radiofrecuencia, cuya función es combinar una señal AC con una señal DC. Consta de tres puertos, el puerto de baja frecuencia se utiliza para setear la señal DC, el puerto de alta frecuencia permite la entrada a señales AC, pero bloquea las señales DC. El puerto de salida entrega la señal AC con un bias igual a la señal DC. La forma más sencilla de Bias-Tee consta de un condensador que permite la señal AC pero bloquea las señales DC, y un inductor que bloquea las señales AC pero permite la entrada a la señal DC, como se observa en la figura 1.6.

Para calcular el valor de capacitor e inductor para cada aplicación, se debe tener en cuenta la impedancia Z_0 del dispositivo a inyectar la señal combinada, en este caso, la impedancia del LED. Como se puede apreciar en la ecuación 1.1, la curva I-V de un LED es no lineal, al igual que en cualquier diodo. Por lo tanto, la impedancia del LED será el inverso de la pendiente de dicha curva. De esta forma, la impedancia del capacitor X_c se debe escoger de modo que sea mucho menor que Z_0 y la impedancia del inductor X_L debe ser mucho mayor que Z_0 , como se expone en las ecuaciones 1.3:

$$\begin{aligned} X_c &= \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \ll Z_0, \\ X_L &= \omega L = 2\pi f L \gg Z_0 \end{aligned} \quad (1.3)$$

Donde ω es la frecuencia angular (en radianes por segundo) y f es la frecuencia en hertz.

El desempeño del Bias-Tee dependerá del cumplimiento de las ecuaciones 1.3. En el caso de los LED, la impedancia de la carga es dependiente de la corriente DC, por lo que el desempeño del Bias-Tee no será el óptimo, puesto que no soporta variaciones de impedancia.

Otra alternativa, ofrecida por Ghassemlooy [10], para combinación de señales en aplicaciones LEDs, se observa en la figura 1.7. Utiliza un par de transistores, el transistor de la derecha establece

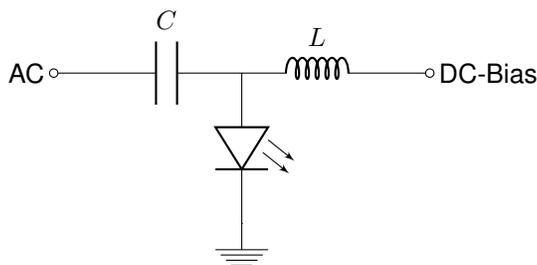


Figura 1.6: Bias-Tee

el bias, mientras el transistor de la izquierda drena corriente adicional desde el LED, de acuerdo a la señal AC V_{in} . El amplificador operacional con el transistor crea un transistor con alta impedancia y sin caída de voltaje. La corriente de bias está dada por la ecuación 1.4 y la corriente de la señal está dada por 1.5

$$I_{DC} = \frac{V_{bias}}{R_{bias}} + \frac{V_{DC} - V_{BE}}{R_S} \quad (1.4)$$

$$I_{signal} = \frac{V_{in}}{R_s} \quad (1.5)$$

donde V_{DC} es el voltaje de la señal en la base del transistor.

1.1.3. Parpadeo de la luz LED y posibles problemas a la salud humana

Según la actualización del estándar par1789 de la IEEE [12] que estudia los efectos del parpadeo de las luces LED en la salud humana, dichos efectos están en función de la frecuencia de parpadeo, la profundidad de modulación, brillantez y de la aplicación LED, entre otros factores. En sujetos con epilepsia fotosensitiva, cualquier cambio repetitivo en estímulos visuales dentro de la frecuencia de 3 a 70 Hz es potencialmente riesgoso, y en un rango entre 15 y 20 Hz se encuentra la mayor incidencia de ataques epilépticos.

Mediciones de electroretinograma indican que la modulación de la luz dentro de un rango de frecuencia de 100 y 200 Hz es resuelto por la retina humana, aunque la frecuencia sea demasiado alta para ser vista. Aún así, al momento de leer, el ojo humano se ve afectado cuando está sometido a modulaciones con frecuencias de dicho rango.

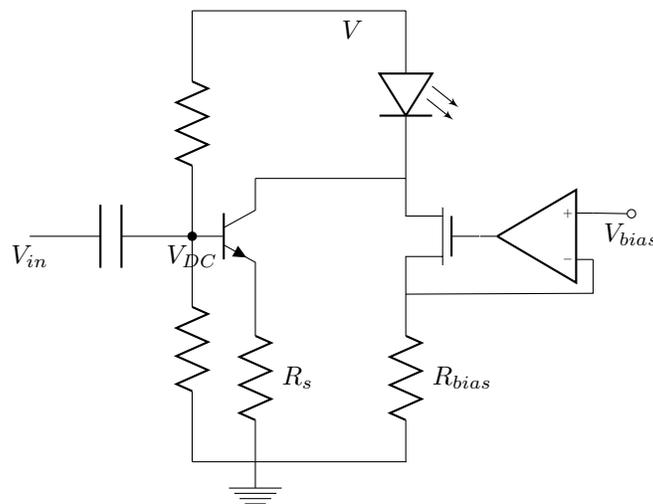


Figura 1.7: Circuito de combinación de señales propuesto por Ghassemlooy

La Sociedad de Ingeniería de Iluminación de Norteamérica (IESNA) [13], ha definido dos medidas para el parpadeo producido por fuentes luminosas, el porcentaje de parpadeo, que es una escala de 0 a 100 % y el índice de parpadeo, que tiene una escala entre 0 a 1.0.

El porcentaje de parpadeo es la amplitud *peak to peak* promedio, es decir, es una medida de la profundidad de la modulación y se puede calcular según la ecuación 1.6

$$\text{Percent Flicker} = 100 \times \frac{A - B}{A + B}, \quad (1.6)$$

y el índice de parpadeo, que toma en cuenta la forma de la modulación o *duty cycle*, según la ecuación 1.7

$$\text{Flicker Index} = \frac{\text{Area}_1}{\text{Area}_1 + \text{Area}_2}. \quad (1.7)$$

La práctica recomendada por la IEEE par1789 para dispositivos lumínicos, a fin de evitar efectos indeseados sobre la salud humana, como ataques epilépticos a personas con fotosensibilidad, o migrañas se define en la ecuación 1.8

$$\text{Max \% Flicker} \leq \text{Flicker frequency} \times 0,08 \quad (1.8)$$

Para llevar a cabo la recomendación, se debe determinar la frecuencia del parpadeo (*flicker frequency*) del dispositivo, la que en todo caso no puede ser menor a 100 Hz. Posteriormente, se determina el % de parpadeo (*% flicker*). La frecuencia de parpadeo se multiplica por un factor de 0.08, y se redondea al número entero más cercano para obtener el % máximo de parpadeo permitido para el dispositivo. De no poder determinar la frecuencia de parpadeo, el porcentaje de parpadeo no debe exceder al 10 %. Por ejemplo, a una frecuencia de 120 Hz, el porcentaje de

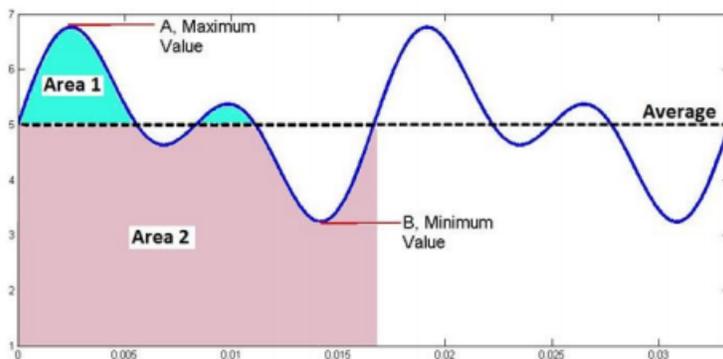


Figura 1.8: Medición del parpadeo. Imagen extraída de IESNA lightning handbook 10th edition

parpadeo máximo permitido es 10 %. A una frecuencia de 1200 Hz o mayor, se permite un 100 % de parpadeo [14]

1.2. Fotodetectores

Es posible el proceso inverso a la transición de un electrón entre las bandas de conducción y valencia, acompañado de liberación de energía en forma de fotón [10]. En un semiconductor expuesto a una fuente luminosa externa, los fotones que llegan a éste pueden suministrar energía suficiente a los electrones en la banda de valencia para moverse a la banda de conducción, a través de un efecto llamado absorción de fotones. Estos electrones fotogenerados se pueden mover libremente en el semiconductor y comportarse como portadores de carga, como se muestra en la figura 1.9.

Al igual que en los diodos LED, se define la eficiencia cuántica de la absorción de fotones como la razón entre el número de cargas fotogeneradas y el número de fotones incidentes, como se expone en la ecuación 1.9

$$\eta = \frac{I_{ph}/q}{P_0/h\nu} = (1 - r) (1 - e^{-\alpha(\lambda)d}) \quad (1.9)$$

donde I_{ph} es la corriente de fotones, P_0 es la potencia óptica incidente, r es el coeficiente de reflexión en la interfase aire-semiconductor, $\alpha(\lambda)$ es el coeficiente de absorción y d es la longitud de la muestra de semiconductor. Generalmente, la eficiencia cuántica depende del coeficiente de

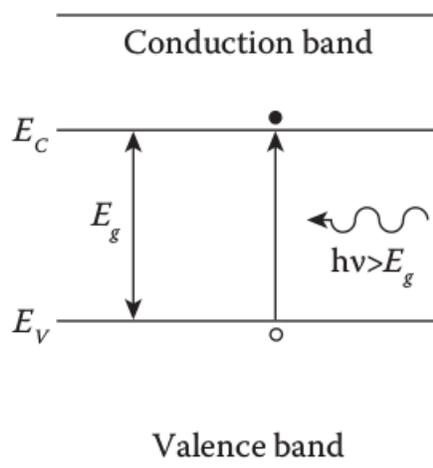


Figura 1.9: Mecanismo de generación de portadores de carga debido a absorción de fotones. Imagen extraída de *Visible Light Communications, theory and applications*.

absorción, que es distinta para diferentes materiales semiconductores utilizados comúnmente en fotodiodos. Otra medida útil, es la responsividad espectral del material. Se utiliza comúnmente como indicador del desempeño del fotodiodo. La responsividad espectral se define como la razón entre la corriente fotogenerada y la potencia óptica incidente.

$$R(\lambda) = \frac{I_{ph}}{P_0} = \eta \frac{q\lambda}{hc} \quad (1.10)$$

En la figura 1.10 (a) se puede apreciar el coeficiente de absorción para algunos materiales semiconductores utilizados en fotodiodos. Como se puede observar, el comportamiento del coeficiente de absorción determina el rango de longitud de onda al cual es sensible el fotodetector. En 1.10 (b) se observan las limitaciones teóricas para la responsividad espectral asumiendo valores de eficiencia cuántica fijos. Como se puede apreciar, Si e InGaAs exhiben responsividades espectrales cercanas al límite teórico y además, Si y GaAs son los semiconductores más favorables en la detección de radiación de luz visible.

La figura 1.11 ilustra la curva corriente-voltaje característica de un fotodiodo. Existen dos modos de operación para detección de señales ópticas: el modo fotoconductor y el modo fotovoltaico. En el modo fotoconductor, el fotodiodo opera bajo polarización inversa. En este caso, la corriente del dispositivo está determinada por $I_{ph} - I_0$, siendo I_0 la corriente oscura (la corriente que fluye aún sin exposición a radiación). Generalmente, se utiliza el modo fotoconductor para detección de señales. En el modo fotovoltaico, el fotodiodo tiene polarización cero, y la salida del dispositivo se representa como un voltaje, dependiendo de la exposición a la radiación óptica. Este modo se utiliza comúnmente para aplicaciones de recolección de energía.

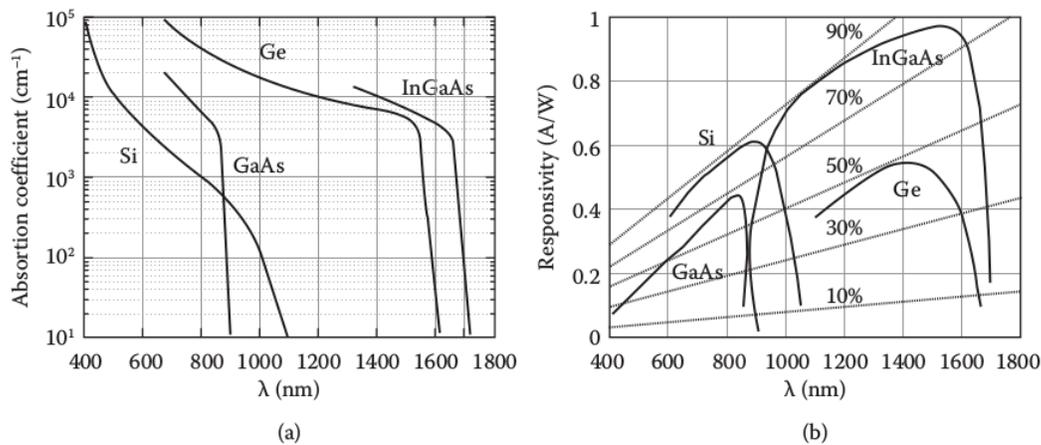


Figura 1.10: (a) Coeficiente de absorción y (b) Responsividad espectral. Imagen extraída de *Visible Light Communications, theory and applications*.

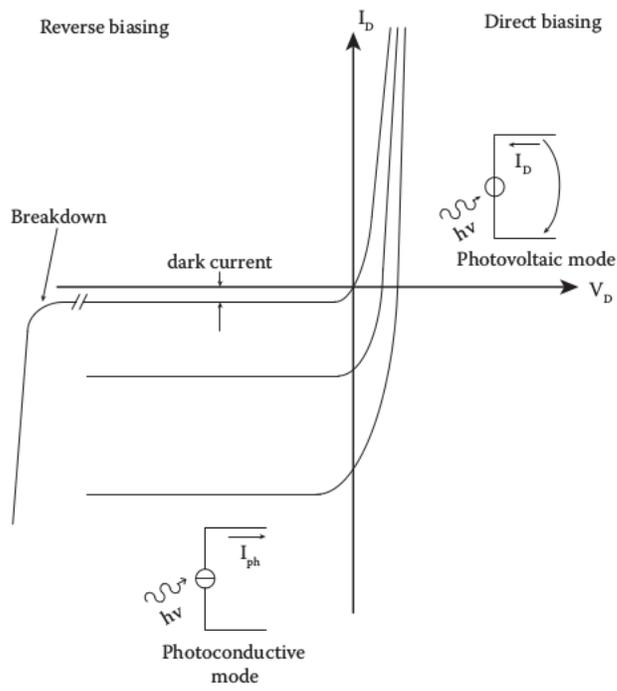


Figura 1.11: Curva corriente-voltaje característica de un fotodiodo y sus modos. Imagen extraída de *Visible Light Communications, theory and applications*.

Capítulo 2

Modelo del canal óptico

A fin de implementar un sistema de posicionamiento en interiores basado en señales ópticas, es necesario entender las características del canal óptico de comunicación, y cómo se comportan las señales según la configuración de emisor y receptor dentro del canal, por ello, se requiere conocer la respuesta al impulso. Se pueden distinguir dos configuraciones en un canal de este tipo: *Line Of Sight* (LOS) y *No Line Of Sight* (NLOS) según si existen o no obstrucciones en el camino directo entre emisor y receptor [15]. En el caso de LOS, no existe ninguna obstrucción entre emisor y receptor, a diferencia de NLOS, donde los fotones provenientes del emisor experimentan reflexiones en el techo, piso o en las paredes antes de alcanzar el fotodetector.

2.1. Modelo del canal

Para simular un canal óptico inalámbrico conformado por un emisor y un receptor dentro de un entorno con superficies con cierto índice de reflexión, se considera un transmisor o fuente óptica E , que transmite una señal $x(t)$ utilizando Modulación de Intensidad y Detección Directa (IM/DD), cuyo esquema se muestra en la Fig. 2.1. La señal recibida por un receptor R , cuando E está emitiendo una señal es $y(t)$, que corresponde a la corriente en el fotodiodo, dado por la ecuación 2.1

$$y(t) = rx(t) * h(t) + n(t) \quad (2.1)$$

donde $*$ denota convolución, $h(t)$ es la respuesta al impulso del canal entre la fuente E y el receptor R , r es la responsividad del fotodiodo y $n(t)$ es ruido, como se puede observar en la figura 2.1.

La respuesta al impulso para una posición arbitraria de E y R se puede expresar mediante la suma de la ecuación 2.2

$$h(t; E, R) = h^{(0)}(t; E, R) + \sum_{k=1}^{\infty} h^{(k)}(t; E, R) \quad (2.2)$$

con $h^{(0)}(t; E, R)$ la respuesta al impulso de LOS y $h^{(k)}(t; E, R)$ la respuesta al impulso de la luz luego de k reflejos (NLOS).

En siguientes secciones se detalla la respuesta al impulso del canal LOS y la respuesta al impulso del canal NLOS para llegar a la expresión descrita en la ecuación 2.2.

2.2. Respuesta al impulso de LOS

En un entorno libre de superficies reflectantes, con un emisor E y un receptor R y una distancia d entre ambos, la respuesta al impulso de LOS se puede aproximar según la ecuación 2.3

$$h^{(0)}(t; E, R) = \frac{1}{d^2} R_0(\phi, m) A_{eff}(\psi) \delta\left(t - \frac{d}{c}\right) \quad (2.3)$$

con $R_0(\phi, m)$ el modelo de Lambert que se utiliza para aproximar el patrón de radiación del emisor, c es la velocidad de la luz y $A_{eff}(\psi)$ es el área efectiva del receptor.

El modelo de Lambert utilizado es descrito por la ecuación 2.4

$$R_0(\phi, m) = \frac{m+1}{2\pi} P_e \cos^m(\phi) \quad (2.4)$$

donde m es el número de Lambert del patrón de radiación, y especifica la direccionalidad del

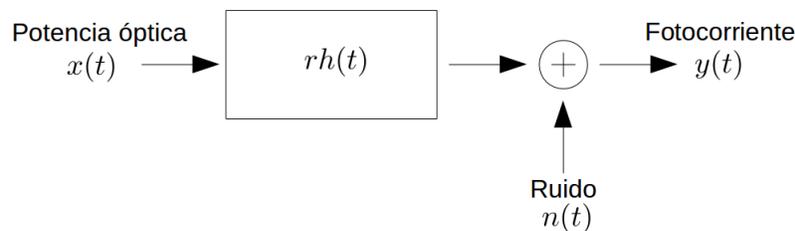


Figura 2.1: Modelo del enlace óptico con Modulación de Intensidad y Detección Directa IM/DD

emisor.

El área efectiva del fotodiodo se puede expresar según la ecuación 2.5 y $rect(x)$ es una función rectangular cuyo valor es 1 para $|x| \leq 1$ y 0 para $|x| > 1$, A_r es el área física del receptor, y FOV (*Field of View*) es el Campo de Visión [15], como se puede observar en la Fig. 2.2.

$$A_{eff}(\psi) = A_r \cos(\psi) rect\left(\frac{\psi}{FOV}\right) \quad (2.5)$$

Entonces, la potencia recibida por un sistema emisor-receptor LOS, viene dada por

$$P_{r-LOS} = \frac{A_r(m+1)}{2\pi d^2} \cos^m(\phi) \cos(\psi) P_e \quad (2.6)$$

con P_e la potencia emitida por la fuente.

