

Grado en Ingeniería en Tecnologías de Telecomunicación
2020-2021

Trabajo Fin de Grado

Prototipado de un T_x/R_x VLC de bajo coste mediante Raspberry Pi

Santiago Expósito Sobrino

Tutor

Víctor P. Gil Jiménez

Leganés, 14 julio 2021



RESUMEN

Las Comunicaciones por Luz Visible (VLC) vienen mostrando una rápida tendencia de desarrollo en los últimos años. Esto se debe a las características que posee tales como su bajo coste y eficiencia energética, la inmunidad a las interferencias electromagnéticas, el uso de un espectro libre de licencias, la seguridad frente al acceso no deseado, y el gran ancho de banda, si se compara con los existentes sistemas basados en radiofrecuencias.

Este Trabajo de Fin de Grado (TFG) describe con detalle, la investigación, el diseño, la implementación y el ensayo de un prototipo de comunicación por luz visible basado en la placa Raspberry Pi, utilizando componentes comerciales de bajo-coste (un diodo LED para la transmisión y un fotodiodo para la recepción) y, considerando una comunicación en interiores, a corta distancia.

El prototipo implementado hace uso de software basado en el lenguaje de programación C para la codificación y decodificación de los datos. Las Raspberry Pi están conectadas a su correspondiente circuito electrónicos, encargados de realizar la modulación y demodulación de la señal. Uno de los propósitos de este proyecto es demostrar que este prototipo puede proporcionar una base esencial a la investigación en este campo. Por lo tanto, este prototipo con suficiente flexibilidad y modularidad puede tener un mayor desarrollo, incluyendo nuevas características, sin necesidad de invertir mucho tiempo y dinero.

Los resultados de las pruebas muestran que el sistema propuesto funciona, y demuestra la aplicación de la luz visible unidireccional como modo de transmisión y recepción de datos a través del aire en distancias cortas. El prototipo implementado puede proporcionar una comunicación con baja tasa de error de caracteres (alrededor del 12 %) a una velocidad de 40 kbit/s.

Por último, este proyecto presenta algunas sugerencias para seguir trabajando con el fin de aumentar el rendimiento y las capacidades del sistema. Además, en él se discute sobre las limitaciones de su implementación y se realiza una comparación con otras publicaciones.

Palabras clave:

Comunicación por Luz Visible (VLC); Bajo-Coste; Raspberry Pi; Prototipo; Diodo Emisor de Luz (LED); Transistor de Efecto Campo (MOSFET); Fotodiodo; Amplificador de Transimpedancia.

ABSTRACT

Visible light communications (VLC) have been exhibiting a rapid development tendency in recent years. It has many attractive features such as its low cost and energy efficiency, its immunity to electromagnetic interference, license-free spectrum, security against undesired access, and large bandwidth compared with existing radio frequency-based systems.

This Bachelor's Degree Final Project (TFG) describes in detail, the research, design implementation and testing of a visible light communication prototype based on the platform Raspberry Pi, using low-cost commercial devices (a light-emitting diode for transmission and a photodiode for reception), and considering a short-range indoor VLC usage.

The implemented prototype makes use of software based on C programming language for encoding and decoding data, to interface between the Raspberry Pi and the electronic circuits, where the modulation and demodulation of the signal is performed. One of the aims of this project is to show that this prototype can provide an essential basis for research in this field. Thus, this prototype with enough flexibility and modularity could be further developed, including new features without requiring much time and economic cost.

The results of the tests show that the proposed system works and demonstrates the application of unidirectional visible light as a mode of transmitting and receiving data through the air over short distances. The implemented prototype can provide a communication with low character error rate (around 12 %) at a bit rate of 40 kbit/s.

Finally, this project presents some suggestions for further work to increase the performance and capabilities of the system, discusses the limitations of its implementation, and compares it with other publications.

Keywords:

Visible Light Communication (VLC); Low-Cost; Raspberry Pi; Prototype; Light-Emitting Diode (LED); Field Effect Transistor (MOSFET); Photodiode; Transimpedance amplifier.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi tutor Víctor Pedro por darme la oportunidad de realizar este trabajo, y por toda la atención y ayuda que he recibido por su parte.

Dar las gracias por encima de todo a mi familia, en especial a mis padres, mi hermano y mi tío por su ayuda y apoyo incondicional.

Y a mis compañeros y amigos, por todos los momentos vividos en esta etapa.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Motivación del trabajo.....	2
1.2. Objetivos	3
1.3. Marco regulador	4
1.4. Estructura del documento.....	6
2. ESTADO DEL ARTE.....	9
2.1. Productos comerciales y prototipos Li-Fi	9
2.2. Prototipos experimentales VLC de bajo coste	11
3. DESCRIPCIÓN DE VLC	17
3.1. Introducción	17
3.2. Técnicas de Modulación en VLC.....	19
3.2.1. Modulaciones monoportadoras	21
3.2.2. Modulaciones multiportadoras.....	23
3.3. Aplicaciones	26
3.3.1. Comunicaciones en interiores	26
3.3.2. Comunicaciones en el transporte.....	27
3.3.3. Sistemas de localización en interior	28
3.3.4. Comunicaciones submarinas	29
4. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO.....	31
4.1. Introducción	31
4.2. Raspberry Pi.....	32
4.2.1. Sistema operativo de la Raspberry Pi.....	33
4.2.2. Lenguajes de programación	34
4.3. Diseño del circuito transmisor.....	35
4.3.1. Transistor MOSFET.....	35
4.3.2. LED	36
4.3.3. Diseño final del circuito transmisor	37
4.4. Diseño del circuito receptor	38
4.4.1. Fotodiodo	39
4.4.2. Amplificador de transimpedancia	41
4.4.3. Diseño final del circuito receptor	41
4.5. Software del prototipo.....	42
4.5.1. Software para el transmisor.....	43
4.5.1.1. Diagrama	43
4.5.1.2. Configuración del GPIO.....	44
4.5.1.3. Procesado del archivo de texto.....	44
4.5.1.4. Secuencia de inicialización	44
4.5.1.5. Sincronización.....	45
4.5.1.6. Transmisión del archivo	45
4.5.2. Software para el receptor.....	46
4.5.2.1. Diagrama	46
4.5.2.2. Configuración del GPIO.....	47

4.5.2.3. Secuencia de inicialización	47
4.5.2.4. Sincronización.....	47
4.5.2.5. Comprobación carácter correcto	48
4.5.2.6. Recepción de datos y decodificación	48
4.5.2.7. Introducción del texto al archivo nuevo	49
5. PRUEBAS Y VALIDACIÓN	51
5.1. Herramientas utilizadas.....	51
5.2. Ensayos con el hardware	52
5.2.1. Pruebas del transmisor	52
5.2.2. Pruebas del receptor	54
5.2.2.1. Selección del fotodiodo.....	55
5.2.2.2. Elección de la frecuencia máxima del receptor.....	57
5.2.3. Selección de la frecuencia para el prototipo.....	58
5.3. Ensayos de comunicación en el prototipo VLC de bajo coste	59
6. ENTORNO SOCIOECONÓMICO	63
6.1. Presupuesto del trabajo.....	63
6.2. Impacto socioeconómico.....	65
6.2.1. Impacto económico	65
6.2.2. Impacto social	66
6.2.3. Impacto medioambiental	66
7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO	69
7.1. Discusión y conclusiones	69
7.2. Futuras líneas de trabajo.....	70
BIBLIOGRAFÍA.....	73
ANEXO A - EXTENDED ABSTRACT	
ANEXO B - CONFIGURACIÓN DE LAS RASPBERRY PI	

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1. Frecuencias y longitudes de ondas asociadas a RF, OWC y VLC, basado en [2]	1
Fig. 2.1. Accesorios del dispositivo <i>LiFi-XC</i> [9]	9
Fig. 2.2. Detalle de dos dispositivos VLC con tecnología <i>LiFiNET®</i> &/o <i>GEOLiFi®</i> y <i>LiFiMAX®</i> [10]	10
Fig. 2.3. Elementos VLC <i>LumiStick II</i> y <i>LumiLamp</i> creado por VLNcomm [11]	10
Fig. 2.4. Elementos del sistema VCL <i>LumiNex</i> creado por VLNcomm [11].....	11
Fig. 2.5. Diagrama del circuito transmisor propuesto por la Universidad de North Carolina [13]	12
Fig. 2.6. Diagrama de bloques de un sistema VLC [15]	13
Fig. 2.7. Módulo de transmisión VLC con 20 LEDs permitiendo una cobertura de 360° [16] ...	13
Fig. 2.8. Sistema VLC optimizado con tasa de transferencia de 100 Mbps [17]	14
Fig. 2.9. Esquema T _x /R _x utilizado para la comunicación de datos en [18]	14
Fig. 2.10. Esquema del circuito transmisor VLC con el driver LED LT8391 [20].....	15
Fig. 3.1. Espectro electromagnético	18
Fig. 3.2. Comparación esquemática de la modulación OOK y PPM	22
Fig. 3.3. Comparación esquemática de la modulación PWM y diferentes variantes de PPM	22
Fig. 3.4. Ejemplo esquemático de modulación 4-PAM	23
Fig. 3.5. Modelo de sistema OFDM para comunicaciones por luz visible [33].....	24
Fig. 3.6. Diagrama de bloques de un sistema de modulación DCO-OFDM [35]	24
Fig. 3.7. Salida de la señal temporal OFDM para la variante DC-bias OFDM para N = 16 [34]25	25
Fig. 3.8. Diagrama de bloques de un sistema con modulación tipo ACO-OFDM [35]	25
Fig. 3.9. Salida de la señal temporal OFDM para la variante ACO-OFDM para N = 16 [34]....	25
Fig. 3.10. Ejemplo de comunicaciones VLC integrada en la iluminación de interiores [22].....	27
Fig. 3.11. Escenario de utilización de comunicación VLC para V2V y V2I [38]	27
Fig. 3.12. Utilización de la VLC para guiar a un invidente	28
Fig. 3.13. Aplicaciones de utilización de VLC por UTROV [29].....	29
Fig. 4.1. Esquema del sistema de comunicación VLC de bajo coste	31
Fig. 4.2. Raspberry Pi 4 Modelo B.....	32
Fig. 4.3. Distribución de pines de la Raspberry Pi 4 Modelo B	32
Fig. 4.4. Proceso del formateo de la tarjeta microSD a formato FAT32.....	33
Fig. 4.5. Herramienta <i>Raspberry Pi Imager</i>	33
Fig. 4.6. Imagen y esquemas del transistor <i>MOSFET BS270</i> [49].....	36
Fig. 4.7. Características espectrales del LED de luz azul <i>HLMP-CB1B-XY0DD</i> de Broadcom [50]	37
Fig. 4.8. Esquema del diseño final del circuito transmisor	37
Fig. 4.9. Imágenes del circuito T _x	38
Fig. 4.10. Fotodiodo PIN de silicio <i>SFH 206 K</i> fabricado por Osram [51].....	39
Fig. 4.11. Sensibilidad espectral relativa del fotodiodo <i>Osram SFH 206 K</i> [51].....	39
Fig. 4.12. Fotodiodo de silicio <i>BPW21R</i> fabricado por Vishay [52]	40
Fig. 4.13. Sensibilidad espectral relativa del fotodiodo <i>BPW21R</i> [52]	40
Fig. 4.14. Esquema básico de un amplificador de transimpedancia.....	41
Fig. 4.15. Esquema del diseño final del receptor	42

Fig. 4.16. Imágenes del circuito R_x	42
Fig. 4.17. Diagrama del proceso del software de la Raspberry Pi transmisora	43
Fig. 4.18. Diagrama del software de la Raspberry Pi receptora	46
Fig. 5.1. Osciloscopio digital durante medidas preliminares con un LED rojo	51
Fig. 5.2. Multímetro utilizado en el diseño y obtención del prototipo VLC de bajo coste	52
Fig. 5.3. Señal del LED (en amarillo) y de la salida de la Raspberry Pi transmisora (en azul) a 100 kHz	53
Fig. 5.4. Señal del LED (amarillo) y de la salida de la RPi transmisora (azul) a 250 kHz	53
Fig. 5.5. Señal del LED (amarillo) y de la salida de la RPi transmisora (azul) a 1,5 MHz.....	54
Fig. 5.6. Señal del LED (amarillo) y de la salida de la RPi transmisora (azul) a 3,3 MHz.....	54
Fig. 5.7. Señal a la salida del TIA con el fotodiodo <i>SFH 206K</i> , $R_f= 8,2 \text{ k}\Omega$ y $C_f=10 \text{ pF}$	55
Fig. 5.8. Señal a la salida del TIA con el fotodiodo <i>SFH 206K</i> , $R_f= 82 \text{ k}\Omega$ y $C_f= 10 \text{ pF}$	56
Fig. 5.9. Señal del fotodiodo <i>BPW21R</i> , $R_f= 8,2 \text{ k}\Omega$ y $C_f= 100 \text{ pF}$, después de su amplificación con el TIA	56
Fig. 5.10. Señal a la salida del TIA con el fotodiodo <i>BPW21R</i> Vishay, $R_f= 8,2 \text{ k}\Omega$ y $C_f= 50 \text{ pF}$	57
Fig. 5.11. Señal a la salida del TIA con el fotodiodo <i>BPW21R</i> Vishay, $R_f= 8,2 \text{ k}\Omega$ y $C_f= 10 \text{ pF}$	57
Fig. 5.12. Señal a la salida del TIA (azul) y señal del LED (amarilla) a 250 kHz	58
Fig. 5.13. Señal a la salida del TIA (azul) y señal del LED (amarilla) a 360 kHz	58
Fig. 5.14. Señal a la salida del TIA (azul) y señal del LED (amarilla) a 20 kHz	59
Fig. 5.15. Prototipo VLC de bajo coste diseñado para este TFG, T_x a la derecha y R_x a la izquierda.....	60
Fig. 5.16. Señal proveniente de la Raspberry Pi (amarilla) y a la salida del TIA (azul) a 20 kHz	60
Fig. 5.17. Detalle gráfico de un envío y recepción de un carácter (Amarillo: LED; Azul: TIA) 61	
Fig. 6.1. Detalle del certificado de conformidad del LED utilizado en el prototipo	67

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 3.1. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS VLC	19
TABLA 5.1. RESULTADOS DE LA TRANSMISIÓN DE ARCHIVOS CON EL PROTOTIPO	60
TABLA 6.1. COSTE DE PERSONAL	63
TABLA 6.2. COSTES MATERIALES DEL PROTOTIPO.....	63
TABLA 6.3. COSTES DE LOS COMPONENTES ELECTRÓNICOS DEL PROTOTIPO VLC	64
TABLA 6.4. COSTES DE AMORTIZACIÓN DEL MATERIAL DEL PROTOTIPO.....	64
TABLA 6.5. COSTES DEL TRABAJO	65

GLOSARIO DE TÉRMINOS

ACO	Asymmetrically Clipped Optical
ADC	Analog to Digital Converter
AoA	Angle of Arrival
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
BER	Bit Error Rate
BJT	Bipolar Junction Transistor
CP	Cyclic Prefix
CRC	Cyclic Redundancy Check
DAC	Digital to Analog Converter
DC	Direct Current
DCO	Direct Current Biased Optical
DOPPM	Differential Overlapping Pulse Position Modulation
DPPM	Differential Pulse Position Modulation
FFT	Fast Fourier Transform
FPS	Frame Per Second
GPIO	General Purpose Input/Output
GPS	Global Positioning System
HDMI	High-Definition Multimedia Interface
I2C	Inter-Integrated Circuit
ID	Identifier
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
IM/DD	Intensity Modulation / Direct Detection
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
IR	Infrared
ISI	Inter Symbol Interference
ISO	International Organization for Standardization

JEITA	Japan Electronics and Information Technology Industries Association
LD	Laser Diode
LDR	Light Dependent Resistor
LED	Light Emitting Diode
LiFi	Light Fidelity
LoS	Line of Sight
MAC	Media Access Control
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
MOSFET	Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor
MPAM	Multiple Pulse Amplitude Modulation
MPAPM	Multiple Pulse Amplitude and Position Modulation
MPPM	Multiple Pulse Position Modulation
MSB	Most Significant Bit
NRZ	Non-Return to Zero
OA	Operational Amplifier
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OMPPM	Overlapping Multiple Pulse Position Modulation
OOK	On-Off Keying
OPPM	Overlapping Pulse Position Modulation
OWC	Optical Wireless Communication
PAM	Pulse Amplitude Modulation
PAPM	Pulse Amplitude and Position Modulation
PAPR	Peak-to-Average Power Ratio
PD	Photodiode
PHY	Physical Layer
PIN	Positive–Intrinsic–Negative
PMOS	P-channel Metal–Oxide Semiconductor
PPM	Pulse Position Modulation

PWM	Pulse Width Modulation
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
RF	Radio Frequency
RPi	Raspberry Pi
RSS	Received Signal Strength
Rx	Receiver
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SoC	System on Chip
SPI	Serial Peripheral Interface
SSH	Secure SHell
TFG	Trabajo Fin de Grado
TIA	Transimpedance Amplifier
TIC	Tecnologías de la Información y la Comunicación
ToA	Time of Arrival
Tx	Transmitter
UNE	Asociación Española de Normalización
USB	Universal Serial Bus
UTROV	UnThered Remotely Operated Vehicle
UV	Ultraviolet
V2I	Vehicle to Infrastructure
V2V	Vehicle to Vehicle
VL	Visible Light
VLC	Visible Light Communication
VLCC	Visible Light Communication Consortium
VNC	Virtual Network Computing
VPPM	Variable Pulse Position Modulation
WDM	Wavelength Division Multiplexing
WiFi	Wireless Fidelity
WLAN	Wireless Local Area Network

1. INTRODUCCIÓN

El uso de luz para las comunicaciones se remonta a los tiempos de **griegos y romanos**, cuando usaban sus escudos para reflejar la luz del sol y así poder transmitir mensajes durante las batallas. Entre los inventos antiguos para comunicación por luz visible destacan por su gran relevancia: el **heliógrafo** y el **fotófono**. El primero de ellos es un dispositivo que permitía hacer señales telegráficas a través de un par de espejos movibles. Debido a su sencillez, se estuvieron utilizando en los años 90 para comunicaciones militares. El segundo, inventado por Alexander Graham Bell en el año 1880, era un dispositivo capaz de transmitir señales de voz usando señales ópticas (haces de luz solar) a una distancia de unos 200 metros.

Durante los años 90 del pasado siglo, las comunicaciones por radiofrecuencia y fibras ópticas se desarrollaron muy rápido y dominaron el mercado global de las telecomunicaciones. Esto provocó que las comunicaciones ópticas perdieran protagonismo, aunque su desarrollo continuó con experimentos de interés [1].

En los últimos años, el tráfico de datos en las redes inalámbricas ha aumentado exponencialmente debido, en gran medida, al incremento de usuarios. Actualmente, todas estas tecnologías utilizan la banda de radiofrecuencia, que se encuentra entre los 3 kHz y los 300 GHz. El problema de la utilización de esta banda del espectro es que no es ilimitada, y será insuficiente para satisfacer los futuros servicios que se van a requerir, como por ejemplo los nuevos servicios del 5G.

Las Comunicaciones Ópticas Inalámbricas (**OWC - Optical Wireless Communications**) son una alternativa potencial para el desarrollo de futuras redes de alta intensidad y capacidad. Las OWC son aquellas transmisiones ópticas en las que se usa el espectro **VL** (Luz Visible - **Visible Light**), **IR** (Infrarrojos - **Infrared**) o **UV** (Ultravioleta - **Ultraviolet**). La Fig.1.1. muestra las frecuencias y longitudes de onda que utiliza las transmisiones ópticas (*Optical region*).

