



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

**TELECOM** ESCUELA  
TÉCNICA **VLC** SUPERIOR  
DE **UPV** INGENIEROS  
DE TELECOMUNICACIÓN

## **IMPLEMENTACIÓN EXPERIMENTAL DE UN ENLACE ÓPTICO INALÁMBRICO PARA COMUNICACIONES EN LA REGIÓN VISIBLE (VLC)**

**Alberto Barreda Beltran**

**Tutor: Beatriz Ortega Tamarit**

Trabajo Fin de Grado presentado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de la Universitat Politècnica de València, para la obtención del Título de Graduado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación

Curso 2018-19

Valencia, 1 de Septiembre de 2019

## Resumen

Hoy en día las capacidades de las tecnologías de acceso a Internet están al límite de su capacidad por el gran incremento del consumo que han aportado los dispositivos móviles conectados y la saturación del espectro radioeléctrico. Para resolver este problema distintas tecnologías están siendo estudiadas y entre ellas una de las más destacadas son las comunicaciones con luz visible o VLC. Gracias a la popularización de los LEDs en los sistemas de iluminación esta tecnología tiene un gran potencial por a la facilidad de implementación en las infraestructuras actuales. Además, las VLC ofrecen sencillez, coste bajo, capacidad de transmisión y seguridad. El objetivo de este trabajo ha sido en poner en funcionamiento un enlace VLC para la transmisión de datos. Se han realizado medidas experimentales para caracterizar el alcance en distancia longitudinal, horizontal y vertical, y se han obtenido los parámetros que caracterizan el enlace.

## Resum

Hui en dia la capacitat de les tecnologies de accés al Internet estan al seu límit de capacitat gracies al gran increment del consum que han provocat els dispositius mòbils connectats y la saturació del espectre radioelèctric. Per resoldre aquest problema diferents tecnologies estan sent estudiades y entre elles una de les més destacades son les comunicacions en llum visible o VLC. Gracies a la popularització dels LEDs en els sistemes de il·luminació aquesta tecnologia té un gran potencial per la facilitat de implementació en les infraestructures actuals. A més les VLC son tecnologies senzilles, amb un baix preu, en grans capacitats de transmissió de dades y molt segures. L'objectiu d'aquest treball ens hem focalitzat en posar en funcionament un enllaç VLC per la transmissió de dades. S'han realitzat mesures experimentals per la caracterització del abast longitudinal, horitzontal y vertical, y se han obtingut els paràmetres que caracteritzen l'enllaç.

## Abstract

Nowadays the capacity of the Internet access technologies is at their limit of capacity because the increase in usage brought by the new mobile devices and the saturation of the radioelectric spectrum. Resolving this problem has started researches in different technologies, one of the most important between them are the visual light communications or VLC. One of the reasons of its importance is the popularization of the LEDs in the illumination systems has facilitated its implementation in the infrastructures present nowadays. In addition, the VLC are simple, cheap, great data transmission potential and security. This project's objective is the implementation of a VLC link for data transfer. Experimental measures have been done for characterizing the longitudinal range, the horizontal range and the vertical range, and we have obtained the parameters to characterize the link.

## Índice

Capítulo 1	Introducción, objetivos y estructura	4
1.1	Sistemas VLC en las redes actuales y futuras	4
1.2	Objetivos	5
1.3	Estructura de la memoria	5
Capítulo 2	Sistemas de comunicaciones ópticas en la región del espectro visible (VLC)	6
2.1	Fundamentos teóricos	6
2.2	Aplicaciones	10
2.3	Estándares	12
2.4	Soluciones comerciales	13
Capítulo 3	Montaje experimental	14
3.1	Fuente óptica LED	14
3.2	Fotodiodo	16
3.3	Amplificador de transimpedancia	17
3.4	Circuito electrónico	18
3.5	Arduino	23
3.6	Fuentes de ruido	24
Capítulo 4	Medidas experimentales	26
4.1	Medidas en distancia en alineación perfecta	27
4.2	Medidas en desplazamiento horizontal	35
4.3	Medidas en desplazamiento vertical	40
4.4	Medidas en desplazamiento angular	44
Capítulo 5	Presupuesto	45
Capítulo 6	Conclusiones y líneas futuras	47

Referencias	49
Anexo I	51
Anexo II	52
Anexo III	53
Anexo IV	54
Anexo V	55
Anexo VI	56
Anexo VII	57

## 1. Introducción, objetivos y estructura

### 1.1. Sistemas VLC en las redes actuales y futuras

Durante los últimos años se ha incrementado notablemente la cantidad de dispositivos conectados por la popularización del internet de las cosas (IoT), además de un aumento en el uso de datos móviles. Como la mayoría de estas conexiones se realizan mediante tecnología Wi-Fi la capacidad para realizarlas es muy limitada ya que en el rango de frecuencias que utilizan estas tecnologías son limitadas la capacidad para aumentar el número de estas cada vez es más reducida y complicando creando el problema conocido como “Wi-Fi spectrum crunch”.

Para resolver dicho problema, una solución es emplear las comunicaciones con luz visible o VLC. Estas son aquellas en las cuales la información viaja en la modulación de ondas electromagnéticas, en un rango espectral entre las longitudes de onda 380 nm y 750 nm que corresponde con el rango visible del espectro. A pesar de transmitir con la luz visible esta se realiza de forma que es imperceptible para el ser humano, pudiendo usar así esta luz para iluminar el ambiente. Se han creado otras nomenclaturas como podrían ser Li-Fi (Light Fidelity) o OWC (Optical Wireless Communication).

Las ventajas de la tecnología VLC consiste principalmente en la capacidad de tener un mayor número de dispositivos conectados y el mayor ancho de banda. Este que puede llegar cerca de los terahercios, siendo este mucho mayor del ancho que se puede llegar en las zonas con frecuencias centrales de unos pocos gigahercios. Los sistemas con luz visible permiten que cada uno de los distintos LEDs sea un punto de acceso distinto, por lo tanto, existe la posibilidad de un reuso espacial para aumentar los usuarios además estos sistemas no afectan ni son afectados por otros sistemas electromagnéticos por lo que pueden trabajar conjuntamente con otros sistemas.

Hoy en día hay muchos estudios se centran en crear sistemas híbridos con una arquitectura de red que integre tanto Wi-Fi como VLC. Uno de estos sistemas es PLi-Fi [1] que combina ambas tecnologías utilizando PLC (power line communications) para conectar y comunicar las dos estructuras distintas.

También están estudiando como implementar las VLC en las redes inalámbricas futuras como 5G. Con el auge del uso de dispositivos móviles como smartphones y tablets la demanda de servicios inalámbricos esta aumentando y se requiere de una evolución de las tecnologías actuales para cubrir la demanda actual y futura. Por estudios realizados se ha concluido que la mayoría de esta demanda se realiza en interiores donde sería factible implementar las VLC en las infraestructuras ya presentes. Para adecuar los teléfonos las VLC se plantea utilizar la cámara del propio teléfono y un LED externo realizando los mínimos cambios posibles.

Actualmente hay diversos proyectos en marcha entorno a las VLC, por ejemplo podemos mencionar el proyecto Internet of Radio-Light (IoRL) [2] o “European Training Network on Visible-light based Interoperability and Networking (VisIon)” [3].

El primero de estos se busca obtener una red que permita transmitir a velocidades mayores a 10Gbps en edificios a través de puntos de acceso localizados alrededor del mismo, minimizando interferencias, exposición a las radiaciones electromagnéticas al mismo tiempo que ofrece localización con una precisión de 10 cm. Este proyecto mezcla tecnologías como las VLC, las ondas milimétricas o las redes definidas por software (SDN).

VisIon es un proyecto europeo que busca formar a investigadores en primera etapa (ESR) que trabajan en el área de las VLC. Además de proyectos de doctorado o seminarios también se realizan actividades no académicas como el emprendimiento o la elaboración de artículos científicos.

Otros campos donde se utilizan las VLC podría ser la demostración de comunicaciones con estaciones lunares mediante láser [4], donde en 2013 la NASA lanzó a la misión LADEE (Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer) para recolectar datos en la Luna. En este se encontraba la LLST (Lunar Lasercom Space Terminal) que enviaba datos a la tierra mediante comunicaciones ópticas inalámbricas utilizando una longitud de onda de 532nm, consiguiendo velocidades de 622 Mbps, siendo seis veces mayores a las conseguidas con tecnologías anteriores.

## **1.2. Objetivos**

En este trabajo el objetivo consiste en implementar experimentalmente un enlace óptico inalámbrico utilizando la región visible del espectro visible. Para ello, primero analizaremos el funcionamiento de esta tecnología además de conocer el estado actual de las investigaciones y los productos comerciales. El siguiente objetivo específico será analizar detalladamente los circuitos que utilizaríamos para realizar el montaje experimental y a continuación, realizar las medidas sobre el prototipo en distintas configuraciones, con el fin de estimar el alcance de las comunicaciones. Se caracterizará totalmente la respuesta del sistema en los distintos ejes.

## **1.3. Estructura del trabajo**

Al finalizar este capítulo introductorio pasaremos a un capítulo teórico que informará sobre los fundamentos teóricos necesarios para la comprensión de este trabajo, además de las posibles aplicaciones de los sistemas VLC y los dispositivos ya comercializados. En el tercer capítulo se mostrarán y explicarán en detalle los circuitos utilizados. En el cuarto capítulo se mostrarán las pruebas realizadas y los resultados obtenidos. Finalmente se realizará un presupuesto del prototipo y se expondrá la conclusión obtenida y posibles líneas futuras de avance en este tema.

## 2. Sistemas de comunicaciones ópticas en la región del espectro visible (VLC)

### 2.1. Fundamentos teóricos

#### 2.1.1 LEDs

En los sistemas VLC el LED es utilizado como principal fuente óptica hoy en día. Los LED (Light Emitting Diode) son dispositivos que utilizan semiconductores y la electroluminiscencia para generar luz. Las principales ventajas de estos son el precio, y la gran implementación y crecimiento en el ámbito de la iluminación gracias a su eficacia, durabilidad. Los LEDs en el uso residencial requieren un 75% menos de energía y pueden durar incluso 25 veces más que las bombillas incandescentes.

Los LEDs están formados por la unión p-n de dos semiconductores los cuales se polarizan en tensión directa. En la capa n hay una sobrepoblación de electrones, localizados en la capa de conducción, en cambio la capa contiene los huecos, presentes en la capa de valencia a un menor nivel de energía. Estas capas están separadas por una banda prohibida que, dependiendo del material tiene un tamaño distinto. Cuando los electrones de la capa de conducción se recombinan con los huecos de la capa de valencia estos desprenden energía, en forma de fotones. La frecuencia del fotón viene dada por la energía desprendida en el salto de capa, siguiendo la relación establecida por la fórmula de Plank, la cual relaciona la energía y la frecuencia del fotón mediante la constante de Plank.

$$E = h * f \quad (1)$$

En los LEDs el ratio de emisión espontanea sigue el comportamiento descrito en la fórmula siguiente:

$$R_{spont}(w) = A_o * \sqrt{\hbar * w - E_g} * e^{-\frac{\hbar * w - E_g}{k_B T}} \quad (2)$$

Como se ha dicho la energía depende del material utilizado para realizar la unión p-n, y de esta depende la frecuencia. Como según la frecuencia se tendrá una luz de un color u otro, se ha realizado la tabla 1 donde se listan ciertos materiales comúnmente utilizados en los LED con la longitud de onda de los fotones asociados y el color que se visualiza.

Tabla 1: LEDs, materiales y colores

Materiales de los semiconductores	Longitud de onda	Color
GaAs – Gallium Arsenide	580-940 nm	Infrarrojo
GaAsP – Gallium Arsenic Phosphide	630-660 nm	Rojo
GaAsP – Gallium Arsenic Phosphide	605-620 nm	Ámbar
GaP – Gallium Phosphide	585-595 nm	Amarillo
InGaAlP – Indium Gallium Aluminium Phosphide	550-570	Verde
SiC – Silicon Carbide	430-505 nm	Azul
GaN – Gallium Nitride	450 nm	Blanco

El LED más utilizado hoy en día es el de color blanco, que en vez de crearse mediante semiconductores como los otros colores para este se utilizan otros dos métodos. El primero de estos utiliza un led azul con una cubierta de fósforo, parte de los fotones se convierten a color amarillo al pasar por el fósforo y mezclándose con los azules se consigue luz blanca. El otro método consiste en mezclar la luz de tres LEDs de colores rojo, verde y azul, obteniendo así el nombre de RGB LED. Utilizando la cubierta de fósforo se obtiene un LED más barato por lo que es utilizado normalmente en la iluminación, en cambio sí utilizamos los RGB LEDs podemos manipular la luz por lo que se adecuan más para el uso en VLC. Los espectros de emisión de estos métodos se pueden ver en la figura 1:

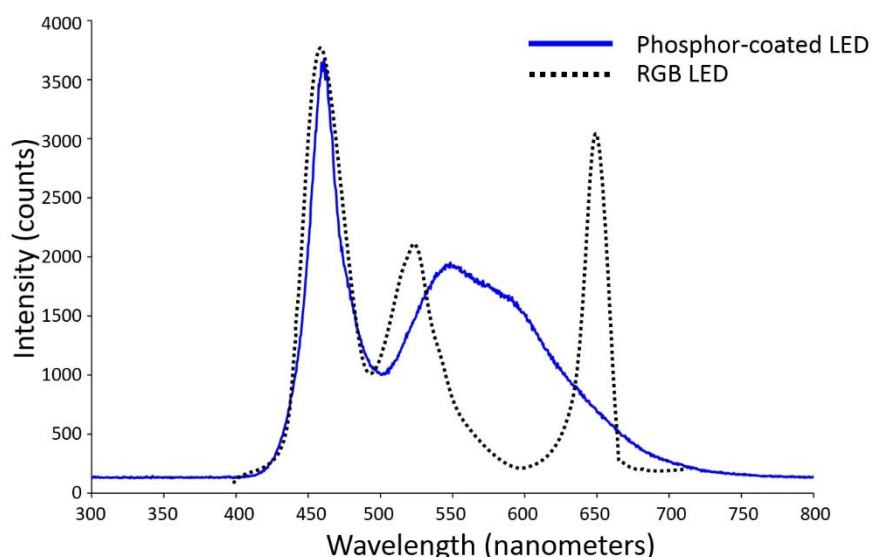


Figura 1: Comparativa espectral entre LEDs con cubierta de fósforo y RGB LEDs

Los LEDs tienen un diagrama de radiación Lambertiano, siguiendo la fórmula (1), que además al multiplicarlo por la potencia del LED se obtiene la potencia total radiada.

$$R(\vartheta) = \left[ \frac{n+1}{2\pi} \right] * \cos^n(\vartheta) \quad (3)$$



$$n = -\ln 2 / \ln(\cos \theta_1) \quad (4)$$

$$P = P_{LED} * R(\theta) \quad (5)$$

A partir de esas fórmulas podemos calcular la distribución de la iluminación dentro de una sala, obteniendo un resultado como el visto en la figura 2.

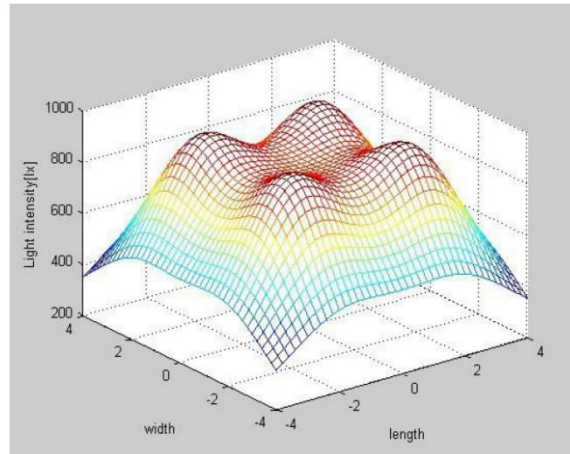


Figura 2: Distribución de la iluminación en interiores [5]

### 2.1.2 Fotodiodos

Uno de los principales receptores utilizados en óptica son los fotodiodos, estos dispositivos fabricados con semiconductores están formados por una unión p-i-n, que además de la anteriormente comentada unión p-n añade una capa intrínseca en medio de ellas para mejorar el funcionamiento de esta como receptor. Para el correcto funcionamiento del mismo se debe polarizar en tensión inversa. Al incidir el fotón arranca un electrón de la capa intrínseca, creando así un par electrón-hueco los cuales son recogidos por el ánodo y cátodo, por lo tanto según el número de fotones incidentes se creará una fotocorriente.

### 2.1.3 Comparativa VLC y Wi-Fi

La tecnología dominante en comunicaciones en los últimos años ha sido el Wi-Fi, así que compararemos la tecnología de estudio con esta. Esto no significa que sean tecnologías opuestas, en muchas ocasiones se pueden utilizar conjuntamente para lograr un sistema mejor.

Una de las principales ventajas de los sistemas VLC es la estructura ya instalada en los sistemas de iluminación, donde los LEDs ya ocupan un lugar destacado como fuente de luz. Utilizando los sistemas VLC estos transmitirían la información al mismo tiempo que iluminan la estancia, ahorrando así energía ya que se utiliza para ambas funciones. Se han realizado estudios donde se construyen sistemas que permiten realizar estas conexiones con componentes de precio reducido.

Otra de las grandes ventajas de los sistemas VLC es el mayor espectro disponible para ellos. En el espectro radioeléctrico la asignación del espectro es muy restrictiva y regulada por cada país con la

coordinación de instituciones internacionales de telecomunicaciones. Por lo tanto cada país tiene unas frecuencias distintas disponibles y reservadas, la tecnología Wi-Fi utiliza bandas de 2,4GHz y 5GHz que son registradas para usos sin licencia. En cambio, el espectro de luz visible, utilizado por las VLC, es totalmente libre con el problema de las interferencias provenientes de otros sistemas de iluminación sin datos o la luz solar.

Uno de los puntos fuertes de estos sistemas es la seguridad que aportan en comparación de las ondas de radio porque la luz no se propaga a través de paredes y otros elementos sólidos, haciendo así que no es posible interceptar la señal desde un lugar relativamente lejano y sin control del usuario. Como ventaja también se encuentra la alta frecuencia a la que opera la luz visible, dando la posibilidad de comunicar a velocidades muy elevadas. La máxima velocidad que se ha conseguido en Wi-Fi es de 10Gbps con el estándar WiGig mientras que VLC se han conseguido velocidades de 100Gbps.

Los componentes principales del sistema VLC, el transmisor y el receptor, generalmente influyen en tres capas de la pila de protocolos, capa física, capa de enlace y capa de aplicación. En cuanto el transmisor esta función normalmente esta realizada por un LED en el cual se modula la intensidad de la luz para enviar los datos, aunque en estos sistemas dicha modulación no debe afectar al brillo de la luz para que siga siendo útil en la función de alumbrar. En el receptor se utilizan fotosensores captan la luz y la convierten en datos.