2.3. Respuesta al Impulso de reflejos múltiples (NLOS)

Hasta el momento, no se han tomado en consideración los reflejos múltiples que puede experimentar el haz antes de alcanzar el receptor. Para generar una respuesta al impulso que incluya los reflejos, se utiliza el algoritmo de Barry [16], en donde se considera una pieza rectangular y vacía, y se asume que el receptor óptico apunta hacia el techo. Cada una de las superficies de la pieza es dividida en elementos de área ΔA , y cada vez que un haz se refleje en

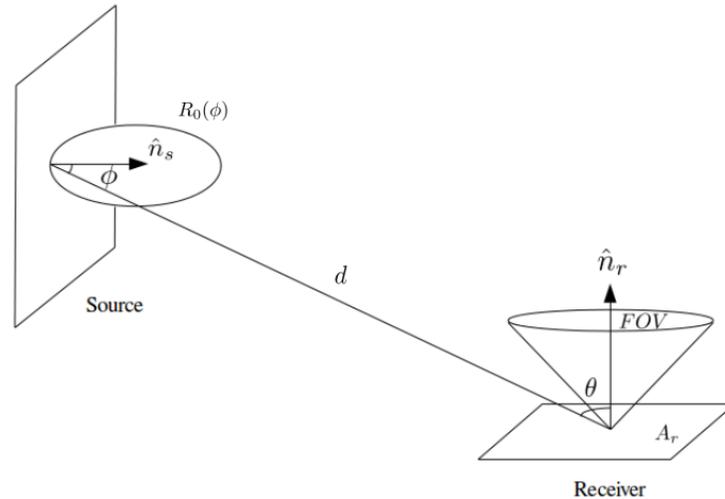


Figura 2.2: Geometría del sistema. Un emisor y un receptor con LOS, donde se indica el patrón de radiación de Lambert $R_0(\phi)$, donde ϕ es el ángulo entre la superficie del emisor y la normal a éste, \hat{n}_s . En el receptor se indica el FOV, cuyo ángulo sólido es medido desde la normal a la superficie del receptor, \hat{n}_r .

alguno de estos elementos de área, se trata al elemento ΔA como una nueva fuente que emite con el patrón de Lambert. Esta nueva emisión, sin embargo, se encuentra escalada por el coeficiente de reflexividad de la superficie, ρ . Dados una fuente E y un receptor R , la respuesta al impulso de NLOS se escribe como una suma infinita:

$$h_{nlos}(t; E, R) = \sum_{k=0}^{\infty} h_{nlos}^{(k)}(t; E, R) \quad (2.7)$$

donde $h_{nlos}^{(k)}(t; E, R)$ es la respuesta al impulso debido a los haces de luz luego de exactamente k reflejos. Para K fuentes, la ecuación anterior se puede modificar a:

$$h_{nlos}(t; E, R) = \sum_i^K \sum_{k=0}^{\infty} h_{nlos}^{(k)}(t; E, R) \quad (2.8)$$

Luego de k reflejos, $h_{nlos}^{(k)}(t; E, R)$ puede evaluarse recursivamente de la forma:

$$h_{nlos}^{(k)}(t; E, R) = \frac{m+1}{2\pi} \sum_{j=1}^K \rho_j \cos^m(\phi_j) \frac{\cos(\psi)}{d_{Ej}^2} \text{rect}\left(\frac{2\psi}{\pi}\right) h_{nlos}^{(k-1)}\left(t - \frac{d_{Ej}}{c}, E, R\right) \Delta A \quad (2.9)$$

donde, como se mencionó anteriormente, ΔA es el área de un elemento reflector, κ es el número de elementos reflectores en el canal, ρ_j es el coeficiente de reflexión de la superficie, d_{Ej} es la distancia entre E y j , $h_{nlos}^{(k-1)}$ es la respuesta al impulso de orden $k-1$ entre el reflector j y el receptor R . En la Fig. 2.3 se esboza la situación para un haz que experimenta una reflexión antes de alcanzar el fotodetector, o receptor.

Procedure 1 Algoritmo de Barry para una pared

Input: lx, ly, lz {Dimensiones del sitio};**Output:** $Nx = 3 * lx, Ny = 3 * ly, Nz = 3 * lz$ {grid de pared}**for** $ii=1:Nx$ **do****for** $jj=1:Ny$ **do**

Calcular posición receptor en grid

 $h_1(ii, jj) = 0$ {reflejo en la pared}**for** $kk=1:Nz$ **do****for** $ll=1:Nz$ **do**

Calcular punto de incidencia en pared reflectora

Calcular distancia desde emisor a punto de incidencia D_1 Calcular $\cos \Phi_{Ej}$ y $\cos \psi_{Ej}$ Calcular distancia desde punto de incidencia a receptor D_2 Calcular $\cos \Phi_{Rj}$ y $\cos \psi_{Rj}$ **if** $|\arccos \cos \phi| \leq FOV$ **then** $h_1(ii, jj) = h_1(ii, jj) + (m+1) * A * \rho dA \cos^m \phi_{Ej} \cos \psi_{Ej} \cos \psi_{Rj} \cos \phi_{Rj} / 2\pi^2 * D_1^2 * D_2^2$ { A área de fotodetector, dA elemento de área, ρ coeficiente de reflexión}**end if****end for****end for****end for****end for**

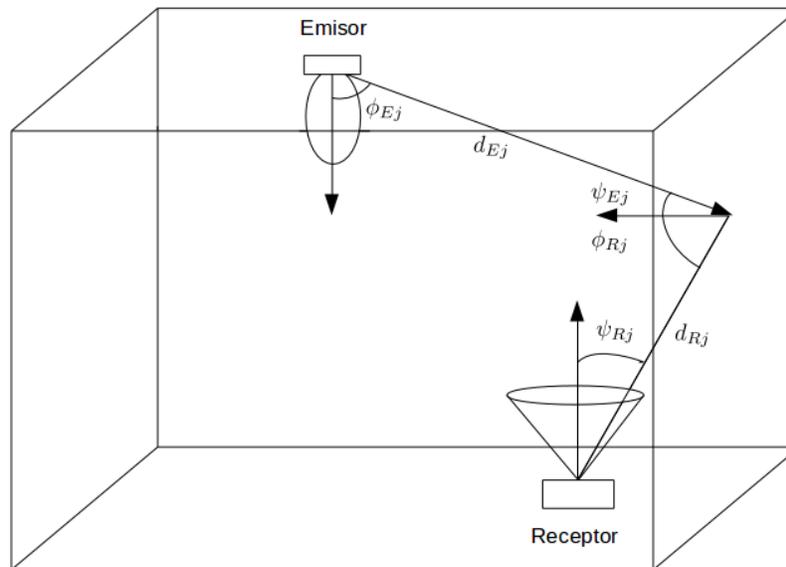


Figura 2.3: Geometría del sistema NLOS para el algoritmo de Barry. Un haz luminoso experimenta una reflexión antes de llegar al receptor. El elemento de área j se considera primero un receptor, para luego ser un emisor que emite un patrón de radiación de Lambert hacia el receptor. Este patrón está escalado por un factor ρ_j , el índice de reflexión de la superficie.

Capítulo 3

Posicionamiento en interiores

La localización de un objeto en el espacio se puede determinar midiendo una cantidad física que cambia proporcionalmente con la posición del objeto de interés. Los sistemas de posicionamiento para entornos cerrados se pueden clasificar en tres tipos: Triangulación, Proximidad y Análisis de Escena. Los dos primeros se han implementado utilizando radiofrecuencia, ondas sónicas (o ambas en simultáneo) y energía fotónica, mientras que el análisis de escena es usualmente llevado a cabo mediante cámaras, fijas o móviles [17].

Los distintos sistemas de localización utilizados en espacios cerrados se mencionan brevemente a continuación. El sistema utilizado en el presente trabajo corresponde a lateración circular mediante RSS (*Received Signal Strength*), y es tratado en profundidad al final del capítulo, en la Sección 3.6.2.

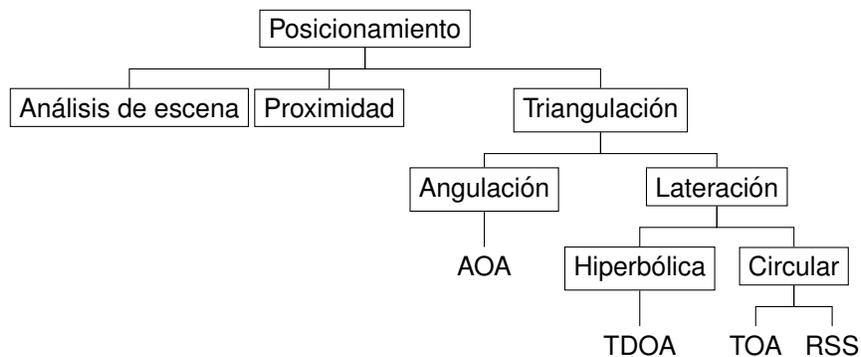


Figura 3.1: Métodos de posicionamiento.

3.1. Análisis de Escena

Análisis de escena es un grupo de algoritmos de posicionamiento que recoge distintas características (*fingerprints*) de una escena y luego estima la posición de un objeto comparando mediciones tomadas en tiempo real con dichos *fingerprints*. Una de las desventajas de este método, es que requiere una muy precisa pre-calibración para cada entorno en específico, y por lo tanto no puede emplearse instantáneamente en un nuevo escenario [17].

3.2. Proximidad

Los algoritmos de proximidad basan su funcionamiento en un arreglo denso de puntos de referencia, cada uno con una posición conocida. Cuando el dispositivo a localizar recibe una señal de uno de los puntos de referencia, se le asigna su posición, y por lo tanto, la precisión de este sistema de localización está dado por la resolución del arreglo. Una de las ventajas de este método, es que se puede implementar en distintos entornos. A modo de ejemplo se puede mencionar la localización por Cell-ID.

3.3. Triangulación

En la triangulación se utilizan propiedades geométricas de los triángulos para estimar la posición de un objeto. Tiene 2 ramas, Angulación y Lateración. La angulación mide ángulos desde el objeto a localizar a múltiples puntos de referencia; la Lateración, por otro lado, utiliza la medición de la distancia desde el objeto a localizar, hasta varios puntos de referencia cuya posición es conocida. Esta medición de la distancia se realiza indirectamente a través de distintos métodos, como lo son el Tiempo de Llegada (Time of Arrival, TOA), la Diferencia de Tiempo de Llegada (Difference Time of Arrival, TDOA), y la Intensidad de la Señal Recibida (Received Signal Strength, RSS). Estas cantidades son medidas y se utilizan para calcular la distancia entre cada punto de referencia y el objeto a localizar, generalmente teniendo en cuenta la atenuación de la señal recibida. En ambos casos, Angulación y Lateración estiman la posición del objeto a localizar calculando puntos de intersección entre las líneas directrices que se obtienen de cada uno de los métodos.

3.4. Angulación

3.4.1. Ángulo de Llegada (AOA) o Angulación

En los sistemas basados en AOA, dentro de la rama de la Angulación, el receptor hace mediciones de los ángulos de las señales que recibe, con respecto a varios puntos de referencia; a lo menos dos para realizar una localización en 2-D y tres para 3-D. Una de las ventajas de este método, es que no requiere sincronización entre los emisores y el receptor (objeto a localizar). Además, la adición de puntos de referencia extra mejora la exactitud de la localización.

3.5. Lateración Hiperbólica

3.5.1. Diferencia de Tiempo de Llegada (TDOA)

Los sistemas que utilizan la Diferencia de tiempo de Llegada (TDOA) miden la diferencia en tiempo de llegada de una señal, a diferencia del tiempo absoluto que se utiliza en sistemas basados en TOA. Las señales deben ser emitidas al mismo tiempo para que sea factible calcular la TDOA, y por lo tanto, todos los emisores deben estar sincronizados, sin embargo, los emisores no tienen que estar sincronizados con el receptor, puesto que éste no está tomando medidas del Tiempo de Llegada absoluto (TOA). Para cada medición de la TDOA, la ubicación del transmisor se estima en una hipérbola en un espacio 2-D y un hiperboloide en un espacio 3-D, y por lo tanto se necesita dos medidas del TDOA con tres puntos de referencia para estimar la posición del objeto a localizar calculando el punto de intersección.

3.6. Lateración Circular

Para utilizar este algoritmo, se asume que el fotodetector se encuentra en un la intersección de perímetros circulares, donde el radio de los círculos corresponde a la distancia entre el fotodetector y el punto de referencia. El radio se mide indirectamente midiendo Tiempo de Llegada (TOA) o la intensidad de la señal recibida (RSS) de la señal lumínica.

3.6.1. Tiempo de Llegada (TOA)

En los sistemas de posicionamiento basados en TOA, se utiliza el tiempo de propagación de la señal (sólo ida) y a partir de allí se calcula la distancia entre emisor-receptor, siendo emisores cada uno de los puntos de referencia mencionados anteriormente.

Para lograr una localización en 2-D es necesario hacer mediciones del TOA desde diferentes señales desde al menos 3 emisores, la localización se realiza buscando la intersección de tres círculos, y tres cascarones esféricos en el caso de la localización 3-D. Un buen ejemplo de un sistema de localización basado en TOA es el Sistema de Posicionamiento Global (GPS). En este sistema, se utilizan satélites como puntos de referencia que envían señales a receptores en Tierra.

El TOA puede ser medido a través de distintas técnicas, como lo son Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) o medidas hechas por Ultra Wide Band (UWB).

Una de las desventajas del método, es que se necesita que emisor y transmisor estén perfectamente sincronizados, ya que cualquier desincronización resultará en una medición errónea de la distancia entre ambos, y por lo tanto, en una estimación errónea de la posición.

Para satisfacer las demandas de localización en entornos cerrados, la precisión del posicionamiento debe estar dentro de un rango desde algunos metros a centímetros, lo que significa que todos los relojes en un sistema TOA necesitan estar sincronizados al nivel de algunos nanosegundos, y por lo tanto, la complejidad y costo de dicho sistema usualmente no pueden ser abordados adecuadamente [17].

3.6.2. Lateración mediante Intensidad de la Señal Recibida

Los sistemas basados en RSS, miden la intensidad de la señal recibida, considerando las pérdidas por propagación mediante un modelo matemático adecuado para el sistema. A partir de la RSS, se puede estimar la distancia entre emisor y receptor. Luego se utiliza Trilateración o Lateración Circular para estimar la posición del receptor, o objeto a localizar. Matemáticamente, la expresión matemática de la trilateración en 3D, asumiendo que (X_i, Y_i, Z_i) es la posición del i -ésimo punto de referencia, con $i = 1, 2, 3$ y (x, y, z) la posición del objeto a localizar. Si la estimación de la distancia entre el punto de referencia i -ésimo (emisor i -ésimo) y el receptor es R_i , entonces las posibles posiciones del objeto a localizar forman un cascarón esférico centrado en (X_i, Y_i, Z_i) y con un radio R_i , lo que puede ser expresado matemáticamente como:

$$(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2 + (Z_i - z)^2 = R_i^2, \quad i = 1, 2, 3 \quad (3.1)$$

Teóricamente, la intersección de estos tres cascarones esféricos es, a lo más, dos puntos, uno de los cuales corresponde a la posición del objeto a localizar. Sin embargo, en un entorno real ésta no es la situación, debido a la presencia de ruido lumínico u otras interferencias. Una solución aproximada del sistema está dado por el método de cuadrados mínimos.

Si se hace la substracción entre pares de ecuaciones, entonces podemos notar que

$$\begin{aligned}
 R_i^2 - R_1^2 &= (x - X_i)^2 + (y - Y_i)^2 + (z - Z_i)^2 \\
 R_i^2 - R_1^2 &= X_i^2 + Y_i^2 + Z_i^2 - X_1^2 - Y_1^2 - Z_1^2 \\
 &\quad - 2x(X_i - X_1) - 2y(Y_i - Y_1) - 2z(Z_i - Z_1)
 \end{aligned}$$

La ecuación anterior se puede llevar a una forma matricial del tipo

$$\mathbf{A}\mathbf{X} = \mathbf{B} \quad (3.2)$$

con

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x & y & z \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} X_2 - X_1 & Y_2 - Y_1 & Z_2 - Z_1 \\ X_3 - X_1 & Y_3 - Y_1 & Z_3 - Z_1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} (R_1^2 - R_2^2) + (X_2^2 + Y_2^2 + Z_2^2) - (X_1^2 + Y_1^2 + Z_1^2) \\ (R_1^2 - R_3^2) + (X_3^2 + Y_3^2 + Z_3^2) - (X_1^2 + Y_1^2 + Z_1^2) \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Y la solución de cuadrados mínimos del sistema está dado por la ecuación 3.6

$$\mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{B} \quad (3.6)$$

Por lo tanto, para resolver las coordenadas x, y, z , se requiere de la distancia entre cada LED (punto de referencia) y el fotodetector, d_1, d_2, d_3 , como también las coordenadas de cada LED, X_i, Y_i, Z_i .

Método	Exactitud	Costo	Fortaleza	Debilidad
Proximidad	Baja a alta	Bajo	Bajo costo	Baja exactitud
AOA	Media	Alto	Sin ancho de banda	Alto costo Complejidad
TOA/TDOA	Alta	Alto	Alta precisión	Alto costo Sincronización
RSS	Media	Medio	Bajo costo	Baja exactitud
Fingerprint	Alta	Medio	Bajo costo	Calibración Mantener calibración

Tabla 3.1: Tabla comparativa de métodos matemáticos utilizados para localización

Capítulo 4

Simulación e implementación

Una vez hecha la revisión del estado de arte, se procede a implementar dos simulaciones computacionales. La primera, es una simulación del canal óptico inalámbrico, en donde se estudiará la respuesta al impulso de un canal que consiste en una pieza rectangular con las paredes con coeficiente de reflectividad idéntico, con un emisor LED en el techo apuntando hacia el piso, y un fotodetector en dirección al techo. En esta primera simulación se estudian dos configuraciones; con el receptor en el centro del sitio, y el receptor cercano a una esquina, para comprender el efecto de los reflejos en la respuesta al impulso.

La segunda simulación, es una implementación del sistema de posicionamiento en sí, en donde se estima la posición del fotodetector utilizando la respuesta al impulso simulada anteriormente, trilateración circular y RSS.

Posteriormente se realiza la implementación del sistema de posicionamiento. Para ello, se construyen dos prototipos de LED emisor y dos prototipos de sistema receptor, los que incluyen adquisición de datos. Con los prototipos definitivos, se procede a estudiar el patrón lumínico del LED utilizado, haciendo mediciones de la potencia recibida del LED en función de la distancia y el ángulo θ , para determinar los parámetros de la ecuación 2.6. Una vez conocidos dichos parámetros, se escribe un programa en el sistema receptor, para que, a partir de los datos adquiridos, se realicen los cálculos de la trilateración circular, utilizando la intensidad de la señal recibida por el fotodetector, teniendo como parámetros de entrada, la posición de los LEDs, y los parámetros de la ecuación 2.6, y como salida la coordenada estimada del fotodetector.