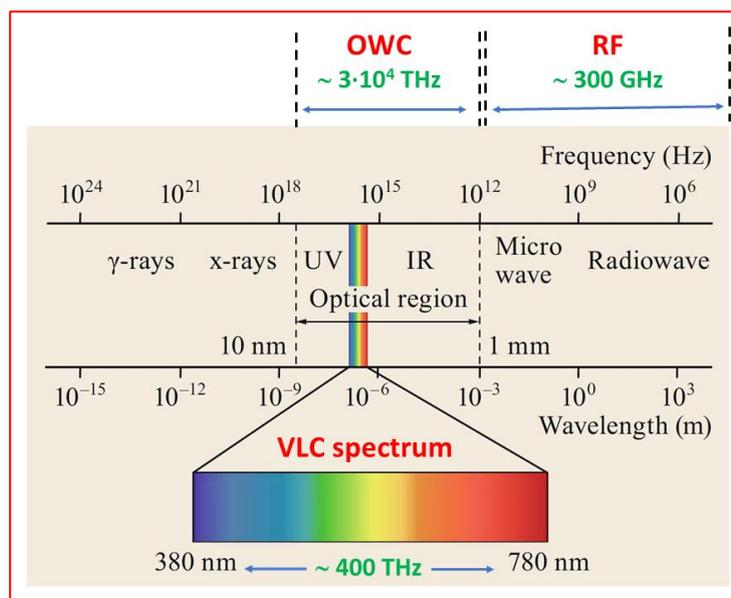


Fig. 1.1. Frecuencias y longitudes de ondas asociadas a RF, OWC y VLC, basado en [2]

Estas comunicaciones ópticas inalámbricas ofrecen numerosas ventajas: poseen un ancho de banda enorme, posicionado en el espectro entre los 0,3 THz y los 30 PHz, sin regular según normativa, muy superior al de comunicación por radiofrecuencia; tienen un gran nivel de seguridad; el coste y el consumo de potencia es bajo; no interfieren con equipamiento electrónico o con otras redes de comunicaciones por radiofrecuencia, lo que se denomina robustez frente a interferencias electromagnéticas; pueden alcanzar una SNR (Relación señal a ruido - *Signal to Noise Ratio*) alta y pueden integrarse fácilmente en la infraestructura existente de iluminación.

Pero también, tienen ciertas desventajas, por ejemplo: el canal de transmisión se bloquea con obstáculos y la potencia de transmisión es más limitada que en radiofrecuencia.

En este Trabajo Fin de Grado (TFG), se analizará y se hará uso de las comunicaciones ópticas inalámbricas que se encuentran solamente en el espectro de luz visible. A este tipo de comunicaciones las denominamos **Comunicaciones por Luz Visible (VLC - Visible Light Communications)**.

1.1. Motivación del trabajo

Las comunicaciones por luz visible han levantado un grandísimo interés en estos últimos años debido a la necesidad de búsqueda de comunicaciones alternativas o complementarias a las producidas por radiofrecuencia (RF). El problema del estrecho ancho de banda en comunicación por radiofrecuencias puede mitigarse con las VLC por la capacidad de un mayor ancho de banda, al utilizar la parte más alta del espectro electromagnético, como se ilustra en la Fig.1.1. Además, esta tecnología posee unas características idóneas para el futuro de las comunicaciones inalámbricas, como ha sido comentado en párrafos anteriores.

Teniendo en cuenta las ventajas y características de la tecnología VLC, se ha elegido como Trabajo Fin de Grado **la implementación de un prototipo T_x/R_x de comunicación por luz visible de bajo coste**. Se trata de un proyecto basado en esta temática novedosa y de enorme interés. Este sector es novedoso y viene desarrollándose principalmente en los últimos años, por lo que el margen de mejora y crecimiento es enorme, en donde la investigación ha de jugar un papel muy destacado para su desarrollo final.

Por otra parte, se trata de una tecnología ecológica, lo que en nuestros tiempos supone un valor añadido, ya que la tendencia de la tecnología actual gira en torno a un mundo más respetuoso con el medio ambiente.

A nivel personal, el tener que realizar, en época de pandemia mundial, un sistema de comunicación completo supondrá un enorme reto. El estudio de todo lo que conlleva el desarrollo de un sistema proporciona un aprendizaje muy amplio y más profundo de la tecnología, no sólo de forma teórica sino también práctica. Aplicando y ampliando conocimientos adquiridos durante los estudios del grado en Ingeniería en Tecnologías de Telecomunicación, en la Universidad Carlos III de Madrid.

Dentro de este nuevo aprendizaje se encuentra la utilización de un dispositivo de increíble versatilidad como la Raspberry Pi, que proporcionará la potencia de cómputo necesaria para

poder implementar el dispositivo de VLC, con un coste bajo. También profundizar en el desarrollo software basado en algún lenguaje de programación para la codificación y decodificación de los mensajes, y para gobernar circuitos electrónicos.

Por lo tanto, se trata de un trabajo basado en una tecnología actual de gran relevancia, que se aplicará de una forma práctica, al desarrollar un sistema de comunicaciones completo, respetuoso con el medio ambiente y haciendo uso de componentes electrónicos como LEDs, transistores, fotodiodos, amplificadores operacionales, y la plataforma Raspberry Pi.

Con este TFG se pretende contribuir a mejorar y avanzar en esta tecnología para interiores y para comunicación a corto alcance, con dispositivos de muy bajo coste, haciendo un prototipo sencillo de implementar, versátil y modulable, con el que un alumno se pueda iniciar en la investigación en este campo.

1.2. Objetivos

Como se ha mencionado, este Trabajo Fin de Grado tiene como propósito la revisión bibliográfica, el diseño, la implementación y el ensayo de un prototipo VLC unidireccional, destinado a espacios interiores a distancias cortas, y para el que se utilicen componentes comerciales de bajo coste, incluyendo dos Raspberry Pi. Por otra parte, el prototipo implementado ha de hacer uso de software basado en algún lenguaje de programación, con el fin de codificar y decodificar la información transmitida y recibida.

Con el fin de alcanzar el propósito inicial, en el presente proyecto se pretenden abordar los siguientes objetivos:

- Llevar a cabo una investigación de revisión bibliográfica sobre la comunicación por luz visible, la modulación y demodulación, el acondicionamiento de señales y el desarrollo de lenguaje de programación para codificar los datos en la plataforma Raspberry Pi.
- Diseñar un circuito transmisor compuesto de componentes de bajo coste capaz de modular una señal de entrada y transmitir dicha señal a través de luz visible.
- Diseñar un circuito receptor compuesto de componentes de bajo coste capaz de demodular la señal de luz recibida.
- Desarrollar un software para la codificación y transmisión de datos.
- Desarrollar un software para la decodificación y recepción de datos.
- Implementar el circuito transmisor diseñado.
- Implementar el circuito receptor diseñado.
- Integrar los subsistemas hardware y software del transmisor y receptor mediante dos Raspberry Pi.
- Diseñar un protocolo software para el comienzo y finalización de la recepción de señales; sincronización de los sistemas T_x y R_x .
- Evaluar el subsistema hardware del prototipo mediante el envío de señales cuadradas analógicas. Caracterizar la velocidad óptima de transmisión y recepción.
- Evaluar el prototipo completo mediante el envío de diferentes archivos de texto. Estimar la tasa de error de carácter.

- Proponer líneas futuras de desarrollo y mejora del prototipo VLC de bajo coste basado en Raspberry Pi.

El estudio que se pretende desarrollar es muy ambicioso. Dadas las circunstancias en las que se llevará a cabo el trabajo experimental debido a la pandemia mundial, se considerará un proyecto exitoso si se consigue transmitir señales a través de la modulación de un LED y recibirlas con un fotodetector.

En estas condiciones, resulta un gran desafío el diseño y la implementación de ambos subsistemas hardware y software para un transmisor y un receptor. Por otra parte, la complejidad del receptor es elevada, si se pretende garantizar una transmisión síncrona de la información.

Habiéndose transmitido señales moduladas y recibidas analógicamente, se confirmaría el envío y recepción de archivos de texto, y se probaría a incrementar la dificultad de la comunicación, con el aumento del tamaño del archivo, analizándose la tasa de error conseguida con el prototipo de bajo coste, y discutiendo los resultados obtenidos.

En este proyecto no están entre sus objetivos:

- El desarrollo de un prototipo que cumpla las especificaciones marcadas en los diferentes estándares sobre VLC.
- El desarrollo de un prototipo para comunicaciones en exteriores, a distancia medias-largas. O el estudio de su comportamiento con la distancia entre los sistemas T_x y R_x .
- El desarrollo de un prototipo VLC bidireccional.

1.3. Marco regulador

En este apartado se pretende analizar de forma breve la **normativa** existente en **comunicación por luz visible**, y en lo que haga referencia al proceso de **desarrollo de prototipos** para comunicación por luz visible con plataformas basadas en **circuitos eléctricos** y **electrónicos**. En la búsqueda se ha tenido presente el aspecto del **bajo coste** del prototipo que se pretende desarrollar.

Especialmente se hará referencia a los estándares técnicos aplicables a los posibles **lenguajes de programación** que se pueden utilizar, por ejemplo, el lenguaje *C*, y al conjunto de tecnologías sobre la cual se basa este trabajo, como son las comunicaciones por luz visible.

La última normativa sobre la que se tiene conocimiento sobre el lenguaje de programación *C* es la norma **ISO/IEC 9899:2011/ COR:2018 Information technology-Programming languages-C-Technical Corrigendum**, también conocido como C11, y publicada su última revisión en 2018. Esta normativa internacional especifica la forma del lenguaje y establece la interpretación de programas escritos en lenguaje de programación *C* [3]:

- La representación de programas en *C*
- La sintaxis y restricciones del lenguaje *C*
- Las reglas semánticas para interpretar programas en *C*

- La representación de los datos de entrada procesados por los programas en C
- La representación de los datos de salida de los programas en C
- Las restricciones y limitaciones impuestos por una implementación en C

En cuanto a las VLC, su regulación comenzó en Japón, país que inició el desarrollo más exhaustivo de esta tecnología.

En este país, se fundó el **Visible Light Communications Consortium (VLCC)**, organización que creó dos estándares en junio de 2007: **Visible Light Communication System Standard** y **Visible Light ID System Standard**. Estos fueron aceptados por la **Japan Electronics and Information Technology Industries Association (JEITA)** como **JEITA CP-1221** y **CP-1222**. Posteriormente, en mayo 2013, se creó **Visible Light Beacon System**, atribuyéndole el nombre de **JEITA CP-1223**.

El estándar **JEITA CP-1221** asume que las VLC están en el intervalo de las longitudes de onda entre **380 nm - 780 nm** (ver Fig.1.1.), y permite un rango de longitud de onda para cada aplicación en precisión de 1 nm. Además, este estándar indica un valor mínimo para evitar la interferencia entre diferentes equipos de comunicación óptica y define un requisito mínimo que deben cumplir diversas aplicaciones de comunicación por luz visible [4].

El **JEITA CP-1222** recomienda el uso de 28,8 kHz como frecuencia subportadora a una tasa de transmisión de 4,8 kbps y modulación subportadora de **4-PPM (Modulación por posición de pulso)** para evitar el parpadeo de la luz. Añade también, el uso de un método de control de errores como el **CRC (Control de Redundancia Cíclica)** [4].

En el estándar **JEITA CP-1223** se describe un sistema de comunicación unidireccional usando la luz visible, el cual permite diversas aplicaciones como información de posicionamiento, identificación de objetos y sistemas de guía. Este sistema funciona transmitiendo una señal de identificación a través del dispositivo de luz usado con una longitud de onda entre los 380 nm y los 780 nm, y usando una modulación tipo 4-PPM [4].

Posteriormente, en septiembre de 2011 la organización **IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers)** propuso su primer estándar IEEE para comunicaciones por luz visible como **IEEE 802.15.7-2011 - IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks-Part 15.7: Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light**. Esta norma hace referencia a las comunicaciones ópticas de corto alcance usando luz visible. Más adelante, en el año 2018, fue reemplazado por el estándar **IEEE 802.15.7-2018 - IEEE Standard for Local and metropolitan area networks-Part 15.7: Short-Range Optical Wireless Communications** [5].

El estándar previamente mencionado hace referencia a las **comunicaciones ópticas inalámbricas de corto alcance** usando longitudes de onda de luz entre los **10000 nm** y los **190 nm**. Incluye las especificaciones de una capa física, denominada **PHY** y una subcapa de control de acceso medio, llamada **MAC**. Este estándar permite dar soporte a servicios multimedia de audio y video, considerando la movilidad de los enlaces ópticos y la compatibilidad entre varias estructuras de luminarias, entre otras. Además, este estándar **IEEE 802.15.7** se adhiere a las normas de seguridad ocular aplicables, sugiriendo que el parpadeo de la luz (*flicker*) sea a frecuencias superiores a **200 Hz** para evitar cualquier efecto dañino a las personas.

Asimismo, en mayo de 2018 la IEEE aprobó la modificación del estándar **IEEE 802.11**, creado para la implementación de comunicaciones **WLAN (Wireless Local Area Network)** en varias

frecuencias, incluyendo las frecuencias **2,4 GHz**, **5 GHz** y **60 GHz**. Estas frecuencias son usadas para conectividad inalámbrica entre distintos dispositivos electrónicos como portátiles, impresoras y teléfonos móviles, y para proporcionar acceso a Internet.

La anterior modificación se conoce con el nombre de **IEEE 802.11bb** e incluye las especificaciones para las comunicaciones basadas en luz. Esta modificación especifica una nueva capa física (**PHY**) y modificaciones en el control de acceso medio **IEEE 802.11 (MAC)** para permitir comunicaciones inalámbricas por luz. Esta nueva capa física proporciona operaciones de enlace ascendente y descendente en la banda entre los **380 nm** y **5000 nm**.

Por otra parte, la **UNE (Asociación Española de Normalización)** ratificó en 2017, la norma **UNE-EN 62943:2017**, la **IEC 62943:2017**, denominada **Sistema de baliza de luz visible para aplicaciones multimedia (Visible light beacon system for multimedia applications)**. Esta norma detalla un **protocolo** para realizar una **comunicación por luz visible unidireccional**. El contenido a enviar por el transmisor puede ser tanto datos multimedia como **códigos de identificación ID**. La longitud de onda debe estar comprendida en el intervalo 380 nm – 780 nm, con una tasa de datos de 4,8 kbps. La modulación utilizada es la **4-PPM invertida**, una modulación basada en la 4-PPM pero en la que la señal obtiene un nivel alto cuando el bit correspondiente es el valor **0** y un nivel bajo cuando el bit tiene valor **1**.

Finalizamos este apartado señalando la directiva europea, transpuesta a la legislación española, **Directiva 2011/65/UE del Parlamento Europeo y del Consejo** del 8 de junio de 2011, sobre restricciones a la utilización de determinadas sustancias peligrosas en **aparatos eléctricos y electrónicos**, por ser aplicable a la implementación de un prototipo VLC de bajo coste, como se comentará en el capítulo 6.

1.4. Estructura del documento

En esta memoria se muestra de forma descriptiva toda la labor realizada en el desarrollo de este TFG. Se deja para los anexos la información que complementa este trabajo, como un *Extended Abstract*, o algunas características de los dispositivos utilizados en el desarrollo del prototipo. Se intentará apoyar al texto con figuras, imágenes, gráficas, tablas, diagramas de flujo y ecuaciones siempre que sea conveniente y preciso.

En este apartado se muestra la distribución de los contenidos seguida a lo largo de este documento.

En este primer capítulo de **introducción**, además, de recoger la **motivación** del trabajo que se ha realizado, el **propósito**, los **objetivos** concretos, el plan de trabajo y las dificultades que nos podríamos encontrar, incorpora un apartado sobre el **marco regulador** de las VLC, y la legislación más destacada aplicable a la implementación de un prototipo de luz visible.

El Capítulo 2 plantea una revisión del **Estado del Arte** de las VLC, analizando diferentes implementaciones de sistemas para esta tecnología, presentando tanto productos comerciales, como prototipos experimentales de bajo coste.

En el Capítulo 3 se describe de forma más detallada las VLC, comentando las numerosas **características** que posee, y analizando las **ventajas** y **desventajas** que ofrece. Además, se describe brevemente los tipos de **modulaciones** aplicables y las **aplicaciones** en las que se está dando uso a esta tecnología.

Dentro del Capítulo 4 se discute el **diseño y la implementación del prototipo**, que se divide en tres apartados destacados. Un apartado referente a la placa **Raspberry Pi**, un elemento muy importante del trabajo experimental, que va a proporcionar la potencia de cómputo para la transmisión de datos y el voltaje necesario para el funcionamiento del hardware. Otro apartado referente al **hardware** implementado, describiendo los **componentes** que van a formar los **circuitos transmisor y receptor**, y proporcionando un diseño final de los mismo. Y, por último, un apartado en el que se describe el desarrollo del software necesario para realizar la transmisión y recepción de información en este prototipo unidireccional de VLC de bajo coste, para comunicación a corta distancia.

Las **pruebas o ensayos** realizados para la **validación** se realizan en el Capítulo 5, donde se evalúa tanto el **subsistema hardware** del prototipo utilizando señales analógicas cuadradas, como el prototipo completo, incluyendo el **subsistema software**, realizando envíos de **archivos de texto** compuesto por caracteres **ASCII**.

Debido a la importancia del coste del diseño y desarrollo del prototipo experimental, el **entorno socioeconómico** se recoge en el Capítulo 6. En este capítulo, se presenta el presupuesto final del trabajo y el impacto que supondría la utilización de esta tecnología de bajo coste para comunicaciones a corta distancia, fundamentalmente en interiores. Se ha dejado para este capítulo el impacto medioambiental, económico y social que supondría la utilización de esta técnica VLC.

En el Capítulo 7 se plantean y discuten las **conclusiones** de la implementación de un sistema T_x/R_x VLC de bajo coste y **futuras líneas de trabajo** para el desarrollo del prototipo. Analizando todo el trabajo realizado y los resultados obtenidos, comparándolo con los objetivos propuestos al comienzo. Además, se proporcionan mejoras y propuestas para trabajos futuros.

En esta memoria se ha incluido un **índice de figuras, tablas, y abreviaturas** para intentar facilitar la lectura y la comprensión del documento.

Finalmente, esta memoria del TFG se completa con la **bibliografía** consultada que se considera más relevante, y diversos anexos, en los que se incluye un *Extended Abstract* y la configuración de las Raspberry Pi usadas en este trabajo.

2. ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se van a analizar diferentes implementaciones de sistemas para comunicaciones por luz visible (VLC). Se comenzará presentando algunos productos o soluciones comerciales, para posteriormente analizar diferentes propuestas de desarrollos experimentales de bajo coste, en los que han venido trabajando en los últimos años diferentes investigadores.

El gran potencial de la tecnología VLC para la comunicación ha hecho posible que numerosas compañías y grupos de investigación hayan puesto el foco en el desarrollo de esta técnica de comunicación. Por ello se encuentran numerosos desarrollos prácticos, sobre todo aplicándose a la transmisión de datos mediante luz visible (Li-Fi).

En sus inicios este interés se concentraba fundamentalmente en países asiáticos, especialmente en Japón, el cual fue pionero en esta área. Así, se crea en el año 2003 el Consorcio de Comunicaciones por Luz Visible, conocido por sus siglas en inglés VLCC [6]. Este consorcio estaba formado por las principales compañías del país (*Fuji Television, NEC Lighting o Tokyo Electric Power Co*). En los últimos años, este interés por el desarrollo e investigación de la tecnología VLC se ha extendido por numerosos países, entre ellos España [7].

2.1. Productos comerciales y prototipos Li-Fi

Dentro de las soluciones comerciales nos encontramos con numerosas compañías que han apostado fuerte por esta área de conocimiento, ver por ejemplo la referencia [8]. A continuación, destacamos algunas de dichas empresas.

La compañía **PureLifi** fue cofundada por Harald Haas (*Institute for Digital Communications, School of Engineering, The University of Edinburgh, LiFi Research and Development Centre, Edinburgh, UK*), persona que dio visibilidad y acuñó el término *Li-Fi*. Entre los diversos productos que han desarrollado destaca *LiFi-XC*.

LiFi-XC es un dispositivo que permite comunicaciones inalámbricas bidireccionales con una tasa de 43 Mbps. Consta de un USB con un diseño compacto y ligero, que no supera los 43 gramos, compuesto de un fotodetector y un transmisor de infrarrojos, además, de un punto de acceso, que incluye un receptor de infrarrojos y un LED para transmitir (ver Fig.2.1).