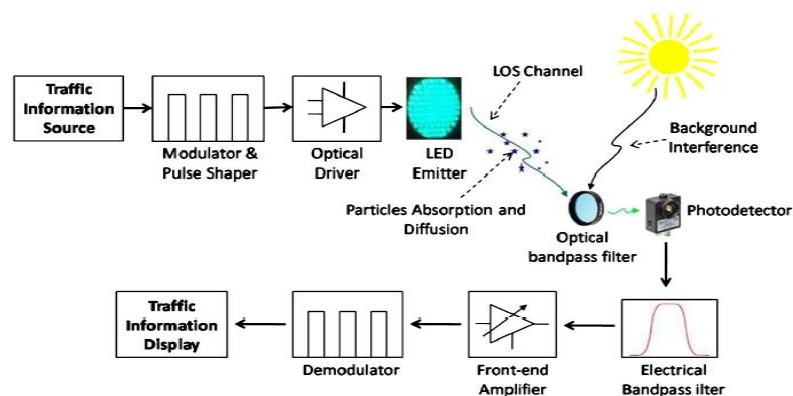


Figura 3:Arquitectura de una red VLC, adaptada de [6]

En la figura 3 se aprecia la arquitectura de la red VLC, donde el LED transmite los datos modulados en la intensidad de la luz. El receptor debe estar en línea de visión, para tener la mejor calidad de la señal posible y reducir el efecto del ruido producido por la luz ambiente. Para mejorar la calidad de la señal se puede utilizar un filtro. La corriente generada al fotodetector se amplifica para después convertirla en información demodulando la señal.

Como receptores se suele utilizar un fotodiodo como se ha explicado en el apartado anterior, aunque estos son muy sensibles y reciben señal fuera del espectro visible en entornos muy luminosos, como podría ser la presencia de luz solar, se saturarían. Por ello se pueden utilizar otros receptores como podría ser en smartphones la cámara que ya hay instalada en todos ellos con lo que cualquier

podría usar estas comunicaciones. También se pueden utilizar los LEDs como receptores como se explica en la sección de los LEDs.

## 2.2. Aplicaciones

Durante los recientes años se han realizado múltiples estudios con diferentes focos de interés, teniendo resultados que se expondrán clasificados según el entorno al que pertenecen.

- **Comunicaciones en interiores**

En el entorno de interiores se tienen estudios como Komine *et al.* [7] donde se utilizó modulación OOK (On-Off Keying) para transmitir datos al mismo tiempo que iluminaba una habitación de 5mx5mx3m con un ángulo de iluminación en el LED de 40-50 grados, obteniéndose una transmisión de 200Mbps. También utilizaron rastreo, moviendo el haz de luz para cubrir más espacio con un haz más estrecho, reduciendo el ángulo a 5 grados y obtener una velocidad de 10 Gbps. A partir de este se realizaron otros estudios usando LEDs comerciales llegando a resultados similares e incluso como una bombilla LED comercial tiene varios LEDs se emplearon técnicas MIMO, llegando incluso a velocidades de 1.1Gbps, entre estos podemos destacar Grunor *et al.* [8], Dambul *et al.* [9] o Azhar *et al.* [10]. Otros estudios han afrontado el realizar transmisiones con las luces apagadas mediante ráfagas demasiado cortas como para percibir las intensidades muy bajas consiguiendo velocidades del orden de 1.6Kbps como por ejemplo Tian *et al.* [11].

En artículos más recientes como [5] se estudia el uso de la modulación CSK-CDMA VLC, basada en la modulación de la información en el color de la luz emitida por el LED, al mismo tiempo de tener acceso múltiple mediante códigos de mezcla. Se obtienen resultados con tasas de errores o BER menores a  $10^{-6}$ .

Otras aplicaciones que hemos encontrado es el uso del teléfono móvil para comunicar las credenciales del Wi-Fi a un microcontrolador [12]. Utilizaron la pantalla, alternando un fondo oscuro y otro blanco para realizar la modulación y en el microcontrolador se incorporó un fotodetector. En otros estudios analizan el caso donde los receptores están en movimiento [13], y ofrecen una comparación de distintas configuraciones de la iluminación, concluyendo cual es más eficiente en este entorno. Otro caso donde se analizan distintas configuraciones en el caso de comunicaciones VLC multiusuario y se ofrece una nueva que minimiza la potencia necesaria manteniendo los requisitos de iluminación [14].

- **Comunicaciones vehiculares**

En las comunicaciones vehiculares se han realizado varias pruebas por la facilidad de implementar estas comunicaciones en un ambiente con gran uso de LEDs y facilidad de implementación. Además la condición de línea de visión que se adapta fácilmente a los sistemas de

transporte inteligente (ITS). Estos sistemas, llamados V2LC (Vehicle Visible Light Communications), consisten de nodos móviles representando los vehículos y estructuras fijas como los semáforos.

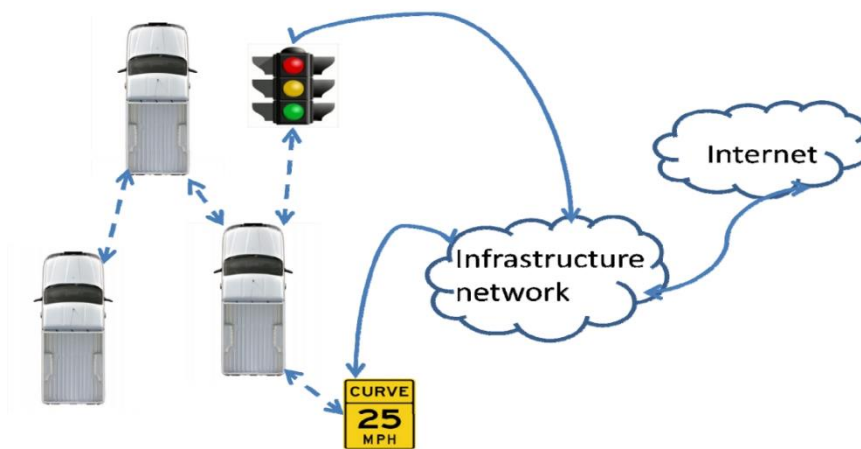


Figura 4: Estructura de las V2LC

En este campo se realizaron estudios como el de Cheng *et al.* [15] comparando las comunicaciones con luz y ondas de radio, donde la luz destacaba por su alta velocidad, el bajo coste, y la eficiencia espacial por actuar en línea de visión. En las comunicaciones entre vehículos (V2V) los faros delanteros funcionan como transmisor y fotodiodos pueden ser instalados para realizar el papel de receptores. Se han realizado estudios como el de Takai *et al.* [16] sobre estas comunicaciones V2V donde con un sensor de imagen se llegó a recibir hasta 20Mbps/pixel.

- **Sistemas de posicionamiento de alta precisión**

Las VLC también son útiles para realizar sistemas de posicionamiento de alta precisión en interiores donde un receptor capta las señales de los LEDs y con distintos algoritmos calcula su posición, entre estos sistemas destacan RSS (received signal strength) que depende de la intensidad de la señal recibida, TOA (time of arrival) la cual requiere alta sincronización, o AOA (angle of arrival). Uno de los primeros estudios al respecto es Liqun Li *et al.* [17], donde se crea el sistema Epsilon que permite la localización con alta precisión y bajo coste, esta es conseguida mediante trilateración de las medidas obtenidas con el algoritmo RSS.

- **Comunicaciones subacuáticas**

Otro enfoque de estas comunicaciones ocurre con aquellas que ocurren debajo del agua, como aquella que se producen entre buzos, en el control remoto de vehículos o la exploración de gas o petróleo. La comunicación en este entorno es difícil e incluso para comunicaciones cercanas se necesitan elementos complejos en el entorno de la radiofrecuencia. Adicionalmente en este entorno se han utilizado ondas acústicas para realizar las comunicaciones, pero a pesar de tener capacidad de transmitir a distancias mayores la eficiencia y velocidad son bajas. En cambio, las comunicaciones

ópticas tienen rangos menores de alcance, pero de mayor velocidad y eficiencia. A continuación, se adjunta una tabla comparativa:

Tabla 2: Tabla comparativa comunicaciones debajo del agua

Parámetro	Acústica	Radiofrecuencia	Óptica
Velocidad (m/s)	1500	$2.255 * 10^8$	$2.255 * 10^8$
Velocidad de transmisión	~ Kbps	~ Mbps	~ Gbps
Distancia	~ km	~ 10m	~10m-100m
Frecuencia	kHz	MHz	MHz
Potencia	Docenas de vatios	Docenas de vatios	Unos pocos vatios
Parámetros de desempeño	Presión	Conductividad	Absorción, turbidez

En las ondas ópticas el comportamiento dentro del agua depende de la frecuencia, teniendo, por ejemplo, los colores rojos más absorción y los violetas menos por lo que el entorno estará presente en la elección de la longitud de onda. Adicionalmente la línea de visión se dificulta con las corrientes marinas por lo que sería útil tener unos receptores y transmisores que pudiesen moverse ligeramente para ajustar la alineación si fuese necesario. En algunos estudios como Oubei *et al.*[18], se han creado sistemas donde se consiguió una velocidad a 2.3Gbps en una distancia de 7m.

### 2.3. Estándares

Los primeros esfuerzos por estandarizar las VLC fue en 2003 seguido del consorcio de las comunicaciones con luz visible (VLCC) en Japón. En aquella época se empezaba a explorar las VLC alrededor del mundo pero en Japón ya se había creado un sistema de posicionamiento basado en estas. Más tarde en 2007 se registraron dos estándares en el JEITA (Japan Electronics and Information Technology Industries Association): el JEITA CP1221 que cubría las bases de los sistemas VLC y el JEITA CP-1222 , un estándar para sistemas de identificación con luz visible.

Por el creciente interés en estos sistemas por el mundo académico e industrial se hizo un nuevo estándar en el 2011 en el primer borrador del oficial IEEE 802.15.7 donde se definían las capas físicas y MAC para condiciones ópticas de corto alcance usando luz visible. Este cubría los aspectos necesarios para garantizar tasas suficientes para aplicaciones multimedia y la compatibilidad con las infraestructuras de iluminación. Adicionalmente este incluía estudios respecto a las consecuencias en la salud y el entorno. El estándar trata temas desde la topología de la red o los dispositivos empleados hasta especificaciones de seguridad o control de la atenuación.

Dentro de este estándar también se definen distintas capas físicas [19] al mismo tiempo de las modulaciones empleadas en las mismas. Adicionalmente también se definen mecanismos de atenuación de la luz para que no tenga problemas para la salud. En [20] se ha analizado el rendimiento de estas distintas capas físicas.

En [21] exponen la necesidad de un estándar diferente para las comunicaciones vehiculares porque actualmente muchos fabricantes no siguen el estándar 802.15.7 para obtener dispositivos más simples y baratos.

#### 2.4. Soluciones comerciales

Hoy en día hay diferentes empresas que ofrecen productos que utilizan la tecnología de las VLC para conectar dispositivos a internet, entre ellos podemos encontrar empresas especializadas en ello como podría ser Oledcomm [22] o otras mayores con una división para esto como Philips con Signify [23].

Como el foco de este trabajo experimental no se encuentra en las soluciones comerciales ya finalizadas sino en el montaje de un enlace, nos centraremos en las distintas opciones que nos encontramos en distintos LEDs y fotodetectores que pueden ser utilizados para este objetivo. Estos están resumidos en las siguientes tablas:

*Tabla 3: Características LEDs comerciales*

LED	Longitud de onda	Velocidad de transmisión	Densidad espectral de potencia	Precio
LED Cree PLCC6 CLX6A-FKB	620/520/470 nm	3.4 Gbps	29dBm	15.51 €
BROADCOM SP000063871	650 nm	100 Mbit/s	-12.5dBm - -16 dBm	9.35 €
OSRAM SFH 2505-Z	870 nm	3 Gbps	0 dBm	0.88 €
LUW CN7M-HYJY-EMKM	750 nm	10 Mbps – 40 Mbps	27 dBm	2.95 €
LED LZ4-20MC00	624/525/457 nm	2.93 / 3.22 Gbps	30.5 dBm	19.10 €
LZ4-00MA00	621/525/460 nm	1.2 Gbps	33 dBm	16.08 €

*Tabla 4: Características fotodetectores comerciales*

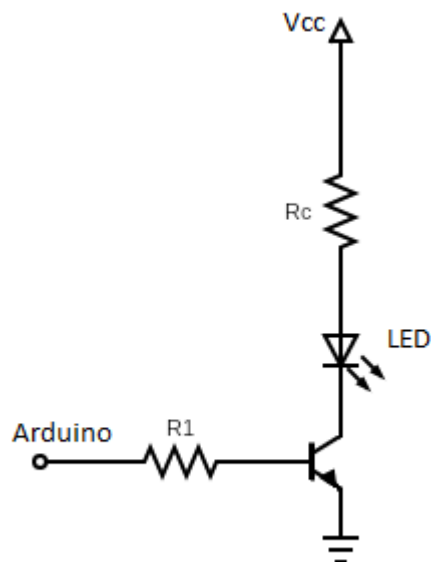
Fotodetector	Ancho de banda	Responsividad	Sensibilidad	Precio
APD S9075	280 MHz	620 nm a 0.42 A/W	-30 dBm	20.66 €
PIN S10784	250-300 MHz	650-780 nm a 0.56 A/W	-50 dBm	6.40 €
PIN SFH213	17 MHz	0.62 A/W	-60 dBm	0.33 €
APD AD800-11	650 MHz	0.28 A/W	-47 dBm	2.56 €
SFH 250	650 MHz	0.44 A/W	-33 dBm	9.41 €

Nosotros hemos elegido otros componentes distintos a los listados en estas tablas, que a continuación en la descripción de los circuitos serán explicados, sus características y el motivo por el cual fueron elegidos.

### 3. Montaje experimental

#### 3.1 Fuente óptica

El primer paso para realizar nuestro experimento es diseñar los circuitos del transmisor y del receptor. Para el transmisor se pretende usar un transistor para realizar la modulación directa, viéndose el circuito en la siguiente imagen:



*Figura 5: Circuito receptor*

Como se aprecia en la figura, el circuito consta de cuatro elementos: dos resistencias, un LED y un transistor; además de la conexión a masa y dos puntos de alimentación, uno en el puerto serie del Arduino y otro a una fuente de alimentación, Vcc, de 12V.

La rama que conecta a la base del transistor contiene una resistencia que llamaremos Rb y está conectada a la salida del puerto serie de la placa Arduino. El emisor está conectado a la masa y el colector se conecta al LED y a la alimentación tras una resistencia de protección que se llamará Rc.

*Tabla 5. Características del LED*

Corriente directa	80 mA
Corriente directa máxima	120 mA
Tensión directa	3 - 3.4 V
Temperatura de operación	-40 - 85 °C
Angulo de visión	30°
Intensidad de iluminación	16000 - 20000 mcd
Longitud de onda	550 - 650 nm

Para elegir el LED se tiene en cuenta principalmente la frecuencia de encendido y apagado que limita la máxima velocidad de transmisión y ésta debe ser capaz de realizar la transición entre apagado y encendido a velocidades de megahercios. Por otra parte, al ser parte de la iluminación ambiente tiene que tener luz visible y al mismo tiempo debe tener una tonalidad adecuada para dicha utilidad. Por estas características se ha elegido un LED blanco con número de modelo YSL-R1042WC-D15 de la marca Yunsun. Sus características se pueden apreciar en la tabla 5. Además, con unos criterios similares a los del LED se ha elegido el transistor bipolar de silicio 2N3904 NPN, cuyas características se pueden apreciar en la Tabla 6.

Tabla 6: Características del transistor

Intensidad colector	200 mA
Ganancia de corriente ( $h_{fe}$ )	100
Voltage $(_{CE})$ saturación	0.25 V
Voltage $(_{BE})$ saturación	0.75 V
Frecuencia	300 MHz
Tiempo de subida	35 ns

\*Estos valores son referidos a los 80 mA de corriente en el LED

Para calcular el valor de las resistencias nos basaremos en las características de los componentes ya elegidos. Para la rama de base del transistor se tendrá una entrada de 5V en los valores altos de la transmisión y 0V en los valores bajos. En los valores bajos no habrá corriente y por lo tanto el transistor se encontrará en corte impidiendo el paso de corriente y por lo tanto apagando el LED. Para el caso de tener tensión debemos elegir la resistencia  $R_b$  de forma en que el transistor se sature, usando cálculos básicos podemos ver como la corriente por la base es la corriente en el colector dividida por la ganancia de corriente. Añadiendo un margen para asegurar que la saturación se consiga. Aplicando la ley de Ohm podemos calcular el valor de  $R_b$  con los siguientes cálculos:

$$I_B = \frac{I_c}{h_{fe}} = \frac{0.08}{100} = 800 \mu A \quad R_b = \frac{V_{11} - V_{BE}}{5 \cdot I_B} = \frac{5 - 0.75}{5 \cdot 800 \cdot 10^{-6}} = 1062.5 \Omega \quad (6)$$

Similarmente podemos calcular el valor de  $R_c$  mediante la ley de Ohm y ciertos parámetros de los componentes con los siguientes cálculos:

$$R_c = \frac{V_{cc} - V_{LED} - V_{CE}}{I_c} = \frac{12 - 3 - 0.25}{0.08} = 110 \Omega \quad (7)$$

Con estos cálculos ya realizados se puede calcular la potencia del LED, que en los casos de alimentación a 12 V la corriente que pasará por él será de 80mA y en el resto de casos la alimentación será de 5V y la intensidad se calcula a partir de la ecuación 2.

$$P_{LED-12Vcc} = V_{LED} * I_{LED} = 80mA * 3.4V = 272mW \quad (8)$$



Implementación experimental de un enlace óptico inalámbrico para comunicaciones en la región visible (VLC)

$$I_c = \frac{V_{cc} - V_{LED} - V_{CE}}{R_c} \rightarrow P_{LED-5V_{cc}} = V_{LED} * \frac{V_{cc} - V_{LED} - V_{CE}}{R_c} = 3.4 * \frac{5 - 3.4 - 0.25}{110} = 41.7mW \quad (9)$$

Una vez diseñado el circuito se implementa en una placa como se muestra en la figura 6, donde los cables realizan la conexión con el LED que estará colocado en la estructura que se usa para realizar las medidas:

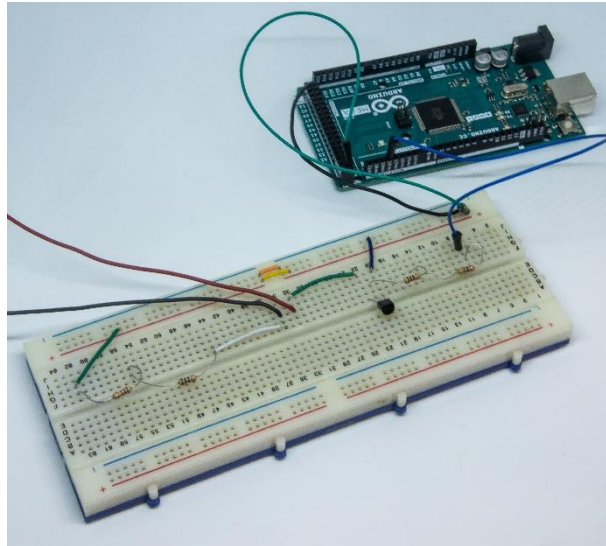


Figura 6: Circuito transmisor

### 3.2 Fotodiodo

Para diseñar el circuito receptor el primer paso es elegir un fotodiodo capaz de captar las señales que vamos a transmitir y el amplificador de transimpedancia que usaremos para amplificar la corriente generada en el detector y convertirla en tensión.