El presente capítulo abordará en detalle cada una de las etapas mencionadas anteriormente;

simulación del canal óptico, simulación del sistema de posicionamiento, la construcción de ambos prototipos de emisor y receptor, el experimento para determinar los parámetros de 2.6, y finalmente los resultados de la localización.

4.1. Simulación de un canal óptico inalámbrico

A fin de implementar un sistema de posicionamiento óptico, se necesita entender las características del canal de comunicación, es decir, su respuesta al impulso. Las pérdidas de señal asociadas al canal se pueden clasificar en *multipath dispersion* y *optical path loss*. Como se mencionó en el capítulo 2, existen dos configuraciones de canales ópticos inalámbricos, LOS, en la que no existen obstáculos entre el emisor y el receptor, y por lo tanto, el haz no sufre reflexiones antes de llegar al receptor, y NLOS en el que el haz es reflejado una o varias veces en superficies antes de llegar al fotodetector.

Se realizan simulaciones computacionales para estudiar distintas topologías en sistemas de posicionamiento óptico basados en RSS. Para ello, se utiliza un modelo de canal realizado por Z. Ghassemlooy, W. Popoola y S. Rajbhandari [18] que consiste en un lugar cerrado (por ejemplo, una pieza o una oficina), definida por seis superficies reflectantes perpendiculares entre sí. Se asume que no existen otras superficies reflectantes aparte de las paredes, el piso y el techo. A continuación se incorpora el LED a la simulación, cuya distribución de radiación angular se simula utilizando el modelo generalizado de Lambert de la ecuación 2.4

$$R(\phi) = \begin{cases} \frac{(m_l+1) \cos^{m_l}(\phi)}{2\pi} & \text{si } \phi \in [-\pi/2, \pi/2] \\ 0 & \text{si } \phi \geq \pi/2 \end{cases}$$

donde m_l es el número de Lambert que se refiere a la directividad del haz. $\phi = 0$ es el ángulo de mayor potencia irradiada. El orden de la emisión Lambertiana se relaciona con el semiángulo de la mitad de potencia del LED, $\phi_{1/2}$ por

$$m_l = \frac{-\ln 2}{\ln(\cos \phi_{1/2})} \quad (4.1)$$

La intensidad de radiación está dada por

$$S(\phi) = P_t \frac{m_l + 1}{2\pi} \cos^{m_l} \phi \quad (4.2)$$

El detector se modela como un área A_r que capta la radiación incidente en ángulos ψ menores que el FOV.

$$A_{eff}(\psi) = \begin{cases} A_r \cos \psi & \text{si } 0 \leq \psi \leq \pi/2 \\ 0 & \text{si } \psi > \pi/2 \end{cases} \quad (4.3)$$

Para incrementar el área de recepción de potencia se pueden utilizar concentradores ópticos. Con un índice de refracción interno n , su ganancia es

$$g(\psi) = \begin{cases} \frac{n^2}{\sin^2 \psi_c} & \text{si } 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0 & \text{si } \psi > \psi_c \end{cases} \quad (4.4)$$

donde $\psi_c \leq \pi/2$ es el FOV.

La atenuación por scattering y absorción en un enlace óptico inalámbrico *indoor* es muy baja, debido a que las distancias son relativamente cortas. Considerando un enlace óptico inalámbrico con una fuente Lambertiana, un receptor con un filtro óptico $T_s(\psi)$ y un concentrador de ganancia $g(\psi)$, la ganancia DC para un receptor a una distancia d y ángulo ϕ con respecto al emisor se puede aproximar como [11]

$$H_{los} = \begin{cases} \frac{A_r(m_l+1)}{2\pi d^2} \cos^{m_l}(\phi) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi) & \text{si } 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (4.5)$$

Por lo tanto, la potencia recibida se puede expresar como

$$P_{r-los} = H_{los}(0) P_t \quad (4.6)$$

La respuesta al impulso es

$$h_{los}(t) = \frac{A_r(m_l+1)}{2\pi d^2} \cos^{m_l}(\phi) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi) \delta\left(t - \frac{d}{c}\right) \quad (4.7)$$

donde c es la velocidad de la luz, δ es la función de Dirac y $\delta(t - d/c)$ representa el retraso de la propagación de la señal. La expresión asume que $\phi \leq 90^\circ$ y $\psi \leq FOV$ y $d \gg \sqrt{A_r}$.

Para un enlace difuso o NLOS, la pérdida es más difícil de predecir, pues depende de muchos factores, como las dimensiones del lugar, la reflectividad de las superficies, como el techo y las paredes, y la posición y orientación del emisor y el receptor. La potencia recibida se define como

$$P_{r-nlos} = (H_{los}(0) + H_{nlos}(0)) P_t \quad (4.8)$$

$$= \left(H_{los}(0) + \sum_{refl} H_{refl}(0) \right) P_t \quad (4.9)$$

donde $H_{refl}(0)$ representa el haz reflejado.

Para generar una respuesta al impulso que incluya los reflejos, Barry [16] desarrolló un algoritmo que contiene todas las contribuciones para la respuesta al impulso. En este algoritmo, se divide cada superficie reflectora en elementos de área ΔA , y para simular un reflejo, se considera el elemento de área como un nuevo emisor lambertiano escalado por el factor de reflexividad ρ , como se ha detallado en la sección 2.3. Los autores consideran piezas rectangulares y asumen que el receptor óptico apunta hacia el techo. Dado una única fuente S y un receptor R_x en una pieza, la respuesta al impulso NLOS se puede escribir como una suma infinita:

$$h_{nlos}(t, S, R_x) = \sum_{k=0}^{\infty} h_{nlos}^k(t, S, R_x) \quad (4.10)$$

donde $h_{nlos}(t, S, R_x)$ es la respuesta al impulso debido a la luz luego de reflejarse k veces. La respuesta al impulso luego de k reflejos puede evaluarse como:

$$h_{nlos} = \frac{m_l + 1}{2\pi} \sum_{j=1}^{\kappa} \rho_j \cos^{m_l}(\phi_j) \frac{\cos(\psi)}{d_{sj}^2} \text{rect}\left(\frac{2\psi}{\pi}\right) h_{nlos}^{k-1}\left(t - \frac{d_{sj}}{c}, S, R_x\right) \Delta A \quad (4.11)$$

con ΔA el área de los elementos reflectantes, κ es el número de áreas reflectantes en la pieza, ρ_j es el coeficiente de reflexión del elemento de área reflectante j , d_{sj} es la distancia desde S a j , $h_{k-1}(t, S, R_x)$ es la respuesta al impulso de orden $k - 1$ entre el reflector j y R_x .

Utilizando los parámetros dados en la tabla 4.1 se realizan distintas simulaciones. En todas las simulaciones se ubica el emisor en el techo apuntando hacia el suelo, y el receptor a una altura inferior al emisor, apuntando hacia el techo (ver Fig. 2.3). Se asume un coeficiente de reflexión de todas las superficies de $\rho = 0,184$, que corresponde al coeficiente de reflexión de una pared pintada [19].

En la primera simulación, el emisor se encuentra en las coordenadas (3, 3, 5) y el receptor en las coordenadas (3, 3, 0,1). Es decir el receptor está justo debajo del emisor, y ambos están al centro de la pieza. Se puede observar en la figura 4.1a que el primer peak corresponde a la respuesta LOS. El resto de la respuesta al impulso se calcula con los haces reflejados solamente, y se puede observar, que comparados con la respuesta LOS la respuesta de NLOS (reflejos) es mucho más pequeña. La respuesta al impulso se calculó con 2 reflexiones.

En la segunda simulación, el emisor sigue al centro, en las coordenadas (3, 3, 5), pero el receptor

es trasladado hacia una esquina, en las coordenadas $(0,2,0,2,0,1)$. Se pueden hacer varias observaciones de la figura 4.1b, primero, que la respuesta a LOS es menor que en la primera simulación. Esto se debe a que la distancia entre emisor y receptor es mayor, y por lo tanto, como se considera que la potencia lumínica disminuye como inverso al cuadrado, es esperable que la respuesta al impulso en esta configuración sea menor. Otra consecuencia de la mayor distancia emisor-receptor en esta configuración, es que la respuesta a LOS es más tardía; en la primera configuración la respuesta a LOS aparece a los 17 *ns*, y en la segunda configuración aparece a los 21 *ns*. También se observa una mayor respuesta de NLOS, o reflejos, que contribuyen una mayor cantidad de potencia de los reflejos en el receptor debido a que éste se encuentra mucho más cerca de las paredes. De esta manera, observando ambas figuras se puede hacer una estimación, a grandes rasgos, de la posición relativa entre emisor y receptor.

A partir de estas simulaciones se pueden desprender algunas conclusiones. Primero, la magnitud de la respuesta al impulso LOS es usualmente mucho mayor que las contribuciones de los reflejos a la respuesta al impulso total, incluso cuando el receptor se ubica cerca de las paredes. Por lo tanto, a la luz de los resultados de esta simulación, en un canal óptico es posible despreciar el efecto de los haces reflejados.

Una vez realizada la simulación de la respuesta al impulso del canal óptico, se puede implementar una nueva simulación para el sistema de posicionamiento en sí, tomando como base los resultados de la simulación de la respuesta del canal recién realizada.

Tabla 4.1: Parámetros simulación de la respuesta al impulso del canal

	Parámetros	Config. 1	Config. 2
	Tamaño pieza	$6 \times 6 \times 6 \text{ m}^3$	$6 \times 6 \times 6 \text{ m}^3$
	Coef. reflexión (ρ)	0,7	0,7
	Número de reflejos (k)	2	2
Emisor	Posición (x; y; z)	(3, 3, 5)	(3, 3, 5)
	Orden Lambert (m_l)	1	1
	Elevación	-90°	-90°
	Potencia	1 W	1 W
Receptor	Posición (x; y; z)	(3, 3, 0,1)	(0,2, 0,2, 0,1)
	Área activa	$0,16 \text{ cm}^2$	$0,16 \text{ cm}^2$
	Semi ángulo FOV	70°	70°
	Elevación	90°	90°

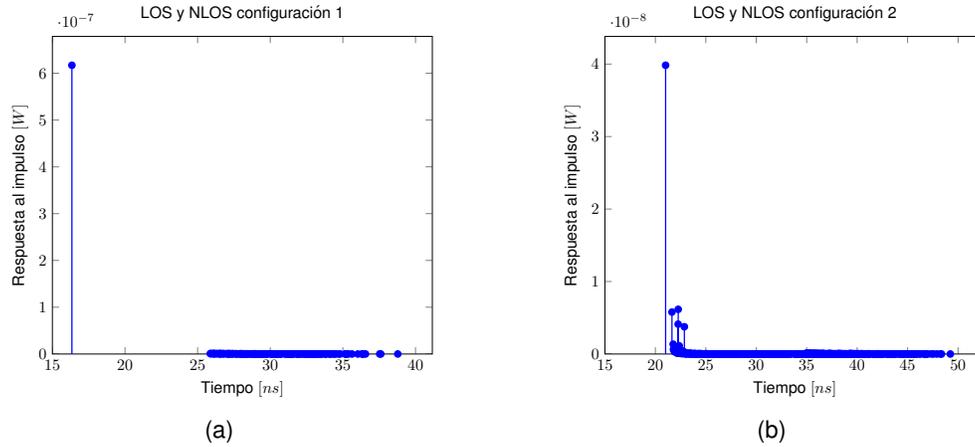


Figura 4.1: Respuesta al impulso LOS y NLOS de (a) configuración 1 (b) configuración 2

4.2. Simulación del sistema de posicionamiento

El método propuesto se basa en el cálculo de la potencia lumínica de la señal recibida por el fotodetector. Como se muestra en el diagrama de bloques de la Fig. 4.2, las diferentes señales lumínicas son recibidas por el fotodetector luego de ser convolucionadas con la Respuesta al Impulso del Canal.

El fotodetector recibe una suma de señales entre las que se encuentran las señales de cada uno de los tres LED y una señal simulada de ruido gaussiano. Esta suma de señales es filtrada para separar cada señal y se calcula la potencia lumínica de cada una de las señales de los LED utilizando la ecuación 4.5 y dicha potencia se asocia a una distancia LED-fotodetector utilizando la ecuación que relaciona ambas, 4.6.

El espacio en donde se puede encontrar el fotodetector se reduce a un cascarón esférico con radio d_{LP} , que corresponde a la distancia entre cada LED y el fotodetector. Para los tres LEDs, el espacio en donde se puede encontrar el fotodetector viene de la intersección de los tres cascarones esféricos con radio d_{L_iP} , que corresponde como máximo a dos puntos. El error en la localización se estima como la distancia entre la posición estimada y la posición real del fotodetector.

Para un canal óptico con Respuesta al Impulso $h(t)$, la señal recibida se puede expresar como:

$$y(t) = x(t) * h(t) + n(t), \quad (4.12)$$

donde $*$ denota convolución, $n(t)$ es ruido gaussiano (AWGN) y $x(t)$ es la señal lumínica de entrada

Cada una de las distancias entre los LED y el fotodetector se convierten en el radio de un cascarón esférico centrado en la posición de cada LED. Como hay tres LED, entonces hay tres cascarones esféricos y el problema se reduce a estimar la intersección entre los tres cascarones. Dicho problema se conoce como trilateración, y se puede resolver el sistema de ecuaciones para x , y y z . Uno de los cascarones esféricos tendrá su centro en el origen del sistema de coordenadas, y todos ellos se encuentran en el mismo plano $z = 0$. Se debe notar que si los cascarones no se encuentran en el mismo plano $z = 0$, se puede realizar una transformación del sistema de coordenadas para resolver el problema, y luego realizar la transformación para volver a la configuración original. Bajo estas condiciones, la primera esfera está centrada en el origen, la segunda centrada en $(d, 0, 0)$ y la tercera centrada en $(i, j, 0)$:

$$\begin{aligned} r_1^2 &= x^2 + y^2 + z^2 \\ r_2^2 &= (x - d)^2 + y^2 + z^2 \\ r_3^2 &= (x - i)^2 + (y - j)^2 + z^2 \end{aligned} \quad (4.16)$$

si se sustrae $r_1^2 - r_2^2$ se puede resolver para x

$$r_1^2 - r_2^2 = x^2 - (x - d)^2 \quad (4.17)$$

$$x = \frac{r_1^2 - r_2^2 + d^2}{2d} \quad (4.18)$$

sustituyendo x en la ecuación para el primer cascarón esférico:

$$y^2 + z^2 = r_1^2 - \frac{(r_1^2 - r_2^2 + d^2)^2}{4d^2} \quad (4.19)$$

se puede observar que la intersección de dos cascarones esféricos es un círculo con radio igual a:

$$r_c = \frac{1}{2d} \sqrt{(r_1^2 - r_2^2 + d^2)^2} \quad (4.20)$$

sustituyendo $z^2 = r_1^2 - x^2 - y^2$ en la ecuación para el tercer cascarón esférico se puede resolver para y :

$$y = \frac{r_1^2 - r_3^2 - x^2 + (x - i)^2 + j^2}{2j} \quad (4.21)$$

y finalmente, sustituyendo x y y en la primera ecuación, se puede resolver para z :

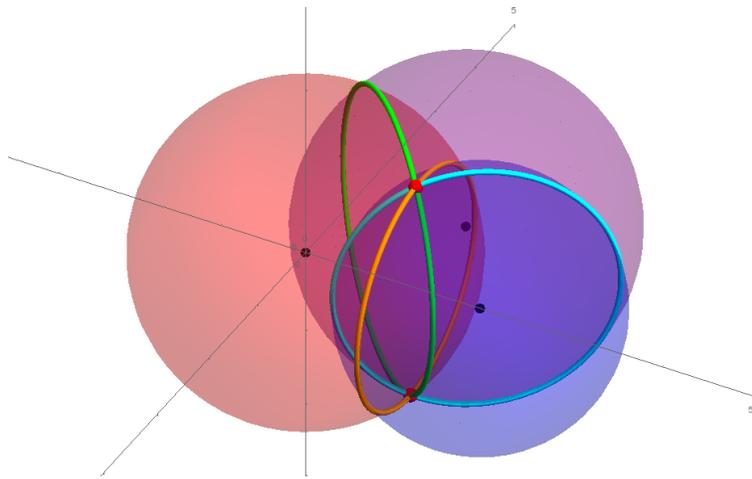


Figura 4.3: La intersección entre tres cascarones esféricos es, a lo más, dos puntos. Este problema se conoce como trilateración. Aquí, los puntos de intersección se muestran en color rojo, mientras que la posición de las fuentes luminosas y centro de las esferas se muestran como puntos negros. Figura de elaboración propia.

$$z = \pm \sqrt{r_1^2 - x^2 - y^2} \quad (4.22)$$

Este último resultado se puede visualizar, si el círculo que resulta de la intersección de las dos primeros cascarones se intersecciona con un tercer cascarón. Si el círculo toca la esfera en un punto, entonces $z = 0$ y si el círculo toca la esfera en dos puntos, entonces z es la raíz cuadrada de un número positivo. Si el círculo es más pequeño o más grande que la esfera, y se encuentra completamente dentro o fuera de ésta, entonces no existen soluciones reales. Todo el procedimiento se encuentra descrito en la Tabla 4.2.

La solución teórica descrita anteriormente para el sistema 4.16 entrega dos puntos para la intersección de tres cascarones esféricos en un entorno sin ruido. Sin embargo, una situación más realista que considere ruido proveniente de otras fuentes luminosas puede desembocar en una solución que sea un espacio 3D rodeado por los cascarones esféricos, y que éstos no se interseccionen entre sí. En este caso, la solución aproximada para la posición del receptor se obtiene por el método mínimos cuadrados discutido en la sección 3.6.2.

En la simulación del sistema de posicionamiento, se utilizan 3 fuentes luminosas emitiendo a distintas frecuencias dentro de una pieza de $6 \times 6 \times 6 \text{ m}^3$. Los emisores se ubican en el techo y el receptor apunta hacia el techo, por lo tanto, existe un enlace LOS entre los emisores y el receptor. Como se mencionó anteriormente, se utiliza el modelo de Lambert con número modal igual a 1 para todos los emisores. Además, el semiángulo de la mitad de potencia es 70° . Todos los

Tabla 4.2: Procedimiento de localización

Paso 1	Simular la señal recibida en el fotodetector. Para esto, se convoluciona la señal de cada LED con la Respuesta al Impulso del Canal. Esta señal en el fotodetector es $y_{PD} = x_1 * h_1(t) + x_2 * h_2(t) + x_3 * h_3(t)$. Las señales emitidas por los LEDs $x_i = \cos(2\pi f_i t)$ tienen una frecuencia única f_i .
Paso 2	y_{PD} es filtrada por un filtro pasabanda para obtener la señal original x_i emitida por cada LED.
Paso 3	Calcular la potencia recibida por el fotodetector: $P_{PD} = f_i(Y_{PD}) ^2$.
Paso 4	Estimar la distancia entre cada LED y el fotodetector $d_{Light_i/PD}$ a partir del cálculo de la potencia.
Paso 5	Utilizando la posición de cada emisor LED como centro, y la distancia entre cada LED y el fotodetector como radio, determinar un cascarón esférico. Se determinan tantos cascarones esféricos como fuentes luminosas.
Paso 6	La intersección entre tríos de cascarones esféricos se resuelve por trilateración.

parámetros se muestran en la Tabla 4.3.