Fig. 2.1. Accesorios del dispositivo *LiFi-XC* [9]

La empresa **Oledcomm**, fundada en el año 2011 por investigadores de la Universidad de Versalles en Francia (empresa tipo *spin off*), dispone de diferentes dispositivos VLC. Por ejemplo, las farolas urbanas pueden equiparse con la tecnología *LiFiNET®* &/o *GEOLiFi®*, lo que permite convertirlas en luminarias inteligentes para servicios de geolocalización y transmisión. Por otra parte, *LiFiMAX®* es un sistema óptico inalámbrico que permite disponer de internet a través de luz no visible a un máximo de 16 usuarios con una tasa de datos de 100 Mbps de bajada. La Fig.2.2 muestra dichos dispositivos de comunicación VLC.

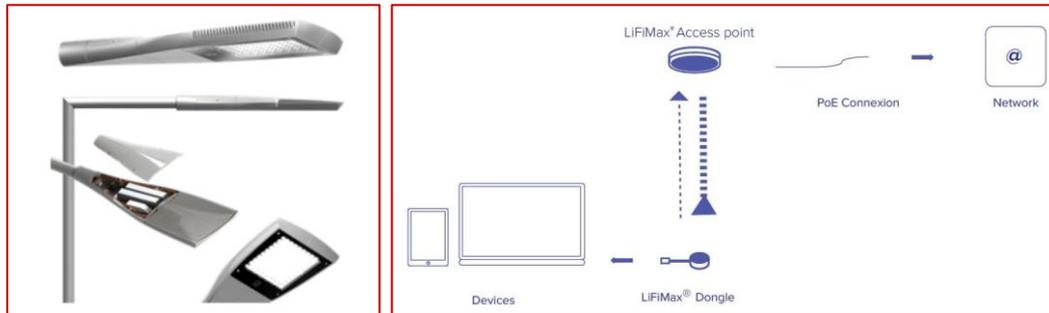


Fig. 2.2. Detalle de dos dispositivos VLC con tecnología *LiFiNET®* &/o *GEOLiFi®* y *LiFiMAX®* [10]

VLNcomm, fundada en 2013 en Virginia, Estados Unidos, es una empresa centrada en la investigación y desarrollo de la tecnología VLC. Entre sus productos, destacan *LumiStick II*, con un precio de 500€ y *LumiLamp* (ver Fig.2.3.). Ambos proporcionan VLC con una tasa de datos de 108 Mbps de bajada y 53 Mbps de subida, usando luz con longitudes de onda entre los 420 y 680 nm, y los 800 y 875 nm, respectivamente. El primer equipo mencionado es un dispositivo en forma de adaptador USB, mientras que el segundo es una lámpara de mesa.

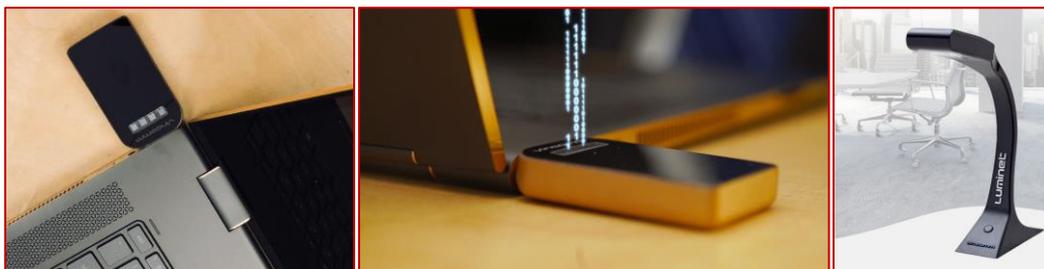


Fig. 2.3. Elementos VLC *LumiStick II* y *LumiLamp* creado por VLNcomm [11]

LumiNex es un panel LED de comunicación LiFi de esta misma empresa. Utiliza Ethernet para conectarse a Internet de forma inalámbrica a través de la luz emitida por los LED. La comunicación inalámbrica se lleva a cabo mediante variaciones en la intensidad de la luz. Permite hasta quince conexiones simultáneas utilizando ordenadores con el sistema *Lumistick*. Este sistema se muestra en la Fig.2.4.

Los productos mencionados anteriormente destacan por su diseño compacto, fácil instalación y grandes prestaciones, aunque su precio puede llegar a ser elevado, como se ha mencionado.

Otras empresas que están compitiendo por el mercado de los sistemas de VLC son: **General Electric** (United States), **Koninklijke Philips N.V.** (the Netherlands), **Panasonic Corporation** (Japan), **Acuity Brands Inc.** (United States), **LightPointe Communications Inc.** (United States), **LightBee Corporation** (United States) y **FSONA Networks** (United Kingdom) [8].

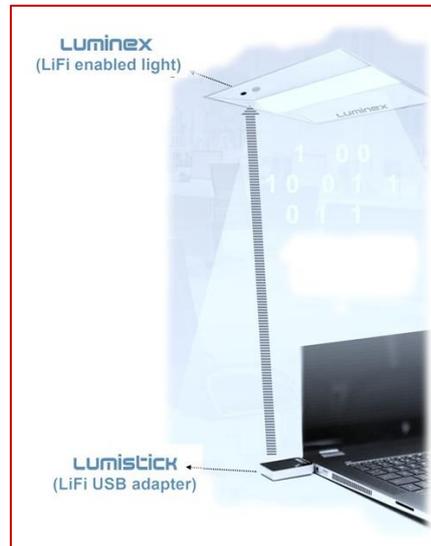


Fig. 2.4. Elementos del sistema VLC *LumiNex* creado por VLNcomm [11]

Por otra parte, conviene destacar que algunos de los productos que tienen por objetivo esta conectividad Li-Fi están en desarrollo y aún no están disponibles para su uso comercial.

2.2. Prototipos experimentales VLC de bajo coste

En este apartado se analizan algunos ejemplos de prototipos de sistemas VLC de bajo coste, desarrollados por distintos grupos de investigación, y que han sido presentados en congresos internacionales IEEE o publicados en revistas de gran prestigio (con alto factor de impacto) y tienen, en algunos casos, un número de citas elevado. Este apartado no pretende ser una revisión del estado del arte exhaustiva.

El objetivo del diseño de este tipo de sistemas VLC es la obtención rápida de un prototipo con hardware de bajo coste listo para usarse.

En la conferencia **IEEE SoutheastCon** en 2014, investigadores de la Universidad de North Carolina presentan un artículo que muestra una comunicación óptica para interiores con luz ambiental, a través de luz visible. Para ello se utiliza un LED como dispositivo transmisor y una cámara digital como receptor. La señal de comunicación se transmite como una secuencia de valores de 0 y 1, valores que apagan o encienden la fuente de luz. Una cámara recibe la señal observando la presencia o ausencia del punto de luz proyectado en una superficie intermedia y convirtiendo esto de nuevo en una señal binaria de valores de 0 y 1. El *driver* transmisor se compone de un microcontrolador que generará la señal, y un circuito para el control de luz,

compuesto por un MOSFET (Transistor de Efecto de Campo de Metal-Óxido-Semiconductor), una resistencia y una linterna LED (ver Fig.2.5.). El receptor es una cámara digital de 15 FPS conectado a la popular placa *Raspberry Pi* [12], la cual procesará los datos recibidos para obtener el mensaje. La modulación seleccionada es tipo OOK (*On-Off Keying*) debido a su simplicidad y se consigue una transmisión de datos a una velocidad de 5 bps sin errores.

En este trabajo fin de grado, el proceso de creación de la señal se realizará a través de un microcontrolador con una salida de 0 V o 3,3 V. Como se describirá en capítulos posteriores, se propone la generación de la señal procesada a través de software, que gobierna un ordenador de bajo coste tipo *Raspberry Pi*, que también nos proporcionará un voltaje apropiado para alimentar el *driver* transmisor.

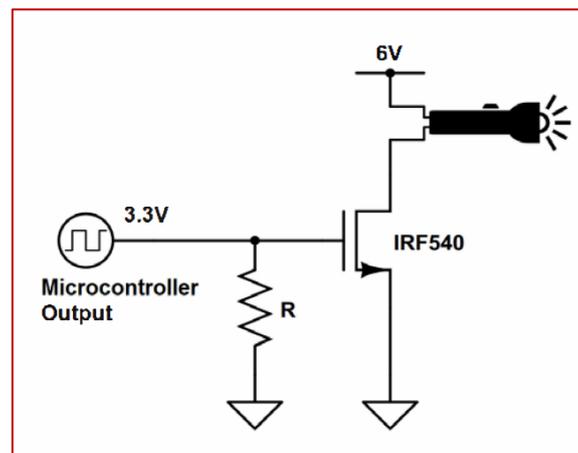


Fig. 2.5. Diagrama del circuito transmisor propuesto por la Universidad de North Carolina [13]

Este mismo año se publicó el artículo titulado ***A 3-Gb/s Single-LED OFDM-Based Wireless VLC Link Using a Gallium Nitride μ LED*** [14]. En él sus autores presentaban un sistema para conseguir una VLC con una tasa de datos de 3 Gbps usando un único LED de nitrato de galio de 50 μ m a una distancia de 5 cm. El dispositivo descrito permite un ancho de banda de hasta 60 Mhz, significativamente superior al ancho de banda que se puede conseguir con LEDs blancos comerciales. En este documento se utiliza el esquema de modulación OFDM (Multiplexación por división de frecuencias ortogonales). Este esquema tiene una complejidad mayor que la modulación OOK, aunque proporciona mayor velocidad de transmisión, es decir, mayores prestaciones.

En el año 2015 aparece publicado en la revista **IEEE Communications surveys & tutorials** un artículo [15] en el que se revisan algunos trabajos de la época, sobre prototipos VLC de bajo coste. En esta publicación, los investigadores de la Universidad de California presentan un diagrama esquemático de un sistema VLC con varios módulos, tanto en la transmisión como en la recepción (ver Fig.2.6.), con un array de LEDs.

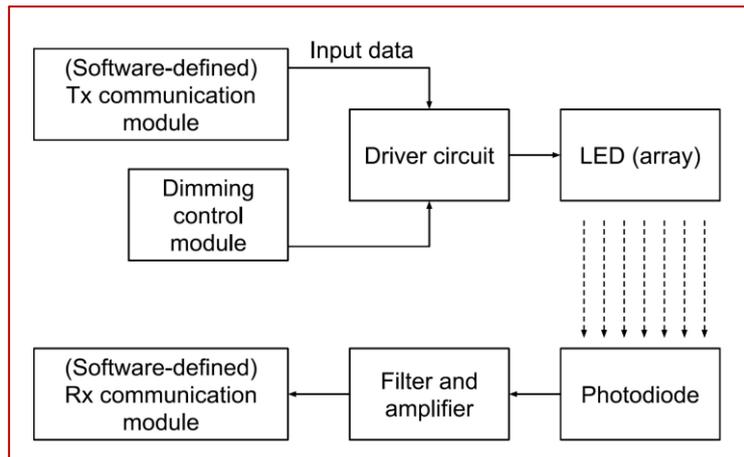


Fig. 2.6. Diagrama de bloques de un sistema VLC [15]

OpenVLC es una implementación de código-abierto para investigación en redes de VLC que también se cita en este artículo [15]. Consta de una tarjeta *BeagleBone Black* (BBB) como módulo de comunicación que utiliza la normativa IEEE 802.15.7 para comunicación óptica inalámbrica por luz visible. Utiliza un interfaz bidireccional que puede actuar como LED (ver Fig.2.7.) o como fotodiodo, transmitiendo y recibiendo señales de luz, respectivamente. Esta implementación utilizaba modulación OOK en la transmisión. La señal OOK directamente recibida en el receptor es demodulada.

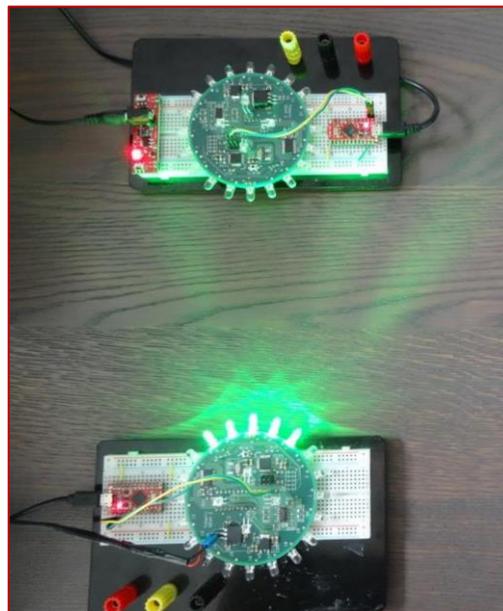


Fig. 2.7. Módulo de transmisión VLC con 20 LEDs permitiendo una cobertura de 360° [16]

En el año 2017, en la **4th International Conference on Systems and Informatics (ICSAI)** se presenta el diseño de un sistema con transceptores VLC con LEDs de luz blanca. Se consigue una tasa de datos de 95,1 Mbps a una distancia de 3 metros, una longitud muy superior a la conseguida en trabajos anteriormente descritos, tal como se muestra en la Fig.2.8. En el receptor se reciben 300 lux, lo que también permite la iluminación en interiores.

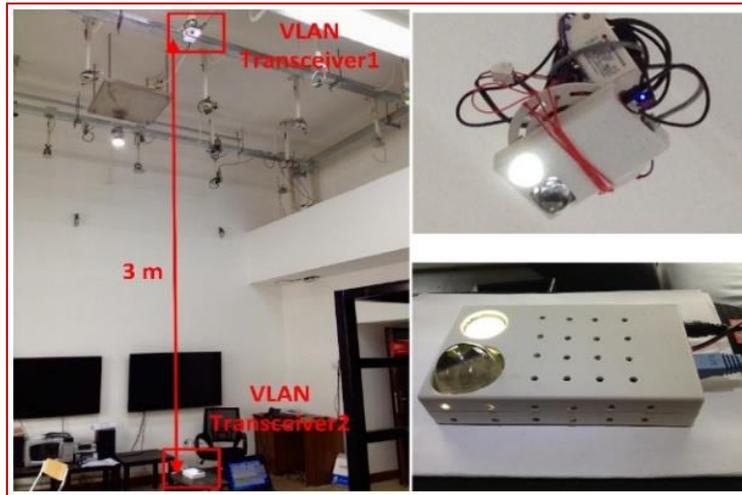


Fig. 2.8. Sistema VLC optimizado con tasa de transferencia de 100 Mbps [17]

También, en 2017 se presentó en la **International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI)** un trabajo en el que se muestra un sistema VLC capaz de transmitir mensajes de texto a una distancia de 6 centímetros entre dos ordenadores con la ayuda de microcontroladores *Arduino*. El diseño consta de un transmisor formado por un LED de luz blanca y un receptor formado por un LDR (resistencia dependiente de la luz), como se muestra en la Fig.2.9. Ambos ordenadores tendrán instalados el software *Matlab* con el que se realiza la conversión texto-binario y binario-texto. La modulación utilizada es PWM (Modulación por ancho de pulso) consiguiendo transmitir 18 caracteres exitosamente.

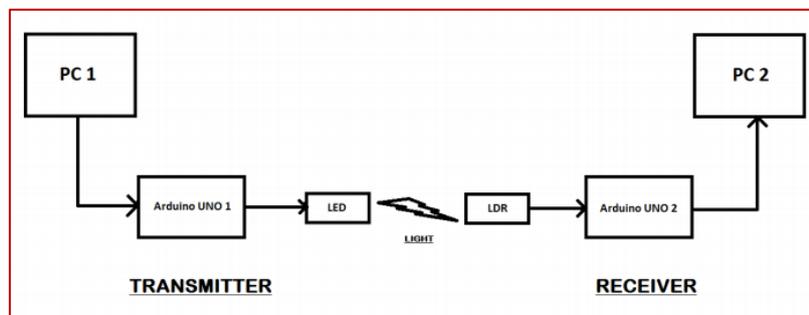


Fig. 2.9. Esquema T_x/R_x utilizado para la comunicación de datos en [18]

Posteriormente, en el año 2019, se publicó en la revista **Journal of lightwave technology** el artículo titulado: **15.73 Gb/s Visible Light Communication With Off-the-Shelf LEDs** [19]. En él se presentan resultados experimentales de un sistema VLC con una tasa de datos de 15,73 Gbps a una distancia de 1,6 metros. Se utiliza el tipo de modulación OFDM para modular cuatro longitudes de onda del espectro visible. En esta investigación, también se utilizan componentes comerciales de bajo coste y un sistema WDM (Multiplexación por división de longitud de onda) con 4 LEDs de bajo coste de color único, como fuentes de luz. Lo más destacable de esta investigación, respecto a otras de anteriores fechas, es la alta tasa de transmisión para un sistema VLC utilizando fuentes LEDs como elemento transmisor.

En una publicación más reciente, con título **Performance Analysis of LED Driver for Transmitter of Visible Light Communication Using Pulse Width Modulation**, se examina las capacidades de un transmisor VLC usando el *driver* LED comercial *LT8391* de *Analog Devices*. Se usa la modulación PWM lo que permite minimizar el parpadeo mediante el ajuste del ciclo de trabajo (*duty cycle*). El circuito transmisor, mostrado en la Fig.2.10., es complejo y se basa en el módulo de evaluación comercial *DC2345A*, reemplazando todos los transistores por transistores de tipo PMOS (Positive-channel Metal-Oxide Semiconductor). Hay que señalar que, además, utilizan un microcontrolador *Arduino* para proporcionar la señal PWM.

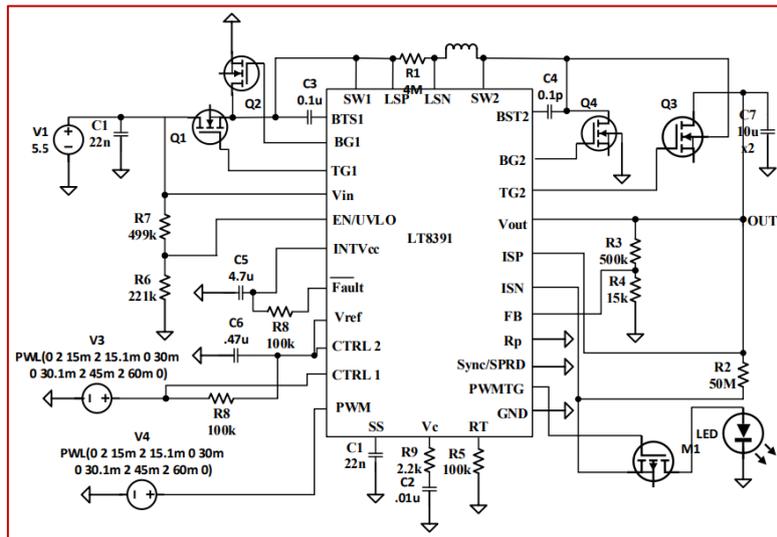


Fig. 2.10. Esquema del circuito transmisor VLC con el driver LED LT8391 [20]

Por último, en el trabajo titulado **Visible-light communication using high-power LED panel-lamp and low-complexity MOSFET circuit** [21], publicado en 2021, se consigue una VLC para interiores con una tasa de datos de 2 Mbps a una distancia de 6 metros usando la modulación OOK. También, se observa que con la modulación 4-PAM (Modulación por amplitud de pulso) se puede doblar esta tasa de datos. El transmisor se compone de un circuito modulador formado por un MOSFET, una resistencia y un panel de LEDs de alta potencia conectados en serie.

Como se ha mencionado en este apartado, estos prototipos permiten un desarrollo muy rápido del sistema VLC a un coste menor, que es suficiente en muchas aplicaciones de investigación y comerciales. Sin embargo, su rendimiento a menudo está limitado por el hardware (procesador, velocidades ADC/DAC, frecuencia LED, etc.), lo que los hace más adecuados para aplicaciones de baja velocidad de datos.