En cuanto a las características del fotodetector nos vamos a fijar en el tiempo de subida, la corriente en cortocircuito, la corriente de oscuridad, la capacidad de la unión, el ángulo de media sensibilidad y el rango de longitudes de onda. Entre estas características los valores deseados deberían ser:

- Corriente de oscuridad: tiene que ser baja porque es una de las fuentes de ruido más importantes y por lo tanto debe tenerse en cuenta en la elección del detector.
- La corriente de cortocircuito debe ser lo más alta posible para que la resistencia de feedback, que será mencionada en el diseño del amplificador, sea la menor posible y por lo tanto tenga la mejor respuesta posible respecto al ruido y la frecuencia.
- El tiempo de subida debe ser suficientemente bajo para que el fotodetector sea capaz de captar las señales transmitidas correctamente. Además se tiene en cuenta que para un sistema óptico el tiempo de subida determina el ancho de banda,  $f_{3dB}$ , mediante la siguiente relación:

$$Rise\ time = \frac{0.35}{f_{3dB}} \quad (10)$$

- El ancho de banda del circuito se puede calcular mediante la relación que se muestra a continuación:

$$f_{3dB} = \frac{1}{2\pi * R_L * C} \quad (11)$$

- El ángulo de media sensibilidad cuando es mayor aumenta la sensibilidad del fotodiodo pero al mismo tiempo aumenta la corriente de oscuridad.
- La longitud de onda de trabajo debe estar dentro del rango de emisión de nuestro LED, que en este caso es entre 550 nm hasta 650 nm. No solamente deberíamos mirar el rango sino que se debería buscar la gráfica que indica el valor de la respuesta en frecuencia y ajustar el máximo para que esté dentro de nuestro rango.

Una vez analizados todos los parámetros se ha elegido el fotodiodo BPV10, de la marca Vishay, el cual cumple todas las características necesarias para nuestro prototipo. Estas pueden contemplarse en la tabla 7.

*Tabla 7. Características del fotodetector*

Tiempo de subida	2.5 ns
Corriente de cortocircuito	65 $\mu$ A
Corriente de oscuridad	1 nA
Capacidad de la unión	11 pF
Angulo de media sensibilidad	20°
Rango de longitud de onda	380-1100 nm

### 3.3 Amplificador de transimpedancia

El amplificador de transimpedancia es uno de los componentes fundamentales del receptor óptico por el hecho de que transforma la corriente generada por el fotodetector en un nivel de tensión al mismo tiempo que amplifica la señal.

Cuando se selecciona un amplificador para un sistema tenemos que tener en cuenta diversos aspectos, siendo entre ellos los más importantes la limitación en la entrada/salida, la estabilidad y los errores  $V_{IO}$  e  $I_B$ . El  $V_{IO}$  representa la diferencia de tensión que hay entre las dos entradas diferenciales y la  $I_B$  la corriente que entra el circuito por estas entradas.

Los valores de estos errores no se calcularán, pero se elegirá un amplificador con valores pequeños para los mismos asegurando así un correcto funcionamiento del circuito. El amplificador elegido finalmente es el OPA 380 de Texas Instruments. La tabla 8 muestra las principales características.

Tabla 8. Características del amplificador OPA380

Parámetros	OPA380
Pendiente de salida	80V/ $\mu$ s
Rango de tensión de entrada	V- to (V+) – 1.8V
Rango de tensión de salida	(V+) -0.6 , (v-) + 0.1
Máxima corriente de entrada de bias	50pA
Máximo voltaje de offset a la entrada	25 $\mu$ V
Corriente inactiva	7.5mA
Capacidad de entrada en modo diferencial ( $C_D$ ) y modo común ( $C_M$ )	3pF    1.1pF
Producto de ganancia de ancho de banda	90 MHz
Rango de voltaje de alimentación	2.7 v – 5.5 v

El chip consiste en un encapsulado con ocho pines de entrada/salida y una marca circular en el mismo para indicar el orden de los pines. Los pines corresponden a las conexiones de la forma que podemos apreciar en la tabla 9.

Tabla 93. Lista conexiones pines OPA 380

PIN I	Sin conexión interna
PIN II	Entrada negativa
PIN III	Entrada positiva
PIN IV	Alimentación negativa
PIN V	Sin conexión interna
PIN VI	Alimentación positiva
PIN VII	Salida
PIN VIII	Sin conexión interna

### 3.4 Circuito electrónico

Inicialmente para diseñar el circuito receptor se conecta el fotorreceptor a la entrada negativa del amplificador de transimpedancia porque este genera corriente inversa. Adicionalmente se añaden una resistencia para crear la retroalimentación y un condensador para compensar la capacidad interna del fotorreceptor, obteniéndose un circuito como el de la figura 7.

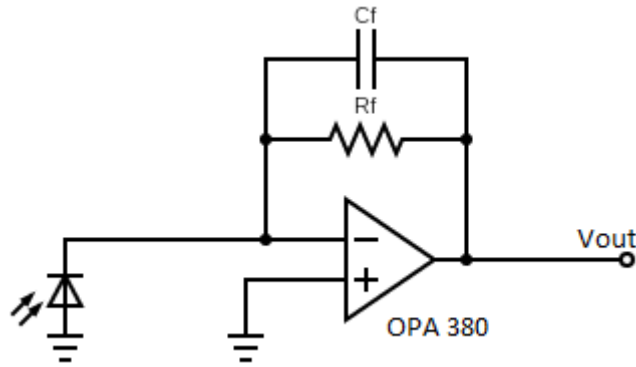


Figura 7: Primera iteración circuito receptor

En esta configuración la salida del circuito se puede describir con la siguiente expresión:

$$V_{OUT} = I_{Corto-circuito} * R_F \quad (12)$$

En el diseño actual aparecen problemas cuando la entrada no inversora (V+) se conecta a masa y el fotodiodo no otorga corriente ya que la salida del amplificador intentará igualarse a la entrada y por lo tanto la salida debería ser cero. Como 0V se encuentra dentro del rango de la entrada negativa de alimentación la salida se satura a un valor cercano a este y retrasa la respuesta a luz incidente en el fotodiodo.

Por esto el estado de saturación es considerado uno de los mayores problemas de los amplificadores de transimpedancia. Para resolver dicho problema se añade un divisor de voltaje desde la fuente de tensión y unas resistencias evitando así el retraso. Obteniendo finalmente el circuito de la figura 8.

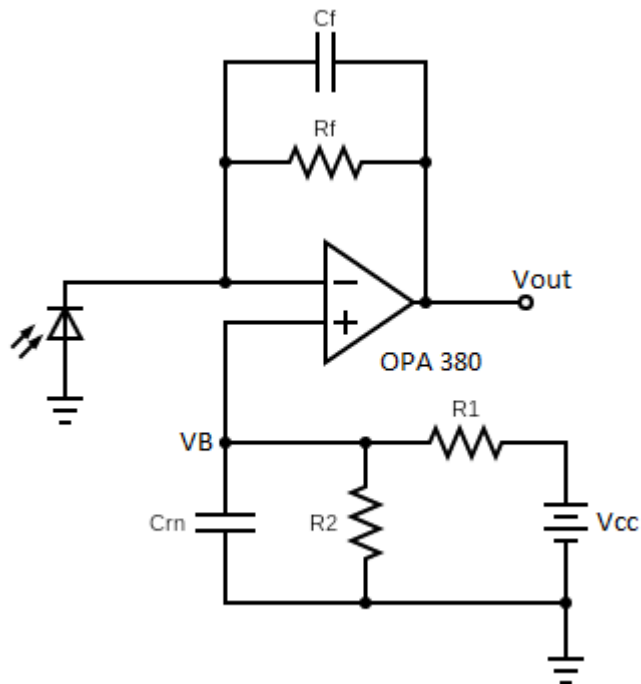


Figura 8: Circuito receptor segunda iteración

Una vez incorporados dichos elementos se obtiene una tensión  $V_B$  a la entrada positiva del amplificador correspondiente a:

$$V_B = V_{CC} * \left(\frac{R_1}{R_1+R_2}\right) \quad (13)$$

Como consecuencia la salida obtendrá un valor de:

$$V_{OUT} = V_{CC} * \left(\frac{R_1}{R_1+R_2}\right) + I_{Corto-circuito} * R_F \quad (14)$$

Para el cálculo del voltaje de bias se tienen en cuenta los casos de recibir luz y el caso donde no se recibe luz. En el caso de tener luz la salida corresponde a la tensión de bias más la corriente generada por la resistencia de retroalimentación ( $R_F$ ). En el caso de no tener luz la salida es igual al nivel de bias. Para que el amplificador no se sature este debe ser menor a 200mV. En este caso consideraremos que este valor debe valer 100mV, Sabiendo que el valor de alimentación equivale a 5V podemos calcular las resistencias  $R_1$  y  $R_2$  a partir de los siguientes cálculos:

$$100 \text{ mV} = 5 * \left(\frac{R_1}{R_1+R_2}\right) \rightarrow 0.02 * R_1 + 0.02 * R_2 = R_1 \rightarrow R_2 = 49 * R_1 \quad (15)$$

Eligiendo el valor de  $R_1$  como 49k $\Omega$  se obtiene un valor de 1000  $\Omega$  para  $R_2$ , con esto valores podemos comprobar que se cumple el valor de  $V_B = 100\text{mV}$ . Adicionalmente se ha colocado un condensador en paralelo a  $R_2$  para reducir el ruido el cual se ha elegido de 1 $\mu\text{F}$ . Con la introducción de dicho condensador se introduce una frecuencia de corte que elimina la salida creada por el ruido proveniente de la fuente de alimentación. Esta frecuencia debería ser baja y se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$f_c = \frac{1}{\pi * 2 * \left(\frac{R_1 * R_2}{R_1 + R_2}\right) * C_{RN}} = 162.403\text{Hz} \quad (16)$$

Finalmente nos falta calcular el valor del condensador y resistencia de retroalimentación, empezando por la resistencia podemos expresar su valor de la siguiente forma:

$$R_F = \frac{V_{OUT(MAX)} - V_{OUT(MIN)}}{I_{Fotodiodo(max)}} \quad (17)$$

En los catálogos la corriente máxima del fotodiodo viene dada con una potencia recibida de 1mW/cm<sup>2</sup>. Para nuestro proyecto será suficiente con una resistencia de 600k $\Omega$  para una distancia de 65cm y 66.153k $\Omega$  para una distancia de 7cm. Adicionalmente se ha situado un condensador el cual introducirá un polo en la frecuencia deseada, la que corresponde con la frecuencia de la respuesta del OPA380. El mismo se calcula con el siguiente procedimiento:

$$C_{Retroalimentacion} \leq \frac{1}{2 * \pi * R_{Retroalimentacion} * f_{deseada}} \rightarrow C_{Retroalimentacion} \leq 1.061 \text{ pF} \quad (18)$$

La estabilidad viene definida por el ancho de banda, tal y como ilustra la figura 9.

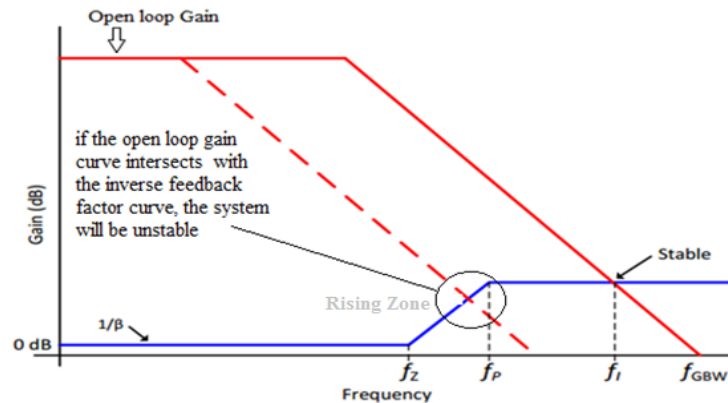


Figura 9 Problemática de estabilidad en el amplificador

En la figura  $1/\beta$  representa el factor inverso de retroalimentación y la ganancia en bucle abierto se nombra  $A_{OL}$ . La ganancia será rechazada por encima de la frecuencia del polo introducido por el condensador de retroalimentación. Una frecuencia cero ( $f_z$ ) en el factor  $1/\beta$  esta generada por la capacidad interna del amplificador. Dicha capacidad está formada por las capacidades de la unión, de entrada diferencial y de entrada común, llamadas  $C_I$ ,  $C_D$  y  $C_M$  respectivamente. Resultando el valor del condensador interno ( $C_I$ ) igual a 15.1pF. Por lo que la frecuencia cero equivale a:

$$f_z = \frac{1}{2 * \pi * (C_{retroalimentación} + C_I) * R_{retroalimentación}} = 0.016413 \text{ MHz (para 65cm) } | 0.0973 \text{ MHz (para 7cm)} \quad (19)$$

El sistema es inestable si la curva  $A_{OL}$  intercepta la curva  $1/\beta$  en la región entre  $f_z$  y  $f_p$ . Para que sea estable tiene que interceptar en un punto pasado  $f_p$ . Este punto se llama  $f_i$  y se calcula con el siguiente procedimiento:

$$f_i = \frac{C_{retroalimentación}}{C_I + C_{retroalimentación}} * f_{GBW} \quad (20)$$

Para que se cumpla la condición de estabilidad  $f_{GBW}$  debe cumplir que  $f_p < f_i$  y  $f_{GBW(Medida)} < f_{GBW}$  del opa. Sustituyendo valores se obtiene la expresión siguiente:

$$f_{GBW} > \frac{C_I + C_{retroalimentación}}{2 * \pi * R_{retroalimentación} * C_{retroalimentación}} = 3.808 \text{ MHz (para 65cm) } | 0.6423 \text{ MHz (para 7cm)} \quad (21)$$

Ahora podemos calcular el valor de  $f_i$  que resulta en 0.25 MHz aproximadamente para ambos casos. Ya podemos comprobar como todos los valores se encuentran en la zona de estabilidad, quedando solamente el cálculo para situaciones límite, donde se calculará el  $f_{GBW}$  para una frecuencia de trabajo de 2.5MHz a distancia corta, obteniéndose un valor de 41.727MHz cumpliendo los requisitos necesarios. Finalmente se obtiene el circuito definitivo.

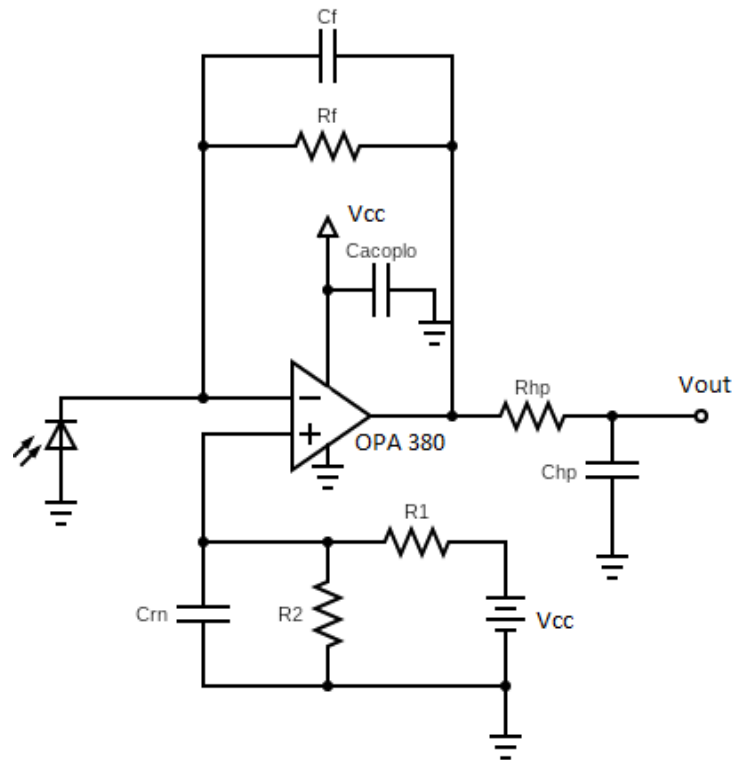


Figura 10: Circuito receptor definitivo

La figura 11 muestra el circuito completo del receptor, en la cual se observan los cables para su conexión con el fotorreceptor que se coloca en la estructura diseñada para realizar las medidas:

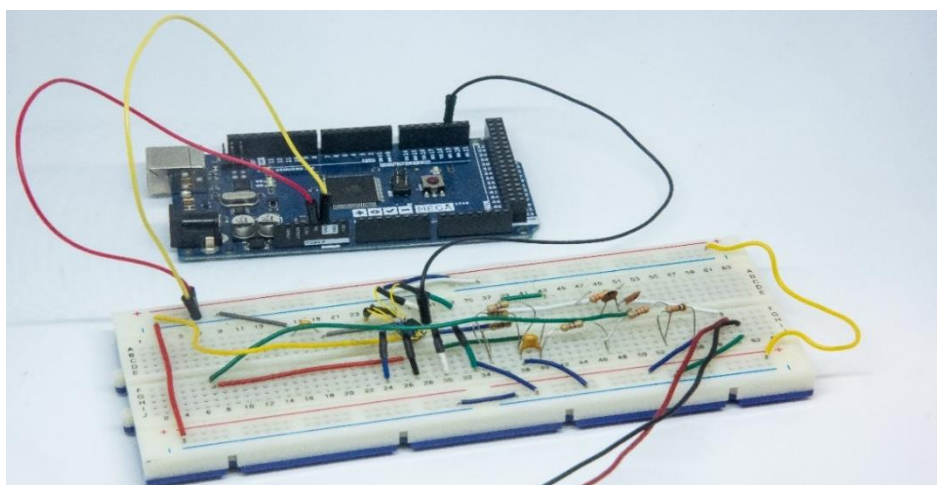


Figura 11: Circuito receptor

Como el circuito se ha montado considerando el caso de larga distancia por la expresión (21) podemos ver como el ancho de banda del circuito es  $\Delta f = 3.808\text{MHz}$ .

### 3.5. Arduino

#### 3.5.1. Descripción de la placa Arduino MEGA 2560

Arduino es una plataforma creada por la empresa homónima que permite programar un microcontrolador de forma fácil. Esta proviene placas con un microcontrolador principal y un secundario que es utilizado para realizar la conexión USB. En este nos facilita un entorno de programación en el lenguaje C con la estructura necesario ya predefinida y diferentes utilidades para seleccionar qué placa y procesador estás utilizando.

Nosotros hemos elegido la placa Arduino Mega 2560 la cual presenta unas prestaciones altas dentro de la gama de productos de la empresa. Sus características se encuentran seguidamente:

Tabla 40: Características Arduino Mega 2560

Microcontrolador	ATmega2560
Voltaje de operación	5V
Voltaje de entrada recomendado	7-12V
Voltaje de entrada límite	6-20V
Pines digitales de entrada/salida	54 (15 de ellos provienen salidas PWM)
Pines de entrada analógica	16
Corriente en los pines de entrada/salida	20 mA
Corriente en los pines de 3,3V	50 mA
Memoria Flash	256 KB con 8 KB usados en el bootloader
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Clock Speed	16 MHz

En nuestro trabajo la principal característica necesaria de esta es su capacidad de obtener unas mayores velocidades de transmisión, llegando hasta 2 Mbps pero de los cuales nuestro sistema logró alcanzar solamente uno, pero las pruebas se realizaron a 0.5 Mbps por ser más estable la conexión.

#### 3.5.2. Programación de la placa Arduino

En este trabajo la placa Arduino es una parte fundamental del prototipo ya que funciona como interfaz entre el ordenador y el prototipo. En cuanto a la programación de la placa Arduino se han creado dos programas distintos, uno para la realización de las medidas experimentales y otro para la realización una transferencia de video, este último realiza la acción junto a Matlab. Dichos códigos de programación se encontrarán en los anexos.

Durante las medidas la placa del transmisor abre el puerto serie estándar por el cual enviaba a la velocidad marcada un '1' y un '0' en bucle con un pequeño tiempo de espera entre estos para facilitar



la captación en el osciloscopio de la señal de forma estable. Durante este proceso el receptor abría un puerto serie para recibir las señales enviadas por el circuito transmisor y otro puerto serie para comunicar los datos recibidos al ordenador, donde mediante la herramienta de visualización de puertos serie del entorno de programación de Arduino podemos observar que datos son recibidos.