Utilizando los datos de la Tabla 4.3 para los tres emisores, (con frecuencias 2,5, 7,5, 12,5 MHz) y el receptor, y los datos de la Tabla 4.4 para el posterior filtrado de las señales, se realiza la simulación de la localización siguiendo el procedimiento descrito en la Tabla 4.2. Una vez calculada la potencia de cada LED, se guarda como una potencia de referencia P_r . Luego, el algoritmo posiciona el fotodetector en el punto más alejado posible, es decir, una de las esquinas de la pieza. Calcula la potencia y la compara con la potencia de referencia P_r . Luego se va moviendo de posición de acuerdo a la comparación anterior, hasta que encuentre un punto de potencia lo más similar posible a P_r y se guarda la distancia relacionada con dicha potencia, para posteriormente ser utilizada como el radio del cascarón esférico centrado en el LED correspondiente. Para incrementar la rapidez, se utiliza un algoritmo de bisección para cambiar la posición del fotodetector. Se repite el mismo algoritmo para los tres LEDs y se procede a resolver el problema de trilateración.

En la primera simulación, el receptor se ubica en el medio del plano yz . El error obtenido es de 17,7 cm. Para la segunda simulación, el receptor se ubica cerca de una de las esquinas de la pieza, y el error obtenido es de 11,1 cm. La tercera simulación conserva la posición de los emisores, pero

Tabla 4.3: Parámetros de simulación

	Parámetro	Valor 1	Valor 2	Valor 3
Emisor 1	Posición (x, y, z) , m	(3, 1, 6)	(1, 1, 6)	(1, 1, 6)
	Frecuencia, MHz	2,5	2,5	2,5
	Modo (n)	1	1	1
	Semi Ángulo	70°	70°	70°
Emisor 2	Posición (x, y, z) , m	(1, 3, 6)	(5, 1, 6)	(5, 1, 6)
	Frecuencia, MHz	7,5	7,5	7,5
	Modo (n)	1	1	1
	Semi Ángulo	70°	70°	70°
Emisor 3	Posición (x, y, z) , m	(5, 3, 6)	(3, 5, 6)	(3, 5, 6)
	Frecuencia, MHz	12,5	12,5	12,5
	Modo (n)	1	1	1
	Semi Ángulo	70°	70°	70°
Receptor	Posición (x, y, z) , m	(0, 3, 3)	(1, 1, 2)	(2,5, 1, 3)
	Área activa, cm^2	1	1	1
	FOV	70°	70°	70°
	Error, cm	17,7	11,1	3,7

Tabla 4.4: Parámetros de los filtros pasabanda

Parameter	Emitter 1	Emitter 2	Emitter 3
Bandwidth [MHz]	2	2	2
Frequency stop 1 [MHz]	0.7	5.7	10.7
Frequency pass 1 [MHz]	1	6	11
Frequency pass 2 [MHz]	3	8	13
Frequency stop 2 [MHz]	3.3	8.3	13.3

la posición del receptor cambia a un sitio más centrado. El error obtenido en la tercera simulación es de $3,7\text{ cm}$. Como se observa en la Fig. 4.4, la cruz azul es la posición real del fotodetector y el punto rojo es la posición estimada a partir del algoritmo.

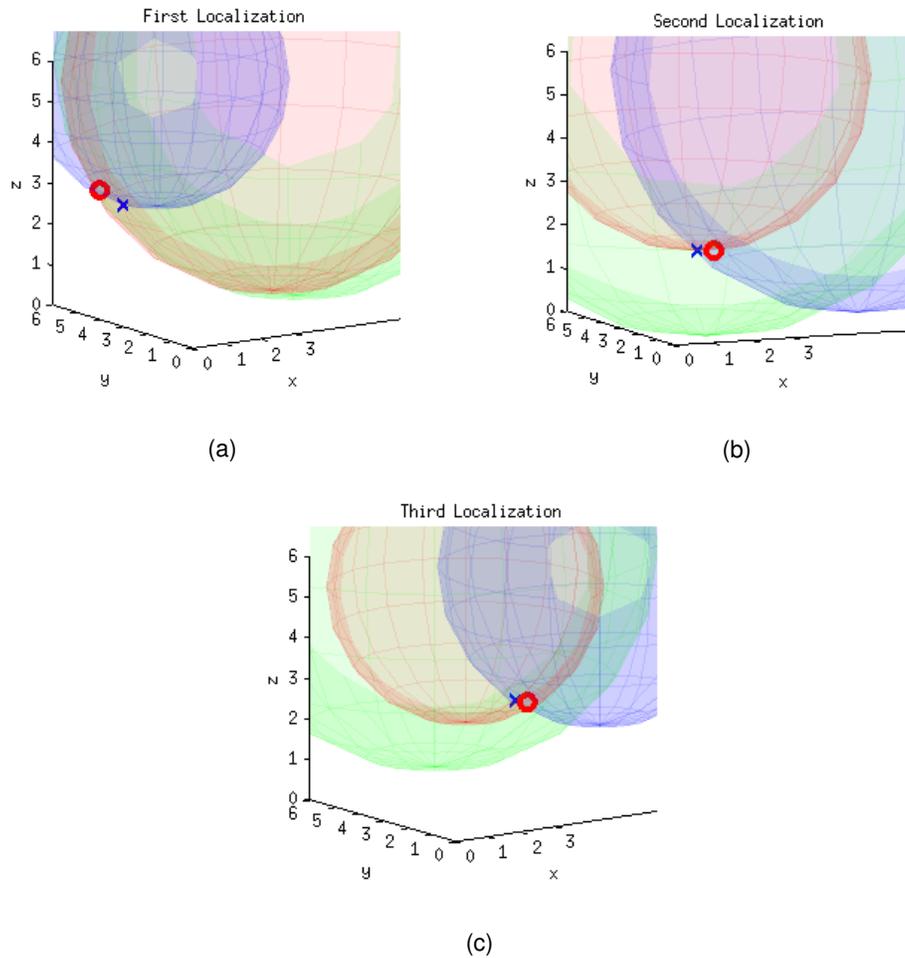


Figura 4.4: Localización utilizando los valores de la Tabla 4.3. En (a) el error es de 17,7 cm, mientras que en (b) el error es de 11,1 cm. En (c) el error fue de 3,7 cm. En todos los gráficos la cruz azul representa la posición real y el punto rojo la posición estimada.

4.3. Implementación del sistema de posicionamiento

A fin de poner en funcionamiento un sistema real de posicionamiento, es necesario implementar un LED emisor, dotado de un circuito capaz de modular la intensidad lumínica a determinada frecuencia para diferenciarlo de otros LEDs luego del proceso de filtrado. Para ello, se estudian dos aproximaciones mencionadas en la sección 1.1.2, el Bias-Tee y el circuito propuesto por Ghassemlooy. Para comparar ambos circuitos, se realizan varias mediciones de la potencia lumínica a distintas distancias a fin de comparar la dispersión de los datos de la potencia, ya que de ello depende el error en la estimación de la distancia LED-fotodetector, que posteriormente incide en el error del posicionamiento.

Además, es necesario desarrollar un sistema de adquisición de datos adecuado para transformar

las señales del fotodetector en señales digitales, y que tenga la capacidad de realizar el análisis de señales descrito en la Tabla 4.2 en tiempo real para entregar un punto de coordenadas que corresponde a la estimación de la posición del fotodetector. En lo posible, dicho sistema de adquisición de datos y procesamiento de señales debe ser portátil, puesto que el objetivo a localizar, el fotodetector, debe tener una capacidad de movimiento lo menos limitada posible.

Aparte de estos dos elementos, también se debe estudiar la dependencia del patrón lumínico en función de la distancia LED-fotodetector y el ángulo entre éstos, pues teóricamente la potencia decrece como inverso de la distancia al cuadrado, pero esto solo es cierto para fuentes puntuales. En cuanto a la dependencia angular, se debe determinar el número modal m_l del LED utilizado, ya que este número varía en distintos tipos de LEDs.

A continuación, se describe en profundidad el desarrollo e implementación de ambos circuitos moduladores para los LEDs y una discusión entre el desempeño de ambos, el sistema de adquisición de datos y procesamiento de señales, y las mediciones realizadas para determinar la dependencia de la potencia lumínica en función de la distancia y el ángulo del LED utilizado.

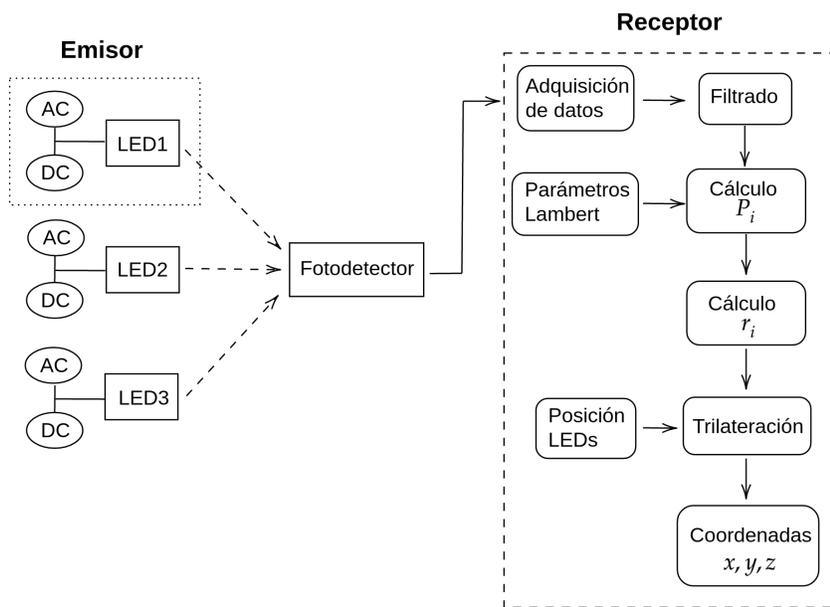


Figura 4.5: Diagrama de la implementación del sistema de posicionamiento.

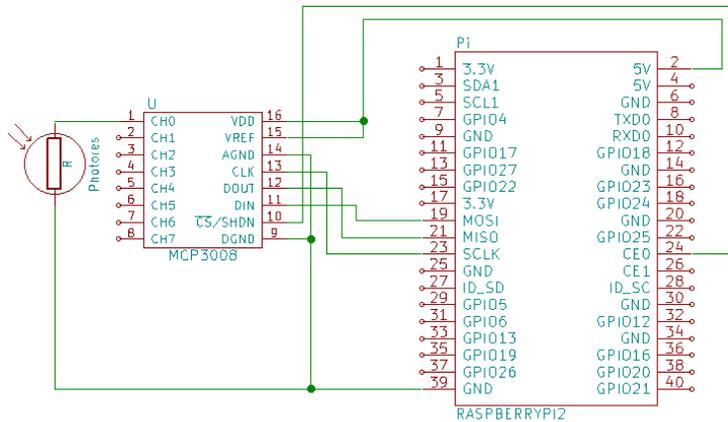


Figura 4.6: Diagrama de conexión del ADC MCP3008 y Raspberry Pi

4.3.1. Adquisición de datos

Para medir la potencia lumínica proveniente del LED modulado, se utiliza un fotodetector THORLABS PDA36A-EC. Sin embargo, se necesita un sistema de adquisición de datos para capturar las señales recibidas por el fotodetector, que sea portátil y que además pueda realizar un posterior procesamiento de dichas señales en tiempo real. Para ello, se realizan dos prototipos de adquisición de datos, ambos con una Raspberry Pi como dispositivo principal.

4.3.1.1. Primer prototipo: Raspberry Pi + MCP3008

Para el primer prototipo, se utilizó una Raspberry Pi en conjunto con un convertor análogo digital (ADC), MCP3008 que cuenta con 10 bit de resolución, 8 canales, y 200 kbps de frecuencia de muestreo. Utiliza protocolo SPI, que además está soportado por el *General Purpose Input Output* (GPIO) de la Raspberry Pi.

Para observar el desempeño del sistema de adquisición de datos Raspberry Pi + MCP3008, se realizan varias mediciones de la potencia de un LED modulado con una señal de 35 kHz, a una misma distancia, y a un ángulo fijo. Se puede apreciar en 4.7 que existe una variación importante de la potencia para una misma distancia, y en algunos casos, la potencia más alta es 5 veces la potencia más baja. Para ahondar en la naturaleza de esta variación de la potencia, se realizan gráficos de la señal sin filtrar y la misma señal filtrada, para puntos cuyas potencias difieran mucho entre sí, por ejemplo, en 4.7b se puede notar que en la tercera medición, la potencia a $d = 2,34 [m]$ alcanza un valor de $P = 3,12 \times 10^{-7} [W]$ y en la cuarta medición, la potencia tiene un valor de $P = 1,64 \times 10^{-7} [W]$ a la misma distancia. En la figura ambas mediciones están graficadas en color rojo. En Fig. 4.8a se puede ver la señal en frecuencia y sin filtrar de la tercera medición de Fig. 4.7b y en Fig. 4.8b la misma señal una vez filtrada. En este caso, el filtrado es

exitoso y por lo tanto, la potencia lumínica calculada será la correcta. En cambio, en las Fig 4.8c y 4.8d se observan las señales en frecuencia de la cuarta medición, filtrada y sin filtrar respectivamente. En este caso, el filtrado falla porque la frecuencia normalizada de la señal en la tercera y cuarta medición difieren entre sí. En este caso, el sistema de localización calcula una potencia menor a la potencia real, y por lo tanto, estima una mayor distancia LED-Fotodetector, contribuyendo al error en la estimación del posicionamiento.

Esto se puede explicar teniendo en cuenta que la placa de desarrollo Raspberry Pi posee LinuxOS, que es un sistema No Apropiativo o *non-preemptive*, lo que significa que, una vez que el sistema empieza a ejecutar códigos internos no se puede interrumpir, y por lo tanto no está diseñada para procesamiento predecible o tiempo real. Así, si el tiempo que se necesita para realizar una muestra está siendo ocupado por otra tarea del sistema operativo, entonces ésta no se puede interrumpir y la muestra no puede ser tomada, lo que afecta directamente la frecuencia de muestreo, con las consecuencias que se observan en la Fig. 4.8

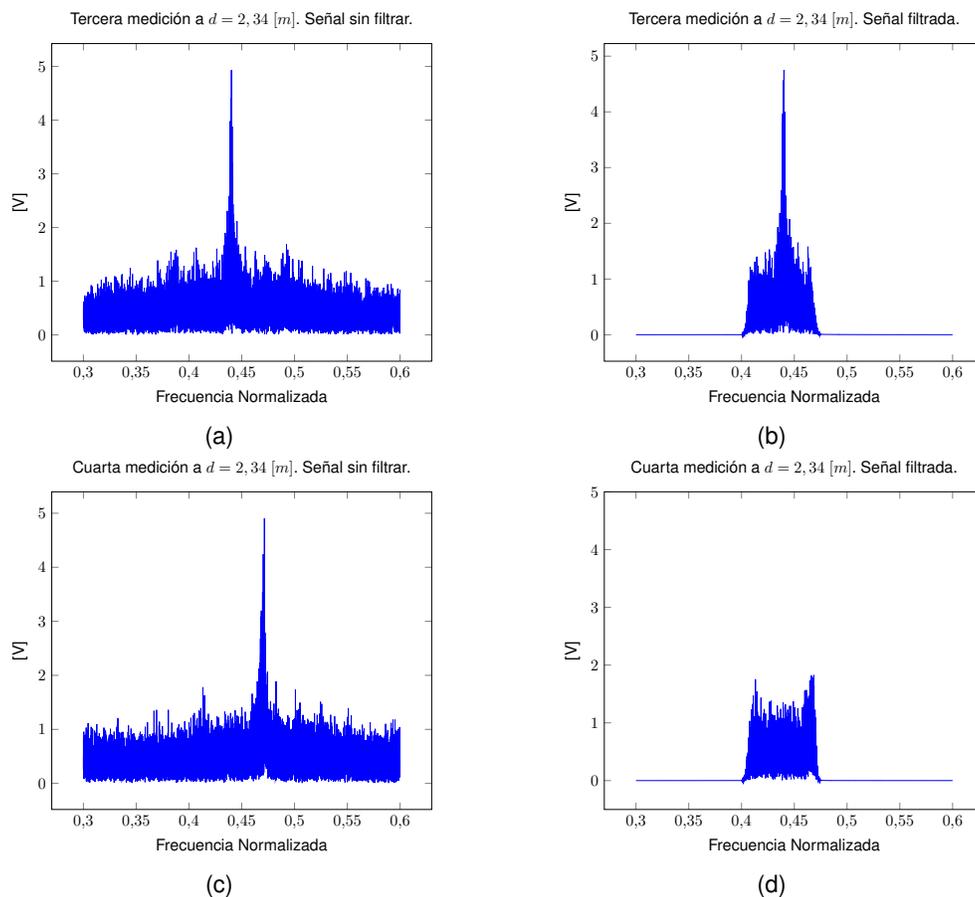
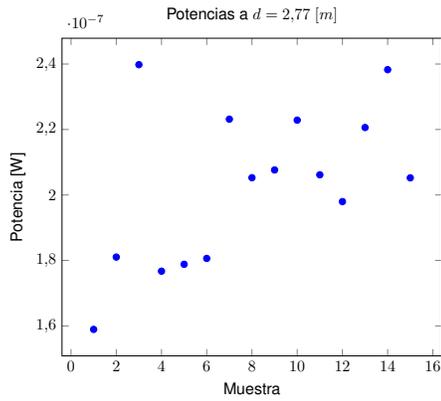
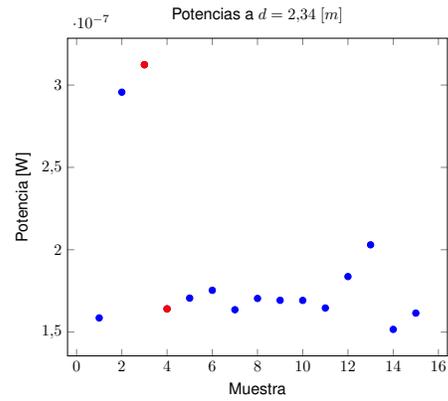


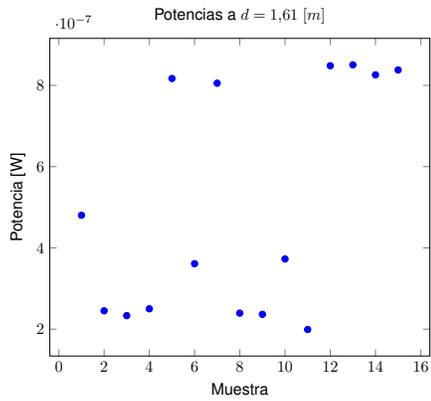
Figura 4.8: Puntos 3 y 4 de Fig 4.7 (en rojo). Se observa la inconsistencia de la frecuencia de muestreo de la Raspberry Pi. El cálculo de la potencia de 4.8a y 4.8c es distinto pues en esta última potencia se considera solo el ruido ambiental, y no la señal enviada por el LED.