Con este Trabajo Fin de Grado pretende mostrar, como se ha comentado en el capítulo 1, que es posible diseñar y montar un prototipo de muy bajo coste, que aplique la tecnología VLC para comunicación unidireccional a corta distancia. Para ello se utilizarán dispositivos comerciales como transistores, LEDs, fotodiodos, amplificadores y placas Raspberry Pi, además del uso de lenguaje de programación para la codificación y decodificación de los datos contenidos en los archivos de texto. Este prototipo podría servir para iniciarse en la investigación en este campo, y proporcionar una base para posibles futuras mejoras del prototipo.

3. DESCRIPCIÓN DE VLC

El objetivo de este capítulo es proporcionar una descripción general de la tecnología VLC (Comunicaciones por Luz Visible), destacando sus ventajas y desventajas. Además, se presentará de forma resumida distintas modulaciones aplicables, y se mostrarán algunas de las aplicaciones que tiene, o que podría llegar a tener esta tecnología si continua su desarrollo en el futuro.

3.1. Introducción

Como se ha mencionado anteriormente en este documento, el interés por las Comunicaciones por Luz Visible ha aumentado exponencialmente en los últimos años. Esto se debe a las numerosas ventajas que ofrece y al problema de limitación de espectro electromagnético que sufren las comunicaciones por radiofrecuencia (RF) (3 kHz – 300 GHz, Fig.3.1) [22].

El espectro electromagnético por debajo de los 10 GHz, con propiedades favorables para la comunicación, está ampliamente utilizado por las actuales tecnologías inalámbricas, y casi está agotado. Además, esta región del espectro tiene regulado su utilización por las autoridades locales e internacionales, y presenta importantes interferencias entre los puntos de acceso a dichas radio frecuencias. El espectro óptico (Infrarrojo-visible-ultravioleta) es considerado una solución prometedora para el desarrollo de redes de comunicación de alta capacidad y densidad, como la red inalámbrica 5G.

Las VLC utilizan la región visible del espectro electromagnético, entre los 380 nm (ultravioleta) y 780 nm (infrarrojo), para realizar transmisiones de datos de forma inalámbrica, con unos 400 THz de ancho de banda [23]. Para realizar este tipo de comunicaciones se utilizan sistemas con configuración **LoS (Line of Sight)**, ya que se requiere una visión directa entre transmisores y receptores. Estos sistemas se componen de un transmisor, el cual modula la luz producida por un LED (*Light Emitting Diodes* – Diodo emisor de luz) o LD (*Laser Diodes* – Diodo laser) y un receptor, es decir, un fotodetector o un sensor de cámara cuya señal será demodulada para que se produzca una comunicación completa [22] [24].

En cuanto a las características que hacen especialmente atractivas las comunicaciones por luz visible podemos mencionar los siguientes aspectos:

- **Ancho de banda:** La banda de las RF va desde los 3 kHz a los 300 GHz aproximadamente, mientras que VLC utiliza el espectro de luz visible que en frecuencia va desde los 400 THz a los 780 THz aproximadamente, lo que supone unos 400 THz de ancho de banda, ver Fig.3.1. Asimismo, el hecho de que esta parte del espectro no esté regulada aporta un valor añadido a esta tecnología, ver por ejemplo la referencia [22].
- **Interferencias:** Las Comunicación por Luz Visible, VLC, no producen interferencia con señales de radiofrecuencia, por lo que es ideal para comunicación en espacios donde se requieran diversas comunicaciones sin que afecte a la precisión de las comunicaciones necesaria, y ya desplegadas en esos entornos. Ejemplos de estos sectores son los hospitales, la industria de la construcción o la industria aeroespaciales.

- **Seguridad:** La luz visible tiene una capacidad innata, no puede traspasar paredes. Esto hace que nadie pueda interferir o espiar la comunicación desde otros recintos, salas o habitaciones, como sí ocurre con las señales RF.
- **Salud:** La luz visible no es dañina para los humanos. Lo que puede afectar a nuestra salud es el parpadeo (*Flicker*), de la luz observada, o las fluctuaciones en su intensidad. En la normativa IEEE 802.15.7 se sugiere que para que no tenga efectos dañinos para los humanos, el *parpadeo* de la luz utilizada para la comunicación por luz visible debe ser de una frecuencia superior a los 200 Hz; es decir, una frecuencia superior al umbral de percepción del ojo humano [5].

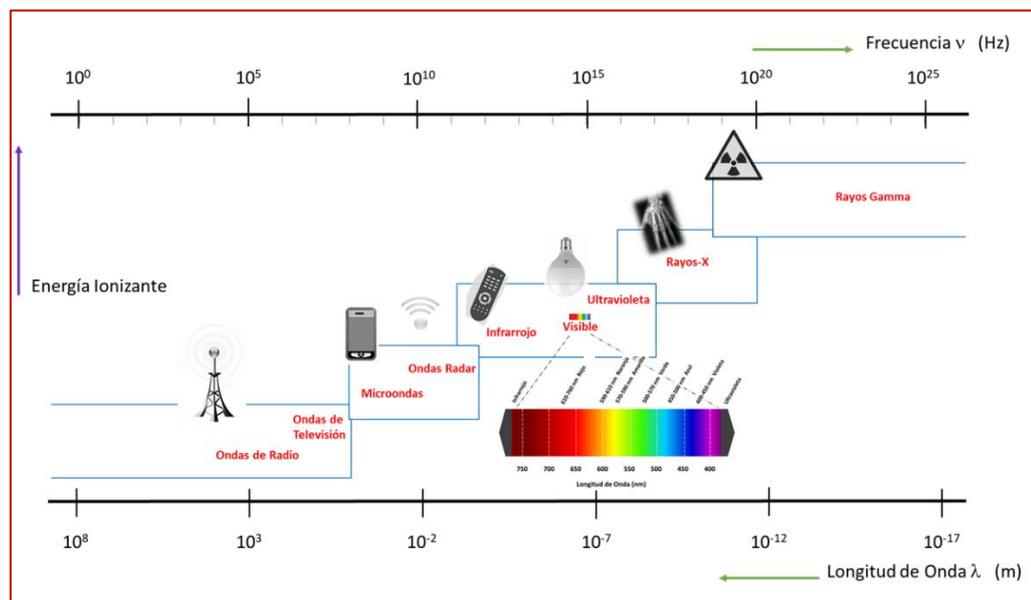


Fig. 3.1. Espectro electromagnético

- **Eficiencia energética de los elementos de transmisión:** Algunos LED comerciales llegan a tener una eficiencia lumínica de más de 150 lúmenes/vatio, mientras que las bombillas incandescentes tienen una eficiencia de unos 15 lúmenes/vatio, y los fluorescentes de 60 lúmenes/vatio, lo que supone una mayor eficiencia energética de los dispositivos LEDs [24] [25]. Además, otro factor ventajoso es la vida útil de los LEDs, que ronda entre las $2,5 \cdot 10^4$ y $5 \cdot 10^4$ horas, significativamente superior a los fluorescentes compactos (10^4 horas) [24].
- **Coste:** La tecnología VLC se puede instalar sobre la infraestructura de la luminaria actual, por lo que se puede desplegar asumiendo un coste menor que la comunicación, por ejemplo, a través de Wifi; además de una mayor precisión si se trata de localización en interiores [22] [24] [26].

Por otro lado, la tecnología de la comunicación VLC también tiene ciertas desventajas o limitaciones con respecto a otras técnicas de comunicación:

- **Ruidosa en aplicaciones en el exterior:** Se puede producir ruido en el receptor VLC debido a la luz ambiental, por lo que para aplicaciones en exteriores se debería tener en cuenta este hecho [27].
- **Poco apropiado para comunicaciones distantes:** No es apropiado realizar comunicaciones por luz visible a grandes distancias debido a que se encuentran ciertas limitaciones por el ancho de banda del transmisor y por diversas fuentes de luz externas que pueden influir e interferir en el rendimiento de las comunicaciones. Además, al ser una comunicación LoS, cualquier obstáculo cortaría la transmisión de datos [22].

A continuación, se muestran algunas ventajas y desventajas de VLC:

TABLA 3.1. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS VLC

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Gran capacidad de ancho de banda	Elevado ruido en aplicaciones exteriores
Banda del espectro no regulado por normativa	Atenuación de la señal en grandes distancias
Sin interferencias electromagnéticas	Bloqueo por obstáculos
Mayor seguridad en las comunicaciones	Limitada potencia de transmisión
Sin efectos dañinos para las personas	Interferencias debido a luz natural o artificial
Eficiente consumo de energía	
Bajo coste económico	

3.2. Técnicas de Modulación en VLC

Existen diferentes técnicas que se utilizan en el transporte de datos sobre ondas portadoras, en las que se varía algún parámetro de la onda portadora con el fin de transmitir una señal. Cada parámetro (frecuencia, fase, amplitud, intensidad) da lugar a un tipo de modulación.

Una de las diferencias más notables entre la tradicional comunicación por radiofrecuencia, donde la señal portadora de datos modula el campo \vec{E} bipolar de valor complejo irradiado por una antena, y la comunicación por luz visible a través de LEDs, es que, en esta última, debido a las propiedades físicas de estas fuentes de luz, la información no puede ser codificada en fase y amplitud en la señal de luz, ver por ejemplo [24]. Esto significa que las técnicas de modulación en fase o cuadratura no se pueden aplicar en VLC: la información ha de ser codificada en el transmisor usando variaciones en la intensidad de la onda de la luz que se emite. En otras palabras, en VLC la señal ha de ser **unipolar positiva** y con *valor real*, por lo que para transmitir un mensaje se utilizará la variación de la intensidad de la luz.

Cuando un elemento de iluminación se utiliza para comunicación VLC, como por ejemplo un LED, el circuito controlador que modula la información que se transmite es elegido con el fin de poder modificar la luz emitida para transmitir los datos. Por ejemplo, los datos binarios 0 y 1 pueden

ser transmitidos eligiendo dos niveles diferenciados de intensidad de luz del LED. Por otra parte, la demodulación de la señal enviada se realiza con la señal detectada en el receptor, como por ejemplo un fotodiodo.

Este tipo de técnicas de modulación que se usan en VLC son conocidas como modulaciones **IM/DD** (*Intensity Modulation/Direct Detection*) [24]. Además, atendiendo al número de ondas portadoras utilizadas en la modulación para la transmisión de información podemos distinguir dos tipos de modulaciones. La **Modulación monoportadora** (*Single-carrier modulation*) y la **Modulación multiportadora** (*Multicarrier modulation*). La primera de ellas utiliza una sola portadora con una sola frecuencia, mientras que la segunda utiliza varias ondas portadoras para transmitir la información. En este trabajo fin de grado se va a utilizar un tipo de modulación **IM/DD monoportadora** debido a su mayor simplicidad y bajo coste.

Por otra parte, cualquier esquema de modulación en VLC deben cumplir con los requerimientos que se le demanda a la luz que perciben los seres humanos. Estas exigencias sobre la luz percibida pueden caracterizarse por los siguientes factores que influyen en la modulación VLC:

- **Atenuación o Difuminación** (*Dimming*). Diferentes tipos de actividades que realizamos los humanos requieren diferentes iluminancias; es decir, diferentes niveles de *flujo luminoso*. La utilización de LEDs en VLC permite regular el nivel necesario dependiendo de la actividad realizada o del lugar iluminado, mejorando así el consumo de energía y evitando daños sobre el ojo humano. El impacto de la atenuación de la luz emitida por los LEDs de los dispositivos VLC sobre los humanos no es lineal. La luz percibida puede ser calculada a partir de la luz medida con la siguiente relación (ver por ejemplo [24]):

$$Luz\ percibida\ (\%) = 100 \sqrt{\frac{Luz\ medida\ (\%)}{100}} \quad (1)$$

Esto significa que una atenuación del 1 % en la luz emitida por un LED se percibe por el ser humano como una disminución de luz del 10 %. Esto es muy importante tenerlo presente en términos de comunicación por luz visible: independientemente del grado de iluminancia elegida por el usuario, la comunicación no se ha de ver afectada.

Por ello, la información debe ser modulada de tal forma que cualquier nivel de iluminancia sea tolerado durante la comunicación.

- **Reducción del Parpadeo** (*Flicker*). Otra exigencia para cualquier tipo de modulación en las VLC es que no produzca la sensación de variación en la luminosidad de la luz en los humanos. El hecho de que una persona note este parpadeo de la luminosidad de la luz puede ser perjudicial para su salud. En la norma internacional IEEE 802.15.7 [5], se recoge la frecuencia mínima recomendable para que este parpadeo (o variación de la intensidad de la luz) sea imperceptible por el ser humano; este valor debe ser superior los 200 Hz (periodo máximo de parpadeo < 5 ms) para evitar cualquier efecto dañino para la salud.

Por tanto, la información debe ser modulada de forma que se evite la percepción de parpadeo de la luz.

3.2.1. Modulaciones monoportadoras

En esta sección serán descritas cuatro tipos de modulaciones monoportadoras:

- **OOK (On-Off Keying)**

Debido a su sencillez en el diseño y a su fácil implementación es uno de los esquemas de modulación más usados en comunicaciones ópticas inalámbricas tipo VLC [28] [29]. Los LEDs (opción más deseada en sistemas VLC de bajo coste) o los LDs se encienden o apagan a velocidades elevadas para que no sea percibido por el ojo humano, de acuerdo con los datos transmitidos. Los datos se representan usando un **0** o un **1** digital, que equivale al estado **apagado** o **encendido**, respectivamente. Ahora bien, el que el modo apagado esté fijado, no implica que los LEDs estén completamente apagados, sino una reducción significativa de su nivel de intensidad.

El uso de esta técnica de modulación tan sencilla de llevar a cabo está contemplado para VLC en la norma **IEEE 802.15.7**, donde se incluyen dos vías para proporcionar la atenuación de la luz (*Dimming*), mejorando así sus prestaciones.

A pesar de que esta técnica de modulación tiene la ventaja de su simplicidad y fácil implementación, lo que conlleva un bajo coste, según algunos autores su principal limitación es su baja tasa de datos, principalmente cuando se aplican diferentes niveles de atenuación (*dimming levels*). Con una variante OOK denominada **NRZ (Non-Return-to-Zero) OOK**, tasas de datos del orden de 10 Mbps han sido obtenidos en una comunicación VLC [29]. Ahora bien, otros autores han publicado valores de hasta 400 Mbps en un sistema VLC con modulación OOK [30].

- **PWM (Modulación por ancho de pulso)**

Esta técnica de modulación está diseñada para intentar solucionar la limitación de la técnica OOK con la aplicación de niveles de atenuación. Es una modulación en la que se envía la señal modulada ajustando los **anchos de los pulsos** para obtener así la atenuación que se requiera. La tasa de datos de la señal modulada debe ajustarse de acuerdo con la atenuación requerida. Con esto se consigue obtener, sin variar la intensidad de la luz, altos niveles de atenuación. El inconveniente de la modulación PWM sigue estando en la limitada tasa de datos de envío; algunos autores han publicado valores de 4,8 kbps [24].

- **PPM (Modulación por posición de pulso)**

La modulación **PPM** o *modulación por posición de pulso* se caracteriza por transmitir la información en pulsos cortos. Estos pulsos tienen todos la misma duración y amplitud, modificándose, únicamente, la posición de cada pulso en una base de tiempo, dependiendo de la señal que sea transmitida. Como la modulación PPM, sólo proporciona un pulso por tiempo de símbolo, presenta una baja tasa de datos y una baja eficiencia espectral, además de gran dificultad en la sincronización con el receptor. Por ello se han venido proponiendo diversas variantes, como la modulación **OPPM (Overlapping PPM)**, que permite variar el número de pulsos transmitidos, pudiendo estos solaparse, lo que conlleva no solo una mayor eficiencia espectral que las modulaciones OOK o PPM sino un amplio intervalo de niveles de atenuación a altas tasas de datos.

Otra variante es la modulación **MPPM** (*Multiple PPM*), que permite la transmisión de múltiples pulsos en el mismo tiempo de símbolo, con la que se consigue una mayor eficiencia espectral que OPPM. Existen otras variantes del esquema de modulación PPM, entre las que se encuentra la modulación **OMPPM** (*Overlapping MPPM*), la modulación **DPPM** (*Differential PPM*) o **DOPPM** (*Differential Overlapping PPM*), que son similares a la modulación PPM pero que se combina con otros tipos de modulaciones. En el estándar IEEE 802.15.7 se propone una mezcla de modulación PPM y PWM que se denomina **VPPM** (*Variable PPM*). Con ella se puede variar la posición de pulso como en la PPM y variar el ancho del pulso permitiendo obtener niveles de atenuación diferente. En la Fig.3.2. y Fig.3.3. se muestra un diagrama esquemático mostrando las diferencias entre las diferentes técnicas de modulación presentadas en este apartado.

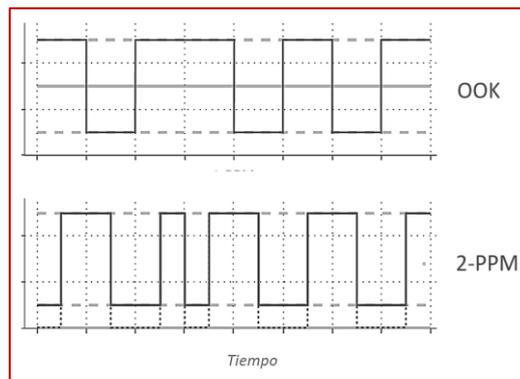


Fig. 3.2. Comparación esquemática de la modulación OOK y PPM

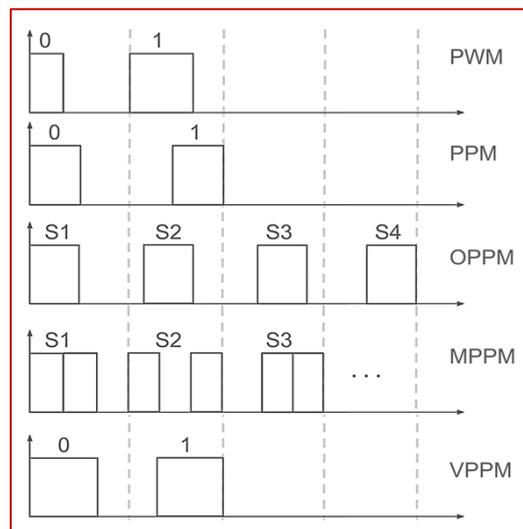


Fig. 3.3. Comparación esquemática de la modulación PWM y diferentes variantes de PPM

- **PAM (Modulación por amplitud de pulso)**

Esta modulación es muy básica y eficiente en el ancho de banda [31]. La información transmitida se modula en la amplitud del pulso de la señal. Esta modulación se representa de la siguiente manera: **M-PAM**, donde M representa el número de símbolos o amplitudes diferentes durante la transmisión de la señal, o también conocido como

orden de modulación. Está siendo utilizada por investigadores debido a su estructura tan simple, por la mínima complejidad computacional y por su flexible implementación. La eficiencia espectral se puede mejorar aumentando el orden, M , de modulación. La Fig.3.4. representa un ejemplo esquemático de dicha modulación para 4 amplitudes.

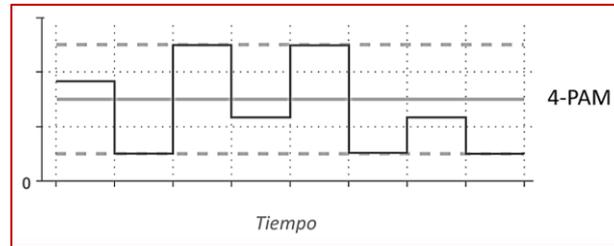


Fig. 3.4. Ejemplo esquemático de modulación 4-PAM

3.2.2. Modulaciones multiportadoras

Las modulaciones monoportadoras pueden llegar a no ser eficaces cuando es necesario una alta tasa de transferencia de información. En estos casos surgen problemas como la **no linealidad** de la señal enviada por los LEDs, o los altos valores de **interferencias entre símbolos (ISI)**, a causa de la respuesta no lineal en frecuencias de los canales de comunicación de la luz visible. Las modulaciones multiportadoras consiguen mitigar estos problemas en transferencia a altas tasas de datos. Una de las modulaciones más utilizadas es la que se conoce como **multiplexación por división ortogonal de frecuencia (OFDM)**.