El otro método de operación consiste en la transmisión de un fichero, ya sea de video, imagen o texto, desde el ordenador a través del prototipo a otro ordenador o en su defecto al mismo, entrando por un puerto serie distinto. En este caso el Arduino abre dos puertos serie en cada una de las placas, uno para comunicarse entre ellas y el otro para comunicarse con el ordenador correspondiente. Una vez en el Matlab este abre el documento que debemos enviar, en nuestro caso ejemplo un video en formato cif, crea el puerto serie con el Arduino, en nuestro caso como solamente utilizamos un ordenador abre dos puertos, uno para cada placa; y configura los parámetros de transmisión para no haya problemas. Una vez preparado para transmitir abre los dos puertos serie y empieza la comunicación, una vez enviado y recibido dicho fichero este pasa a reproducirlo o guardarlo.

### **3.6 Fuentes de ruido**

En los sistemas de comunicaciones uno de los principales problemas es el ruido ya que deteriora la señal y puede llegar a producir errores en la recepción. En las señales de radiofrecuencia si dos sistemas diferentes si emiten a la misma frecuencia estos se interfieren entre ellos, equivalentemente la luz ambiente. es interferente con nuestro sistema. Este fenómeno degrada la señal, especialmente en entornos de exterior en la luz visible e interiores con la luz artificial, llegando incluso a saturar el sistema.

Otra fuente de interferencias son las propagaciones multicamino. Estas se producen porque al ser una comunicación inalámbrica hay más de un camino que permite llegar al receptor y por lo tanto la misma señal se puede recibir varias veces en varios instantes temporales distintos interfiriendo a la señal principal.

Para mitigar el efecto del ruido se pueden utilizar filtros ópticos que permiten eliminar los ruidos provenientes de fuentes naturales. También se puede mitigar con el uso de amplificadores o elegir específicamente un receptor que sea resistente a ciertos tipos de ruido o interferencia que sean prevalentes en tu sistema particular. Los fotodiodos son muy sensibles por lo que además del espectro visible también registran señales infrarrojas o ultravioletas

Otra fuente de ruido más cuantificable que las anteriores es la corriente de oscuridad, que corresponde con la corriente que genera el fotodiodo en una situación de completa oscuridad, la cual según los datos técnicos podemos ver como equivale a 1nA. A partir de la ecuación (7) podemos ver como la salida depende de la tensión de bias introducida a la entrada positiva y de la corriente generada por el fotodetector multiplicada por la resistencia de retroalimentación, en este caso la corriente generada es la corriente de oscuridad, por lo que la salida se verá afectada por esta. Si consideramos

el ruido solamente varía la señal la parte relativa a la corriente por lo tanto el ruido por corriente de oscuridad tiene un valor de:

$$\Delta V_{oscuridad} = R_F * i_{oscuridad} = 600k * 1n = 600\mu V \quad (22)$$

Finalmente la última fuente de ruido es el ruido electrónico el cual se genera en los distintos componentes. Las resistencias producen ruido término relativo a la fórmula siguiente, dependiente de la resistencia, la temperatura y la constante de Boltzman.

$$e_n^2(f) = 4 * K * T * F * R \text{ (V}^2/\text{Hz)} \quad (23)$$

Adicionalmente a este ruido se encuentra el ruido shot debido a la naturaleza no continua de la corriente eléctrica ya que existen fluctuaciones en el flujo de los electrones a través de la corriente. Este valor viene dado por la fórmula (17), donde q representa la carga del electron.

$$i_{n\ shot}^2(f) = 2 * q * I_{DC} \text{ (A}^2/\text{Hz)} \quad (24)$$

Otro ruido a tener en cuenta es el ruido rosa o flicker el cual depende de la frecuencia, la corriente y un parámetro dependiente del dispositivo, su fórmula se muestra a continuación.

$$i_{n\ flicker}^2(f) = K_1 * I_D^a * \frac{1}{f} \text{ (A}^2/\text{Hz)} \quad (25)$$

Para obtener los valores estas densidades deben ser integradas a lo largo de todo el ancho de banda del circuito.

$$\Delta V = \int (e_n^2 * + i_{n\ shoot}^2 + i_{n\ flicker}^2) df \quad (26)$$

#### 4. Medidas experimentales

La primera prueba que vamos a realizar es enviar una secuencia de '1' y '0' y medir en el osciloscopio la diferencia entre el nivel alto y el nivel bajo. En las distintas medidas vamos a medir el valor medio del valor alto y bajo, además de la variación del nivel, tanto bajo como alto, representada como la diferencia entre el valor máximo y mínimo en dicho intervalo.

Estas medidas se realizarán en tres ejes de desplazamiento: distancia, ángulo y altura. Para asegurar que las medidas sean fiables y la alineación entre el transmisor y receptor se pueda conseguir con relativa facilidad se sitúan estos elementos en una estructura diseñada de forma que asegure estabilidad y facilite la capacidad de situar el receptor y transmisor en la posición adecuada para cada medida. Dicho montaje se muestra en la figura 12.

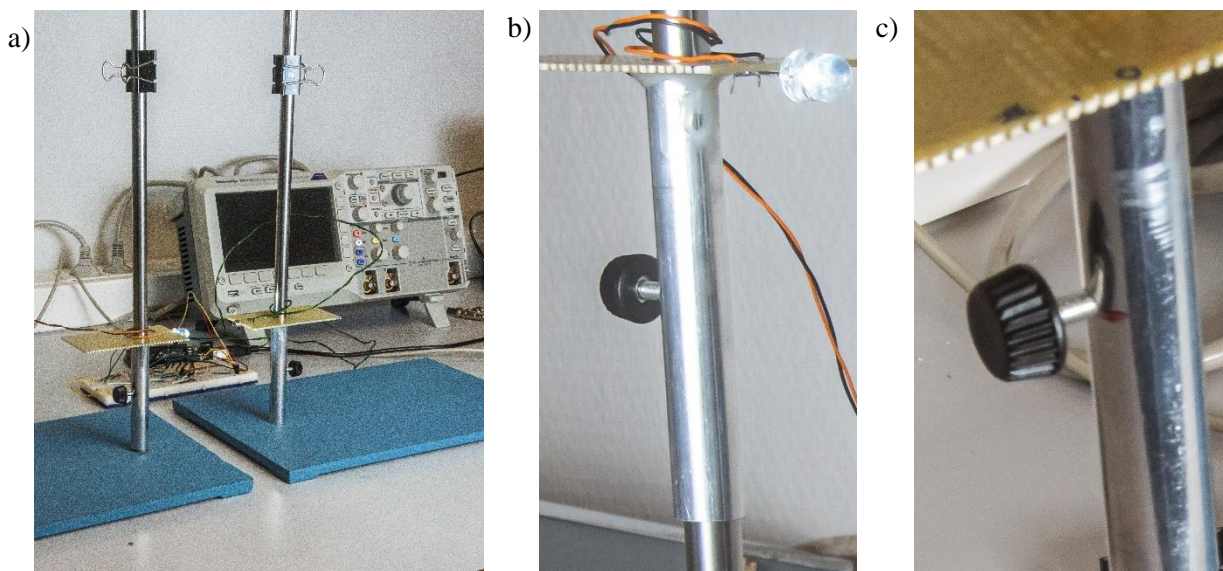


Figura 12: a) Montaje utilizado para realizar las medidas. b) detalle del tubo sobre la barra. c) detalle del tornillo

El montaje consiste en dos elementos estructurales que nos permitirán realizar las medidas con facilidad y estabilidad. Cada una de estas estructuras está compuesta por una base que asegura la estabilidad de la misma, en esta se ha situado una barra vertical que permite colocar el transmisor y receptor en distintas alturas. Para ello se han montado el LED y el fotodetector en una plataforma con un tubo incorporado para situar la barra dentro del tubo y a través de un agujero en el tubo apretar un tornillo para que la plataforma se mantenga en un nivel estable.

Para realizar las medidas se utilizará un osciloscopio con la primera entrada, situada en la parte superior de la imagen, se conecta a la señal de salida del Arduino transmisor y la segunda entrada,

situada en la parte inferior, se conecta a la señal de entrada del Arduino receptor. Según las configuraciones se obtienen las siguiente ocho opciones mostradas en la figura 13.

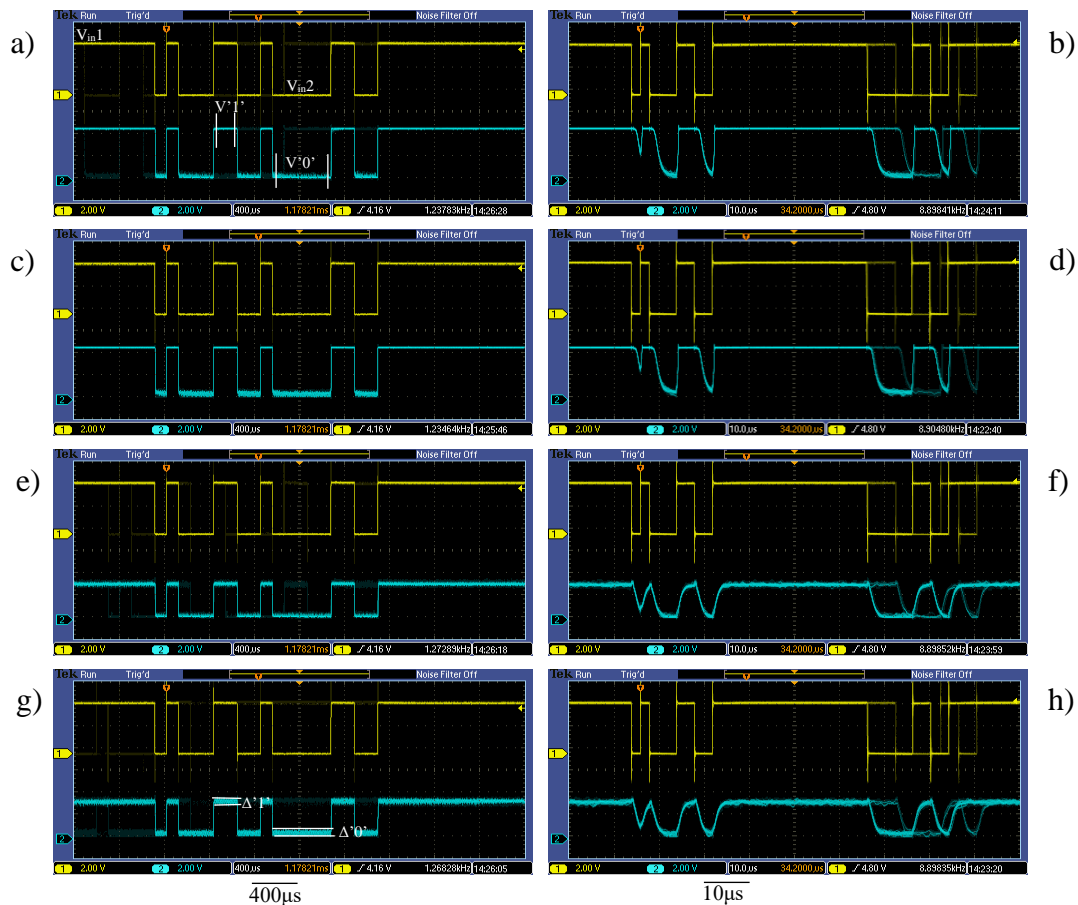


Figura 13: Ondas visualizadas en el osciloscopio. a) velocidad binaria 9600 bps, potencia recibida alta (receptor cerna del transmisor) y ambiente oscuro. b) velocidad binaria 500000 bps, potencia recibida alta y ambiente oscuro. c) velocidad binaria 9600 bps, potencia recibida alta, ambiente luminoso. d) velocidad binaria 500000 bps, potencia recibida alta y ambiente luminoso. e) velocidad binaria 9600 bps, potencia recibida baja (detector lejano al transmisor), y ambiente oscuro. f) velocidad binaria 500000bps, potencia recibida baja y ambiente oscuro. g) velocidad binaria 9600bps, potencia recibida baja y ambiente luminoso. h) velocidad binaria 500000bps, potencia recibida baja y ambiente luminoso.

En estas capturas de pantalla del osciloscopio se puede observar la señal amarilla como la señal de entrada al sistema, es decir la que sale del Arduino del circuito transmisor, y la señal azul como la señal de salida del sistema, es decir aquella que entra en el Arduino del receptor y ha recorrido todo el sistema. En las gráficas a) y g) se han colocado marcas que indican como se han realizado las medidas mediante los cursores del osciloscopio, tanto de los valores medios como de la máxima variación. Adicionalmente en la primera de estas se ha marcado el valor de la tensión de entrada en el nivel alto y bajo.

#### 4.1. Medidas en distancia con alineación perfecta

En el primer grupo de medidas se refleja la evolución de la señal mientras se aleja el receptor del emisor, y se realizarán empleando múltiples configuraciones, a diferencia de las demás medidas,

que utilizarán la misma configuración. Las distintas configuraciones se basan en la variación de tres parámetros: voltaje de alimentación en el LED que puede ser de 5V, que se proporcionara utilizando la placa Arduino por comodidad, o un voltaje mayor de hasta 12V utilizando una fuente de alimentación externa; luz ambiente encendida o apagada dentro de la sala oscura y la velocidad de transmisión, utilizando 500.000 bps como alta velocidad y 9.600 bps como baja velocidad, característica marcada en la creación del puerto serie dentro de la programación del Arduino.

*Tabla 51 Diferentes casos de medidas para alineación perfecta*

	Velocidad binaria	Voltaje de alimentación	Ambiente
Caso 1	9.600 bps	5 V	Luminoso
Caso 2	9.600 bps	5 V	Oscuro
Caso 3	500.000 bps	5 V	Luminoso
Caso 4	500.000 bps	5 V	Oscuro
Caso 5	9.600 bps	12 V	Luminoso
Caso 6	9.600 bps	12 V	Oscuro
Caso 7	500.000 bps	12 V	Luminoso
Caso 8	500.000 bps	12 V	Oscuro

#### **4.1.1. Casos 3 y 4**

Entre los distintos resultados podemos destacamos en nivel de potencia en el nivel alto ‘1’, el nivel de potencia del nivel bajo ‘0’ y la relación entre los mismos, además de confirmar si la recepción de la información en el Arduino es correcta, es decir, si en esta posición y configuración el Arduino receptor es capaz de detectar las señales que está enviando el otro Arduino y decodificarlas adecuadamente. Los resultados de esta primera configuración se aprecian en la figura 14.

Para la representación de dichas gráficas a partir de los valores recogidos inicialmente se ha creado una función polinómica de orden apropiado para a conseguir una representación más cercana a la realidad dentro de las posibilidades que nos aportan los datos recogidos. Además de esto se han representado alrededor de la curva las fluctuaciones en el nivel de señal que fueron medidas.

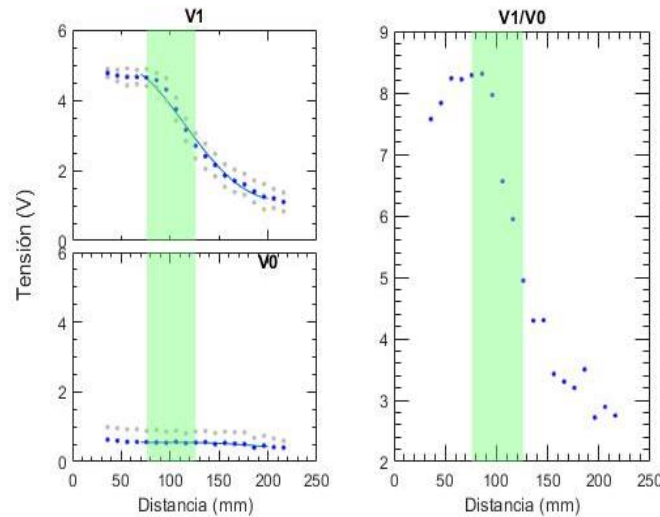


Figura 14: Evolución de la señal en la distancia en el caso 3

Como podemos apreciar en la gráfica de la tensión en el nivel alto la señal inicia a un nivel de potencia que se mantiene constante hasta que empieza a bajar, esto es debido a que la corriente generada en el fotorreceptor al amplificarse en el amplificador de transimpedancia genera una tensión mayor a la de alimentación y por tanto la señal se recorta. A continuación, la señal baja de nivel con carácter exponencial hasta llegar a niveles similares a los de la señal en el nivel bajo, donde virtualmente la señal recibida es nula. La fluctuación de la señal empieza teniendo un valor alrededor del 5% de la señal y cuando esta disminuye al mantenerse la fluctuación esta llega a tener un valor equivalente al 50% de la señal. Durante la bajada, en concreto entre las distancias de 70mm y 200mm se ha obtenido la aproximación por el polinomio  $-0.002x^2 + 0.142x + 1.6120$ .

Si nos fijamos en el nivel bajo podemos ver como su valor es muy similar en todo el proceso, y en el rango anterior, de 70 a 200mm, se ha obtenido la aproximación  $0.00021x^2 - 0.01522x + 0.9653$ . Estas características son esperables por el hecho de que al estar en un punto de señal recibida nula únicamente se mostraría el ruido. Por la monotonía del valor bajo el valor de la relación entre ambos niveles es similar a la función del nivel alto con un ligero cambio en la escala.

Para explicar el corto rango de transmisión primeramente tenemos que explicar porque en distancias cercanas, donde la señal recibida es muy alta, la transmisión no es correcta. Para explicar esta parte volveremos a la figura 13, en concreto a las gráficas b) y d), dónde podemos apreciar si comparamos la señal azul con la amarilla como cuando la señal amarilla baja de nivel alto a nivel bajo la señal azul apenas disminuye, por lo que el sistema es incapaz de detectar dicho pulso. Por esto la información no se puede recuperar y la transmisión es incorrecta. Por la parte de las distancias largas la transmisión se atura a una distancia de 116 mm donde la relación entre el nivel alto y bajo es 5.94. Como comparación la distancia donde el valor de  $V1/V0$  iguala al 70%, o la mitad en potencia, se encuentra a 126mm siendo esperable que estas distancias sean parecidas.

El siguiente caso a estudiar es el más similar a este, el caso 4 que únicamente cambia la iluminación de fondo, cuyo resultado se representa en la figura 15.

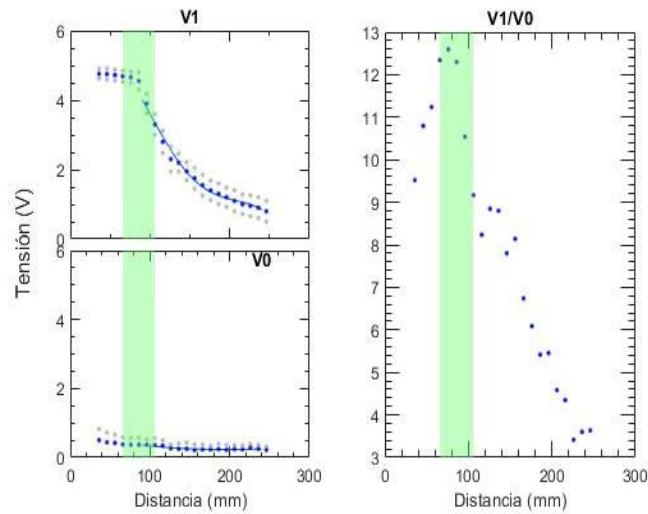


Figura 15: Evolución de la señal con la distancia en el caso 4

En esta podemos ver como los cambios más relevantes en la misma son la disminución del nivel mínimo de señal tanto en el nivel alto a niveles lejanos como en el nivel bajo. Por esto la relación entre ambos consigue un valor mayor. En este caso el valor del 70% sigue consiguiéndose a 116mm, pero en este caso la transmisión se mantiene hasta los 96mm donde la relación de potencias es de 10,54.