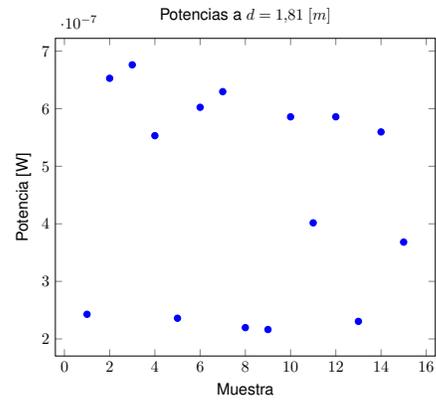
(a)



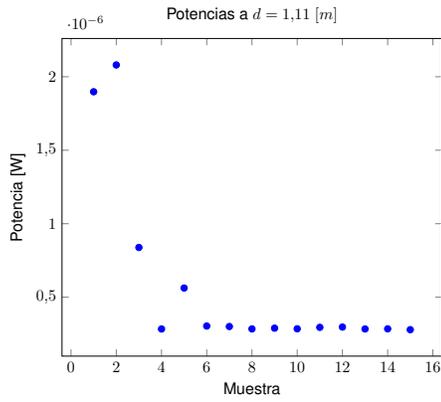
(b)



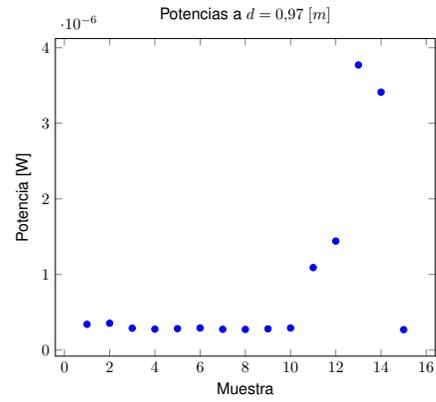
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 4.7: Medición de la potencia media del LED para 6 distancias distintas y un ángulo fijo $\theta = 22^\circ$. Cada gráfico corresponde a una distancia distinta y los puntos las distintas mediciones de la potencia del LED a la misma distancia.

4.3.1.2. Segundo prototipo: Raspberry Pi + XMOS

Para solucionar el problema antes mencionado, se utiliza, en vez del ADC MCP3008, una placa de desarrollo XMOS, con un microcontrolador multinúcleo, que puede ser configurada por el software *xTIMEcomposer*, y que contiene una gran variedad de periféricos; entre ellos 24 GPIO, y 13 GPIO compatibles con Raspberry Pi, y 4 entradas análogas, con un conversor análogo digital incorporado. Gracias a que el microcontrolador posee multinúcleo, se pueden realizar tareas en paralelo, lo que distingue a esta placa sobre otras placas de desarrollo con microcontroladores.

Para llevar a cabo la adquisición de datos, la Raspberry Pi hace una solicitud de 5000 muestras a la XMOS, utilizando una librería llamada *Sampler2*, que es ejecutada constantemente, y genera un vector de 5000, que a su vez, es llenado por la librería *Rpi Receive* ejecutada en XMOS, y que le entrega a Raspberry Pi paquetes de 250 samples. Para ello, interrumpe con un pulso para avisar a la Raspberry Pi que ya muestreó, la Raspberry solicita a la XMOS los datos de muestreo y ésta envía el tamaño del vector y luego el paquete de datos. Este proceso se realiza 20 veces hasta completar las 5000 muestras, y los datos, una vez dentro de la Raspberry Pi son transformados en valores de voltaje y guardados en un archivo de texto llamado *voltData.txt* para su posterior procesamiento.

En la Fig 4.9 se observan mediciones de la potencia lumínica recibida por el fotodetector y con la adquisición de datos Raspberry Pi + XMOS. Se realizan 15 muestras a tres distancias distintas; 110 120 y 130 [cm]. Se debe notar que la diferencia en potencia es mucho menor a las mediciones con el sistema de adquisición de datos anterior compuesto por Raspberry Pi + MCP3008, y al observar los gráficos de las señales filtradas, no existe el problema mostrado en Fig 4.8. Este prototipo será el definitivo para realizar todas las mediciones posteriores.

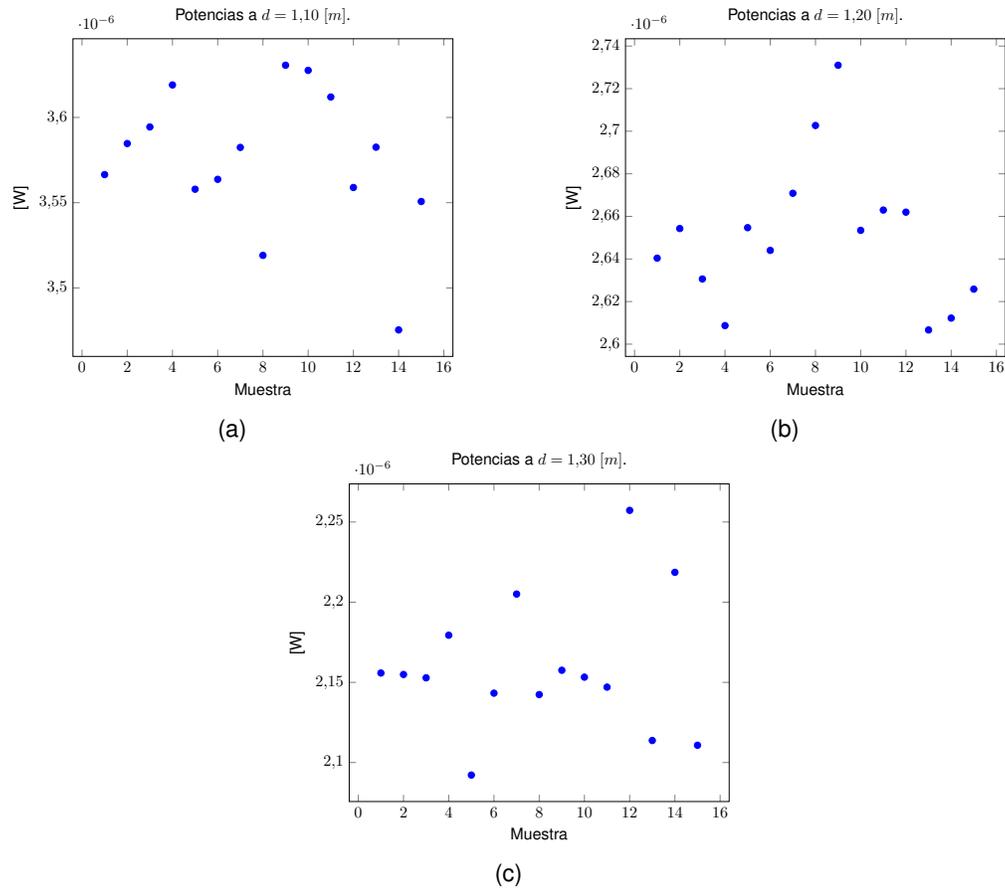


Figura 4.9: Potencia lumínica a tres distancias distintas con Raspberry Pi + XMOS. Se observa una menor variación de la potencia recibida por el fotodetector y una mayor consistencia de la frecuencia de muestreo del sistema adquirente de datos.

4.3.2. Implementación del LED emisor

El circuito del LED emisor debe ser capaz de inyectar una señal (en este caso, sinusoidal) al LED, al mismo tiempo que permite el paso de una corriente constante de bias que posibilita al LED cumplir sus funciones de iluminación. Para esto, se utiliza un LED genérico sin LED-Driver. La señal sinusoidal se genera con un Arduino Nano en conjunto con un módulo generador de señales AD9850, que tiene la capacidad de generar señales de hasta 40 MHz con $2 V_{pp}$ de amplitud. La frecuencia es seleccionada con el Arduino y el prototipo utiliza un ancho de banda entre 30 kHz y 40 kHz. Para combinar la señal AC (localización) con la señal DC (iluminación), se construyen dos circuitos, un Bias-Tee y un circuito que utiliza un transistor bipolar y un FET, que fue propuesto por Ghassemlooy en 2017.

Los Bias-Tee son dispositivos pasivos con tres puertos, dos entradas, una DC y una AC y una salida de señal combinada. La posibilidad más sencilla se muestra en la figura 1.6. Los valores de

estos componentes se calculan utilizando las ecuaciones 1.3. En este caso, la impedancia se calcula con el inverso de la pendiente de la región de operación de la curva I-V del LED, cuyo valor para el LED es 8Ω . Con una razón de impedancia de 1:10, el valor obtenido para el condensador es $C = 5700 \text{ nF}$ y para el inductor $L = 364 \text{ uH}$.

Debido a que la impedancia del LED depende de la corriente, la forma de onda que alimenta al LED se recorta (clipped) con respecto a la señal original, y consecuentemente aparecen frecuencias distintas a la señal AC generada, y provocan una disminución de la amplitud V_{pp} . Debido a esto, la señal sinusoidal es sometida a una etapa de amplificación para asegurar que la amplitud de la señal emitida por el LED es de $1 V_{pp}$.

Por otro lado, el circuito propuesto por Ghassemlooy, utiliza un amplificador de emisor común, en conjunto con un FET y un amplificador operacional para setear el voltaje de bias. La corriente de bias está dada por la ecuación 1.4 y la corriente de la señal está dada por la ecuación 1.5.

El LED alcanza su máxima iluminación a 400 mA , luego $I_{signal} = 40 \text{ mA}$, que corresponde al 10% de la corriente máxima que pasa por el LED, y los valores de los componentes del circuito se calculan de acuerdo a este valor, utilizando las ecuaciones 1.4 y 1.5. Se obtiene que la señal emitida tiene $1 V_{pp}$, de modo que ambos circuitos pueden compararse.

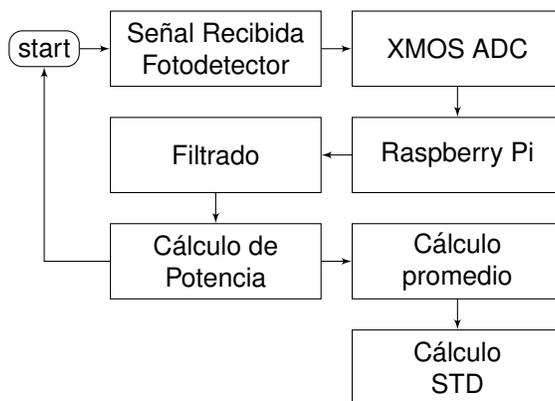


Figura 4.10: Diagrama de la adquisición de datos y el cálculo del promedio y desviación estándar de las potencias. El procedimiento es el mismo para ambos circuitos.



Figura 4.11: Fotografía del circuito de un LED emisor.

4.3.2.1. Comparación entre Bias-Tee y Circuito de transistores

El procedimiento para comparar ambos circuitos, se explica en la Fig. 4.10. Se inicia con la señal recibida por el fotodetector, cuya adquisición se realiza por el sistema XMOS + Raspberry Pi descrito anteriormente. Posteriormente, la señal pasa por un proceso de filtrado y se calculan 80 varias potencias a una misma distancia. Se calcula el promedio de dichas potencias y la desviación estándar.

Los datos se tomaron a 3 distancias LED-Fotodetector, con cada uno de los circuitos, para estudiar si existe algún cambio en la estimación de la distancia emisor-receptor (que es dependiente de la potencia recibida por el fotodetector, y esencial para el cálculo de las coordenadas del fotodetector). Si es así, este cambio influenciará directamente el algoritmo de trilateración usado en el sistema de posicionamiento. Se toman 80 muestras de la señal emitida, con ambos circuitos, a tres distancias distintas, 80 cm, 150 cm y 200 cm, y se realiza una comparación entre el valor medio de la potencia de dichas señales y su desviación estándar. Se obtienen los datos observados en la Fig. 4.12.

Cuando se comparan los valores medios de la potencia recibida, utilizando ambos circuitos, se puede observar que la diferencia entre ellos es menos del 8% en las tres distancias estudiadas. Pero cuando se compara la desviación estándar de las muestras para las tres distancias, se

observa que para $d = 80$ [cm], la desviación estándar de la potencia de los datos recibidos, utilizando el Bias-Tee en el LED emisor, es casi un 50 % mayor que la desviación estándar de la potencia de las señales emitidas por el LED utilizando el circuito de la Fig. 1.7. Las desviaciones estándar comienzan a acercarse a medida que d crece, y la desviación estándar de la potencia utilizando el circuito de Ghassemlooy es ligeramente mayor a una distancia de $d = 200$ [cm].

Es posible entonces, concluir que una de las ventajas de utilizar el circuito Bias-Tee en el LED emisor en un sistema de localización como el descrito, es que se puede implementar fácilmente, y es de menor costo. Por otro lado, las desventajas son que la desviación estándar de los datos de la potencia de la señal es mayor a distancias menores de 2 metros, y esto implica necesariamente un error adicional al estimar las coordenadas del fotodetector. Esto se puede explicar teniendo en cuenta que el Bias-Tee es un circuito pasivo, y el valor que deben tener sus componentes para un correcto desempeño, depende fuertemente de la impedancia de la carga, en este caso, el LED. Sin embargo, la impedancia de un LED depende de la corriente que circula por él, debido a su comportamiento no lineal descrito en el Capítulo 2, por lo tanto, la forma más sencilla de Bias-Tee expuesta acá no asegura un buen desempeño como circuito emisor para un LED, en efecto, la señal inyectada al LED, que en un principio es sinusoidal, al llegar al LED es recortada, lo que disminuye su amplitud, y la deforma, apareciendo frecuencias indeseadas que perturban la señal, y además limitan su alcance.

Por otro lado, utilizar un circuito dedicado, como el propuesto por Ghassemlooy puede tener un mayor costo en términos de implementación, pero a distancias menores a 2 metros la desviación estándar de la potencia de la señal recibida es menor, y por lo tanto, asegura una disminución del error en la estimación de la posición del fotodetector en comparación al Bias-Tee.

Tabla 4.5: Promedio y desviación estándar de la potencia de la señal para cada distancia, utilizando ambos circuitos de las Fig. 1.6 y 1.7

Distancia Emisor-Receptor 80 cm		
	Promedio [W]	STD
Bias-Tee	2.28×10^{-4}	4.8×10^{-6}
Circuito	2.23×10^{-4}	2.5×10^{-6}
Distancia Emisor-Receptor 150 cm		
	Promedio [W]	STD
Bias-Tee	1.96×10^{-5}	6.05×10^{-7}
Circuito	2.11×10^{-5}	4.01×10^{-7}
Distancia Emisor-Receptor 200 cm		
	Promedio [W]	STD
Bias-Tee	7.37×10^{-6}	3.30×10^{-7}
Circuito	7.67×10^{-6}	3.52×10^{-7}

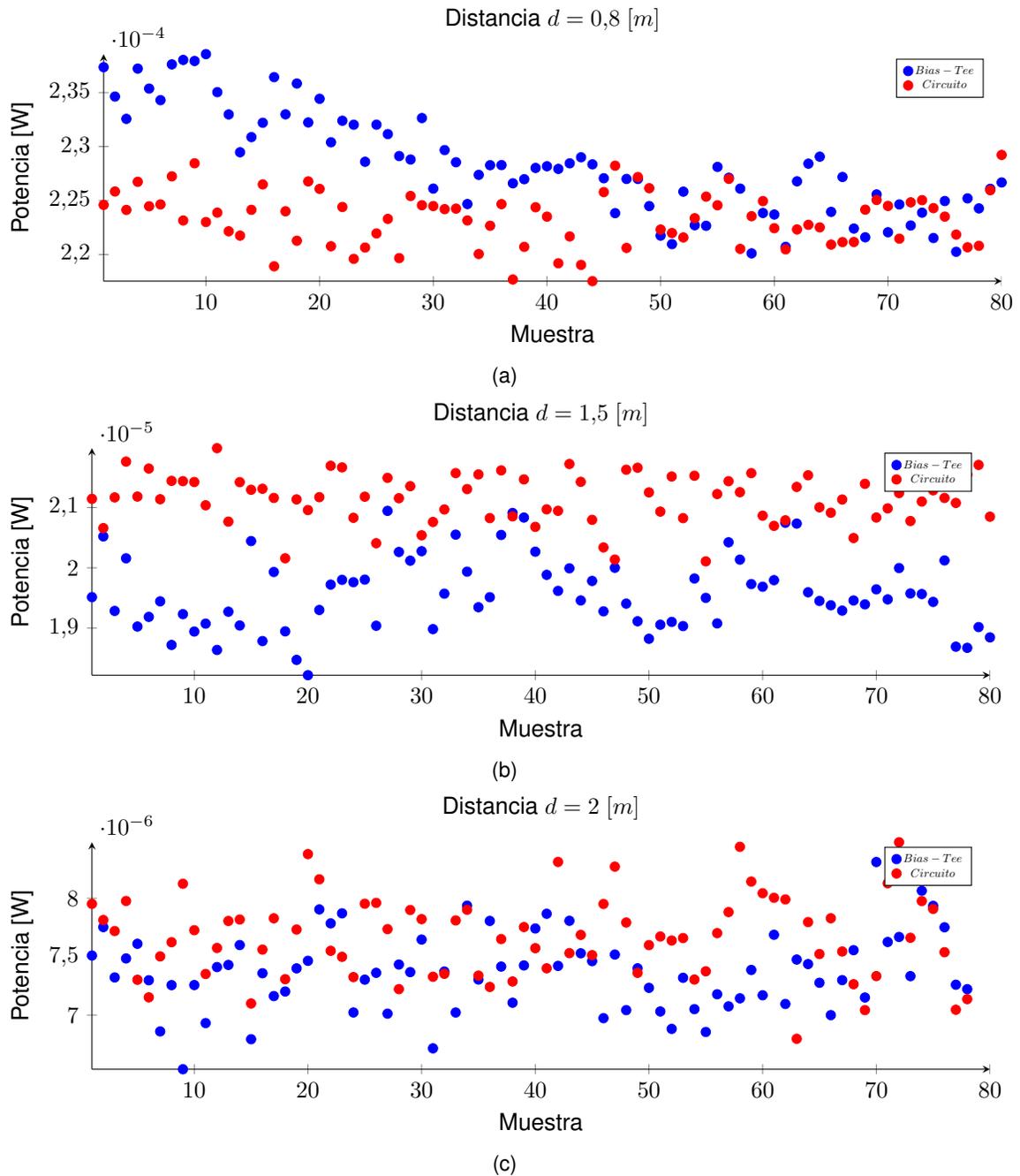


Figura 4.12: Comparación de la potencia recibida por el fotodetector, con el LED transmisor utilizando Bias-Tee y el Circuito dedicado, a tres distancias distintas.