- **OFDM (Multiplexación por división ortogonal de frecuencia)**

Esta técnica de modulación multiportadora para comunicación por luz visible divide el ancho de banda en múltiples subportadoras con diferentes frecuencias que transmiten la información en paralelo. Las frecuencias de las subportadoras son elegidas de forma que las señales son matemáticamente ortogonales sobre cada periodo de símbolo. Tanto la modulación como la multiplexación son llevadas a cabo digitalmente utilizando la **inversa de la transformada rápida de Fourier (IFFT)**. En OFDM los espectros de las subportadoras individuales solapan, pero debido a las propiedades de ortogonalidad, las subportadoras pueden ser demoduladas sin interferencia y sin la necesidad de filtros analógicos para separar la señal recibida. La demodulación y la demultiplexación es llevada a cabo con la **transformada rápida de Fourier (FFT)** [32]. La Fig.3.5. muestra un modelo de un sistema OFDM para comunicaciones por luz visible según Mesleh *et al.* [33]

Esta modulación se utiliza ampliamente en sistemas de comunicación de banda ancha por su capacidad para reducir las **interferencias intersimbólicas** causadas fundamentalmente en canales con alta dispersión [32]. Destaca por su gran potencial llegando a alcanzar los Gbps [24] y, al contrario que las modulaciones monoportadoras, posee una gran eficiencia espectral.

Como ya ha sido mencionado en este capítulo, la modulación de la información que se desea transmitir con las técnicas de modulación utilizadas en comunicaciones RF para **OFDM** no son válidas para VLC, ya que generan señales **bipolares complejas**. Este tipo de señales no pueden

ser transmitidas en sistemas de comunicaciones **IM/DD**, del tipo **VLC**, debido a que las señales deben ser reales y positivas (unipolares). Por ello, se hace uso de la simetría Hermítica, que permite obtener señales reales.

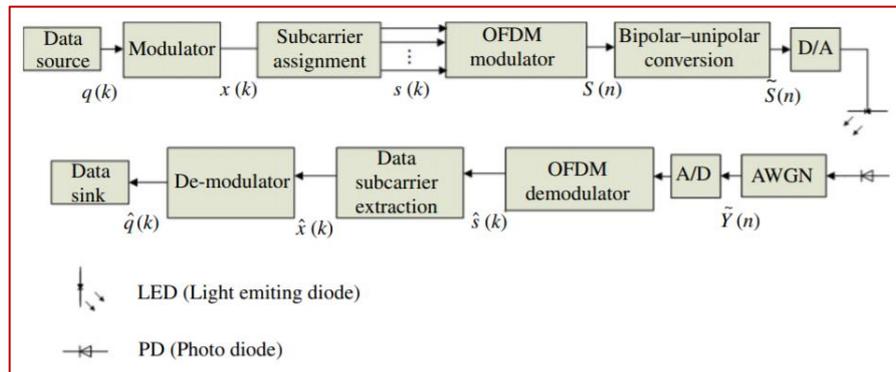


Fig. 3.5. Modelo de sistema OFDM para comunicaciones por luz visible [33]

Pero todavía se deben obtener señales unipolares positivas, para conseguirlo se pueden utilizar dos técnicas OFDM para IM/DD distintas o variantes OFDM:

1. **DCO-OFDM (DC-biased Optical OFDM):**

En esta variante se añade una **señal continua DC** a la señal OFDM para eliminar la parte negativa de la señal y obtener la señal unipolar positiva deseada. Todas las subportadoras se modulan. En la Fig.3.6. se muestra un esquema del sistema de modulación **DCO-OFDM** para VLC. Se comienza codificando los bits de entrada con la modulación M-QAM, gracias a la simetría Hermítica se consigue una señal real ($X(k)$), con **IFFT** obtenemos la señal en dominio de tiempo ($X(n)$). Tras esto, se procede a añadir prefijo cíclico (CP) el cual eliminara la interferencia inter-simbólica (**ISI**). Como sigue habiendo muestras negativas, como se observa en la Fig.3.6., se añade la señal continua **DC Bias** para cambiar las muestras negativas a positivas y así obtener toda la señal positiva ($X_c(n)$). La Fig.3.7. muestra un resultado de la señal temporal de este tipo de modulaciones, según Mesleh *et al.* [34]. En esta figura se puede observar que es necesario, después de la modulación, la aplicación del DC Bias para que se elimine la parte negativa de la señal.

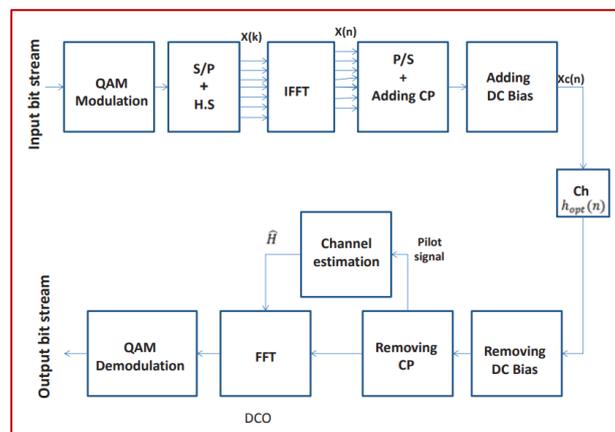


Fig. 3.6. Diagrama de bloques de un sistema de modulación DCO-OFDM [35]

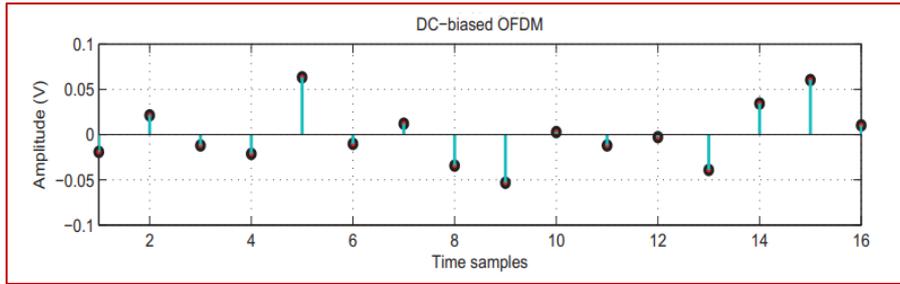


Fig. 3.7. Salida de la señal temporal OFDM para la variante DC-bias OFDM para $N = 16$ [34]

2. ACO-OFDM (Asymmetrically-Clipped Optical OFDM)

En la Fig.3.8. se muestra un esquema del sistema de modulación **ACO-OFDM** para un sistema VLC. En esta variante de la modulación OFDM sólo se modulan las subportadoras impares, poniendo las subportadoras pares a 0 . Esto produce que la señal tenga simetría impar, como se muestra en Fig.3.9., por lo que al realizar el recorte (*clipping*) de la parte negativa no se pierde información, quedándose únicamente, la parte positiva, $X_c(n)$. La Fig.3.9. muestra un resultado de la señal temporal de este tipo de modulaciones, según Mesleh *et al.* [34].

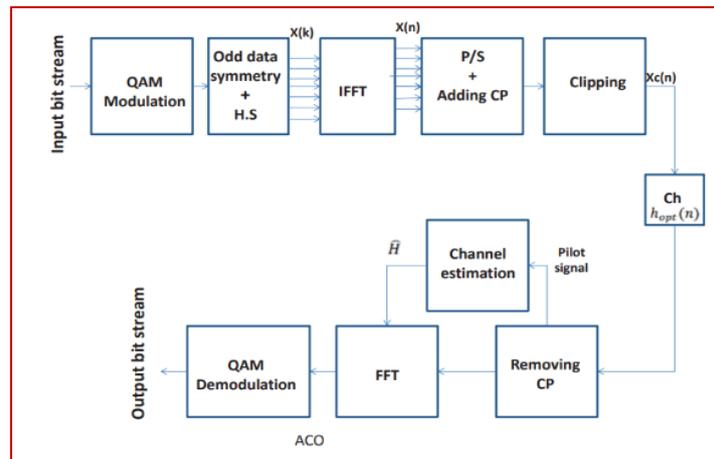


Fig. 3.8. Diagrama de bloques de un sistema con modulación tipo ACO-OFDM [35]

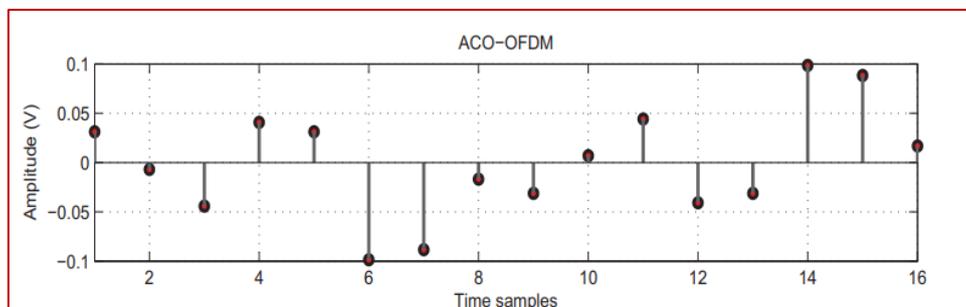


Fig. 3.9. Salida de la señal temporal OFDM para la variante ACO-OFDM para $N = 16$ [34]

Por último, hay que señalar que la modulación OFDM se enfrenta al problema de la no-linealidad de los LEDs. Esto, como ya se ha mencionado en este capítulo, se debe a que la relación de la corriente y la luz emitida por el LED no son lineales. Esto afecta especialmente a esta modulación para VLC, ya que sufre de altos **PAPR (Peak-to-Average Power Ratio)**. Como solución se propone operar el LED en un rango pequeño en el que sus parámetros son casi lineales [24].

3.3. Aplicaciones

Debido a las esenciales características que ofrecen los sistemas VLC, existe un amplio abanico de aplicaciones en las que se podría hacer uso de esta tecnología y aprovecharse de las ventajas que brinda, en contraste con la radio frecuencia. En este apartado se analizarán brevemente las siguientes aplicaciones de VLC: comunicación por luz visible en interiores, comunicación por luz visible en el transporte, sistemas de posicionamiento o localización por luz visible en interiores y comunicación por luz visible submarina.

3.3.1. Comunicaciones en interiores

Hoy en día, la mayoría de los hogares y espacios interiores de edificios disponen de luminarias tipo LEDs. Aunque la principal función de estos elementos es la actuar como fuente de iluminación, pueden ser adaptadas, siguiendo la normativa correspondiente a VLC, para proporcionar servicios de comunicación.

En la referencia [36] Matheus *et al.* mencionan varios trabajos en los que se consigue a través de un sistema VLC con bombillas LED, tanto la iluminación requerida, como la transmisión de datos dentro del mismo espacio. En algunos casos, mediante la utilización del sistema de **modulación OOK**, con los que se llega a conseguir comunicación inalámbrica a 200 Mbps. Además, se destaca la posibilidad de aplicar técnicas **MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)**, ya que las bombillas LED que se incorporan a las infraestructuras de luminarias pueden contener múltiples LED.

Como ya ha sido comentado, la comunicación en interiores se debe proporcionar con diferente grado de atenuación de la luz, e incluso cuando los usuarios la apaguen. Un ejemplo claro sería durante el día, cuando no hay necesidad de tener la luz encendida. Tian *et al.* [37] desarrollan un sistema con el que se permite una comunicación VLC incluso cuando los LED emiten una luminancia extremadamente baja. Para ello se codifican los datos en pulsos de luz ultracortos e imperceptibles por el ser humano, aunque sí por fotodiodos.

La Fig.3.10. muestra el concepto de un hogar inteligente donde está integrada la VLC; las luminarias LED se utilizan simultáneamente para la iluminación y la comunicación, pudiendo prestar soporte a lo que se conoce como **Internet de las Cosas (IoT)**. Dispositivos como ordenador portátil, teléfono móvil y televisión inteligente pueden ser utilizados en gran medida por esta tecnología.

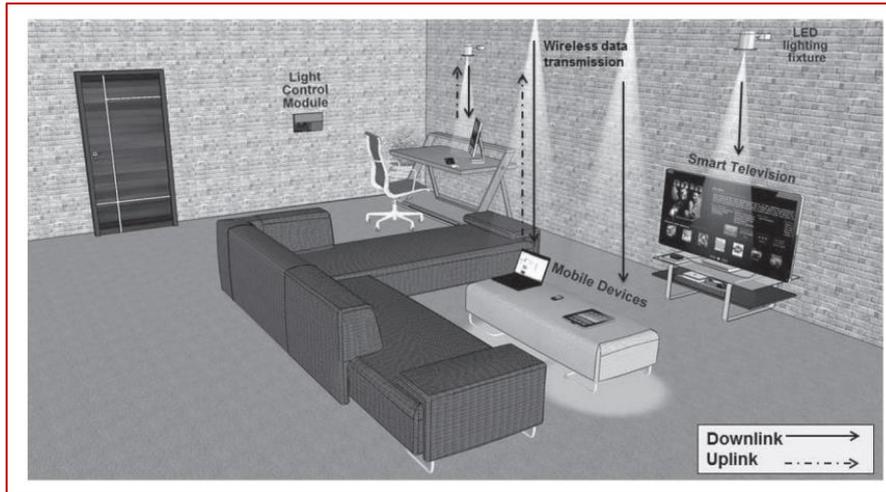


Fig. 3.10. Ejemplo de comunicaciones VLC integrada en la iluminación de interiores [22]

3.3.2. Comunicaciones en el transporte

Las comunicaciones tipo VLC entre vehículos (**V2V**), o entre vehículos e infraestructuras urbanas (**V2I**) puede llegar a ser una aplicación tremendamente útil y ventajosa, sobre todo en ciudades muy pobladas. Los vehículos actuales ya incorporan LEDs por lo que la implementación de VLC tendría un coste y complejidad inferior si se compara con los sistemas de RF. Sin embargo, es necesario considerar que esta aplicación se produciría en exteriores por lo que las interferencias con otras luces podrían llegar a ser un problema [36].

Esta tecnología se ha encontrado adecuada para aplicaciones de seguridad en el transporte. Al combinar los datos recogidos de los vehículos cercanos y de las infraestructuras, la seguridad vial se incrementaría considerablemente, como se pretende ilustrar en la Fig.3.11.

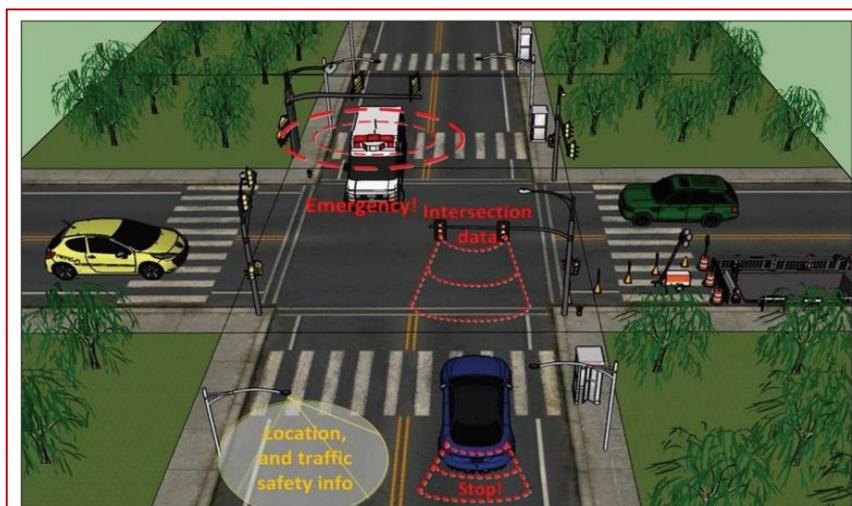


Fig. 3.11. Escenario de utilización de comunicación VLC para V2V y V2I [38]

3.3.3. Sistemas de localización en interior

La tecnología más usada para posicionamiento es el **GPS (Global Positioning System – Sistema de posicionamiento global)**, el cual tiene una precisión de unos pocos metros, lo que lo invalida como sistema de localización en interiores [39]. Para llevar a cabo una localización en interiores utilizando VLC, el receptor debe tomar la señal de los LEDs de iluminación y calcular la distancia desde ellos. Para ello es necesario utilizar varias **técnicas** que permitan establecer la posición exacta del receptor: **RSS (Received Signal Strength)**, **ToA (Time of Arrival)**, **AoA (Angle of Arrival)**.

En 2014 se presentó el sistema de localización en interiores **Luxapose** [40]. Aunque otros sistemas de localización utilizan fotodiodos como receptores, **Luxapose** usa **sensores de imagen**, como las cámaras de los teléfonos móviles. Además, utiliza los LEDs como transmisores, con el sistema de modulación **OOK**, y un servidor en la nube que se encarga de procesar las imágenes para proporcionar las coordenadas del receptor. Este sistema utiliza la técnica **AoA**, que requiere **LoS**, para establecer la posición exacta del receptor (*smartphone*), y su orientación con respecto al LED. Este sistema logra una precisión de 0,1 m, lo cual suponía una gran mejora respecto a los sistemas de localización de aquel momento. La Fig.3.12. muestra un esquema del sistema de posicionamiento para interiores **Luxapose** que permite la localización exacta de un *smartphone*, y su orientación.

Los sistemas VLC para posicionamiento también pueden servir de ayuda para personas invidentes, haciendo uso del **Sistema de baliza de luz visible** recogido por las normas **JEITA CP-1223** y **UNE-EN 62943:2017**, mencionadas en el apartado 1.3. de este trabajo. Debido a la precisión que ofrece, personas invidentes pueden verse beneficiadas al moverse por entornos de interiores. La luz producida por los LEDs transmite información de posicionamiento y el fotodiodo, incorporado en el *smartphone*, obtiene dicha información y envía a través de sonido la información de navegación al usuario [41]. Una ilustración de esta aplicación se muestra en la Fig.3.12.



Fig. 3.12. Utilización de la VLC para guiar a un invidente

3.3.4. Comunicaciones submarinas

Las VLC son muy adecuadas para comunicaciones submarinas, ya que las ondas **RF** sufren **altas atenuaciones** en este entorno, y las **ondas acústicas** tienen un elevado consumo de energía durante la transmisión y recepción. Además, tienen tasas de datos y ancho de banda bajos, llegando a alcanzar, únicamente, **10 kb/s** para distancias de unos km, y algo más si la distancia se reduce [42]. Junto a las ventajas de elevado ancho de banda y menor consumo energético se une la desventaja de la baja distancia de transmisión, algo menor a 50 m, que presenta la comunicación por luz visible en entornos submarinos. Esto se debe a la absorción del agua, la dispersión causada por partículas suspendidas o debido a fuertes perturbaciones causadas por el sol.

Las modulaciones comúnmente utilizadas en comunicaciones submarinas VLC son OOK o PPM. En [43] se muestra el desarrollo de un sistema capaz de transmitir información a unos 7 m utilizando la técnica OOK-NRZ, a tasas de 2,3 Gbps, aunque con un diodo laser de 520 nm.

Dentro de esta temática destaca el dispositivo **UTROV (UnTethered Remotely Operated Vehicle)**, un vehículo submarino que permite la observación submarina de los océanos y el despliegue de buques. En la Fig.3.13., se aprecian dos aplicaciones de comunicaciones ópticas que permite este sistema. La primera, comunicándose a un dispositivo que cuelga de un barco. La segunda, directamente a una estructura submarina.