Al aproximar los puntos obtenidos se ha aproximado las expresiones  $-0.0033x^2 + 0.2162x + 0.2747$  y  $-0.0000397x^2 + 0.0001177x + 0.51$  para los niveles alto y bajo respectivamente, mientras que el estemos a distancia mayor a 90mm e inferior a 240mm.

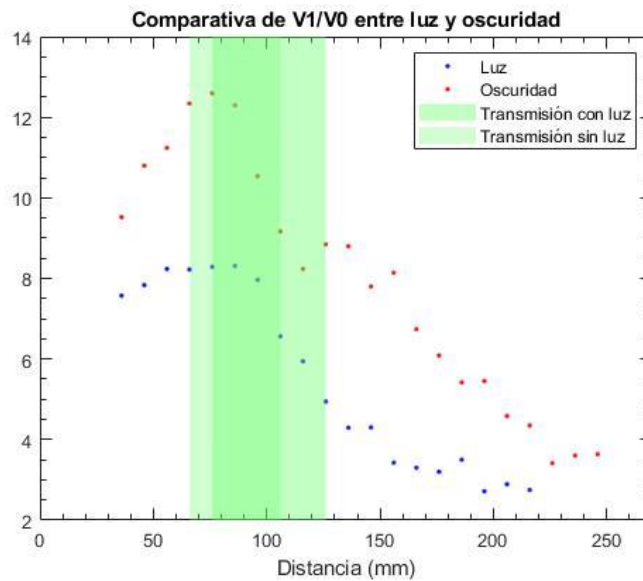


Figura 16: Comparativa casos 3 y 4

Pero para mejor comparación en la figura 16 se han comparado las relaciones entre el nivel alto y bajo de ambos casos. Como ya se ha explicado anteriormente se puede comprobar como el valor es mayor en oscuridad, con un ligero cambio en las distancias largas donde el valor de luz se iguala al valor de oscuridad, aspecto esperado por la falta de señal en estas distancias por lo que predomina el ruido. En cuanto a la transmisión se observa como la zona de un color más oscuro representa la zona con recepción en el entorno luminoso y la zona más clara en entorno oscuro; por la suposición de estas se obtiene un tono muy oscuro donde las dos transmiten y en la parte lejana se consigue más distancia con luz y en la parte cercana se transmite antes en oscuridad.

Para finalizar con estos primeros casos se representarán las medidas normalizadas respecto los valores de entrada, pero como en los niveles bajos la entrada es nula la normalización sería inútil, por lo que se omitirán dichas gráficas y por lo tanto la comparación entre estas. Los resultados de la normalización se aprecian en la figura 17. Estas presentan un comportamiento idéntico a las mostradas anteriormente por el valor constante de la entrada. El aspecto más relevante es ver como no se alcanza un nivel de salida igual a la entrada en ningún momento.

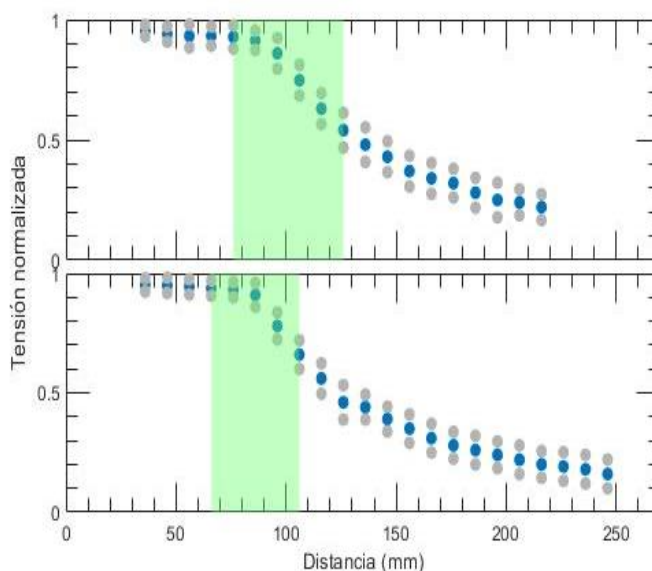


Figura 17: Evolución de la señal en la distancia casos 1 y 2; nivel alto normalizado

#### 4.1.2. Casos 1 y 2

Al cambiar otro de los parámetros, la velocidad de transmisión, obtenemos los casos 1 y 2, así que al compararlos podremos ver como varía la transmisión al cambiar la velocidad de transmisión. En la figura 18 se ven los resultados obtenidos.



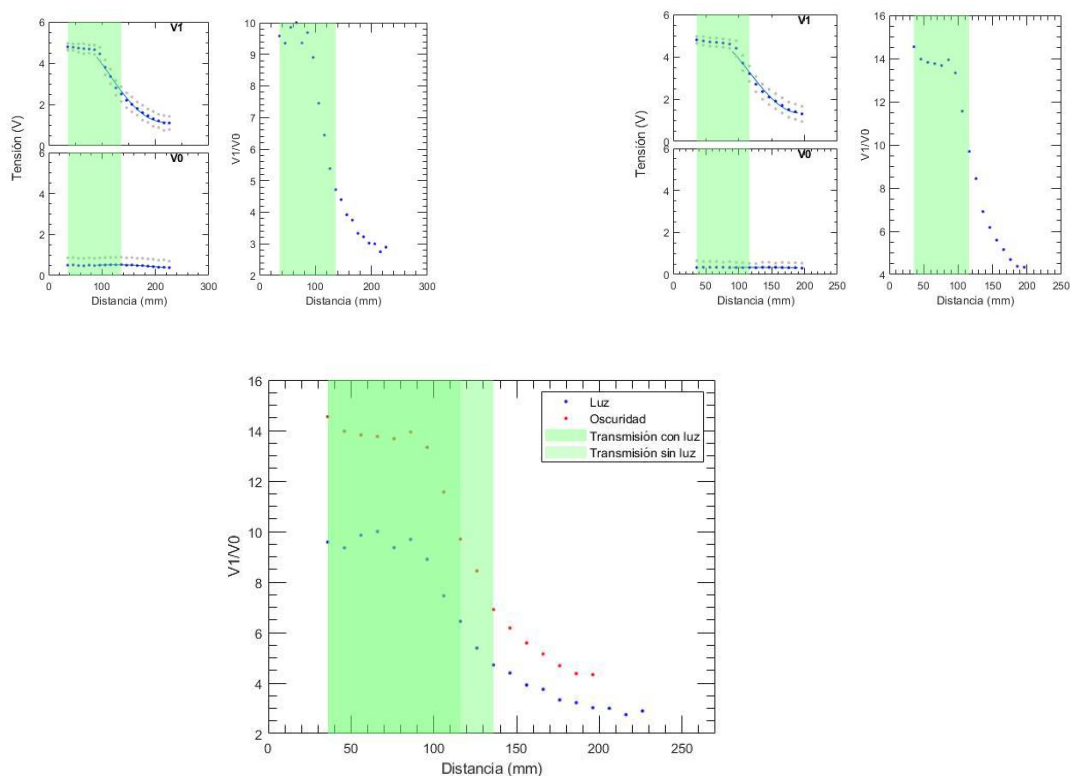


Figura 18: Evolución de la señal en la distancia en los casos 1 y 2

Ahora podemos ver como al reducir la velocidad de transmisión no tenemos el problema anterior donde en los momentos de potencia muy alta no podía leer bien los datos ahora los reconoce a la perfección, y por lo tanto la recepción es correcta mientras la potencia recibida sea la suficiente. En el primero de estos casos, la recepción es interrumpida en la distancia de 126mm donde la relación de tensiones es de 5,38. Siguiendo las medidas de los casos anteriores falta calcular la distancia donde la potencia se reduce a la mitad, obteniendose el valor de 116mm al igual que en el segundo caso. Por diferencia la transmisión más lejana en el caso de oscuridad se detectó a 106mm con un valor de  $V1/V0$  de 11,56.

Los polinomios aproximados en estos casos son validos entre 90mm y 220mm en el caso 1, utilizando la expresión  $-0.002x^2 + 0.144x + 1.5829$  para el nivel alto y  $0.0002055x^2 - 0.00013418x + 0.784$  para el nivel bajo, mientras que en el caso 2 el rango es desde 90mm hasta 190mm con el polinomio  $-0.0017x^2 + 0.1284x + 1.8404$  para el símbolo '1' y  $0.0000186x^2 - 0.0015475x + 0.3754539$  para el símbolo '0'.

### 4.1.3. Casos 5 y 6

Los casos 5 y 6 se diferencian de los casos 3 y 4 que acabamos de representar por la mayor tensión de alimentación al LED por lo que emite con más potencia, que como esta calculado en las ecuaciones (3) y (4) pasamos de 41,7 mW a 272mW. Los resultados obtenidos se resumen en las gráficas de la figura 19:

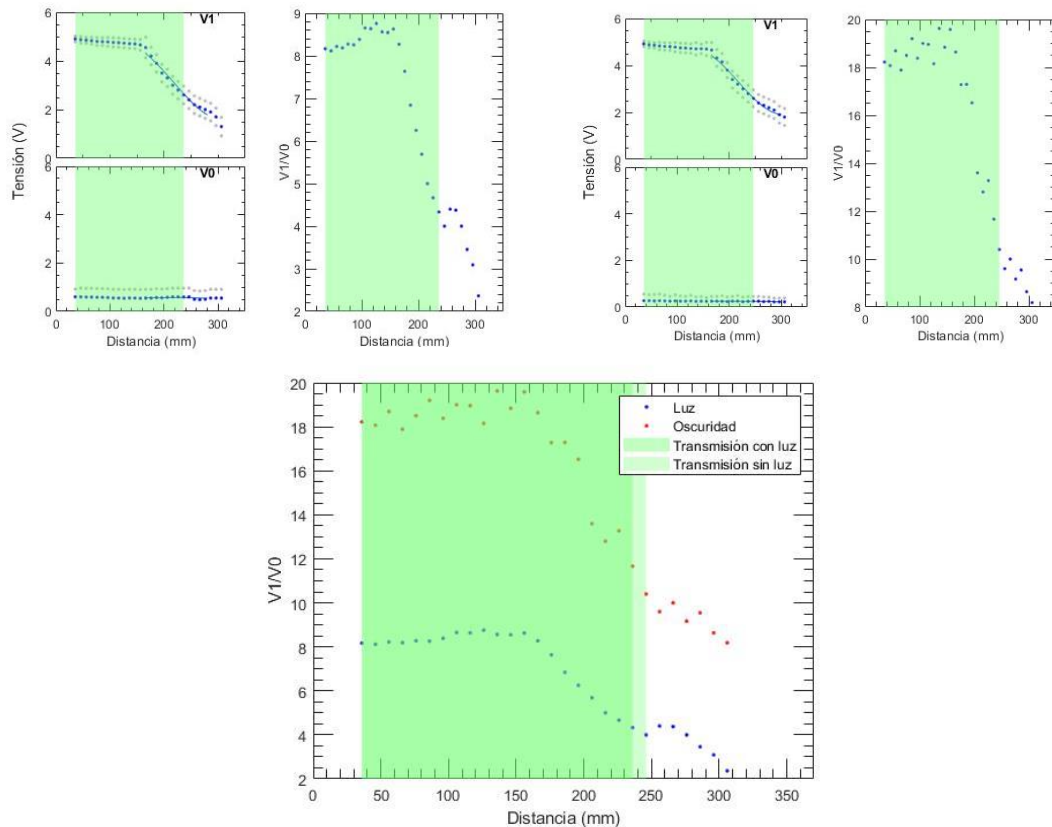


Figura 19: Evolución de la señal con la distancia en los casos 5 y 6

En estas gráficas se observa un comportamiento similar a aquel con una alimentación más baja pero al tener una mayor alimentación se mantiene durante más tiempo la señal con la potencia al máximo, recortada por el amplificador. Por esta mayor potencia recibida la señal se puede recibir adecuadamente hasta los 226mm con una relación de potencias de 4,67 en el caso de ambiente luminoso, por diferencia llega a transmitir hasta los 236mm con una relación de potencias de 11,67. En estos casos las tensiones llegan al 70% de su valor máximo en la distancia de 206mm.

Siguiendo los pasos anteriores exponemos los polinomios aproximados, en el caso 5 estos son válidos entre 165mm y 280mm, con las expresiones  $0.001x^2 - 0.0623x + 6.1957$  y  $0.0000085x^2 - 0.0020545x + 0.6745686$  para los niveles altos y bajos. En el caso 6 las expresiones son válidas entre 165mm y 300mm, y siendo  $0.0012x^2 - 0.0795x + 6.6521$  para el nivel alto y  $-0.0000151x^2 + 0.0006927x + 0.259449$  para el nivel bajo.

#### 4.1.4. Casos 7 y 8

Para finalizar los últimos casos volveremos a analizar el circuito con la velocidad de transmisión alta, obteniendo unos casos con peores prestaciones que los anteriores. Los resultados se representan en la figura 20.

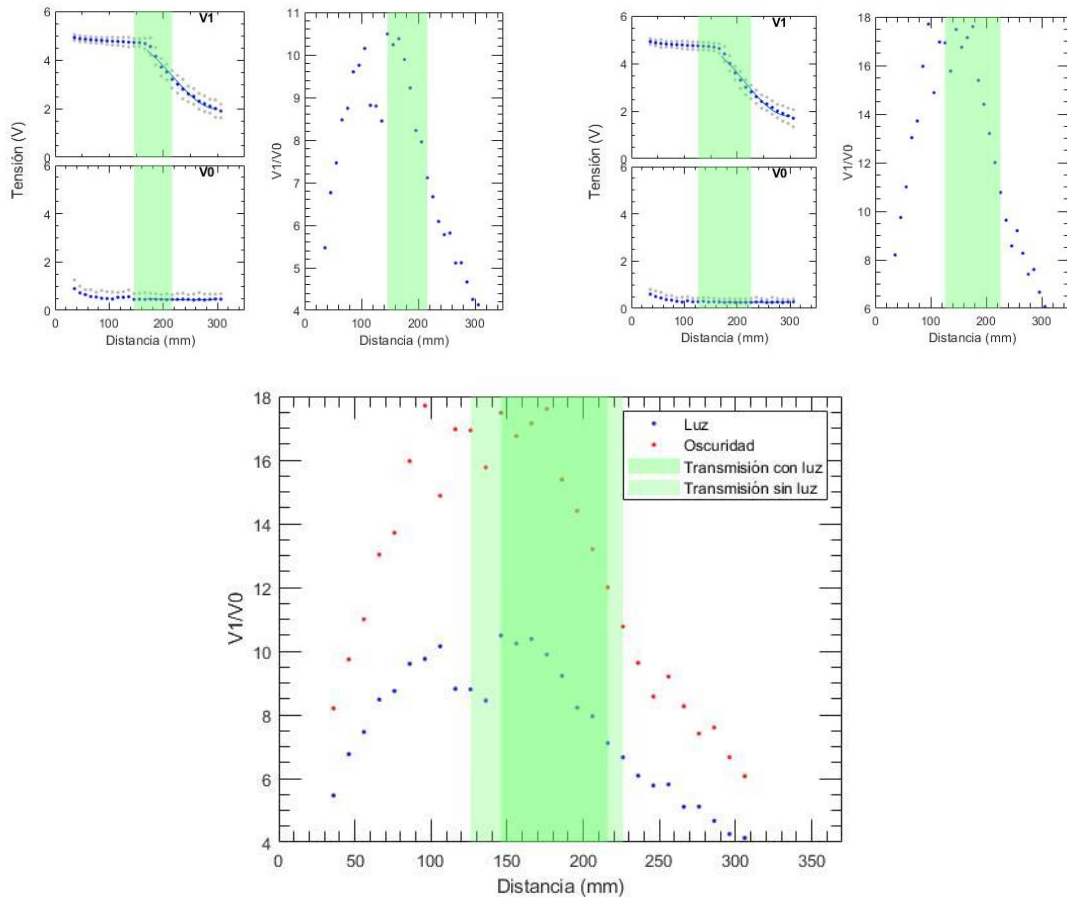


Figura 20: Evolución de la señal con la distancia en los casos 7 y 8

La principal característica destacable es al igual que en los primeros casos la mala transmisión en los casos de máxima potencia, esto en este caso al tener la máxima potencia durante más tiempo la ventana de transmisión se retrasa aún más tiempo. Otra característica a destacar es el ligero pico que podemos ver en las gráficas del nivel bajo, el aumento de tensión es debido a que en estos niveles de potencia a tan altas velocidades el sistema no es capaz de seguir a la perfección la transmisión y por lo tanto en el intervalo del valor bajo aún queda parte de la señal de nivel alto. Por causa de esto la gráfica de la relación entre el nivel alto y bajo forma un máximo en el centro.

Las transmisiones se mantienen hasta la distancia de 206mm y 216mm en los casos 7 y 8, puntos donde los valores de  $V1/V0$  son 7.9545 y 12 respectivamente. En estos casos las distancias necesarias para tener un nivel de tensión al 70% del máximo se llega a la distancia de 216mm.

Las aproximaciones realizadas en este apartado otorgan las expresiones  $0.0013x^2 - 0.0877x + 6.8285$  y  $0.0003x^2 - 0.0308x + 1.6261$  para el caso 7 y los niveles altos y bajos respectivamente en el rango desde 170mm hasta 300mm. En el caso 8 se tiene el mismo rango y las expresiones  $0.0014x^2 - 0.0902x + 6.8557$  y  $0.0002x^2 - 0.0214x + 1.138$  para los niveles altos y bajos.

#### 4.1.5. Conclusiones de las medidas en alineación perfecta

Para finalizar con este grupo de medidas se resumen los principales resultados obtenidos en la tabla 12.

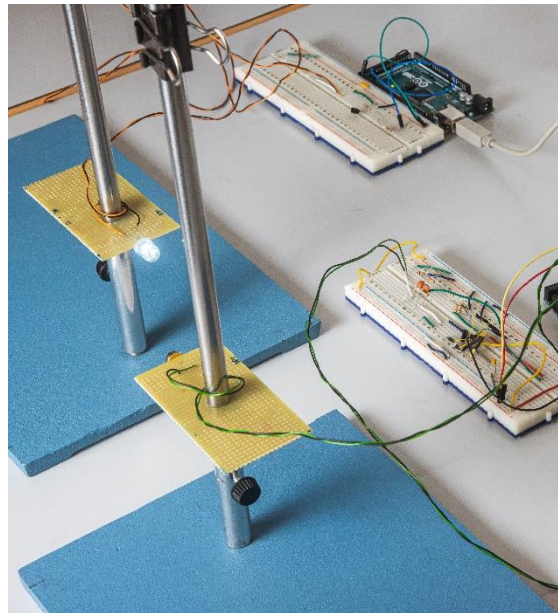
*Tabla 12: Principales resultados de las medidas en alineación perfecta*

Configuración	Distancia transmisión correcta	Distancia V1/V0 (70%)	Nivel V1/V0 transmisión correcta
Caso 1	116 mm	126 mm	5,9434
Caso2	96 mm	116 mm	10,5405
Caso 3	126 mm	116 mm	5,3846
Caso 4	106 mm	116 mm	11,5625
Caso 5	226 mm	206 mm	4,667
Caso 6	236 mm	206 mm	11,667
Caso 7	206 mm	216 mm	7,9545
Caso 8	216 mm	216 mm	12

Done podemos ver como la máxima distancia que hemos conseguido transmitir ha sido 236mm utilizando una alimentación de 12V obteniendo una potencia de 272mW, la cual supone una distancia ligeramente superior a la cual se obtiene la mitad de la potencia máxima obtenida. Respecto al carácter general se transmite hasta una distancia similar a la del 70% de la tensión, que corresponde a un valor de V1/V0 entre 5 y 7 para los casos de luz ambiente y entre 10 y 12 en los casos de oscuridad.