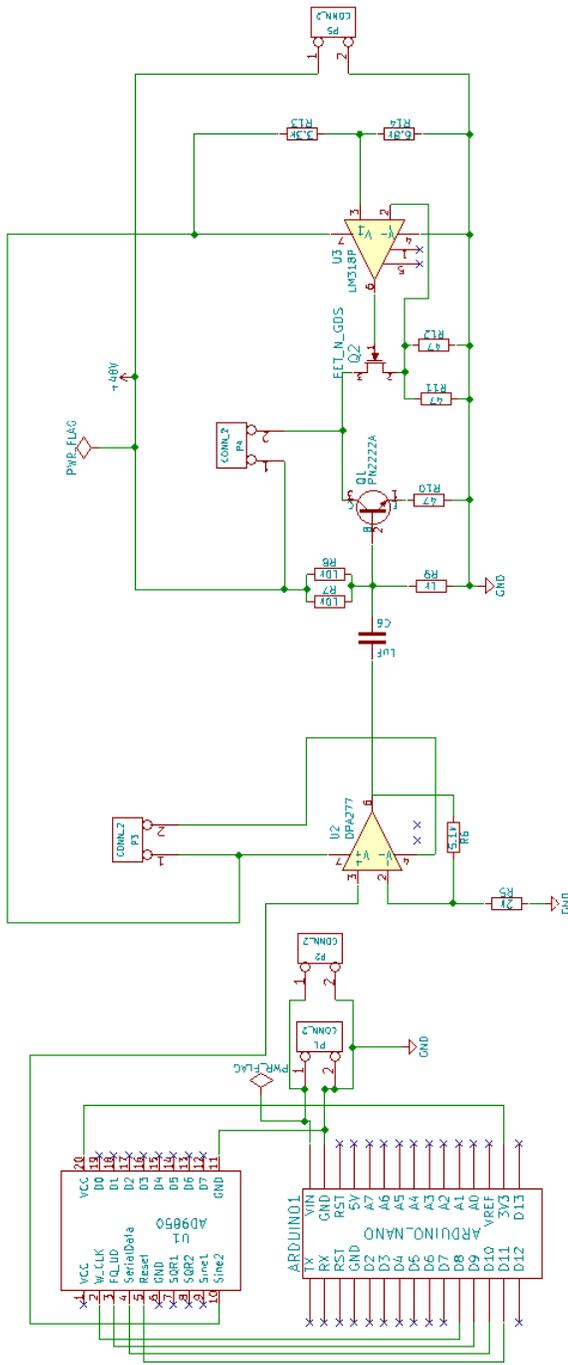


Figura 4.13: Circuito del LED emisor.

4.4. Localización

Una vez construidos los tres LED emisores y el sistema receptor, se debe estudiar el patrón lumínico del LED para determinar los parámetros del modelo de emisión de Lambert. En la presente sección se detallan distintos experimentos para determinar dichos parámetros. En concreto, se realiza una medición de la potencia en función de la distancia, y mediciones de la potencia en función del ángulo de emisión del LED. Los parámetros y la posición de los LEDs emisores serán posteriormente incorporados al sistema receptor para realizar el cálculo de la trilateración.

También en esta sección se detalla el algoritmo utilizado para realizar la trilateración, y finalmente, los resultados del posicionamiento en una celda triangular de lado $2 [m]$.

4.4.1. Modelo del canal para localización

Para un canal óptico inalámbrico, la potencia recibida a través de un canal puede calcularse como en la Eq. 2.6:

$$P_{r-LOS} = \frac{A_r(m_l + 1)}{2\pi d^2} \cos^{m_l}(\phi) \cos(\psi) P_e \quad (4.23)$$

donde P_e es la potencia de transmisión de la fuente lumínica, A_r es el área del fotodetector, ϕ y ψ son los ángulos de irradiancia e incidencia, d es la distancia entre el LED y el fotodetector y m_l el orden lambertiano. Sin embargo, no es posible aplicar este modelo directamente para localización, pues se deben determinar los parámetros del modelo, por ejemplo el orden lambertiano m_l que es diferente para cada LED y se debe determinar si la potencia decrece efectivamente como el inverso del cuadrado de la distancia, o si se debe reemplazar d^2 por otro parámetro. Para ello, se simplifica el modelo. En la Fig. 4.14 se observa la configuración utilizada para la implementación del sistema de localización. Los LEDs estarán a una altura definida y conocida H_{LED} , y apuntando hacia el suelo. El fotodetector se ubica a una altura H_{PD} , y apuntando hacia el techo. En esta configuración, el ángulo de irradiancia ϕ y el ángulo de incidencia ψ son iguales, luego $\phi = \psi$. Por lo tanto el modelo quedaría de la siguiente forma:

$$P_{r-LOS} = \frac{A_r(m_l + 1)}{2\pi d^2} \cos^{m_l+1}(\phi) P_e \quad (4.24)$$

Para simplificar el modelo aún más, y como no existe certeza de que la potencia varíe efectivamente con el inverso del cuadrado de la distancia, se agrupan las constantes en nuevos parámetros α , β y γ , de la siguiente manera:

$$\alpha = \frac{A_r(m_l + 1)P_e}{2\pi}$$

$$d^2 \rightarrow d^\beta$$

$$\gamma = m_l + 1$$

Y el modelo queda:

$$P_{r-LOS} = \frac{\alpha}{d^\beta} \cos^\gamma(\phi) \quad (4.25)$$

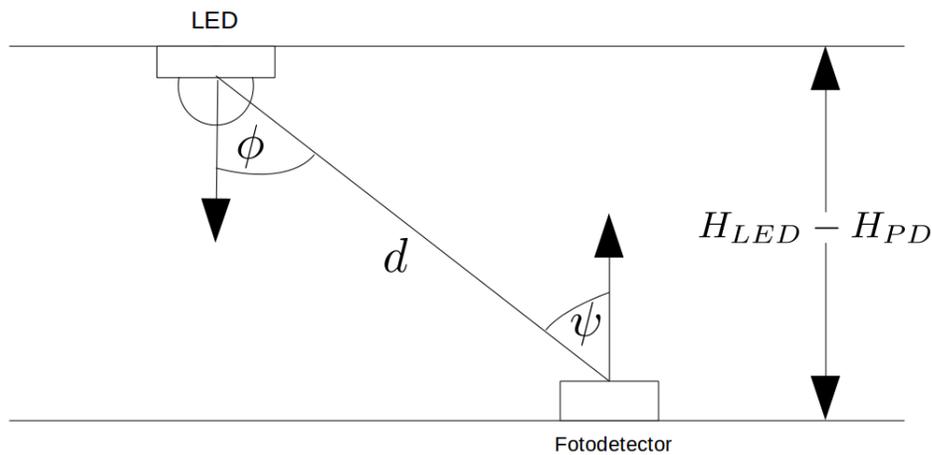


Figura 4.14: Configuración para determinar parámetros de la Eq. 2.6.

4.4.1.1. Relación Potencia versus Distancia LED-fotodetector

De acuerdo a la Eq. 4.23, la potencia recibida decae con el inverso del cuadrado de la distancia d . Para verificar si esto se cumple, se fijan los ángulos de irradiancia e incidencia en $\phi = \psi = 0$, y varía la distancia d entre 30 cm y 230 cm en pasos de 5 cm. El resultado de la medición y la curva de ajuste se muestran en la Fig. 4.15. La ecuación de ajuste es

$$P = \frac{7,393 \times 10^{-5}}{d^{3,01}} \quad (4.26)$$

El error del ajuste es $RMSE = 4,472 \times 10^{-5}$. Resultando en un mejor ajuste que la potencia decreciendo como el inverso del cuadrado de la distancia ($RMSE = 1,87 \times 10^{-4}$). De esta forma, $\alpha = 7,39 \times 10^{-5}$ y $\beta = 3,01$.

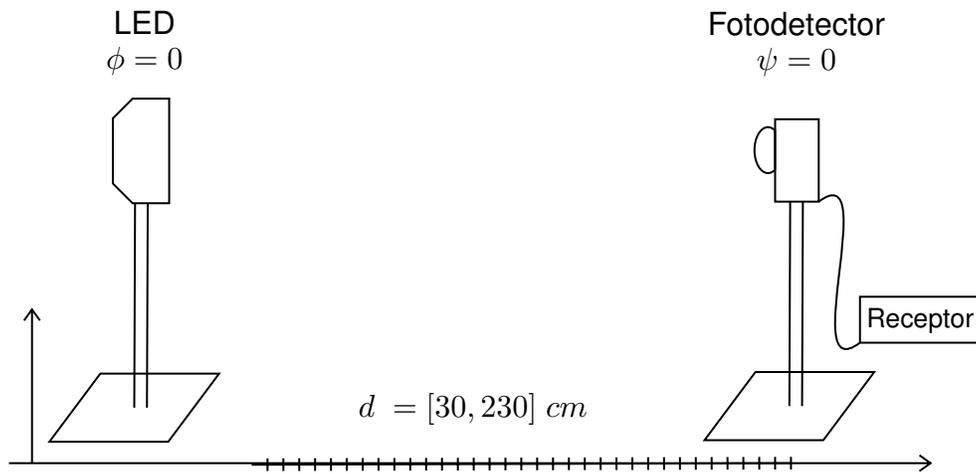


Figura 4.16: Montaje experimental realizado para la medición de la potencia lumínica en función de la distancia y posterior determinación del parámetro β .

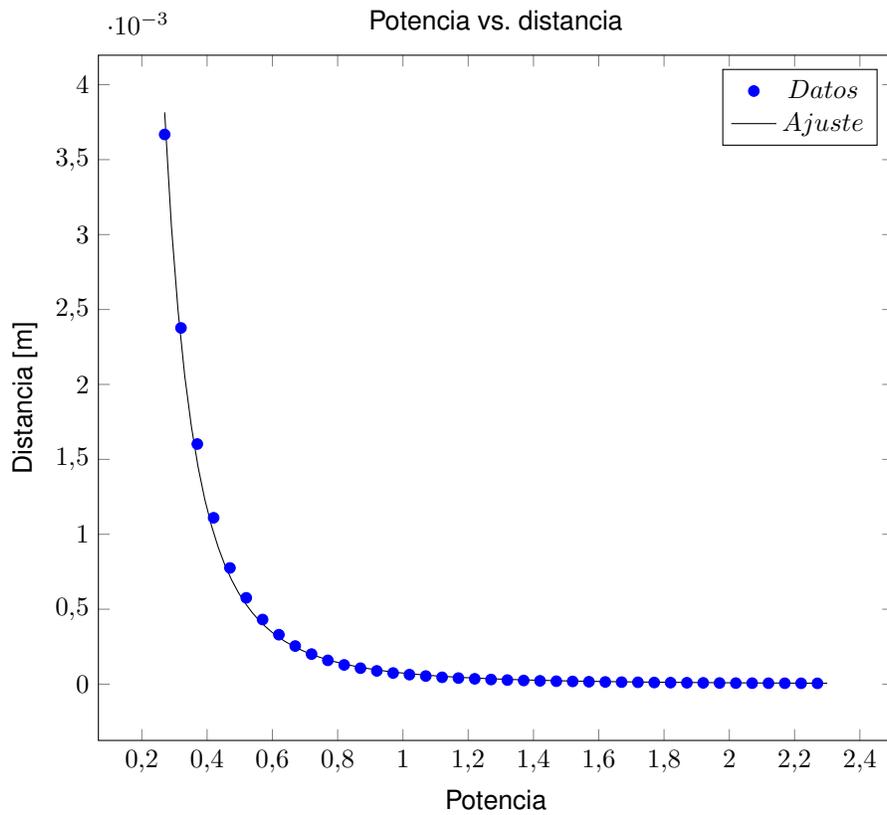


Figura 4.15: Potencia recibida versus distancia d , con los ángulos ϕ y ψ fijos.

4.4.1.2. Relación Potencia versus Ángulo

Una vez obtenido el factor con el cual decrece la potencia, se procede a medir el parámetro angular γ . Para esto se deben tener en cuenta dos condiciones; primero, se debe conservar la distancia emisor-receptor en todo momento, y segundo, se debe conservar la condición $\phi = \psi$.

Se realiza un montaje utilizando un brazo rotatorio, en cuyo extremo se ubica el fotodetector, y al centro se ubica el LED. Sin embargo, debido a la naturaleza del brazo rotatorio, no es posible conservar exactamente la distancia LED-fotodetector, pues el centro del LED no coincide con el centro del brazo rotatorio, lo que implica una pequeña variación de la distancia LED-fotodetector. No obstante, se realiza la medición de todas maneras para obtener una estimación del parámetro γ que será utilizado para una medición posterior, con el fin de corregir el valor del parámetro. La segunda condición $\phi = \psi$ es conservada en todo momento. Los ángulos varían desde -85° hasta 60° y van variando de a 5° . Nuevamente se obtiene 10 señales a cada ángulo, que son filtradas, para luego calcular la potencia para las 10 señales. Luego se utiliza el promedio de las 10 señales y se convierte en la potencia para el ángulo dado. A estos datos se les realiza un ajuste del tipo $A \cos^\gamma(\phi)$ recordando que en este caso, $\gamma = m_i + 1$.

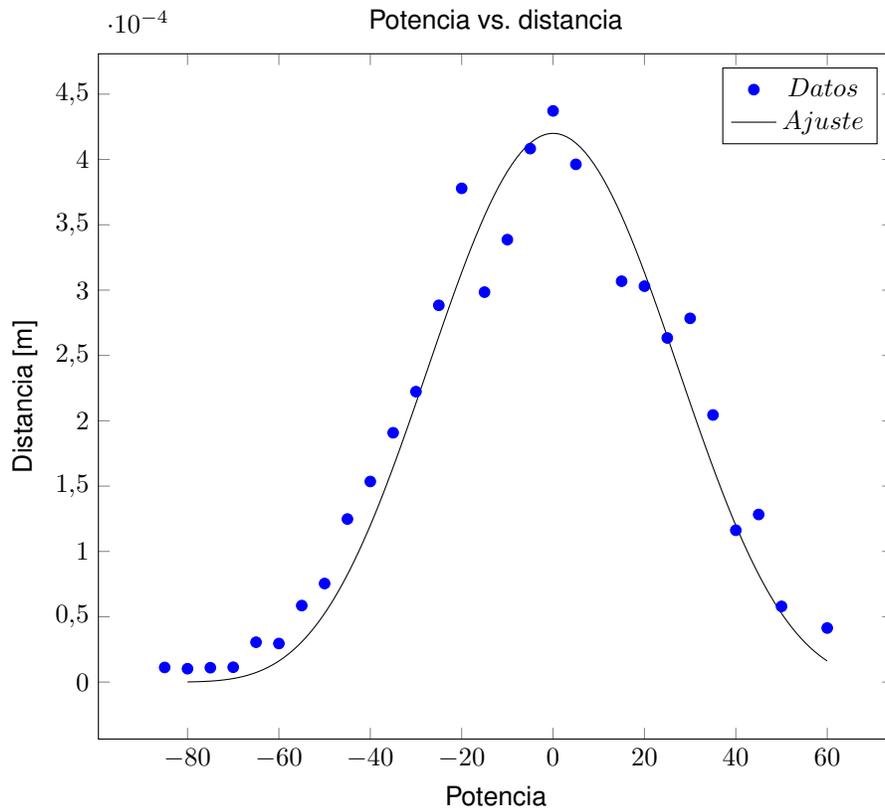


Figura 4.17: Potencia recibida versus ángulo $\phi = \psi$.

Se obtiene la siguiente curva Potencia versus ángulo:

$$P = (0,0004) \cos^{3,6}(\phi) \quad (4.27)$$

Se realiza un segundo experimento para medir el parámetro angular, que consiste en medir la potencia recibida por el fotodetector a 3 distancias distintas, conservando el ángulo, que será fijado en 25° . El LED está modulado a una frecuencia de 35 kHz, y se estudian 3 distancias: $d_1 = 304 \text{ cm}$, $d_2 = 200 \text{ cm}$ y $d_3 = 92 \text{ cm}$. En esta medición, se sigue considerando que la potencia recibida sigue un modelo de Lambert simplificado, del tipo

$$P_r = \frac{\alpha}{d^\beta} \cos^\gamma \phi \quad (4.28)$$

La idea de este tercer experimento, es formar un sistema de ecuaciones del tipo

$$\begin{aligned} P_{r1} &= \frac{\alpha}{d_1^\beta} \cos^\gamma \phi \\ P_{r2} &= \frac{\alpha}{d_2^\beta} \cos^\gamma \phi \\ P_{r3} &= \frac{\alpha}{d_3^\beta} \cos^\gamma \phi \end{aligned} \quad (4.29)$$

con P_{ri} , d_i y ϕ conocidos, e incógnitas α , β , γ .

Una vez que se obtienen las potencias P_{ri} , $i = 1, 2, 3$ se resuelve el sistema de ecuaciones en MATLAB utilizando la función *fsolve*. Como se trata de un ajuste no lineal, los valores que el algoritmo *fsolve* de MATLAB encuentre para α , β y γ dependen fuertemente de los valores iniciales que se le den al programa y definen si los valores encontrados son físicamente correctos para el sistema que se está estudiando. De modo que se ingresan los valores iniciales para $\alpha = 7,393 \times 10^{-5}$, $\beta = 3,01$, $\gamma = 3,6$, que corresponden a los valores para α , β y γ encontrados en los experimentos anteriores. De este modo, los valores que encuentra *fsolve* para estos parámetros son:

$$\begin{aligned} \alpha &= 0,0001 \\ \beta &= 3,01 \\ \gamma &= 3,2 \end{aligned} \quad (4.30)$$

que son los que se utilizarán para el sistema de localización.

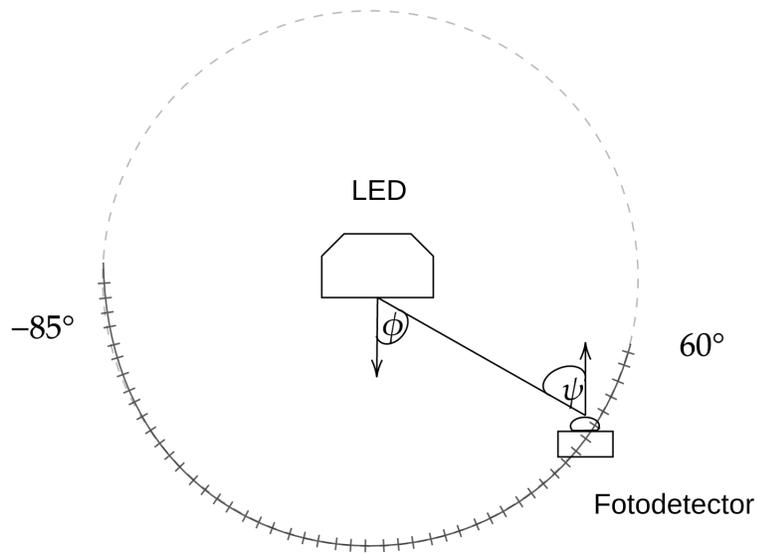


Figura 4.18: Montaje experimental realizado para la medición de la potencia lumínica en función del ángulo ϕ , con $\phi = \psi$, para posterior determinación del parámetro γ . Vista desde arriba.



Figura 4.19: Montaje experimental realizado para la medición de la potencia lumínica en función del ángulo ϕ .