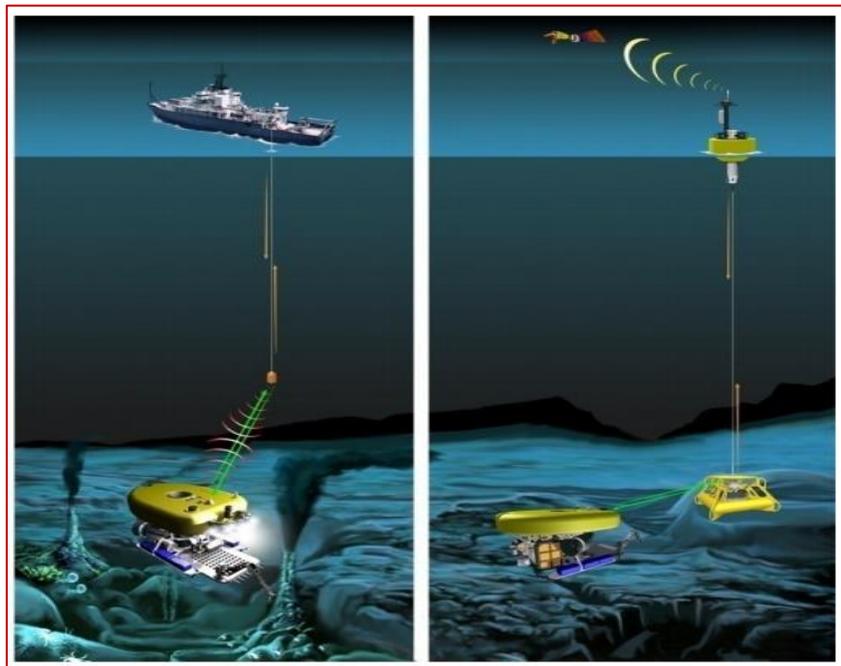


Fig. 3.13. Aplicaciones de utilización de VLC por UTROV [29]

4. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO

En este capítulo se presenta la tecnología necesaria para llevar a cabo el desarrollo y la puesta en funcionamiento de un **prototipo de sistema VLC de bajo coste**, objetivo de este trabajo fin de grado.

4.1. Introducción

A continuación, se va a mostrar tanto la descripción de la parte *hardware*, compuesta por componentes de bajo coste y dos placas **Raspberry Pi (RPI)**, una para el sistema de transmisión y otra para el sistema de recepción, como el software, implementado en las *RPI* para procesar los datos a transmitir y para decodificarlos en el receptor.

En este Trabajo Fin de Grado (TFG) se utilizará un dispositivo **LED de luz visible** para transmitir los datos desde la Raspberry Pi transmisora a un **fotodiodo**, que será el encargado de transformar esta luz en corriente eléctrica para que los datos puedan ser interpretados por la Raspberry Pi receptora. Tanto transmisor como receptor deben ser diseñados y optimizados para este propósito. En la Fig.4.1. se muestra un esquema del sistema de comunicación VLC de bajo coste que se desarrollará.

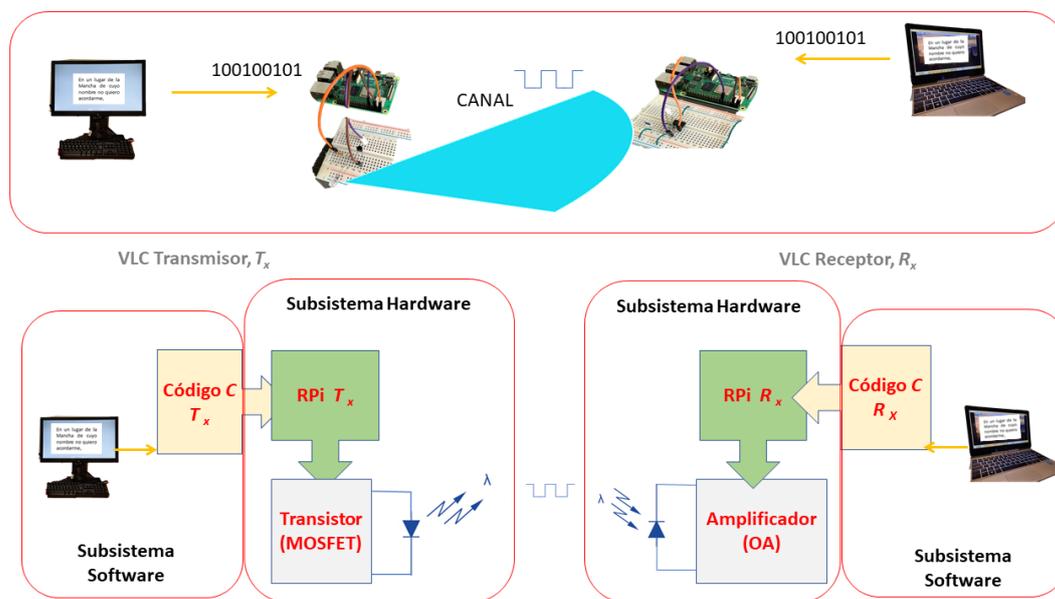


Fig. 4.1. Esquema del sistema de comunicación VLC de bajo coste

En resumen, este capítulo comenzará describiendo muy someramente la **placa Raspberry Pi** que se utilizará en el diseño y puesta a punto de un prototipo de comunicación por luz visible de bajo coste. A continuación, se mencionarán y describirán de forma concisa los componentes que conformarán el diseño de los **controladores de transmisión** y de **recepción**: LEDs, Fotodiodos, transistores, y amplificadores. Se finalizará con la descripción del **software** creado para gobernar la comunicación mediante luz visible con dispositivos de bajo coste.

4.2 Raspberry Pi

La compañía **Raspberry Pi Foundation** surgió con la idea de crear una plataforma informática de pequeñas dimensiones y con un precio asequible que permitiera a los jóvenes poder desarrollar capacidades en el entorno de la tecnología de la información y las comunicaciones [44]. Desde su fundación en 2009 la compañía ha ido creando diferentes modelos de placas Raspberry Pi. De entre todos los modelos que se ofrecen de Raspberry Pi, en este trabajo se hará uso de dos **Raspberry Pi 4 Model B**, el modelo de Raspberry Pi más reciente hasta la fecha, que tiene mayor potencia y una fácil implementación.



Fig. 4.2. Raspberry Pi 4 Modelo B

La **Raspberry Pi 4 Model B** es un ordenador de dimensiones reducidas que permite desarrollar trabajos que requieran de cierta potencia de cómputo como si de un ordenador convencional se tratase; para el desarrollo de una implementación de comunicación por luz visible de bajo coste es esencial. Una de las características generales de este tipo de placas es su **bajo coste**: disponible por tan solo **60 €**.

Este dispositivo está compuesto por el sistema de chip de integrado (SoC) de **Broadcom BCM2711** con procesador 1,5 GHz quad-core Cortex-A72 (ARM v8) de 64 bits [45]. Permite **conectividad WIFI** (IEEE 802.11n) a 2,4 GHz y 5 GHz, y Bluetooth 5.0. Además, proporciona cuarenta pines estándar **GPIO (General Purpose Input/Output)**, dos de los cuales son de **3,3 V**, dos de **5 V** y varios pines de tierra (**ground – 0 V**). Además, dispone de un **puerto Ethernet**, dos puertos **USB 3.0** y dos puertos **USB 2.0** para conectar diferentes dispositivos periféricos, y dos entradas **micro-HDMI** con las que poder conectarse a varias pantallas. También es posible realizar conexiones remotas permitiendo así conectarse desde un ordenador convencional.

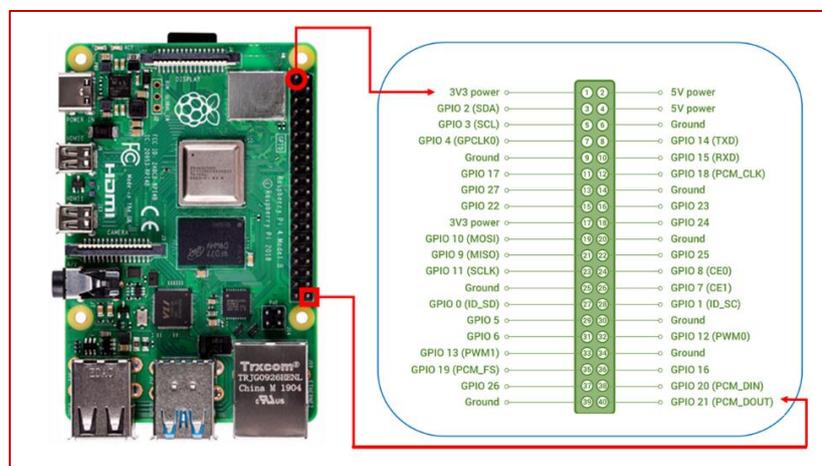


Fig. 4.3. Distribución de pines de la Raspberry Pi 4 Modelo B

4.2.1. Sistema operativo de la Raspberry Pi

Para poder utilizar una Raspberry Pi se debe instalar un **sistema operativo**. Esta instalación debe realizarse en una tarjeta microSD formateada a formato **FAT32**, tal como se muestra en la Fig.4.4.

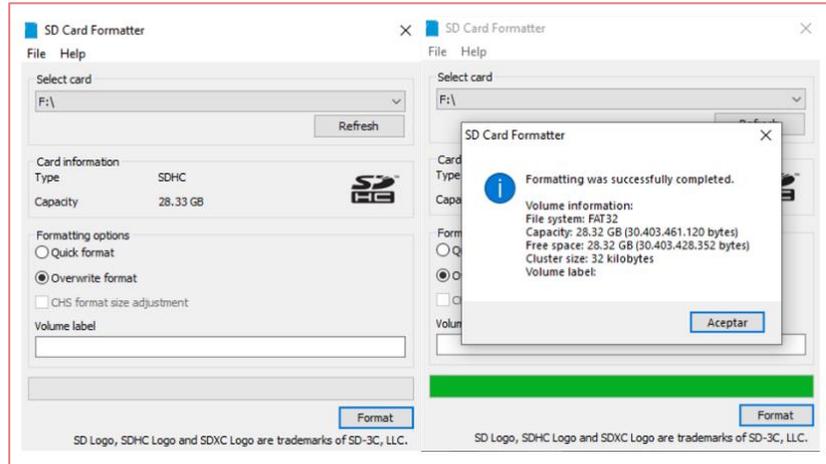


Fig. 4.4. Proceso del formateo de la tarjeta microSD a formato FAT32

Tras esto, se puede hacer uso de **Raspberry Pi Imager**, una herramienta que ha creado la propia compañía para poder instalar fácilmente el sistema operativo elegido en la tarjeta microSD previamente formateada.

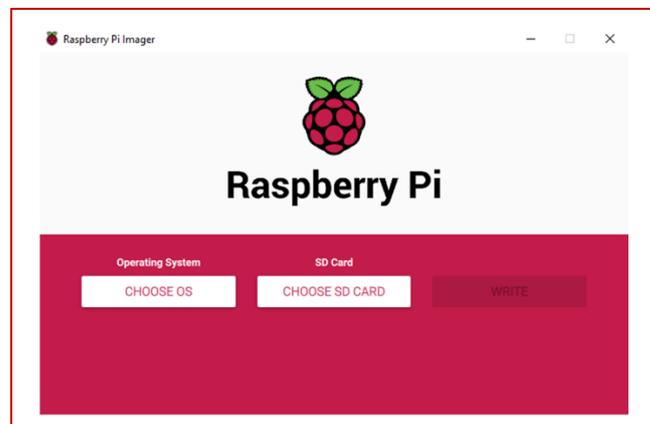


Fig. 4.5. Herramienta *Raspberry Pi Imager*

La Raspberry Pi ofrece la posibilidad de seleccionar un sistema operativo de entre una amplia lista de posibles candidatos compatibles [46]. A continuación, se citan los más destacables:

- **Raspberry Pi OS** (previamente se llamaba **Raspbian**): Es una versión de Debian **Linux** creada expresamente para este dispositivo, por lo que permite aprovechar todo su potencial. Es la opción más recomendable y popular para el uso de una Raspberry Pi.
- **LibreElec**: Es una distribución de Linux creada para poder arrancar y ejecutar *Kodi*, una aplicación que ofrece contenido multimedia.

- **Ubuntu:** Un sistema operativo de código abierto que proporciona escritorio, servidor y producción de **IoT** (*Internet of Thing* – Internet de las cosas). Es la opción más similar a Raspberry Pi OS.
- **RetroPie:** Es un sistema operativo que permite modificar la Raspberry Pi para obtener las características necesarias para usarse como una consola de videojuegos.
- **TLXOS (*ThinLin X OS*):** Es un sencillo sistema operativo basado en Linux que tiene requisitos de hardware mínimos, necesitan menos de 1 GB de RAM y menos de 2 GB de memoria para almacenamiento. Ofrece la utilización de diferentes escritorios remotos de gran rendimiento.

Tras analizar las distintas opciones de sistemas operativos que se proporciona en la *Raspberry Pi Imager*, la opción elegida como sistema operativo es **Raspberry Pi OS**. Es el sistema operativo por defecto para Raspberry Pi y ofrece las funciones necesarias para el desarrollo de este trabajo.

4.2.2. Lenguajes de programación

Para la realización de este trabajo es necesario, además de la puesta en funcionamiento del hardware, creación de un **software** capaz de generar señales digitales a partir de los datos que se quieran mandar desde el transmisor. También, que permita la conversión de la señal analógica recibida en el receptor a datos. Para ello se han considerado varios lenguajes de programación que se vienen utilizando con Raspberry Pi [47]:

- **Java.** Es un lenguaje de programación híbrido orientado a objetos con tipado estático. El código es portátil por lo que se puede ejecutar en distintas plataformas. Soporta multihilo (puede ejecutar varias tareas a la vez) y dispone de una librería muy extensa. Además, al contrario que con el **lenguaje C**, la memoria se asigna de forma automática por lo que la complejidad disminuye.
- **Python.** Es un lenguaje de programación orientado a objetos (***Object Oriented Programming - OOP***) con tipado dinámico, que se caracteriza por su sencillez en el aprendizaje y por su fácil entendimiento. Está preinstalado en el sistema operativo **Raspberry Pi OS** y es una elección muy popular para su uso general en la RPi. Su rendimiento es inferior al del **lenguaje C** si las aplicaciones comienzan a tener cierta complejidad.
- **Lenguaje C.** El lenguaje C es el más complejo de los tres mencionados, pero también el que mejor rendimiento computacional ofrece [47]. Tiene un tipado estático y el código compilado no es portátil. Se puede construir directamente sobre la Raspberry Pi o haciendo uso de otras aplicaciones. Además, dispone de librerías muy útiles para desarrollos en este ordenador de dimensiones reducidas.

Para el desarrollo de este TFG se ha elegido el lenguaje de programación C, ya que, aunque su complejidad sea superior, el desarrollo de un sistema de comunicación de bajo coste utilizando RPi no requiere de un nivel de programación excesivamente elevado. Además, es el lenguaje más potente de los tres analizados, lo que nos ayudará a la generación de señales cuadradas a una alta frecuencia. También cabe destacar que dispone de librerías como **Wiring Pi** [48], creadas expresamente para el uso de RPi, que ayudará a que el control de los pines **GPIO** sea más sencillo, y es recomendable si se van a realizar cambios rápido de los valores de los pines [47], como es el caso de la comunicación por luz visible.

4.3. Diseño del circuito transmisor

El sistema transmisor, T_x , será el encargado de convertir los datos que se quiera transmitir, a luz visible. Esto se llevará a cabo procesando los datos y generando una señal de entrada al circuito transmisor que modulará la señal para que un dispositivo emisor de luz, en este caso un LED, genere una señal luminosa pulsada durante un intervalo de tiempo corto, a una frecuencia dada. Como la modulación elegida ha sido la **OOK (On-Off Keying)**, sólo se generarán **bits** con valor **0** o valor **1**. Por lo que los datos que se quieran transmitir deberán transformarse previamente a **binario**, así podrá transmitirse la información en forma de onda cuadrada.

La **Raspberry Pi** será la que se encargue de codificar la información generando valores de **0** o **1**. Como sólo puede convertir datos a voltaje, el **0** corresponderá a **0 V** y el **1** a **3,3 V**. Este voltaje tendrá como salida uno de los pines seleccionados en la Raspberry Pi y se conectará al circuito transmisor. Por ello, se necesitará un elemento que pueda operar voltaje. En este caso, se ha decidido el uso de un **transistor**.

Este apartado continúa con una descripción de los componentes electrónicos que utilizaremos, que se pueden interconectar con el GPIO en la RPi, incluyendo **resistencias**, **LEDs** o **transistores** de bajo coste. También, conviene destacar que se han utilizado ciertas herramientas que nos han permitido analizar el circuito antes de conectarlo a las entradas/salidas de la RPi, con el fin de reducir la posibilidad de dañar la placa, como un **multímetro**, para medir el voltaje, la corriente, la capacidad y la resistencia, y un **osciloscopio digital**, que nos ha permitido ver cómo cambia el voltaje con respecto al tiempo con varias señales simultáneamente.

4.3.1. Transistor MOSFET

Un transistor **MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)** es un dispositivo electrónico que permite **amplificar** o **conmutar** señales siempre que sea requerido. Se compone de tres terminales: la puerta, el drenador y la fuente (*gate*, *drain* y *source*). En la Fig.4.6. se muestran cada uno de los terminales, *G* (puerta), *D* (drenador) y *S* (fuente), en un esquema MOSFET.

Para este trabajo fin de grado se eligió esta opción por encima de otros transistores como los **transistores de unión bipolar (BJT)** que fueron probados (**BC547 NPN**), ya que los MOSFET son controlados por voltaje; es decir, la corriente que fluye del terminal *D* al terminal *S* viene

determinada por el voltaje del puerto *S* al puerto *G* (V_{GS}), mientras que los BJT son controlados por una corriente de entrada. Además, son dispositivos de bajo coste, por debajo de **0,3 €**.

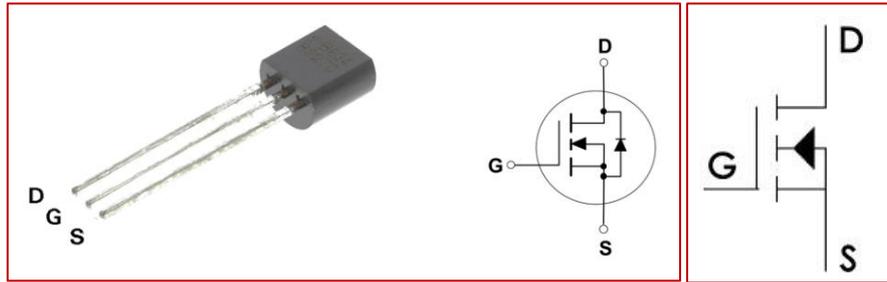


Fig. 4.6. Imagen y esquemas del transistor *MOSFET BS270* [49]

Este transistor hará la función de un interruptor entre el drenador y la fuente, lo que nos permite controlar la corriente del LED (I_D) a partir de un voltaje V_{GS} . Para ello, habrá que tener en cuenta la tensión umbral del terminal de la puerta ($V_{GS(th)}$) que posea el MOSFET, ya que será la condición que determine cuando pasará corriente por el LED y cuando no.

$$V_{GS} \leq V_{GS(th)}, I_D = 0 \quad (2)$$

Teniendo en cuenta que con la RPi podemos trabajar con un voltaje máximo de 5 V y que la señal cuadrada que nos proporcionará será de entre 0 V y 3,3 V, se eligió el **MOSFET BS270**, un MOSFET de canal N muy útil para aplicaciones con poco voltaje y poca corriente. Además, su diseño está pensado para tener una respuesta rápida a cambios de voltajes, es decir, conmutación (*switching*) a alta velocidad.

4.3.2. LED

Un LED (Diodo emisor de luz - **Light-Emitting Diode**) es un semiconductor que actúa como fuente de luz. Hoy en día, los LED se utilizan en las luces de los automóviles, en los televisores, en iluminación doméstica, luces de tráfico, entre otros, principalmente debido a su larga vida útil y a su altísima eficacia en la conversión de la energía eléctrica en luz visible, a un bajo coste.

En este trabajo fin de grado, el dispositivo elegido ha sido el LED de Broadcom, de luz azul **HLMP-CB1B-XYODD**, ya que tiene un bajo coste (**0,6 €**) y una **tensión directa** (*forward voltage*) entre los 2,8 V y 3,8 V, con valor típico de **3,2 V**, valores ideales debido a que la Raspberry Pi genera voltaje de 3,3 V y de 5 V en diversos pines. Es un LED de montaje en orificio pasante cuya longitud de onda predominante es de **470 nm**, como se observa en la Fig.4.7. El ángulo de exposición es de **15°** y la intensidad luminosa de **9,6 cd**.