#### 4.2. Medidas en desplazamiento horizontal

Una vez analizados estos casos del primer eje de medida, la distancia, pasaremos a realizar las medidas en el eje horizontal. Para realizarlas se eligen tres distancias y en ellas se desplazará el receptor horizontalmente para obtener un ángulo de medida, un ejemplo de este posicionamiento se encuentra en la figura 21.



*Figura 21: Montaje para la medida en el eje horizontal*

En este eje se han realizado cinco medidas distintas, con una configuración de nivel bajo de tensión y alta velocidad de transmisión, imponiendo las peores condiciones para el sistema. Los casos de medida se describen en la tabla 13

*Tabla 13: Configuraciones casos de medida en eje horizontal*

	Configuración
Caso 1	Distancia de 56mm con luz ambiente
Caso 2	Distancia de 106mm con luz ambiente
Caso 3	Distancia de 106mm sin luz ambiente
Caso 4	Distancia de 186mm con luz ambiente
Caso 5	Distancia de 186mm sin luz ambiente

#### **4.2.1. Caso 1**

Empezando por la primera configuración, repitiendo las mismas gráficas que en las medidas anteriores, pero en este caso las medidas en vez de representarse sobre la distancia longitudinal se representan respecto a la distancia horizontal que se han medido, considerando el desplazamiento hacia la izquierda como negativo y hacia la derecha como positivo. Las gráficas se muestran en la figura 22.

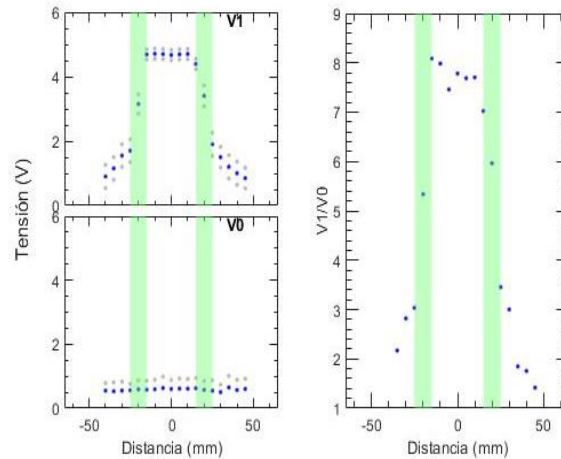


Figura 22: Evolución de la señal en el desplazamiento horizontal

En la gráfica se puede observar como el nivel bajo tiene el mismo comportamiento que en los casos anteriores, cumpliendo así el comportamiento del ruido. En el nivel alto se muestra una gráfica centrada en el cero, es decir alineación perfecta, lugar donde se encuentra el máximo y decrece conforme se aleja de este. Este comportamiento se mantiene en la relación de los niveles gracias a la planitud del nivel bajo. En cuanto a la transmisión seguimos viendo que en altas velocidades mientras la potencia es demasiado grande no se puede recibir correctamente.

En este eje uno de los puntos más importantes a estudiar es el ancho de haz, que en esta gráfica si consideramos como límite el punto donde la señal tiene la mitad de potencia que en el máximo, se obtiene que estos puntos se encuentran a 20mm de distancia a la izquierda y a 25mm de distancia a la derecha, con un ángulo equivalente de  $38,78^\circ$ . En este caso la transmisión no se cumple en las cercanías del transmisor por el problema ya mencionado anteriormente y una vez transmitiendo esta se interrumpe a en ambas direcciones a 20mm de la alineación perfecta, con unos niveles de potencia de 5,339 en la parte izquierda y de 5,9649 en la derecha.

#### 4.2.2. Casos 2 y 3

Al pasar a los siguientes casos se tienen los casos 2 y 3 con la única diferencia de estos reside en la iluminación por lo que se compararan conjuntamente al igual que se ha hecho anteriormente, obteniéndose la figura 23.

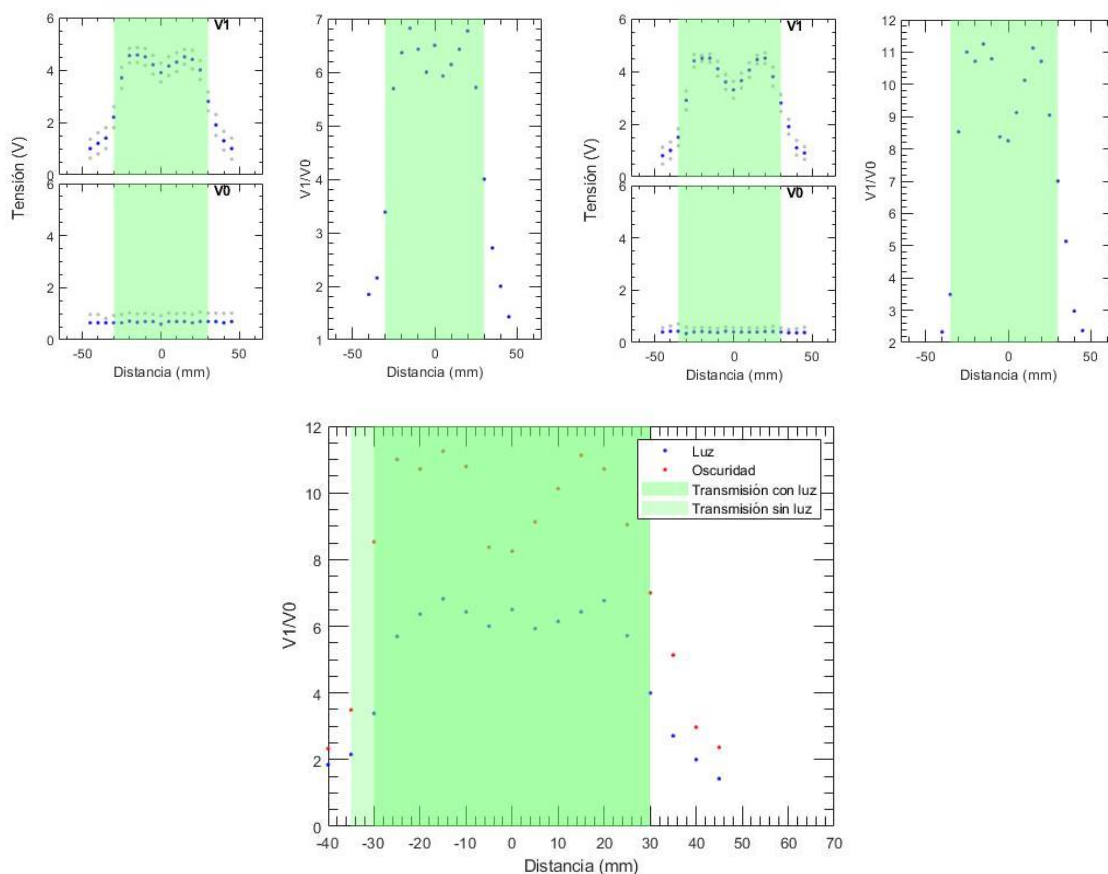


Figura 23: Evolución de la señal en el desplazamiento horizontal en los casos 2 y 3

En estas gráficas muestran como en esta distancia de 106mm la potencia es suficiente mente baja como para mantener la comunicación en la región de máxima potencia, pero la característica más destacada corresponde al pico encontrado en la zona central. En cuanto a la transmisión esta se cumple entre los -25mm con una potencia de 5,69 y los 25mm con una potencia 5,71, en el caso con luz ambiente, en cambio en el caso oscuro esta se cumple entre los -30mm con una potencia de 8,53 y los 25mm con una potencia de 9,05. En cuanto a los anchos de banda en el caso luminoso se obtiene más de la mitad de potencia entre los -30mm y los 30mm con un ángulo equivalente de 29,51° mientras que en oscuridad este se encuentra entre -35mm y 30mm por lo que el ángulo es de 31,5169°, ambos muy cercanos a los teóricos 30° del LED.

#### 4.2.3. Casos 4 y 5

En los últimos casos se repite el procedimiento anterior consiguiéndose el resultado de la figura 24, obteniendo como resultados más notables la falta de transmisión a dicha distancia por falta de potencia, y la repetición del pico anterior en la región central. En cuanto al resto de resultados destacamos el ancho de banda, donde los puntos de media potencia se encuentran a -50mm y 45mm en el caso 7 mientras que en el caso 8 se tienen a -40mm y 40mm. Por esto una vez calculado el ángulo equivalente obtenemos anchos de 27,06° y de 23,27° para los casos 7 y 8 respectivamente.



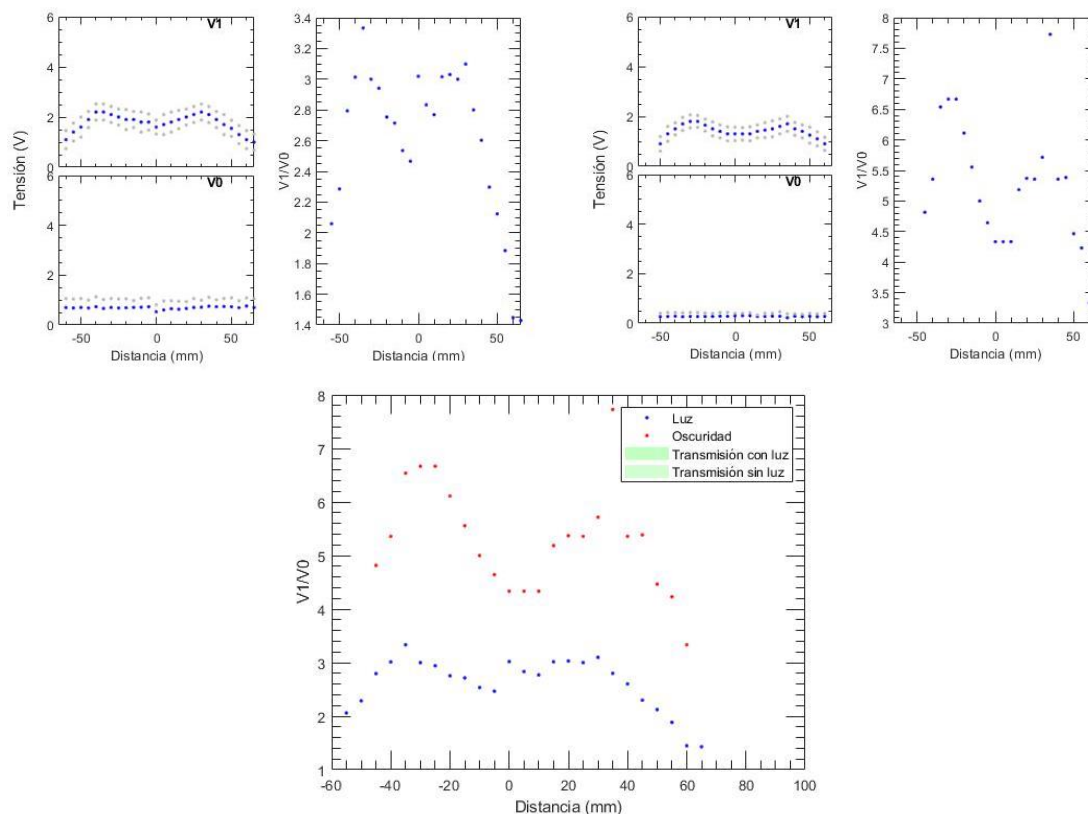


Figura 24: Evolución de la señal en el desplazamiento horizontal en los casos 4 y 5

#### 4.2.4 Conclusiones en las medidas en horizontal

Al igual que en el caso anterior se presenta a continuación un resumen de los principales datos obtenidos en estas medidas:

Tabla 14: Conclusiones de las medidas en desplazamiento horizontal

Configuración	Distancia transmisión correcta		Distancia V1/V0 (70%)		Nivel V1/V0 transmisión correcta		Ancho de haz
	Izquierda	Derecha	Izquierda	Derecha	Izquierda	Derecha	
Caso 1	20mm	20mm	20mm	25mm	5,3390	5,9649	38,78°
Caso 2	25mm	25mm	30mm	30mm	5,6923	5,7143	29,5115°
Caso 3	30mm	25mm	35mm	30mm	8,5294	9,0476	31,5169°
Caso 4	-	-	50mm	45mm	-	-	27,0558°
Caso 5	-	-	40mm	40mm	-	-	23,2729°

En la tabla podemos ver como al igual que en las medidas anteriores el nivel de V1/V0 donde la transmisión deja de ser valida esta alrededor de 5 en el caso con luz ambiente y cercano a 9 en el caso de oscuridad, por las medidas en horizontal podemos ver como las distancias tanto de transmisión como de media potencia son similares en ambas direcciones y los anchos de haz se encuentran alrededor de los 30° teóricos del LED.



### 4.3. Medidas en desplazamiento vertical

En el último grupo de medidas estas se han realizado desplazando verticalmente el receptor realizando un barrido según el eje en el que mueve. Una representación de la situación durante las medidas se muestra en la figura 25. En este montaje similar al anterior se han realizado seis casos de medida, estos se describen en la tabla 15 con la configuración de alta velocidad y alimentación de 5V para el LED.

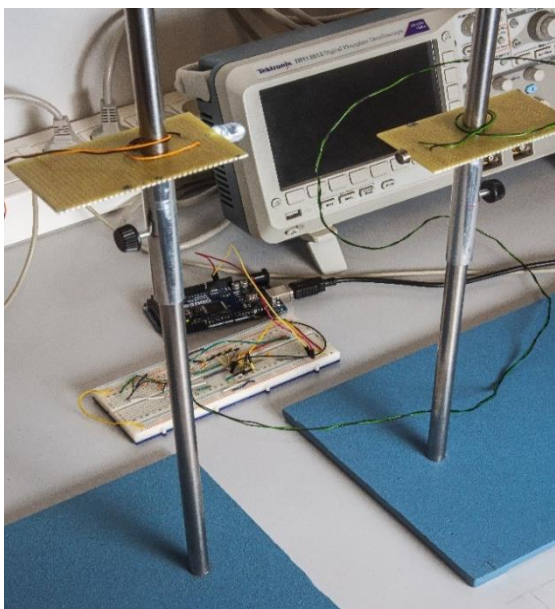


Figura 25: Montaje para la medida del eje vertical

Tabla 65: Casos de medida en el eje vertical

	Configuración
Caso 1	Distancia de 56mm con luz ambiente
Caso 2	Distancia de 56mm sin luz ambiente
Caso 3	Distancia de 106mm con luz ambiente
Caso 4	Distancia de 106mm sin luz ambiente
Caso 5	Distancia de 186mm con luz ambiente
Caso 6	Distancia de 186mm sin luz ambiente

#### 4.3.1. Casos 1 y 2

En este caso la distancia entre el transmisor y el receptor es de 56mm, teniendo una alta potencia recibida. Similar al procedimiento de las medidas anteriores representaremos el nivel alto, el nivel bajo y la relación entre ellos. Los resultados obtenidos para los casos 1 y 2 se pueden apreciar en la figura 26.

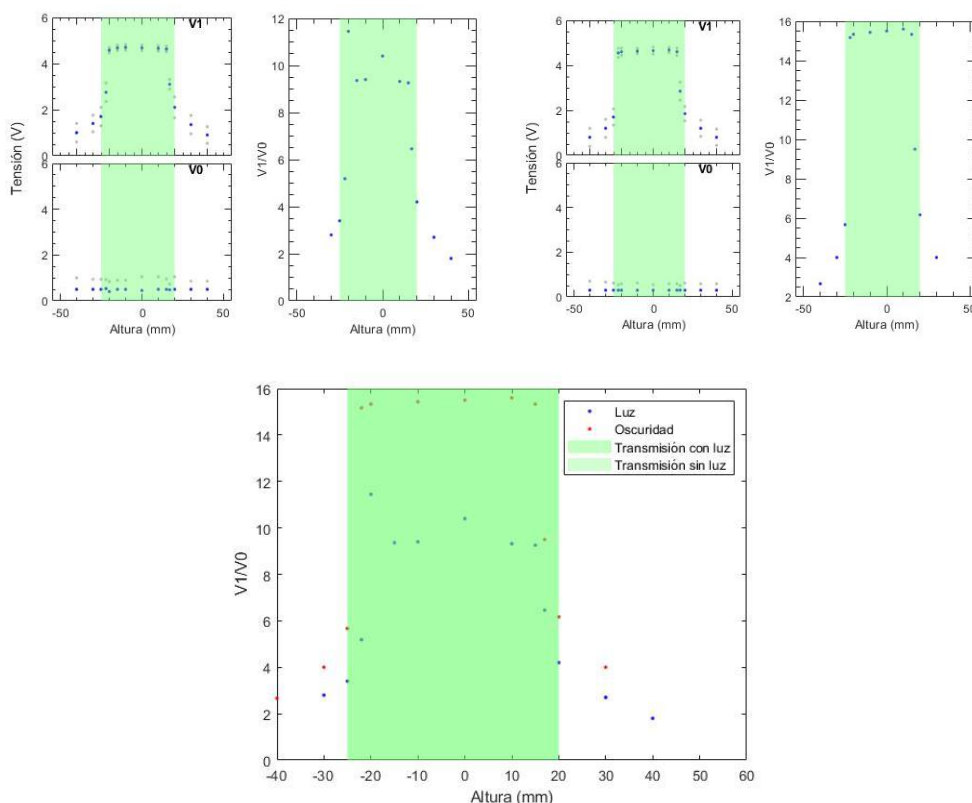


Figura 26: Evolución de la señal con el desplazamiento vertical en los casos 1 y 2

En las gráficas apreciamos un comportamiento similar al caso anterior con un máximo en el centro, en la alineación perfecta y un decrecimiento según aumenta la distancia, manteniéndose en las cercanías y rápidamente decayendo. Para el cálculo del ancho de banda primero obtendremos la distancia donde la potencia es la mitad de la máxima, la cual corresponde con -22mm y 17mm para el caso 1 y de -25mm y 17 mm para el caso 2, con estas distancias podemos calcular los anchos de banda como  $34,8545^\circ$  y  $21,6148^\circ$ . En cuanto a la transmisión esta se mantiene entre -22mm y 17mm para los dos casos, con unos niveles de potencia de 5,19 y 6,45 para el caso 1 mientras que en el caso 2 se tienen niveles de  $V1/V0$  de 15,17 y 9,5.

### 4.3.2. Casos 3 y 4

En estos casos la distancia entre los componentes es de 106mm. Los resultados obtenidos se encuentran en la figura 27.

En esta gráfica se observa un comportamiento diferente a las gráficas vistas hasta el momento, a pesar de tener la misma estructura de un mínimo local en el centro y al alejarse de este después del máximo la señal disminuye notablemente. La gran diferencia entre estas gráficas es la menor caída de potencia en la parte negativa de la gráfica, siendo probablemente por la construcción de la sala donde se realizaron las medidas, que al tener una pequeña ventana en lo alto la luz que entra por ella se recoge mejor la luz en unas posiciones que otras. Esto se reafirma al ver como este carácter es más pronunciado en el caso sin luz, donde la luz de esta ventana obtiene más importancia.