4.4.2. Algoritmo de localización

Para cada LED, se obtiene una ecuación del tipo

$$P(i) = \frac{\alpha}{d_i^\beta} \cos^\gamma(\phi_i) \quad (4.31)$$

donde d_i es la distancia entre el fotodetector en una posición desconocida x, y, z y la fuente de luz i -ésima, $P(i)$ es la potencia de la señal recibida para la fuente lumínica i -ésima y $\alpha = 0,0001$, $\beta = 3,01$ y $\gamma = 3,2$ son los parámetros que describen la radiación luminosa del LED. Todos los LEDs apuntan hacia abajo, y como se puede observar en la Fig. 4.14, $\cos(\phi_i) = H_{eff}/d_i$, y por lo tanto,

$$P(i) = \frac{\alpha}{d_i^{\beta+\gamma}} H_{eff}^\gamma \quad (4.32)$$

con $P(i)$, α , β , γ , H_{eff} y las posiciones de los LEDs x_i, y_i, z_i conocidos se calculan las distancias $LED(i)$ -Fotodetector, s_1, s_2 y s_3 . Para resolver por trilateración, se trazan cascarones esféricos centrados cada uno en x_i, y_i, z_i y con radios s_i , de modo que las coordenadas del fotodetector se pueden encontrar encontrando las soluciones del siguiente sistema de ecuaciones:

$$(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 = s_1^2 \quad (4.33)$$

$$(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 = s_2^2 \quad (4.34)$$

$$(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 = s_3^2 \quad (4.35)$$

En lugar de resolver este sistema con mínimos cuadrados como en el Cap. 2, se utiliza una solución algebraica propuesta por Abdelmoumen Norrdine el año 2012 [20]. Se arregla el sistema de la siguiente forma:

$$(x^2 + y^2 + z^2) - 2x_1x - 2y_1y - 2z_1z = s_1^2 - x_1^2 - y_1^2 - z_1^2 \quad (4.36)$$

$$(x^2 + y^2 + z^2) - 2x_2x - 2y_2y - 2z_2z = s_2^2 - x_2^2 - y_2^2 - z_2^2 \quad (4.37)$$

$$(x^2 + y^2 + z^2) - 2x_3x - 2y_3y - 2z_3z = s_3^2 - x_3^2 - y_3^2 - z_3^2 \quad (4.38)$$

y, en representación matricial

$$\begin{pmatrix} 1 & -2x_1 & -2y_1 & -2z_1 \\ 1 & -2x_2 & -2y_2 & -2z_2 \\ 1 & -2x_3 & -2y_3 & -2z_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x^2 + y^2 + z^2 \\ x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_1^2 - x_1^2 - y_1^2 - z_1^2 \\ s_2^2 - x_2^2 - y_2^2 - z_2^2 \\ s_3^2 - x_3^2 - y_3^2 - z_3^2 \end{pmatrix} \quad (4.39)$$

que se puede representar como

$$\mathbf{A}_0 \mathbf{x} = \mathbf{b}_0 \quad (4.40)$$

con la restricción $\mathbf{x} \in E$

$$E = (x_0, x_1, x_2, x_3) \in \mathbb{R} / x_0 = x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 \quad (4.41)$$

Considerando que LED_1, LED_2 y LED_3 no son colineales, entonces la solución del sistema es

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_p + t\mathbf{x}_h \quad (4.42)$$

con el parámetro real t . Donde x_p es una solución particular y x_h es la solución del sistema homogéneo. Se tiene, entonces las siguientes ecuaciones

$$x_0 = x_{p0} + tx_{h0} \quad (4.43)$$

$$x_1 = x_{p1} + tx_{h1} \quad (4.44)$$

$$x_2 = x_{p2} + tx_{h2} \quad (4.45)$$

$$x_3 = x_{p3} + tx_{h3} \quad (4.46)$$

utilizando la restricción,

$$x_0 = x_{p0} + tx_{h0} = (x_{p1} + tx_{h1})^2 + (x_{p2} + tx_{h2})^2 + (x_{p3} + tx_{h3})^2 \quad (4.47)$$

arreglando términos, se obtiene

$$\begin{aligned} t^2(x_{h1}^2 + x_{h2}^2 + x_{h3}^2) + t(2x_{p1}x_{h1} + 2x_{p2}x_{h2} + 2x_{p3}x_{h3} - x_0) \\ + x_{p1}^2 + x_{p2}^2 + x_{p3}^2 - x_{p0} = 0 \end{aligned} \quad (4.48)$$

que tiene la forma de una ecuación cuadrática con soluciones

$$t_{1/2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (4.49)$$

así, las soluciones del sistema son

$$x_1 = x_p + t_1 x_h \quad (4.50)$$

$$x_2 = x_p + t_2 x_h \quad (4.51)$$

si el problema de trilateración no tiene solución, por ser las distancias LED-Fotodetector muy pequeñas, entonces no existen soluciones reales. En este caso, se utiliza la parte real como una aproximación de la solución.

4.4.3. Resultados de posicionamiento

El escenario experimental del prototipo se muestra en la Fig. 4.20. Las mediciones de la posición del fotodetector se realizan dentro de una celda triangular de 2x2x2 metros. El arreglo de LEDs

Tabla 4.6: Procedimiento de localización

Paso 1	<p>Leer archivos</p> <p>Leer archivos de texto previamente elaborados con la posición de los LEDs y los filtros a utilizar:</p> <ul style="list-style-type: none"> posLeds.txt, filtro30k.txt, filtro35k.txt, filtro40k.txt
Paso 2	<p>Generar tabla de potencias</p> <p>Generar una <i>lookup table</i> que relaciona potencias con distancias, utilizando los parámetros α, β, γ.</p>
Paso 3	<p>Samplear</p> <p>La Raspberry Pi solicita samplear a la tarjeta XMOS. Ésta muestrea y avisa a Raspberry Pi para que se genere un vector de 5000 y reciba paquetes de 250 datos desde la XMOS. Se realiza el envío 20 veces. Raspberry Pi recibe el vector de datos y los transforma en voltaje.</p>
Paso 4	<p>Filtrado</p> <p>Con el vector de voltajes sampleado y los filtros, se inicia el filtrado de la señal.</p>
Paso 5	<p>Cálculo de potencias</p> <p>Calcular la potencia de la señal filtrada para obtener un vector de 3 potencias recibidas (de 3 LEDs) Se relaciona $(P_1, P_2, P_3) \rightarrow (s_1, s_2, s_3)$ utilizando la Tabla generada en Paso 2.</p>
Paso 6	<p>Trilateración</p> <p>Con s_1, s_2, s_3 y la posición de cada uno de los LEDs se realiza el algoritmo de trilateración descrito anteriormente. Retorna una coordenada (x, y, z) para el fotodetector y el error de posicionamiento.</p>

también forma un triángulo, y se realizan mediciones en dos configuraciones diferentes.

En la Fig. 4.21 se muestra la primera configuración. Los puntos representan las posiciones en donde se situó el fotodetector para estimar su posición con el prototipo desarrollado. Además, los puntos coloreados también representan la posición de los LEDs, cuya configuración es un triángulo isósceles, y las coordenadas en metros de la posición de cada LED son:

$$LED1 = (1,32, 0,66, 1,45)$$

$$LED2 = (1,32, 1,32, 1,45)$$

$$LED3 = (0,66, 0,99, 1,45)$$

y para cada medición, el error se calcula como la distancia entre las coordenadas del punto real y el punto estimado

$$Error = \sqrt{(x_r - x_m)^2 + (y_r - y_m)^2 + (z_r - z_m)^2} \quad (4.52)$$

donde x_r, y_r, z_r son las coordenadas reales del receptor y x_m, y_m, z_m son las coordenadas medidas.

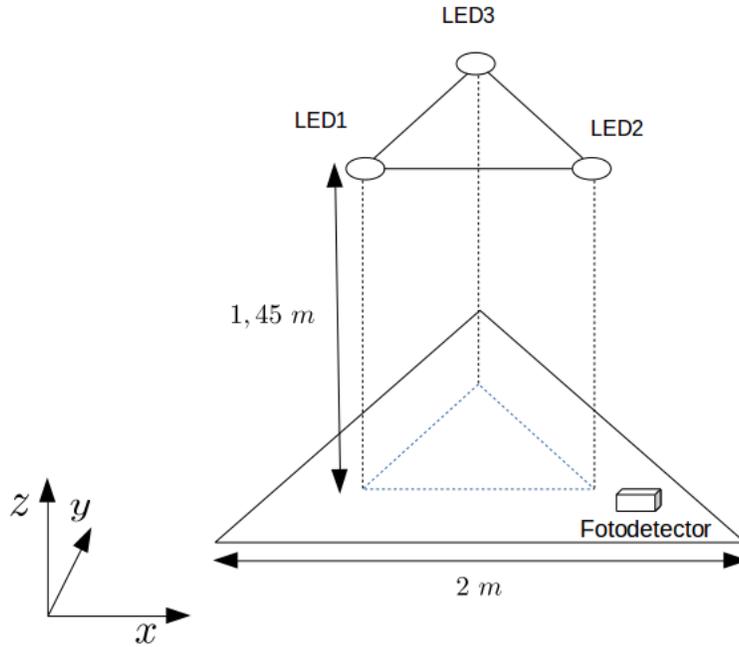


Figura 4.20: Esquema del montaje experimental para medición de posicionamiento.

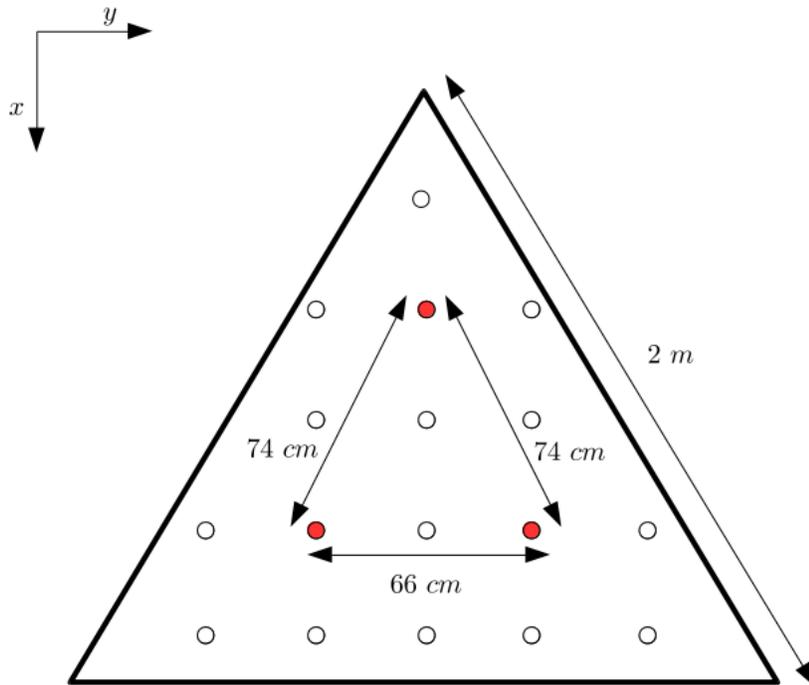


Figura 4.21: Celda triangular para la configuración 1.

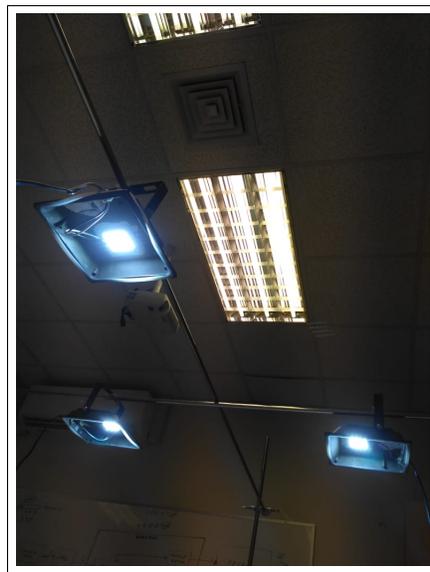


Figura 4.22: Fotografía del arreglo de LEDs para la medición de posicionamiento.

A continuación, se realizan 10 mediciones para cada uno de los 17 puntos para estudiar la distribución del error. En la Fig. 4.25 se observa un histograma de los errores de las 170 mediciones. La dispersión de los errores se encuentra entre 3 cm y 40 cm, y los picos del error se encuentran entre 5 y 20 cm. Se observa que la curva no es simétrica, sino que está sesgada hacia la derecha. En la Fig. 4.26 se muestra el histograma acumulado de los errores obtenidos. En este gráfico se puede ver que el 94 % de los errores obtenidos están contenidos en el intervalo [0,30] cm.

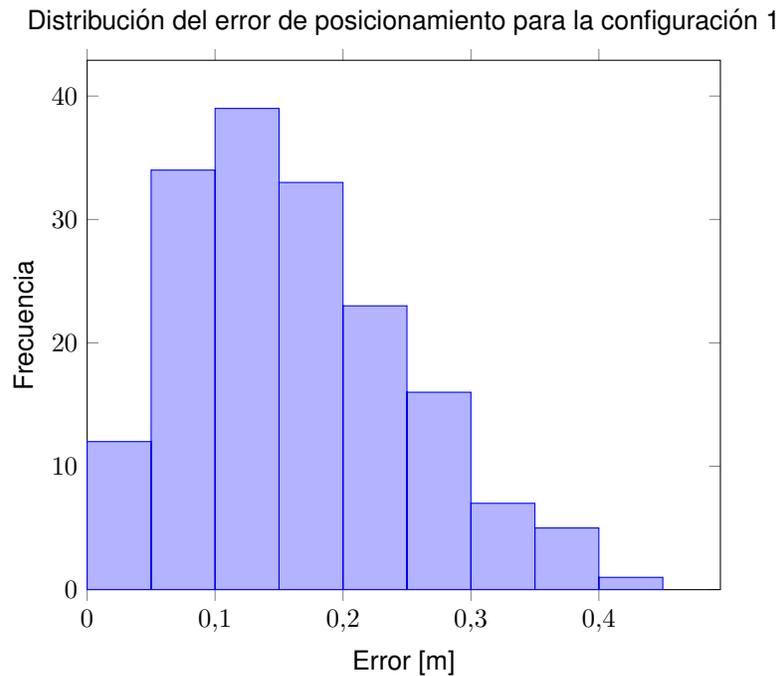


Figura 4.25: Distribución del error de posicionamiento.

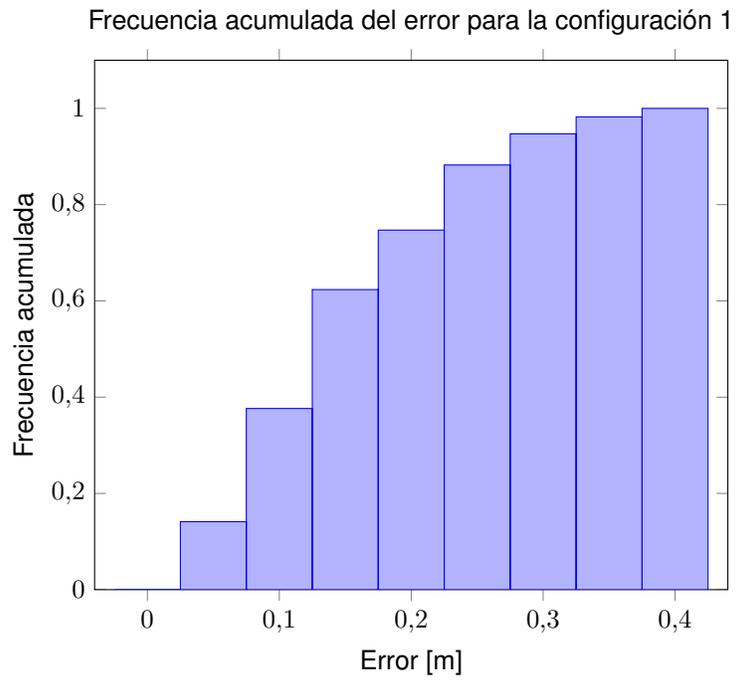


Figura 4.26: Frecuencia acumulada del error de posicionamiento.

Se realiza una segunda medición, con una configuración distinta de LEDs. En este caso, los LEDs tienen una separación de 52 y 44 cm entre sí, como se muestra en la Fig. 4.27. De esta forma, el triángulo que forman los LEDs emisores es más pequeño que el triángulo que formaban en la configuración 1.

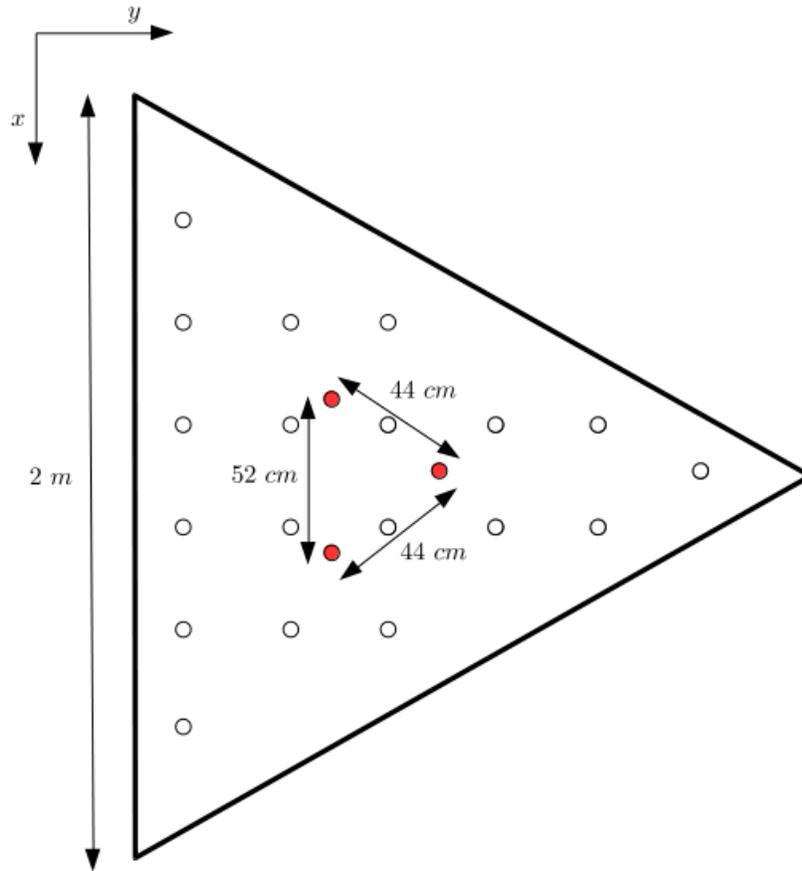


Figura 4.27: Celda triangular para la configuración 2.

Distribución del error de posicionamiento para la configuración 2

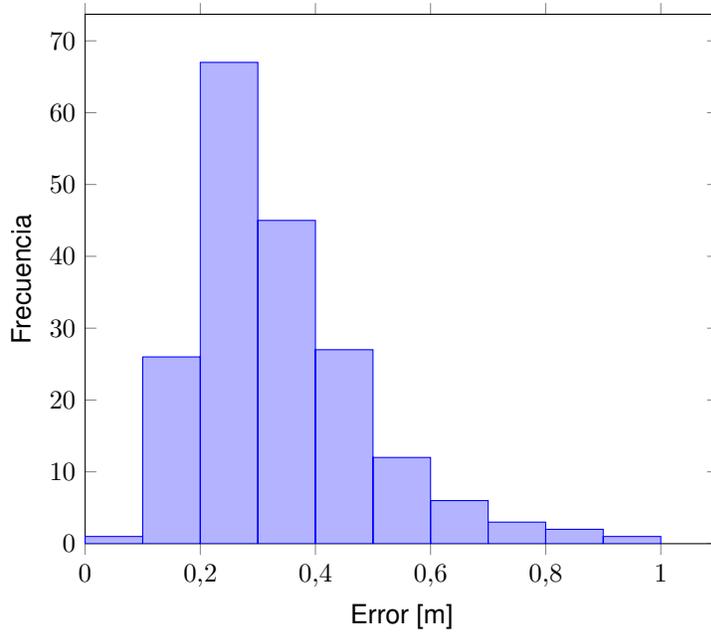


Figura 4.28: Distribución del error de posicionamiento.