Dado que la frecuencia del LED no viene reflejada en las características que ofrece el fabricante, por lo que se deberán realizar pruebas más adelante para obtener estos datos.

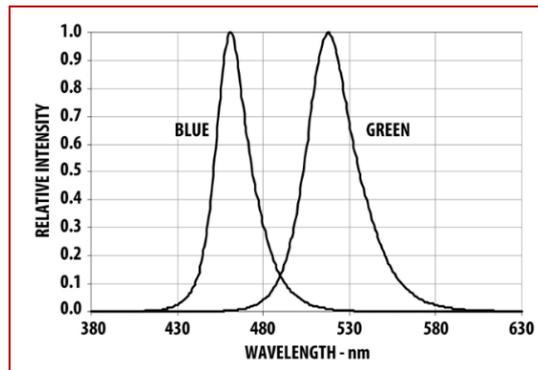


Fig. 4.7. Características espectrales del LED de luz azul *HLMP-CB1B-XY0DD* de Broadcom [50]

4.3.3. Diseño final del circuito transmisor

El diseño final del circuito transmisor implementado sobre una **placa de prueba** de bajo coste está formado por el **LED** y el **MOSFET** nombrados en las secciones anteriores, además, de una **resistencia** de valor muy pequeño ($100\ \Omega$) que pretende limitar la corriente y así proteger al LED.

La **Raspberry Pi** transmisora tendrá tres pines conectados a este circuito, un pin que suministra **5 V**, un pin de **tierra**, y el **pin número 11 (GPIO17)**, ver Fig.4.8., por el que tendrá salida la señal generada mediante software, a partir de los datos que se quieran transmitir, para ser modulada en el circuito.

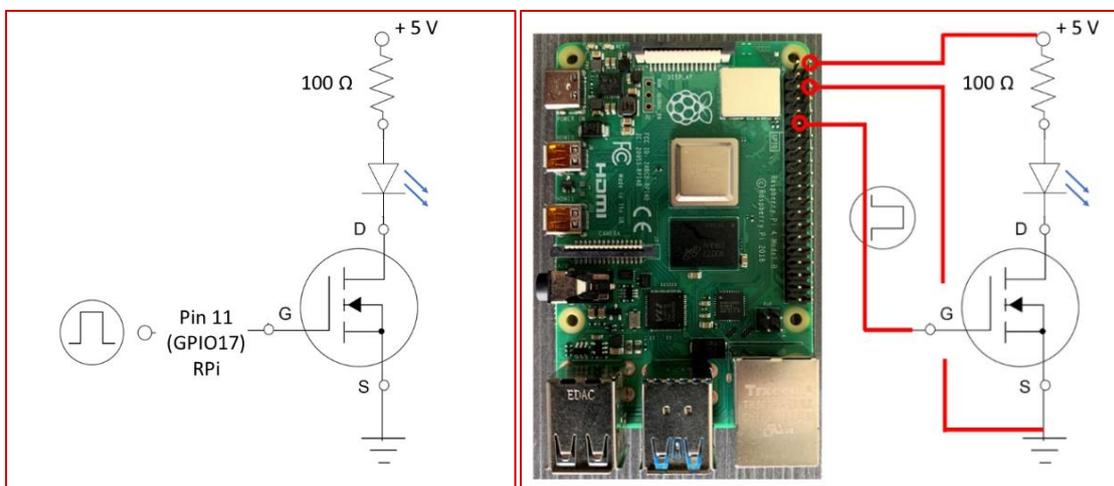


Fig. 4.8. Esquema del diseño final del circuito transmisor

Con este diseño, cuando la salida de la Raspberry Pi por el pin 11 sea **0**, es decir, 0 V, no habrá corriente circulando en el LED, por lo que no proporcionará luz visible, estará apagado. De igual manera, cuando esta salida sea **1**, es decir, 3,3 V, fluirá corriente por el LED provocando que se ilumine, estará encendido. Con este diseño, se consigue un voltaje en el LED de 3 V, un valor asumible por el LED de Broadcom, según sus especificaciones.

La Fig.4.9. muestra imágenes del montaje del circuito transmisor con la RPi, el transistor MOSFET, el LED y la resistencia seleccionados.

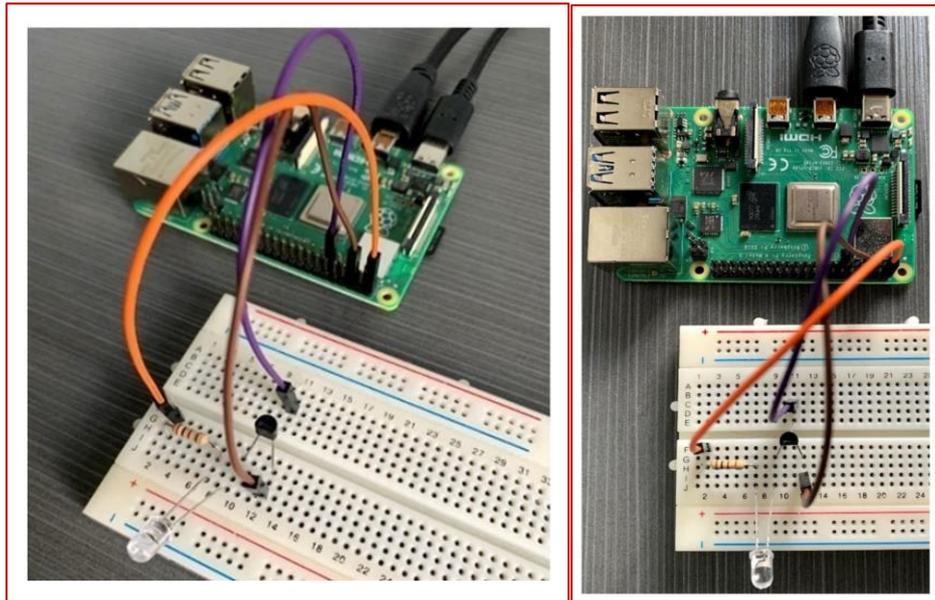


Fig. 4.9. Imágenes del circuito T_x

4.4. Diseño del circuito receptor

El sistema receptor, R_x , recibirá la luz transmitida por el LED y lo transformará nuevamente en los datos correspondiente. El circuito receptor estará compuesto por un **fotodiodo**, que tendrá la función de transformar la luz incidente en **corriente eléctrica**. Además, como la Raspberry sólo puede procesar voltaje, se necesitará la utilización de un **TIA** (Amplificador de transimpedancia - **Transimpedance Amplifier**), que convertirá esta corriente generada por el fotodiodo en **voltaje**.

La señal lumínica recibida será **demodulada** en el circuito receptor y **decodificada** posteriormente en la Raspberry Pi por medio del **software** diseñado para la obtención de la información transmitida.

Un aspecto importante para tener en cuenta es que la Raspberry tiene restricciones de voltaje, ya que solo puede **recibir como máximo 3,3 V** en sus pines. Por lo tanto, los componentes seleccionados para formar el receptor deberán tener unas características que determinen un voltaje de salida de este circuito igual o inferior al voltaje mencionado.

Este apartado continúa con una descripción de los componentes electrónicos que utilizaremos, que se pueden interconectar con el GPIO en la RPi, incluyendo **resistencias, condensadores, fotodiodos** o **amplificadores de transimpedancia** de bajo coste.

4.4.1. Fotodiodo

El fotodiodo es un elemento semiconductor que convierte la luz recibida en una corriente eléctrica proporcional a la intensidad luz recibida. De entre todos los tipos de fotodiodos que existe, la búsqueda se ha centrado en **fotodiodos** tipo **PIN** de bajo coste y con montaje en orificio pasante, ya que tienen un mejor rendimiento para aplicaciones de VLC [2].

Para este trabajo era necesario un fotodiodo que tuviera un tiempo de respuesta rápido, una sensibilidad espectral en el espectro de luz visible, preferiblemente en la zona azul (470 nm), debido al LED seleccionado, y un bajo coste.

Por ello, una opción elegida fue el **fotodiodo PIN de silicio SFH 206 K de Osram** (ver Fig.4.10.), el cual tiene una sensibilidad en el rango espectral entre los 400 nm y 1100 nm (ver Fig.4.11.), **tiempos de respuesta**, de subida y de bajada, de **0,02 μ s**, una frecuencia de conmutación típica de 50 MHz y una **tensión directa típica de 1,3 V**, características muy apropiadas para este Trabajo Fin de Grado.



Fig. 4.10. Fotodiodo PIN de silicio *SFH 206 K* fabricado por Osram [51]

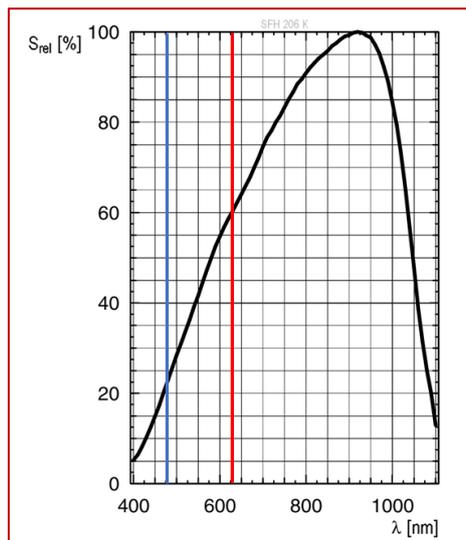


Fig. 4.11. Sensibilidad espectral relativa del fotodiodo *Osram SFH 206 K* [51]

Otra opción elegida fue el fotodiodo de silicio **BPW21R** de **Vishay**, en el que el intervalo de la sensibilidad espectral se encuentra entre los **420 nm** y los **675 nm**, con una **tensión directa típica de 1 V**, un **tiempo de subida de 3,1 μ s** y un **tiempo de bajada de 3 μ s**.

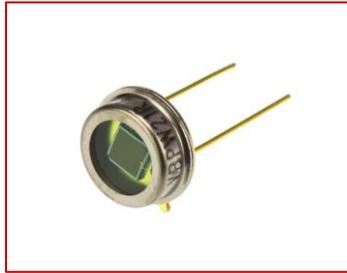


Fig. 4.12. Fotodiodo de silicio *BPW21R* fabricado por *Vishay* [52]

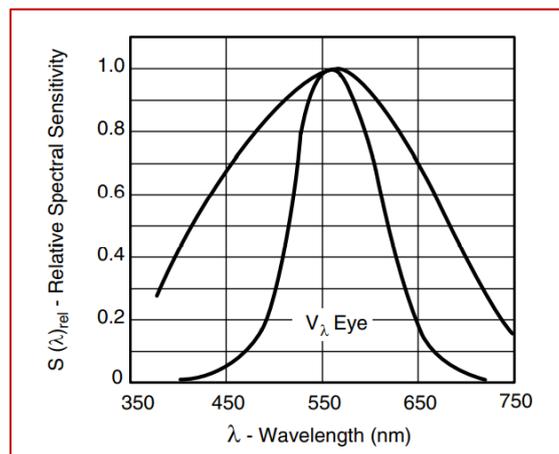


Fig. 4.13. Sensibilidad espectral relativa del fotodiodo *BPW21R* [52]

Como se puede apreciar en la Fig.4.11., la sensibilidad espectral en la región del color rojo es superior de forma apreciable a la que se obtiene en la región del color azul. Aunque este fotodiodo tiene su mayor sensibilidad en el infrarrojo (850 nm), se destaca por su **bajo coste**, alrededor de **1,3 €**, y por la facilidad de su suministro en el momento de realizar la compra de los dispositivos electrónicos, frente al fotodiodo de silicio **BPW21R** de **Vishay**, cuya sensibilidad se centra sólo en el espectro visible (ver Fig.4.13.), aunque con un coste muy superior, **10,35 €**. La elección entre los dos fotodiodos mencionados se realizará en el capítulo 5.

Por otra parte, se barajó la posibilidad de utilizar otro tipo de fotodiodos con sensibilidad espectral en el espectro de luz visible y con tiempo de respuesta del orden de los **10 ns** como el fotodiodo **Centronic OSD15-E**, aunque su coste, por encima de los **50 €**, ha hecho que este componente no sea finalmente tomado en consideración para el diseño del prototipo VLC de bajo coste.

4.4.2. Amplificador de transimpedancia

La corriente eléctrica producida por los fotodiodos es relativamente pequeña, por lo que una práctica muy común es el uso de amplificadores de transimpedancia. Un amplificador de transimpedancia es un **convertidor de corriente a voltaje** que, además, proporciona una **amplificación** de dicho voltaje.

Este dispositivo está compuesto de un **amplificador operacional (OA)** con una **resistencia (R_f)** en retroalimentación, como se muestra en la Fig.4.14. Esta resistencia será la que proporcione ganancia a la señal. También es importante añadir un **condensador (C_f)** en paralelo para prevenir picos de ganancia y oscilaciones.

Para este trabajo, se ha elegido el **amplificador operacional MCP6022** de **Microchip**, cuya aplicación típica es para **TIA**, con un ancho de banda de **10 MHz**, que necesita una **tensión de alimentación** de entre los **2,5 V** y **5V**, valores que puede proporcionar la Raspberry Pi. Además, proporciona un bajo nivel de ruido y tiene un coste bajo (**1,3 €**).

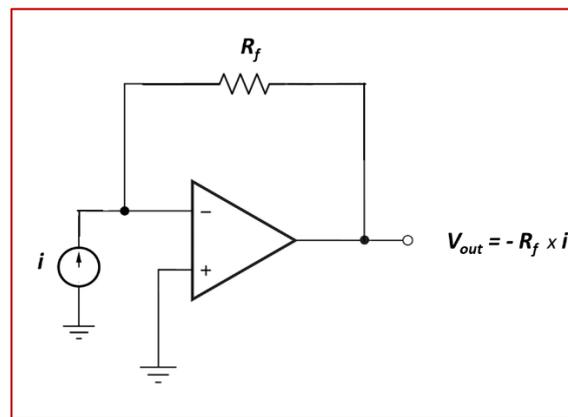


Fig. 4.14. Esquema básico de un amplificador de transimpedancia

4.4.3. Diseño final del circuito receptor

El diseño final del receptor constará del **fotodiodo** y **amplificador operacional** seleccionados, con una **resistencia de retroalimentación (R_f)** y un **condensador (C_f)** en paralelo. La resistencia se seleccionará buscando que la señal tenga **poco ruido**; el hecho de utilizar resistencias de gran valor puede llevar también a una amplificación del ruido.

La Raspberry Pi receptora tendrá tres pines conectados a este circuito, un pin que ofrece **5 V**, un pin de **tierra**, y el **pin número 13 (GPIO27)**, ver Fig.4.15., por el que tendrá entrada la señal demodulada para su decodificación por medio de software.

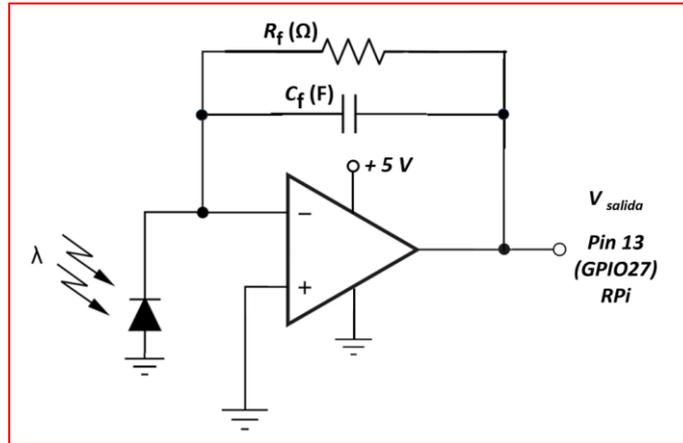


Fig. 4.15. Esquema del diseño final del receptor

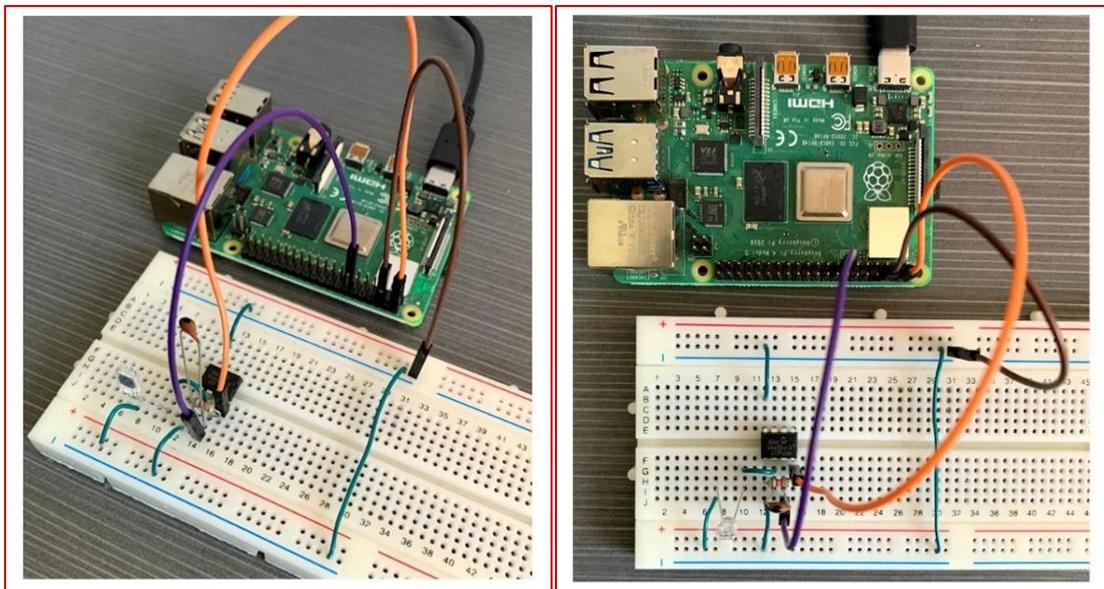


Fig. 4.16. Imágenes del circuito R_x

4.5. Software del prototipo

En esta sección se explicará el funcionamiento del sistema transmisor y del sistema receptor, T_x/R_x , a nivel software. La parte software consta de dos programas, uno para el transmisor y otro para el receptor, que serán ejecutados cada uno en su correspondiente Raspberry Pi.

Los programas se han realizado haciendo uso de **lenguaje de programación C**, apoyados en la librería **Wiring Pi** dado los motivos que se explicaron en la sección 4.2.2. de este trabajo. Con este software se pretende procesar los archivos de texto formado por caracteres ASCII, obteniendo y codificando los datos para su envío, y decodificando los datos recibidos para generar nuevamente el archivo en el receptor.

4.5.1. Software para el transmisor

El software de la Raspberry Pi transmisora será el encargado de abrir el archivo que se quiera enviar, obtener el texto y **codificarlo**, transformando cada carácter a **formato binario**, usando el **código ASCII**, formando bytes (8 bits) para su envío bit a bit a través del circuito transmisor.

4.5.1.1. Diagrama

El transmisor se inicializará y se procederá a la configuración del **GPIO** usando la numeración que proporciona la librería **Wiring Pi**, seleccionando un pin de la RPi transmisora como modo de salida. Este pin seleccionado será el que suministre, al circuito modulador, la señal generada tras la codificación de los datos a enviar.

Posteriormente, se procesará el archivo de texto que se quiere transmitir para obtener el contenido que lo forma para su codificación. La transmisión comenzará con el envío de una secuencia de inicialización, que avisará al receptor para prepararse para el recibo de datos. Tras ello, se comenzará a enviar carácter a carácter el contenido del archivo. El número total de caracteres enviados se manejará con la constante BUFFER, enviando tantos caracteres del archivo como valor tenga esta constante.