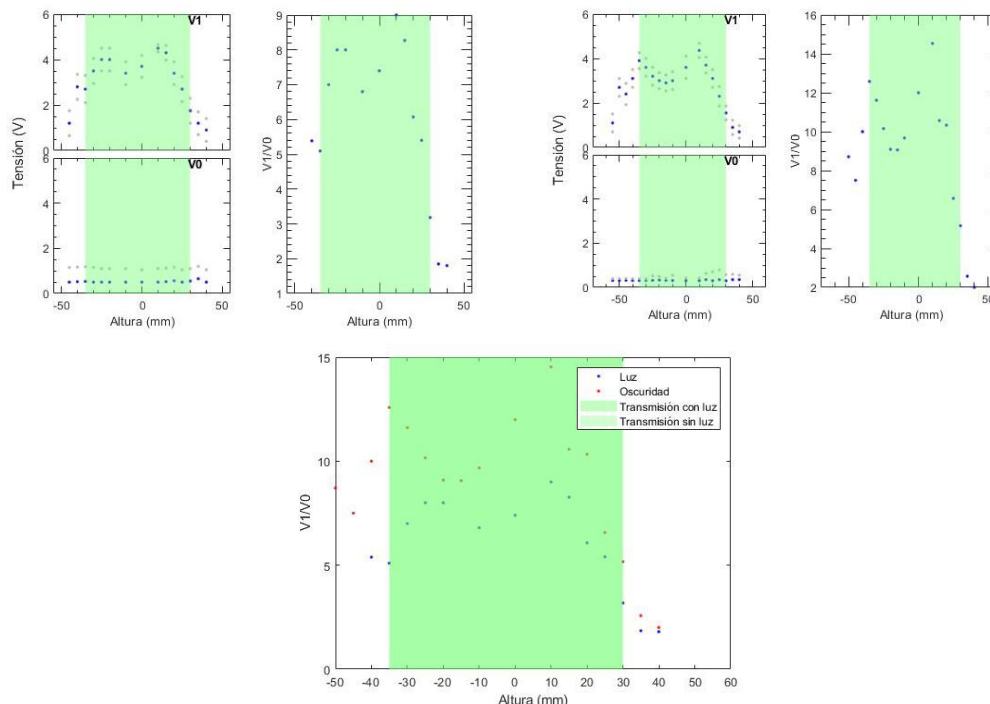


Figura 27: Evolución de la señal con el desplazamiento vertical

La transmisión en este caso se mantiene entre -30mm y 25mm para ambos casos, con unos niveles de potencia de 7 y 5,4 en el caso con luz y de 11,61 y 6,57 en el caso oscuro. Los anchos de banda se calculan entre los puntos -35mm y 20mm para el caso 3 mientras que en el caso 4 se tienen los puntos -40mm y 25mm. Por lo tanto los anchos de banda resultan en 27,43° y 19,26° para los dos casos expuestos.

### 4.3.3. Casos 5 y 6

Finalmente, en estos casos el transmisor y el receptor se alejarán 186mm, obteniéndose los resultados mostradas en la figura 28.

En este resultado no se observa ninguna característica no vista anteriormente, por la lejanía no recibe suficiente potencia para detectar la señal, por lo que no se recibe en ningún momento. Al igual que en los casos anteriores esta tiene un mínimo en el centro y después del pequeño crecimiento que esto comporta disminuye al alejarse del mismo. También se aprecia como la señal disminuye más lentamente en la parte negativa como en el caso anterior.

Por la nula transmisión solamente calculamos el ancho de banda, que a partir de los puntos -60mm y 40 mm en el caso 5 se obtiene un ancho de 28,26° y en el caso 6 se utilizan los puntos -50mm y 70mm con el resultado de 32,83°.

### 4.3.4. Conclusiones de las medidas en desplazamiento vertical

Al igual que en los otros casos se adjunta la tabla 16 con un resumen de los resultados más importantes obtenidos. De estas podemos destacar nuevamente un valor del ancho de banda cercano a

## Implementación experimental de un enlace óptico inalámbrico para comunicaciones en la región visible (VLC)

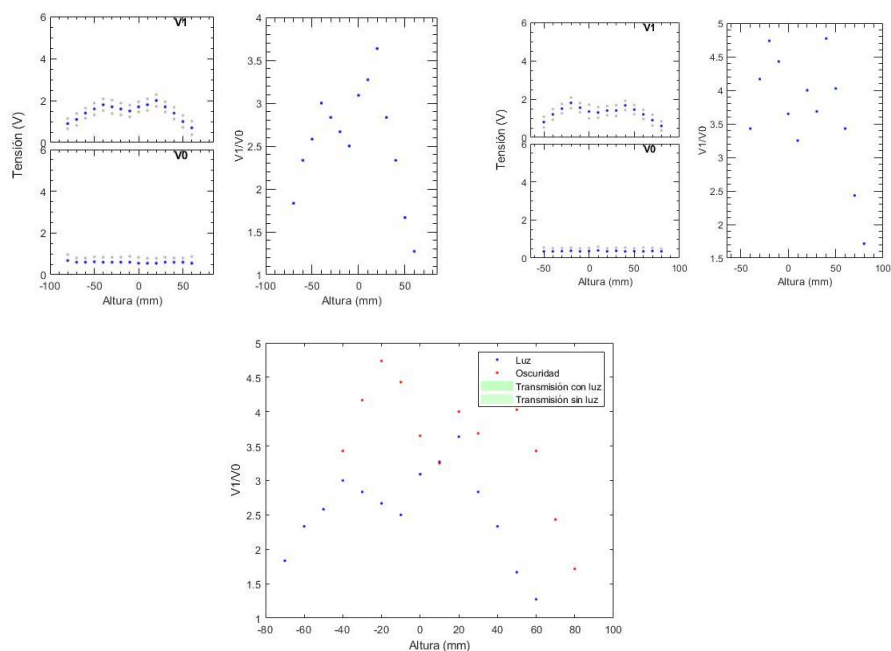


Figura 28: Evolución de la señal con el desplazamiento horizontal

los 30° pero con mayores variaciones que en el caso anterior, los niveles donde se atura la transmisión siguen siendo similares a los anteriores pero en este caso la menor simetría que en los casos anteriores puede estar afectando a los resultados.

Tabla 16: Conclusiones de las medidas en desplazamiento vertical

Configuración	Distancia transmisión correcta		Distancia V1/V0 (70%)		Nivel V1/V0 transmisión correcta		Ancho de banda
	Izquierda	Derecha	Izquierda	Derecha	Izquierda	Derecha	
Caso 1	22mm	17mm	22mm	17mm	5,1887	6,4583	34,8545
Caso 2	22mm	17mm	25mm	17mm	15,1667	9,5	21,6148
Caso 3	30mm	25mm	35mm	20mm	7	5,4	27,4234
Caso 4	30mm	25mm	40mm	25mm	11,6129	6,5714	19,2626
Caso 5	-	-	60mm	40mm	-	-	28,2640
Caso 6	-	-	50mm	70mm	-	-	32,8285

#### 4.4 Medidas en desplazamiento angular

Para finalizar las medidas se ha medido realizando un desplazamiento azimutal, que por la dificultad de realizarlo solamente se ha realizado en un radio de 150 mm, luz ambiente, 500000bps y alimentación de 5V. El resultado se ha expresado en la figura 29, obteniendo unos resultados similares a los anteriores, con el pico inverso en la alineación perfecta y un ancho de haz de 35,55°.

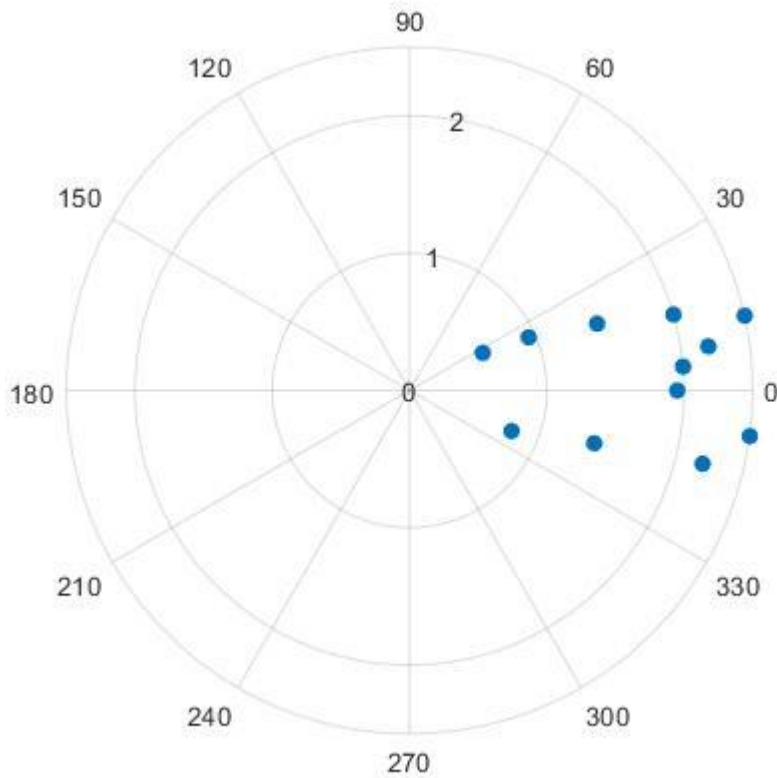


Figura 29: Medidas en desplazamiento azimutal

## 5. Presupuesto

Para realizar el presupuesto se buscarán en alguna de las diferentes tiendas que ofrecen productos online, que en este caso es RS Components. Como los precios se ofertan sin impuestos sobre el valor añadido, VAT ( o IVA en España), este presupuesto se calculará sin contarlos y al final se añadirá un 21% del valor como cálculo del impuesto.

Primeramente, revisamos los componentes principales, siendo estos el fotodiodo, el LED, el amplificador de transimpedancia, el transistor y los Arduino; a continuación se buscarán los elementos menores como resistencias y condensadores. Tener en cuenta que normalmente este tipo de componentes suelen tener un precio menor si se compran en grandes unidades o incluso es necesario comprarlos por lotes.

- Arduino, según la tienda oficial de la empresa Arduino [24], el modelo elegido tiene un precio de 35€ por unidad, que al tener dos se obtiene una suma de 70€.
- El amplificador de transimpedancia OPA380 tiene un precio de 5,5€ [25]
- El fotodiodo BPV10 tiene un precio de 0,33€ en un mínimo de 1000 unidades [26].
- El LED no fue posible encontrar su precio online en ninguna tienda, por lo que se eligió uno similar en características para aproximar su precio el cual tenía un coste de 0,36€ [27].
- El transistor 2N33904 NPN tiene un coste de 0,032€ con mínimo de 2000 unidades [28].
- Los condensadores, de 1pF [29] y 1uF [30]; tiene unos precios de 0.46€ y 1,11€ respectivamente.
- Las resistencias, de 600k $\Omega$  [31], 1k $\Omega$  [32], 49k $\Omega$  [33] y 110 $\Omega$ [34]; tienen unos precios de 0.021€, 0,12€, .0,056€ y 0.13€ respectivamente. En estos casos por causa de no obtener siempre valores exactos se elige uno cercano y si fuese necesaria la exactitud se podría utilizar varias en paralelo o serie para obtener dicho resultado.
- En cuanto a la estructura utilizada para realizar las medidas su valor se estimará alrededor de los 20€.

Finalmente, la suma total del mismo corresponde a 98.119 € y si añadimos el 21% de VAT se obtiene un valor de 118.72€. A continuación se resume este presupuesto mediante una tabla:

Tabla 17: Presupuesto

Componente	Precio sin VAT (€)	Numero unidades	Total sin VAT
Arduino	35	2	70
OPA380	5,5	1	5,5
Fotodiodo BPV10	0,33	1	0,33
LED blanco	0,36	1	0,36
Transistor 2N3904 NPN	0,032	1	0,032
Condensador de retroalimentación (1pF)	0,46	1	0,46
Condensador $C_{RN}$ (1uF)	1,11	1	1,11
Resistencia retroalimentación (600k $\Omega$ )	0,021	1	0,021
R1 (1k $\Omega$ )	0,12	1	0,12
R2 (49k $\Omega$ )	0,056	1	0,056
Rc (110 $\Omega$ )	0,13	1	0,13
Estructura	20	1	20
Total sin VAT			98,119
Total en IVA (21%)			118,72

## **6. Conclusiones y líneas futuras**

### **6.1. Conclusiones**

La conclusión que se obtiene de este trabajo es haber implementado por primera vez en el grupo de investigaciones ópticas de la Universitat Politècnica de València que se implementa un enlace VLC para la transmisión de datos binarios.

En cuanto a las velocidades obtenidas se ha obtenido como máxima velocidad 1 Mbps, pero por la dificultad de conseguirlo y la inestabilidad de la transmisión de datos se decidió realizar las pruebas con un máximo de 500 kbps donde la transmisión es completamente estable. Aún así a altas velocidades cuando la potencia es muy alta se encuentran problemas que impiden detectar correctamente la señal. Por esto en transmisiones de muy corta distancia sería oportuno disminuir la potencia transmitida para poder transmitir a altas velocidades.

En cuanto a la distancia, la máxima a la cual hemos obtenido transmisión a la máxima velocidad medida esta fue de 226mm en condiciones de oscuridad y de 216mm en condiciones de luz, en el caso de utilizar una velocidad menor este aumentó hasta 235mm en oscuridad y 245 mm en luz. Por estos resultados podemos ver como la diferencia entre tener luz ambiente o no en el caso de la distancia de transmisión no es restrictivo y su influencia es casi despreciable.

Al analizar la relación  $V1/V0$  los valores son similares en los distintos casos con la gran diferencia de valor entre las medidas realizadas en oscuridad y las realizadas con luz. En las primeras la relación es aproximadamente el doble que en el segundo caso, considerando que los valores en los niveles altos son prácticamente iguales, esto nos indica que más importante que la relación entre los dos niveles es la tensión es el propio valor del nivel alto.

En cuanto al ancho de haz en el eje vertical se obtuvo un valor cercano a los 30° especificados por el fabricante del LED, manteniéndose dentro de los parámetros esperados. Comparándolo con las distancias de máxima transmisión en los casos horizontales y verticales la transmisión se mantiene aproximadamente dentro del ancho de haz.

Al comparar los resultados con los distintos niveles de potencia podemos comprobar como esta prácticamente ha doblado su valor con un incremento de potencia de cinco veces mayor. Como se explicará en las líneas futuras esto nos permitirá escalar el prototipo a un nivel de potencia mayor donde permitiría comunicar a mayores distancias.

### **6.2 Líneas futuras**

Considerando nuestro prototipo el principal problema que podría encontrarse es la falta de realidad en el entorno de las medidas, ya que estas se realizan en un montaje encima de una mesa. En caso de querer mejorarlo se debería realizar un cambio de modelo e intentar utilizar como fuente una bombilla LED en vez de solamente un LED aislado, de esta forma nos acercaríamos a un uso real y



podríamos gracias a su mayor potencia máxima llegar a distancias más cercanas a las esperadas en la realidad donde la iluminación se encuentra en el techo de la estancia.

Considerando que nuestro prototipo ha utilizado un LED con una potencia máxima de 272mW y una iluminación de máximo 20000 milicandelas, como se indica en la tabla 5. Si utilizásemos un LED comercial, como podría ser el IKEA LEDARE LED1012G5 utilizado en [35] con una potencia nominal de 3.5W y una iluminación de 200 lúmenes. Para compararlo se obtiene que las 20 candelas con un ángulo de radiación de 30° equivalen aproximadamente a 4 lúmenes. Sabiendo esto podemos extrapolar nuestros datos desde unas distancias de 236mm como máximo a probablemente ordenes cercanos a los necesarios en la vida real ya que tanto en potencia y sobre todo iluminación el incremento es mayor a un orden de magnitud.

Otro problema que podríamos encontrarnos es la interferencia de otro sistema de las mismas características ya que si se recibe luz proveniente de varias bombillas estas podrían transmitir una información distinta. Finalmente, el último reto sería plantear el enlace ascendente para facilitar la comunicación bidireccional. Adicionalmente también sería posible implementar un sistema con diferentes modulaciones para obtener una mayor velocidad de transmisión.

## Referencias

- [1] Pengfei Hu, Parth H. Pathak, Aveek K. Das, Zhicheng Yang and Prasant Mohapatra. PLiFi: Hybrid WiFi-VLC Networking using Power Lines. Proceedings of the 3<sup>rd</sup> workshop on visible light communication systems, pages 31-36, 2016
- [2] Proyecto europeo IoRL. <https://cordis.europa.eu/project/rcn/211086/factsheet/en>
- [3] Proyecto europeo VisIon. <https://cordis.europa.eu/project/rcn/211543/factsheet/en>
- [4] Xiaoli Sun, David R. Skillman, Evan D. Hoffman, Dandan Mao, Jan F. McGarry, Leva McIntire, Ronald S. Zellar, Frederic M. Davidson, Wai H. Fong, Michael A. Krainak, Gregory A. Neumann, Maria T. Zuber, and David E. Smith. Free space laser communication experiments from Earth to the Lunar Reconnaissance Orbiter in lunar orbit. *Optics Express* Vol. 21, Issue 2, pp. 1865-1871 (2013).
- [5] R. Shaaban, S. Faruque, "A survey of indoor visible light communication power distribution and color shift keying transmission", *IEEE International Conference on Electro Information Technology (EIT)*, pp. 149-153, 2017.
- [6] Kaiyun Cui, Gang Chen, Zhengyuan Xu, and Richard D Roberts. Traffic light to vehicle visible light communication channel characterization. *Applied optics*, 51(27), 2012.
- [7] Toshihiko Komine and Masao Nakagawa. Fundamental analysis for visible-light communication system using led lights. *IEEE trans. On Consumer Electronics*, 50(1):100–107, 2004.
- [8] J Grubor, OC Jamett, JW Walewski, S Randel, and K-D Langer. High-speed wireless indoor communication via visible light. *ITGFachbericht-Breitbandversorgung in Deutschland-Vielfalt für alle?*, 2007.
- [9] Katrina D Dambul, Dominic C O'Brien, and Grahame Faulkner. Indoor optical wireless mimo system with an imaging receiver. *IEEE photonics technology letters*, 23(2):97–99, 2011.
- [10] Ahmad Helmi Azhar, T Tran, and Dominic O'Brien. A gigabit/s indoor wireless transmission using mimo-ofdm visible-light communications. *IEEE Photonics Technology Letters*, 25(2):171–174, 2013.
- [11] Zhao Tian, Kevin Wright, and Xia Zhou. The darklight rises: visible light communication in the dark: demo. In *Proceedings of the 22<sup>nd</sup> Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, pages 495–496. ACM, 2016.
- [12] <https://hackaday.com/2018/06/13/esp8266-uses-lifi-to-get-on-wifi/>
- [13] Ram Sharma, A. Charan Kumari, Mona Aggarwal, Swaran Ahuka. Performance analysis of LED based indoor VLC system under receiver mobility.
- [14] Sihua Shao, Abdallah Khreishah, and Issa Khalil. Joint Link Scheduling and BrightnessControl for Greening VLC-Based IndoorAccess Networks.
- [15] Lin Cheng, Hsin-Mu Tsai, Wantanee Viriyasitavat, and Mate Boban. Comparison of radio frequency and visible light propagation channel for vehicular communications. In *Proc. of ACM International Workshop on Smart, Autonomous, and Connected Vehicular Systems and Services*, pages 66–67, 2016.
- [16] Isamu Takai, Shinya Ito, Keita Yasutomi, Keiichiro Kagawa, Michinori Andoh, and Shoji Kawahito. Led and cmos image sensor based optical wireless communication system for automotive applications. *IEEE Photonics Journal*, 5(5):6801418–6801418, 2013.
- [17] Liqun Li, Pan Hu, Chunyi Peng, Guobin Shen, and Feng Zhao. Epsilon: A visible light based positioning system. In *NSDI*, pages 331–343, 2014.