Frecuencia acumulada del error para la configuración 1

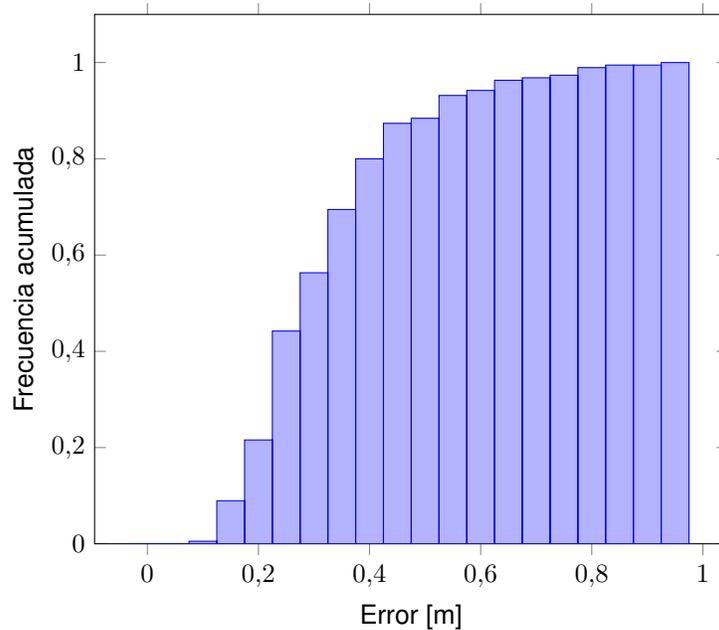


Figura 4.29: Frecuencia acumulada del error de posicionamiento.

En esta segunda configuración, se realizaron 10 mediciones por cada punto, y son 19 puntos en total. Es evidente de la Fig. 4.28 que los errores obtenidos son mayores que en la configuración 1. Los picos de error en el histograma están entre 20 y 40 cm, y la dispersión de los datos se encuentra

entre 9 y 96 cm. Además, de la Fig. 4.29 se observa que el 96 % de los datos tiene un error de 65 cm o menos. Así, de la comparación entre ambas configuraciones se puede deducir que el sistema realiza una mejor localización del fotodetector cuando los LEDs están más separados entre sí, sugiriendo que la configuración de los LEDs es importante a la hora de realizar la localización.

Capítulo 5

Conclusiones y perspectivas

A partir de la simulación realizada, se puede observar que la respuesta al impulso del canal óptico LOS es predominante frente a la respuesta al impulso del canal óptico NLOS. Es decir, la potencia óptica recibida por el fotodetector de los reflejos es mucho menor a la potencia óptica recibida de los haces de luz que llegan directo desde el LED al fotodetector. Esta diferencia en potencia, sin embargo, tiende a decrecer en ciertos sitios cercanos a paredes y esquinas.

Dentro de la implementación, es importante que se tenga en cuenta la no linealidad de la curva V-I del LED y la combinación de señales se realice con circuitos activos dedicados. Los circuitos pasivos, como el Bias-Tee muestran un pobre desempeño en la modulación del LED cuando está en la zona no lineal, se observa una reducción y deformación de la señal original, que da a lugar a armónicos indeseables en este sistema de posicionamiento. Por otro lado, el receptor debe tener una frecuencia de muestreo lo suficientemente alta como para evitar el *aliasing*, y además, debe ser multitarea apropiativa (*preemptive*), de modo que la recepción de datos no se vea afectada por otros procesos. Los ordenadores de placa reducida (Raspberry Pi) usualmente no son sistemas multitarea apropiativa, sino multitarea cooperativa, por lo que la probabilidad de interrumpir el proceso de adquisición de datos al usar estos sistemas es muy alta. Para remediar esto, se utilizó una placa XMOS como conversor análogo digital, de forma que enviara paquetes de datos a la Raspberry Pi. Igualmente, se podría utilizar una placa Beaglebone y sus unidades de tiempo real (PRUs) para cumplir el mismo objetivo.

Con respecto al experimento de localización, se observa una estimación de la posición que fluctúa entre mediciones, que se debe principalmente a una fluctuación de la potencia recibida por el fotodetector desde los LEDs. Esto puede tener distintas razones que serán detalladas a continuación.

Una de las fuentes de fluctuación de la potencia recibida en el fotodetector es la reflexión multicamino. Al realizar la simulación, se observa que la potencia recibida de los reflejos es mucho menor a la potencia recibida directamente desde el LED, y se consideró que la contribución de los reflejos era despreciable. Sin embargo, la simulación realizada en este trabajo, utiliza el algoritmo de Barry, que si bien destaca por su simplicidad al dividir las superficies reflectantes en reflectores elementales y luego suma la contribución de cada uno de ellos, es un método recursivo, por lo que toma mucho tiempo de cálculo y por lo tanto se ha simplificado el número de reflejos.

Existen otras alternativas de simulación para calcular la respuesta al impulso, pero por su complejidad no fueron abordadas en este trabajo. Dichos algoritmos presentan una situación más realista, en la que se observa que los reflejos tienen una mayor potencia que la estimada por el algoritmo de Barry. En el estudio [21], se lleva a cabo una simulación basada en un algoritmo de Monte Carlo modificado, donde concluyen que en una situación ideal, sin reflejos, y en un sitio de 6×6 m, los errores de posicionamiento están dentro de 0,005 m. Sin embargo, al añadir reflejos, la mayoría de los errores se encuentran bajo 0,8 m, y en algunos casos hasta 1,5 m. Se trata de una estimación más realista del efecto que tiene la reflexión multicamino, que dependiendo de la posición del emisor y receptor puede acentuarse, por ejemplo, en las esquinas y cerca de las paredes.

Al haber pocas publicaciones sobre implementaciones de sistemas de posicionamiento en interiores, los problemas de fluctuación de la potencia recibida no se habían tenido en cuenta. Aún así, últimamente se han propuesto algunas soluciones para ello. En [22], publicado en 2017, se propone crear una base de datos de la potencia de los reflejos, en distintos puntos de una grid dentro del sitio donde se encontrará el fotodetector a localizar, para luego utilizar un algoritmo de máxima verosimilitud y ajustar el resultado final de la posición utilizando la base de datos. En las simulaciones utilizaron una distancia de grid de 14 cm, y el error encontrado fue de 5 cm. Sin embargo, se menciona que para una implementación real la dificultad radica en encontrar una base de datos de *fingerprint* para los reflejos dentro de un entorno más complejo, que contiene superficies con distintos factores de reflexión, reflexiones especulares de ventanas y otros elementos como muebles.

Otra fuente de fluctuación de la potencia recibida, puede provenir desde el mismo LED emisor. En [23], publicado en junio de 2017, se mide la iluminación de tres modelos distintos de LEDs en el tiempo, cada 3 segundos, utilizando el mismo fotodetector y a una distancia fija de 1,5 m. Se observa que la iluminación de los LEDs varía aleatoriamente con el tiempo, y la amplitud de la fluctuación alcanzó un 38% del promedio. Dicha fluctuación es fatal para un sistema de posicionamiento como este, pues sobreestimar o subestimar el valor de la potencia incide en la

estimación de la distancia LED-Fotodetector, introduciendo errores en el algoritmo de trilateración.

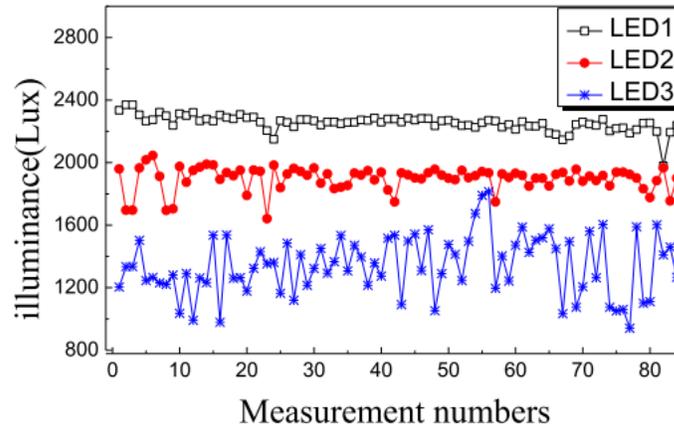


Figura 5.1: Fluctuación de la iluminación de distintos LEDs. Imagen extraída de *High Accuracy VLC Indoor Positioning System With Differential Detection*

En la publicación citada, corrigen la fluctuación de la potencia proveniente de los LEDs utilizando un segundo fotodetector, llamado receptor base, que sitúan al medio de la celda triangular a una altura conocida. El receptor base calcula sus propias coordenadas y las compara con sus coordenadas reales. Realiza esta comparación iterativamente hasta que alcance un error con cierta tolerancia definido por los usuarios. Luego, con esta información, se corrige la iluminación en el fotodetector móvil y se calcula su posición. Los investigadores realizaron mediciones de la posición en una celda de 1×1 m, obteniendo una reducción del 60% en el error original.

Con respecto a la disposición de los LEDs y la forma de la celda, en el presente trabajo se hicieron mediciones de la posición en dos celdas triangulares de distinto tamaño, y se concluyó que una celda de mayor tamaño tiene una mejor estimación de la posición, en efecto, el error promedio de la configuración 1 mostrado en la Figura 4.21, es de 15 cm, mientras que el error de la configuración 2, de la Figura 4.27 es de 33 cm. En [24] analizan el error mínimo teórico del posicionamiento por luz, utilizando intensidad de la señal recibida realizando simulaciones en las que se varía distintos parámetros; el número de lambert m , la forma del arreglo de LEDs y la distancia entre éstos, y la altura entre LEDs y fotodetector. Se concluye que en un arreglo triangular de $N \times M$ LEDs, la condición de iluminación homogénea viene dada por la expresión

$$f(D) = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{N_-} \left\{ \left[(N_+ - 2i)^2 + 3/4(M + 1 - 2j)^2 \right] (D^2/4) + 1 \right\}^{-(m+6)/2} \\ \left\{ 1 - \left[(m + 3)(N_+ - 2i)^2 - 3/4(M + 1 - 2j)^2 \right] (D^2/4) \right\}$$

con

$$N_{\pm} = N + [(-1)^j \pm 1]/2 \quad (5.1)$$

y $D = d/z$, donde d es la distancia entre LEDs, y z es la distancia entre el centro de la celda y el centro del fotodetector. La condición es entonces una función de N , M y el número de Lambert m . Así, conociendo dichos parámetros se podría establecer un arreglo de LEDs triangular que optimice la iluminación de modo que ésta sea lo más homogénea posible. Además, se puede establecer una altura óptima para el arreglo de LEDs. Según las simulaciones realizadas en dicha publicación, al variar la altura desde 1,5 m hasta 3,0 m, el menor error fue encontrado en 1,5 m. Además, llegaron a la conclusión de que al aumentar el número de Lambert m , el error se minimizaba. Esto se puede explicar observando la definición de m :

$$m = \ln 2 / \ln(\theta_{1/2}) \quad (5.2)$$

donde $\theta_{1/2}$ se define como el ángulo de visión donde la irradiancia es la mitad que en $\theta = 0$. Cuando el valor de m aumenta, el valor de $\theta_{1/2}$ decrece, lo que significa que la señal tiene una forma angular más pronunciada y concentrada.

A modo de perspectivas para futuros trabajos, y como resultado del análisis recién expuesto, el mayor desafío en el área de investigación, radica en encontrar una forma de disminuir el efecto de la reflexión multicamino, para reducir el error de posicionamiento en lugares cercanos a paredes o esquinas en implementaciones reales. Además, se puede perfeccionar el prototipo utilizando LEDs con menor fluctuación de potencia, y con mayor número de Lambert m .

Utilizando los estudios sobre el límite teórico del error para un sistema de posicionamiento con división de frecuencia e intensidad de la señal recibida expuesto en [24], se puede optimizar el arreglo de LEDs y la altura LED-fotodetector para lograr una iluminación homogénea en el sitio.

El prototipo propuesto tiene la limitación de que el fotodetector y los LEDs deben ser paralelos entre sí, y de esa forma cumplir la condición $\theta = \phi$, por lo que cualquier inclinación del fotodetector en un ángulo distinto resultaría en una estimación de la posición errada. Una manera de solucionar dicha limitación requiere mayor complejidad de hardware, por ejemplo, un giroscopio que permita establecer la inclinación para realizar la corrección de la potencia recibida.

Es recomendable también ampliar la velocidad de modulación. En [11], sección 3.2.3 se menciona que la frecuencia de *switching* de las lámparas fluorescentes se encuentra en el rango 20kHz y 40kHz. El espectro eléctrico de dichas lámparas contiene armónicos que pueden interferir con el

sistema de posicionamiento, puesto que el prototipo aquí presentado funciona con frecuencias de 30, 35 y 40 kHz. Aumentar la frecuencia de emisión en el LED-driver también implica nuevos desafíos, que tienen que ver con el diseño de circuitos de alta frecuencia. Además, si se aumenta la velocidad de modulación del LED, también se debe aumentar la velocidad de muestreo del hardware receptor, por lo que se puede optar por otras placas de desarrollo, como por ejemplo, Beaglebone Black, capaz de samplear hasta 1 MS/s.

Otro desafío pendiente para el área de investigación se relaciona con la necesidad de que la industria que se ha encargado de desarrollar LEDs evolucione en función de las últimas investigaciones en el campo de localización y comunicación, de forma que se permita ampliar las posibilidades de los LEDs más allá de la función lumínica, y éstos puedan desempeñar un papel relevante en localización y comunicación. Estas mejoras debieran estar orientadas a perfeccionar la estabilidad de la potencia emitida por los LEDs, y en el ámbito de las comunicaciones a incrementar la tasa de transmisión de información.

Esta investigación buscó ser un aporte en el estudio de la localización en interiores desde un punto de vista de la implementación práctica, debido a la escasez de estudios que implementen prototipos funcionales, que sean capaces de procesar información en tiempo real para entregar la posición de un fotodetector.

Anexo

Bibliografía

- [1] Trong-Hop Do y Myungsik Yoo. “An in-depth survey of visible light communication based positioning systems”. En: *Sensors* 16.5 (2016), pág. 678.
- [2] Junhai Luo, Liying Fan y Husheng Li. “Indoor positioning systems based on visible light communication: state of the art”. En: *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 19.4 (2017), págs. 2871-2893.
- [3] Nabeela Khan y N Abas. “Comparative study of energy saving light sources”. En: *Renewable and sustainable energy reviews* 15.1 (2011), págs. 296-309.
- [4] Pengfei Luo y col. “An indoor visible light communication positioning system using dual-tone multi-frequency technique”. En: *Optical Wireless Communications (IWOW), 2013 2nd International Workshop on*. IEEE. 2013, págs. 25-29.
- [5] Mohammadreza Aminikashani, Wenjun Gu y Mohsen Kavehrad. “Indoor positioning in high speed OFDM visible light communications”. En: *arXiv preprint arXiv:1505.01811* (2015).
- [6] Pan Hu y col. “Pharos: Enable physical analytics through visible light based indoor localization”. En: *Proceedings of the Twelfth ACM Workshop on Hot Topics in Networks*. ACM. 2013, pág. 5.
- [7] Liqun Li y col. “Epsilon: A Visible Light Based Positioning System.” En: *NSDI*. Vol. 14. 2014, págs. 331-343.
- [8] Bo Xie y col. “LIPS: A Light Intensity–Based Positioning System for Indoor Environments”. En: *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)* 12.4 (2016), pág. 28.
- [9] Juan B. Ejea Prof. Esteban Sanchis. *El diodo de emisión de luz (LED)*. 2008. URL: https://www.uv.es/=esanchis/cef/pdf/Temas/B_T3.pdf (visitado 13-12-2017).
- [10] Zabih Ghassemlooy y col. *Visible light communications: theory and applications*. CRC Press, 2017.
- [11] Zabih Ghassemlooy, Wasiru Popoola y Sujan Rajbhandari. *Optical wireless communications: system and channel modelling with Matlab®*. CRC press, 2012.

- [12] Arnold Wilkins, Jennifer Veitch y Brad Lehman. "LED lighting flicker and potential health concerns: IEEE standard PAR1789 update". En: *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2010 IEEE*. IEEE. 2010, págs. 171-178.
- [13] Mark S Rea y col. *The IESNA lighting handbook: reference & application*. Illuminating Engineering Society of North America New York, 2000.
- [14] Brad Lehman Naomi J. Miller. *FLICKER: Understanding the New IEEE Recommended Practice*. 2015. URL: https://energy.gov/sites/prod/files/2015/05/f22/miller%20Blehman_flicker_lightfair2015.pdf (visitado 04-01-2017).
- [15] Silvestre Pérez Rodríguez y col. "Simulation of impulse response for indoor visible light communications using 3D CAD models". En: *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* 2013.1 (2013), pág. 7.
- [16] John R. Barry y col. "Simulation of multipath impulse response for indoor wireless optical channels". En: *IEEE journal on selected areas in communications* 11.3 (1993), págs. 367-379.
- [17] Mohsen Kavehrad, MI Chowdhury y Zhou Zhou. "Indoor Positioning Methods Using VLC LEDs". En: *Short-Range Optical Wireless: Theory and Applications* (2015), págs. 225-262.
- [18] Andrew R Hayes, Zabih F Ghassemlooy y NL Seed. "Optical wireless communication using digital pulse interval modulation". En: *Photonics East (ISAM, VVDC, IEMB)*. International Society for Optics y Photonics. 1999, págs. 61-69.
- [19] H Yang y C Lu. "Infrared wireless LAN using multiple optical sources". En: *IEE Proceedings-Optoelectronics* 147.4 (2000), págs. 301-307.
- [20] Abdelmoumen Norrdine. "An algebraic solution to the multilateration problem". En: *Proceedings of the 15th International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, Sydney, Australia*. Vol. 1315. 2012.
- [21] Wenjun Gu y col. "Impact of multipath reflections on the performance of indoor visible light positioning systems". En: *Journal of Lightwave Technology* 34.10 (2016), págs. 2578-2587.
- [22] Hamid Hosseinianfar, Mohammad Noshad y Maite Brandt-Pearce. "Positioning for visible light communication system exploiting multipath reflections". En: *arXiv preprint arXiv:1707.08203* (2017).
- [23] Huichao Lv y col. "High accuracy VLC indoor positioning system with differential detection". En: *IEEE Photonics Journal* 9.3 (2017), págs. 1-13.
- [24] Xueli Zhang y col. "Theoretical accuracy analysis of indoor visible light communication positioning system based on received signal strength indicator". En: *Journal of Lightwave Technology* 32.21 (2014), págs. 3578-3584.