- [18] Oubei, Changping, Hassan Makine Li, Ki-Hong Park, Tien Khee Ng, Mohamed-Slim Alouini, and Boon S Ooi. 2.3 gbit/s underwater wireless optical communications using directly modulated 520 nm laser diode. *Optics express*, 23(16):20743–20748, 2015.
- [19] Sridhar Rajagopal, Richard D. Roberts, Sang-Kyu Lim. IEEE 802.15.7 Visible Light Communication: Modulation Schemes and Dimming Support.
- [20] Elham Sarbazi, Murat Uysal. PHY Layer Performance Evaluation of the IEEE 802.15.7 Visible Light Communication Standard
- [21] Alin-Mihai Cailean and Mihai Dimian. Impact of IEEE 802.15.7 Standard on Visible Light Communications Usage in Automotive Applications.
- [22] <https://www.oledcomm.net/>
- [23] <https://www.signify.com/global>
- [24] <https://store.arduino.cc/mega-2560-r3>
- [25] <https://uk.rs-online.com/web/p/transimpedance-amplifiers/6612498/>
- [26] <https://uk.rs-online.com/web/p/photodiodes/1656173/>
- [27] <https://uk.rs-online.com/web/p/leds/1461317/>
- [28] <https://uk.rs-online.com/web/p/bjt-bipolar-transistors/1241317/>
- [29] <https://uk.rs-online.com/web/p/ceramic-single-layer-capacitors/8312910/>
- [30] <https://uk.rs-online.com/web/p/mlccs-multilayer-ceramic-capacitors/5381578/>
- [31] <https://uk.rs-online.com/web/p/through-hole-fixed-resistors/1695311/>
- [32] <https://uk.rs-online.com/web/p/through-hole-fixed-resistors/7077666/>
- [33] <https://uk.rs-online.com/web/p/through-hole-fixed-resistors/1664476/>
- [34] <https://uk.rs-online.com/web/p/through-hole-fixed-resistors/0148275/>
- [35] Stefan Schmid, Josef Ziegler, Giorgio Corbellini, Thomas R. Gross and Stefan Mangold. Using Consumer LED Light Bulbs for Low-Cost Visible Light Communications Systems.
- [36] Luiz Eduardo Mendes Matheus, Alex Borges Vieira, Luiz F. M. Vieira, Marcos A. M. Vieira, Omprakash Gnawali. Visible Light Communication: Concepts, Applications and Challenges

**ANNEXO I: Catálogo LED YSL-R1042WC-D15**



**深圳市煜森照明有限公司**  
**CHINA YUNSUN LED LIGHTING CO., LTD.**

TEL: (86) 755-28079401 28079402 28079403 28079404 28079405  
 FAX: (86) 755-28079407 E-mail: info@100LED.com Web: www.100LED.com

**Model No.: YSL-R1042WC-D15**

**Applications:**

- |                  |                |
|------------------|----------------|
| Decorations      | Illuminations  |
| Advertising Sign | Traffic Lights |
| Indicators       | Flashlights    |

**Absolute Maximum Ratings: (Ta=25°C)**

ITEMS	Symbol	Absolute Maximum Rating	Unit
Forward Current	$I_f$	80	mA
Peak Forward Current	$I_{fP}$	120	mA
Suggestion Using Current	$I_{su}$	65-75	mA
Reverse Current (Vr=5V)	$I_R$	10	μA
Power Dissipation	$P_D$	180	mW
Operation Temperature	$T_{op}$	-40 ~ 85	°C
Storage Temperature	$T_{stg}$	-40 ~ 100	°C
Lead Soldering Temperature	$T_{sol}$	Max. 260°C for 3 Sec. Max. (3mm from the base of the epoxy bulb)	

**Absolute Maximum Ratings: (Ta=25°C)**

ITEMS	Symbol	Test condition	Min.	Typ.	Max.	Unit
Forward Voltage	$V_f$	$I_f=80mA$	3.0	---	3.4	V
Wavelength (nm) or TC(k)	$\Delta \lambda$	$I_f=80mA$	5500	---	6500	K
*Luminous intensity	$I_v$	$I_f=80mA$	16000	---	20000	MCD
50% Viewing Angle	$2\theta$	$I_f=80mA$	---	30	---	DEGREE

**ANNEXO II: Catálogo OPA 380**



**OPA380  
OPA2380**

SBOS291G – NOVEMBER 2003 – REVISED SEPTEMBER 2007

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS: OPA380 (SINGLE),  $V_S = 2.7V$  to  $5.5V$**

**Boldface** limits apply over the temperature range,  $T_A = -40^\circ C$  to  $+125^\circ C$ .

All specifications at  $T_A = +25^\circ C$ ,  $R_L = 2k\Omega$  connected to  $V_{G2}$ , and  $V_{OUT} = V_{G2}$ , unless otherwise noted.

PARAMETER	CONDITION	OPA380			UNITS
		MIN	TYP <sup>1</sup>	MAX	
<b>OFFSET VOLTAGE</b>					
Input Offset Voltage	$V_S = +5V, V_{CM} = 0V$		4	25	$\mu V$
Drift			<b>0.03</b>	<b>0.1</b>	$\mu V/^\circ C$
vs Power Supply	$V_S = +2.7V$ to $+5.5V, V_{CM} = 0V$		2.4	10	$\mu V/V$
Over Temperature	$V_S = +2.7V$ to $+6.5V, V_{CM} = 0V$			<b>10</b>	$\mu V/V$
Long-Term Stability <sup>(1)</sup>			See Note (1)		
Channel Separation, dc			1		$\mu V/V$
<b>INPUT BIAS &amp; CURRENT</b>					
Input Bias Current	$V_{CM} = V_{G2}$		3	±50	pA
Over Temperature			Typical Characteristics		
Input Offset Current	$V_{CM} = V_{G2}$		6	±100	pA
<b>NOISE</b>					
Input Voltage Noise, $f = 0.1Hz$ to $10Hz$	$V_S = +5V, V_{CM} = 0V$		3		$\mu V_{pp}$
Input Voltage Noise Density, $f = 10kHz$	$V_S = +5V, V_{CM} = 0V$		67		nV/ $\sqrt{Hz}$
Input Voltage Noise Density, $f > 1MHz$	$V_S = +5V, V_{CM} = 0V$		5.8		nV/ $\sqrt{Hz}$
Input Current Noise Density, $f = 10kHz$	$V_S = +5V, V_{CM} = 0V$		10		nA/ $\sqrt{Hz}$
<b>INPUT VOLTAGE RANGE</b>					
Common-Mode Voltage Range		V-		(V+) - 1.8V	V
Common-Mode Rejection Ratio	$(V-) < V_{CM} < (V+) - 1.8V$	<b>100</b>	<b>110</b>		dB
<b>INPUT IMPEDANCE</b>					
Differential Capacitance			1.1		pF
Common-Mode Resistance and Inverting Input Capacitance			10 <sup>13</sup>    3		$\Omega$    pF
<b>OPEN-LOOP GAIN</b>					
Open-Loop Voltage Gain	$0.1V < V_{O1} < (V+) - 0.7V, V_S = 5V, V_{CM} = V_{G2}/2$	<b>110</b>	<b>130</b>		dB
	$0.1V < V_{O1} < (V+) - 0.6V, V_S = 5V, V_{CM} = V_{G2}/2, T_A = -40^\circ C$ to $+85^\circ C$	110	130		dB
	$0V < V_{O1} < (V+) - 0.7V, V_S = 6V, V_{CM} = 0V, R_L = 2k\Omega$ to $-5V/2$	<b>108</b>	<b>120</b>		dB
	$0V < V_{O1} < (V+) - 0.6V, V_S = 5V, V_{CM} = 0V, R_L = 2k\Omega$ to $-5V/2, T_A = -40^\circ C$ to $+85^\circ C$	106	120		dB
<b>FREQUENCY RESPONSE</b>					
Gain-Bandwidth Product	$C_L = 50pF$		90		MHz
Slew Rate	$G = +1$		80		V/ $\mu s$
Settling Time, 0.01% <sup>(3)</sup>	$V_S = +5V, 4V$ Step, $G = +1$		2		$\mu s$
Overload Recovery Time <sup>(4)(5)</sup>	$V_{IN} * G = > V_S$		100		ns
<b>OUTPUT</b>					
Voltage Output Swing from Positive Rail	$R_L = 2k\Omega$		400	800	mV
Voltage Output Swing from Negative Rail	$R_L = 2k\Omega$		80	100	mV
Voltage Output Swing from Positive Rail	$R_L = 2k\Omega$ to $-5V/2$		400	800	mV
Voltage Output Swing from Negative Rail	$R_L = 2k\Omega$ to $-5V/2$		-20	0	mV
Output Current			See Typical Characteristics		
Short-Circuit Current			150		mA
Capacitive Load Drive			See Typical Characteristics		
Open-Loop Output Impedance	$f = 1MHz, I_O = 0A$		40		$\Omega$
<b>POWER SUPPLY</b>					
Specified Voltage Range	$V_S$	2.7		5.5	V
Quiescent Current	$I_Q$		7.5	9.5	mA
Over Temperature				<b>10</b>	mA
<b>TEMPERATURE RANGE</b>					
Specified and Operating Range		-40		+125	$^\circ C$
Storage Range		-65		+150	$^\circ C$
Thermal Resistance	$\theta_{JA}$		150		$^\circ C/W$

(1) 300-hour life test at 150°C demonstrated randomly distributed variation approximately equal to measurement repeatability of 1 $\mu V$ .

(2) Tested with output connected only to  $R_L$ , a pulldown resistor connected between  $V_{OUT}$  and  $-5V$ , as shown in Figure 5. See also applications section, **Achieving Output Swing to Ground**.

(3) Transimpedance frequency of 1MHz.

(4) Time required to return to linear operation.

(5) From positive rail.

### ANNEXO III: Catálogo fotodetector BPV10



www.vishay.com

**BPV10**

Vishay Semiconductors

## Silicon PIN Photodiode



94 8380

### FEATURES

- Package type: leaded
- Package form: T-1 $\frac{3}{4}$
- Dimensions (in mm):  $\varnothing$  5
- Leads with stand-off
- Radiant sensitive area (in mm<sup>2</sup>): 0.78
- High photo sensitivity
- High radiant sensitivity
- Suitable for visible and near infrared radiation
- High bandwidth: 250 MHz at  $V_R = 12$  V
- Fast response times
- Angle of half sensitivity:  $\varphi = \pm 20^\circ$
- Compliant to RoHS Directive 2002/95/EC and in accordance with WEEE 2002/96/EC



**RoHS COMPLIANT**  
**GREEN**  
(0.2018)\*\*

### DESCRIPTION

BPV10 is a PIN photodiode with high speed and high radiant sensitivity in clear, T-1 $\frac{3}{4}$  plastic package. It is sensitive to visible and near infrared radiation.

### Note

\*\* Please see document "Vishay Material Category Policy": [www.vishay.com/doc?99902](http://www.vishay.com/doc?99902)

### APPLICATIONS

- High speed photo detector

PRODUCT SUMMARY			
COMPONENT	$I_{ra}$ ( $\mu$ A)	$\varphi$ (deg)	$\lambda_{0.1}$ (nm)
BPV10	70	$\pm 20$	380 to 1100

### Note

- Test condition see table "Basic Characteristics"

ORDERING INFORMATION			
ORDERING CODE	PACKAGING	REMARKS	PACKAGE FORM
BPV10	Bulk	MOQ: 4000 pcs, 4000 pcs/bulk	T-1 $\frac{3}{4}$

### Note

- MOQ: minimum order quantity

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS ( $T_{amb} = 25$ °C, unless otherwise specified)				
PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	VALUE	UNIT
Reverse voltage		$V_R$	60	V
Power dissipation	$T_{amb} \leq 25$ °C	$P_V$	215	mW
Junction temperature		$T_J$	100	°C
Operating temperature range		$T_{amb}$	- 40 to + 100	°C
Storage temperature range		$T_{stg}$	- 40 to + 100	°C
Soldering temperature	$t \leq 5$ s, 2 mm from body	$T_{sd}$	260	°C
Thermal resistance junction/ambient	Connected with Cu wire, 0.14 mm <sup>2</sup>	$R_{thJA}$	350	K/W

**ANNEXO IV: Catálogo transistor 2N3904**



**2N3904**

**SMALL SIGNAL NPN TRANSISTOR**

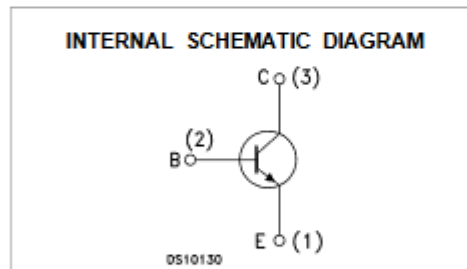
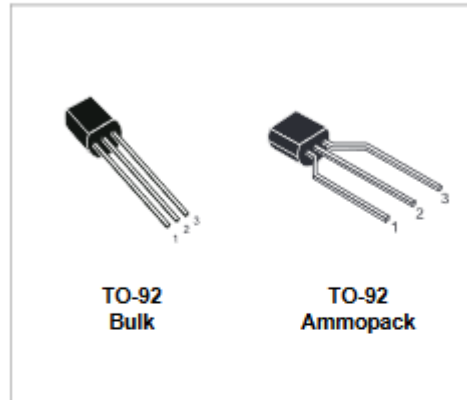
PRELIMINARY DATA

Ordering Code	Marking	Package / Shipment
2N3904	2N3904	TO-92 / Bulk
2N3904-AP	2N3904	TO-92 / Ammopack

- SILICON EPITAXIAL PLANAR NPN TRANSISTOR
- TO-92 PACKAGE SUITABLE FOR THROUGH-HOLE PCB ASSEMBLY
- THE PNP COMPLEMENTARY TYPE IS 2N3906

**APPLICATIONS**

- WELL SUITABLE FOR TV AND HOME APPLIANCE EQUIPMENT
- SMALL LOAD SWITCH TRANSISTOR WITH HIGH GAIN AND LOW SATURATION VOLTAGE



**ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS**

Symbol	Parameter	Value	Unit
$V_{CBO}$	Collector-Base Voltage ( $I_E = 0$ )	60	V
$V_{CEO}$	Collector-Emitter Voltage ( $I_B = 0$ )	40	V
$V_{EBO}$	Emitter-Base Voltage ( $I_C = 0$ )	6	V
$I_C$	Collector Current	200	mA
$P_{tot}$	Total Dissipation at $T_C = 25\text{ }^\circ\text{C}$	625	mW
$T_{stg}$	Storage Temperature	-65 to 150	$^\circ\text{C}$
$T_J$	Max. Operating Junction Temperature	150	$^\circ\text{C}$

## **ANEXO V: Códigos Arduino modo registro de medidas**

### **Transmisor:**

```
void setup() {  
  // put your setup code here, to run once:  
  Serial.begin(500000);  
}  
  
void loop() {  
  // put your main code here, to run repeatedly:  
  Serial.print(1,BIN);  
  Serial.print(0,BIN);  
  Serial.flush();  
  delay(10);  
}
```

### **Receptor:**

```
void setup() {  
  // put your setup code here, to run once:  
  Serial1.begin(500000);    // set up Serial library at 9600 bps  
  Serial.begin(500000);  
}  
  
void loop() {  
  // put your main code here, to run repeatedly:  
  if (Serial1.available() > 0) {  
    Serial.write(Serial1.read());  
    Serial.println();  
  }  
}
```



## **ANEXO VI: Códigos Arduino demo fichero video**

### **Transmisor:**

```
void setup() {  
  // put your setup code here, to run once:  
  Serial.begin(250000);  
  Serial1.begin(250000);  
}  
  
void loop() {  
  if(Serial.available()>0) {  
    Serial1.write(Serial.read());  
  
  }  
}
```

### **Receptor:**

```
void setup() {  
  // put your setup code here, to run once:  
  Serial.begin(250000);  
  Serial1.begin(250000);  
}  
  
void loop() {  
  if(Serial1.available()>0) {  
    Serial.write(Serial1.read());  
  
  }  
}
```

## ANEXO VII: Códigos Matlab demo transmisión de ficheros

### Script:

```
% Abrimos puertos arduinos
delete(instrfind({'Port'},{'COM7'})); %Cierra el puerto abierto para poder ejecutar el programa
arduino1 = serial('COM7', 'BaudRate', 250000);

delete(instrfind({'Port'},{'COM8'})); %Cierra el puerto abierto para poder ejecutar el programa
arduino2 = serial('COM8', 'BaudRate', 250000);

%% Abrimos ficheros

[y,cb,cr] = leeSecVid('s1.cif',288,352);
arduino2.OutputBufferSize = 288*352*300*15;
arduino1.InputBufferSize = 288*352*300*15;
arduino1.Timeout = 10000;
arduino2.Timeout = 10000;
fopen(arduino1)
fopen(arduino2)

data_tx = [y(:);cb(:);cr(:)];
fwrite(arduino2, data_tx,'sync')
arduino1.BytesAvailable
b = fread(arduino1,length(data_tx));
y_rx = uint8(reshape(b(1:length(y(:))),288,352,300));
cb_rx = uint8(reshape(b(length(y(:))+1:length(y(:))+length(cb(:))),144,176,300));
cr_rx = uint8(reshape(b(length(y(:))+length(cb(:))+1:end),144,176,300));

YCbCr = zeros(288,352,3,'uint8'); % Reserva memoria
RGB = zeros(288,352,3,'uint8');
for n3 = 1:300 % En cada imagen:
YCbCr(:, :, 1) = y_rx(:, :, n3);
YCbCr(:, :, 2) = imresize(cb_rx(:, :, n3), 2, 'bilinear'); % Interpola Cb
YCbCr(:, :, 3) = imresize(cr_rx(:, :, n3), 2, 'bilinear'); % Interpola Cr
RGB = ycbcr2rgb(YCbCr); % YCbCr --> RGB
imshow(RGB); % Muestra imagen
```

### **Función necesaria:**

```
function [y,cb,cr] = leeSecVid(fiVid, nFil, nCol)

fid = fopen(fiVid,'r');
if (fid == -1)
    error('No puedo abrir el fichero: %s',fiVid);
end
nBytesIm = (3*nFil*nCol)/2;      % Obtiene el n.ºm. de bytes de una imagen
fseek(fid,0,'eof');             % Posiciona el puntero al final
nBytesFi = ftell(fid);          % Obtiene n.ºm de bytes del fichero
nIm = floor(nBytesFi/nBytesIm); % Obtiene el n.ºm. total de imágenes

tDato = 'uint8';
y = zeros(nFil,nCol,nIm,tDato); % Reserva memoria para y, cb y cr
cb = zeros(nFil/2,nCol/2,nIm,tDato);
cr = zeros(nFil/2,nCol/2,nIm,tDato);
imY = zeros(nCol,nFil,tDato);   % Reserva memoria para imagenes
imC = zeros(nCol/2,nFil/2, tDato);

fseek(fid, 0, 'bof');           % posiciona el puntero al inicio
for k = 1:nIm                   % para cada imagen de la secuencia
    imY = fread(fid,[nCol nFil],tDato); % lee la componente Y
    y(:, :,k) = imY';           % escribe Y en su array
    imC = fread(fid,[nCol/2 nFil/2],tDato); % lee la componente Cb
    cb(:, :,k) = imC';         % escribe Cb en su array
    imC = fread(fid,[nCol/2 nFil/2],tDato); % lee la componente Cr
    cr(:, :,k) = imC';         % escribe Cr en su array
end
fclose(fid)
```