Para el envío de cada carácter, se comenzará enviando un bit con valor conocido **1**, que servirá para que el receptor se sincronice con el transmisor antes de cada carácter enviado. Después, se procederá a convertir el carácter a enviar a formato binario usando la tabla *ASCII*, formando un byte (8 bits) y se enviará bit a bit. Tras la transmisión de este carácter, se establece el valor de salida del pin de la RPi a **0** y se espera un tiempo determinado para la transmisión del siguiente carácter, permitiendo así al receptor estar disponible para recibirlo. Cada carácter se enviará tres veces seguidas, aumentando así la probabilidad de que el envío sea correcto. Una vez enviados tantos caracteres como estipule la constante BUFFER, se apagará el LED para evitar un consumo innecesario de energía. La Fig.4.17. muestra el proceso seguido para la transmisión de los caracteres del archivo, como ha sido descrito en este apartado.

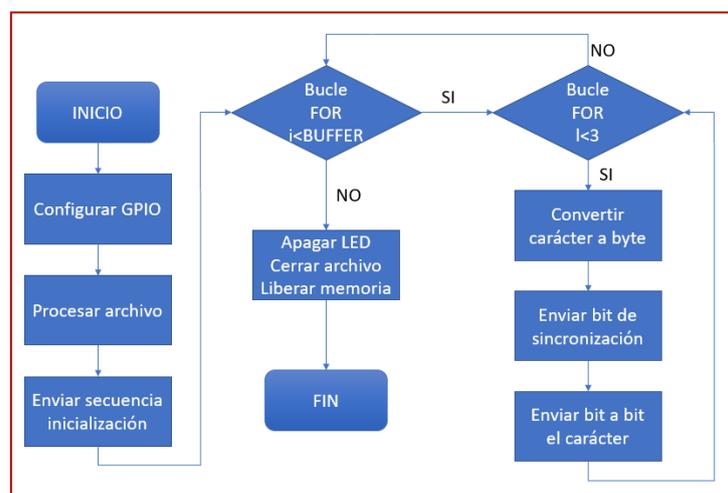


Fig. 4.17. Diagrama del proceso del software de la Raspberry Pi transmisora

4.5.1.2. Configuración del GPIO

Lo primero que se ha de realizar es configurar los pines que queremos utilizar en la GPIO de la RPi. Como se va a emplear la librería *Wiring Pi*, habrá que introducir la función *wiringPiSetupGpio()* para poder hacer uso de la numeración GPIO que ofrece. Además, seleccionaremos el pin y le asignaremos un modo de uso.

Necesitamos un pin en modo salida (*output*) de la Raspberry Pi que nos proporcione la señal creada a partir de los bits de datos que se quieren transmitir. Se usará el **pin 11** de la Raspberry que corresponde al **GPIO 17** definido con la constante **LED_GPIO**. El código para la configuración del GPIO del transmisor sería:

```
wiringPiSetupGpio();  
pinMode(LED_GPIO,OUTPUT);
```

4.5.1.3. Procesado del archivo de texto

El archivo de texto que se quiere transmitir a través de luz visible debe ser procesado para obtención de sus datos, en este caso, el texto. Se obtendrán tantos caracteres como se estipule en la constante **BUFFER** utilizando la función *getline()*. A continuación, se muestra el código para el procesado del archivo de texto:

```
char mi_fichero[]="mi_fichero.txt";  
FILE *fichero = fopen(mi_fichero,"r");  
if(fichero==NULL){  
    fprintf(stderr,"No se puede abrir el fichero: %s",mi_fichero);  
    return 1;  
}  
size_t buffer_size=BUFFER;  
char *texto = (char *)malloc(buffer_size*sizeof(char));  
int line_number=0;  
while(getline(&texto,&buffer_size,fichero)!=-1){  
    printf("%d: %s\n", ++line_number, texto);  
}
```

4.5.1.4. Secuencia de inicialización

Antes de comenzar a enviar el contenido del archivo a través del LED, se procede a transmitir una secuencia de inicialización. Esta secuencia notificará al receptor de la realización de una transmisión y así se preparará para recibir los correspondientes datos. El código para transmitir la secuencia de iniciación es:

```
void secuencia_inicializacion(){  
    digitalWrite(LED_GPIO,HIGH);  
    delayMicroseconds(PERODO/2);  
    digitalWrite(LED_GPIO,LOW);  
    delayMicroseconds(PERODO/2);  
    digitalWrite(LED_GPIO,HIGH);
```

```

    delayMicroseconds(PERIODO/2);
    digitalWrite(LED_GPIO,LOW);
    delayMicroseconds(PERIODO/2);
}

```

4.5.1.5. Sincronización

La sincronización es un factor muy importante en una VLC en presencia de luz ambiente o iluminación de interiores. En este caso, como se usan dos Raspberry Pi distintas, los relojes internos también lo serán. Por ello, se pensó en realizar un envío de un bit conocido, en este caso con valor **1 (HIGH)**, que servirá como aviso al receptor, ya que estará esperando a recibir este valor, y permitirá un reinicio de la sincronización antes de cada transmisión del carácter. Tras el envío de los 8 bits correspondientes al carácter enviado, se establecerá el valor a **0 (LOW)** y se esperará un tiempo determinado para que el receptor esté disponible para recibir el siguiente carácter. El código que transmite un bit para la sincronización es:

```

digitalWrite(LED_GPIO,HIGH);
delayMicroseconds(PERIODO/2);

```

4.5.1.6. Transmisión del archivo

El envío del contenido del archivo procesado se producirá carácter a carácter a través de un bucle **FOR**, como se muestra en la Fig.4.17. Cada carácter se enviará un total de 3 veces para aumentar las probabilidades de que la transmisión no contenga errores. Estos caracteres son transformados a formato binario, formando así un byte para su transmisión. Tras cada carácter enviado se establecerá el valor **0** en la salida y se esperará un tiempo determinado para que el receptor sea capaz de sincronizarse nuevamente con el transmisor para el envío del siguiente carácter, como se ha comentado en el apartado anterior. El código que se utilizará para la transmisión de caracteres previamente descrito es:

```

int i;
int l;
for(i=0;i<BUFFER;i++){
    for(l=0;l<3;l++){
        envio_caracter(texto[i]);
        digitalWrite(LED_GPIO,LOW);
        delayMicroseconds(PERIODO/2);
        delayMicroseconds(PERIODO/2);
        delayMicroseconds(PERIODO/2);
        delayMicroseconds(PERIODO/2);
    }
}

```

4.5.2. Software para el receptor

El software de la Raspberry Pi receptora tiene como objetivo regenerar el archivo transmitido a través de la luz del LED, **decodificando los datos** obtenidos del circuito receptor (fotodiodo y amplificador) para obtener el texto transmitido y así generar un archivo con esa misma información.

4.5.2.1. Diagrama

El proceso de recepción comienza **inicializando el receptor y configurando el GPIO con *Wiring Pi***, seleccionando un pin de la RPi receptora como modo de entrada. Este pin será el que de entrada a la RPi de la señal demodulada por el circuito receptor.

Tras ello, se procederá a esperar hasta que se reciba la secuencia de inicialización. Una vez obtenida, se comenzará a recibir el contenido transmitido, en este caso, los caracteres. Se recibirán tantos caracteres como estipule la constante BUFFER del receptor.

Para la recepción de cada carácter, se esperará al bit de sincronización con valor conocido **1** y esto permitirá al receptor sincronizarse para el recibo del byte correspondiente al carácter enviado. Tras el recibo de este bit, se leerá la secuencia de 8 bits correspondientes este carácter y se realizará su conversión de binario a carácter a través de la tabla *ASCII*.

Cada carácter será recibido tres veces para aumentar la posibilidad de obtenerlo correctamente, evitar así, errores que impedirían la buena comunicación. Por ello, tras recibir tres veces este mismo carácter, se compararán los resultados para seleccionar el carácter correcto.

Finalmente, se procede a introducir dichos caracteres seleccionados a un nuevo archivo de texto. La Fig.4.18. muestra los procesos seguidos para la recepción de los caracteres del archivo, como ha sido en este apartado.

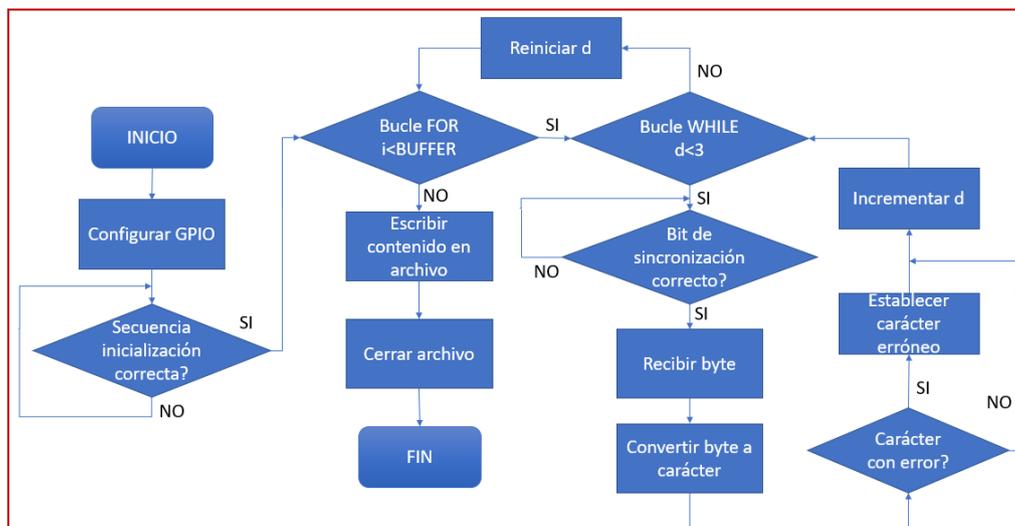


Fig. 4.18. Diagrama del software de la Raspberry Pi receptora

4.5.2.2. Configuración del GPIO

Al igual que se ha hecho con la configuración del transmisor, se ha de configurar los pines con ayuda de **Wiring Pi**. En este caso, usaremos un pin configurado en modo entrada (*input*), así obtendremos la señal demodulada por el circuito receptor. El **pin** seleccionado es el **número 13** de la Raspberry Pi, correspondiente al **GPIO 27** definido con la constante **PD_GPIO**. El código para la configuración del GPIO del receptor es:

```
wiringPiSetupGpio();  
pinMode(PD_GPIO, INPUT);
```

4.5.2.3. Secuencia de inicialización

Para iniciar la recepción de los datos, el receptor debe obtener la secuencia de inicialización completa. Este estará esperando hasta que comience a recibir datos y comprobará si la secuencia es correcta. De ser así, se procederá a recibir los datos. El código que comprueba la secuencia de iniciación es:

```
int sec_correcta = 0;  
while(sec_correcta!=1){  
    if(digitalRead(PD_GPIO)==HIGH){  
        delayMicroseconds(PERODO/2);  
        delayMicroseconds(PERODO/6);  
        if(digitalRead(PD_GPIO)==LOW){  
            delayMicroseconds(PERODO/2);  
            if(digitalRead(PD_GPIO)==HIGH){  
                delayMicroseconds(PERODO/2);  
                if(digitalRead(PD_GPIO)==LOW){  
                    sec_correcta=1;  
                }  
            }  
        }  
    }  
}
```

4.5.2.4. Sincronización

Como se ha comentado en el apartado 4.5.1.5. de este trabajo, con el fin de evitar errores en el envío y recepción de bits es necesario utilizar algún mecanismo de sincronización. En este caso, se esperará a recibir un bit con valor **1 (HIGH)** y así tener sincronizadas ambas Raspberry Pi antes de recibir los 8 bits correspondientes a un carácter. Esto permitirá poder establecer los momentos de recepción y recibir correctamente el byte del carácter, obteniéndolos en el momento exacto (en un punto estable de la señal) del envío de cada uno de esos bits por parte del transmisor. El código para recibir un bit conocido para sincronización es:

```
int bit_sinc = 0;  
while(bit_sinc!=1){  
    if(digitalRead(PD_GPIO)==HIGH){
```

```

        delayMicroseconds(PERIODO/2);
        delayMicroseconds(PERIODO/6);
        bit_sinc=1;
    }
}

```

4.5.2.5. Comprobación carácter correcto

Como ya se ha comentado, cada carácter del mensaje de texto será enviado tres veces. El receptor comprobará que los caracteres transmitidos no contienen ningún error que pueda interferir en la creación o apertura del nuevo archivo de texto. Estos errores son: que el carácter en formato binario contenga un valor **1** en su **MSB (Bit más significativo - Most significant bit)**, puesto que estos valores no están incluidos en la tabla **ASCII**, o que el carácter en formato decimal sea menor de 32, ya que este contenido no permite abrir el archivo de texto correctamente. El código para la comprobación de los bits que forman los caracteres es:

```

if(caracter_decimal>31){
    if(caracter_bit[7]==0){
        if(num==0){
            error_caracter1=0;
        }else if(num==1){
            error_caracter2=0;
        }else{
            error_caracter3=0;
        }
    }
}
}

```

4.5.2.6. Recepción de datos y decodificación

El receptor procesará tantos datos como se haya estipulado en la constante **BUFFER**. De los tres intentos que se hacen de cada carácter, se seleccionará aquel que no cumpla con las condiciones expuestas en el apartado anterior, y por tanto tendrá error con valor **0**. Si los tres intentos contienen errores, se sustituye por un carácter neutral, en este caso se ha elegido la **X**, para que se genere el archivo final sin problemas. Cada vez que se vuelva a recibir un carácter nuevo se reiniciarán las variables utilizadas para controlar los errores. El código para procesar los datos recibidos y decodificarlos es:

```

int i,d;
for(i=0;i<BUFFER;i++){
    while(d<3){
        mismo_caracter[d]=recibo_caracter(d);
        if(error_caracter1==0){
            cadena[i] = mismo_caracter[0];
        }else if(error_caracter1!=0 && error_caracter2==0){
            cadena[i] = mismo_caracter[1];
        }else if(error_caracter1!=0 && error_caracter2!=0 && error_caracter3==0){
            cadena[i] = mismo_caracter[2];
        }else{

```

```

        cadena[i] = 'X';
    }
    d++;
    delayMicroseconds(PERODO/4);
}
error_caracter1 = 1;
error_caracter2 = 1;
error_caracter3 = 1;
d=0;
}

```

4.5.2.7. Introducción del texto al archivo nuevo

Finalmente, se habrá obtenido una cadena de caracteres correspondiente al envío y recepción realizado. Se hará uso de la función *fwrite()* para escribir este contenido en un nuevo archivo de texto. El código para escribir texto en el archivo es:

```
fwrite(cadena,1,sizeof(cadena),fichero);
```


5. PRUEBAS Y VALIDACIÓN

En este capítulo se muestran los resultados de los ensayos llevados a cabo utilizando el diseño del sistema de comunicación por luz visible de bajo coste, presentado en el capítulo anterior. Además, se presentan las señales resultantes del circuito transmisor y receptor, y se discute la selección de la frecuencia óptima para la realización de la comunicación. Finalmente, se analizan los resultados obtenidos al realizar la transmisión y recepción de archivos de texto. Se varía el número de caracteres por archivo para estudiar el rendimiento del prototipo en términos de número de errores cometidos en caracteres.

Durante los ensayos, la transmisión y recepción de datos se realiza a una distancia fija (no es una variable que se haya considerado en este TFG, según quedó establecido en el apartado 1.2.) entre el sistema T_x y R_x , en una habitación de estudio con luz ambiente (300 - 500 lux estimados).

5.1. Herramientas utilizadas

Para realizar el prototipo de VLC de bajo coste con circuitos electrónicos conectados a las plataformas Raspberry Pi (RPI), es imprescindible la utilización de ciertas herramientas que nos permitan analizar los diferentes circuitos antes de ver el funcionamiento completo del prototipo. La herramienta principal utilizada en este trabajo ha sido el **osciloscopio digital *Analog Discovery 2***. Este instrumento ha servido para obtener las **señales analógicas ($V_s(t)$)** en diferentes puntos de los circuitos implementado, con sus respectivas frecuencias. Esto incluye la señal generada por la Raspberry Pi transmisora después de ser codificada, la señal producida por el LED, la señal recibida por el fotodiodo y, finalmente, tras la amplificación de dicha señal gracias al amplificador de transimpedancia utilizado.

Además, se ha utilizado un **multímetro**, necesario para medir las tensiones y corriente en ciertos puntos de los circuitos, clave para no dañar componentes del prototipo y para comprobar valores de resistencias y condensadores. La Fig.5.1. y Fig.5.2. muestra el osciloscopio digital y el multímetro usados en este trabajo.

Estas dos herramientas han facilitado el desarrollo del prototipo para tener un mejor funcionamiento, poder analizar las señales generadas y poder cumplir con las especificaciones de diseño propuestas en el capítulo anterior.

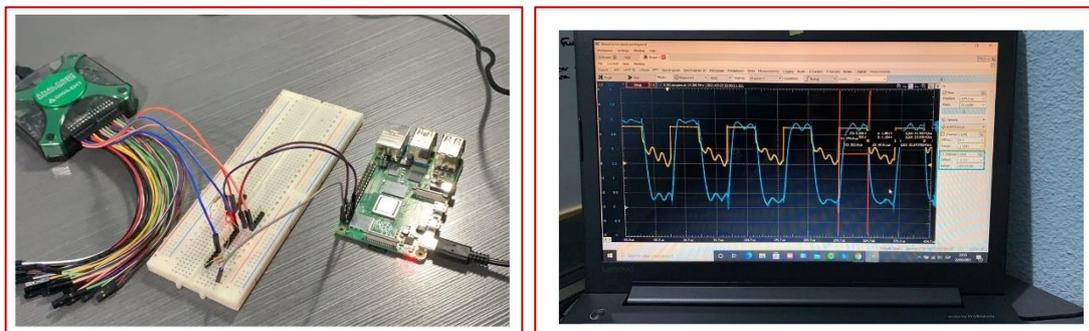


Fig. 5.1. Osciloscopio digital durante medidas preliminares con un LED rojo

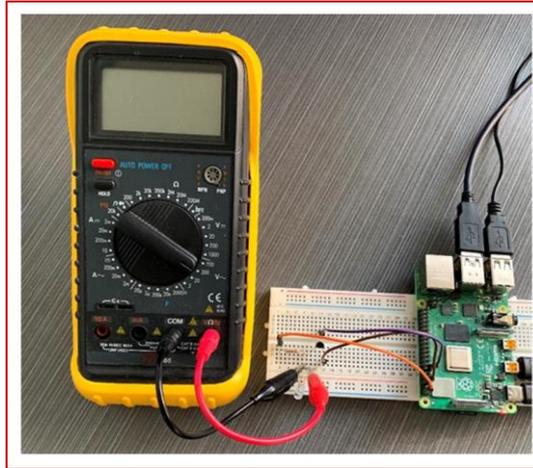


Fig. 5.2. Multímetro utilizado en el diseño y obtención del prototipo VLC de bajo coste

5.2. Ensayos con el hardware

En este apartado se van a registrar y analizar la modulación y demodulación de las señales en ambos circuitos, transmisor y receptor. Por un lado, para seleccionar la frecuencia óptima para la comunicación de este prototipo y, por otro lado, para seleccionar el fotodiodo, entre los disponibles, que ofrezca el mejor resultado variando los componentes de C_f y R_f que componen el **amplificador de transimpedancia (TIA)** (ver Fig.4.15.).

5.2.1. Pruebas del transmisor

El diseño del circuito transmisor ya quedó planteado en el apartado 4.3. de este trabajo, ahora se va a analizar su comportamiento. Debido a que en la ficha técnica (*datasheet*) de los **LEDs** disponibles, los fabricantes no presentan sus características de **conmutación**, se deben realizar pruebas para estudiar su respuesta a distintas frecuencias de la señal suministrada.

- **Frecuencia máxima del circuito transmisor**

Tras llevar a cabo varias pruebas a distintas frecuencias con el **LED** seleccionado en el capítulo 4, se observa que la máxima frecuencia a la que puede operar el transmisor, manteniendo un pulso cuadrado, es de unos **100 kHz**. Aunque el circuito transmisor de forma independiente es capaz de operar de forma óptima a frecuencias superiores, el problema se encuentra en la señal que sale del pin de la Raspberry Pi para alimentar el transistor MOSFET (Fig.4.8.). Se aprecia que esta señal comienza a perder propiedades (la señal comienza a no mantener un periodo constante y se observan variación del ciclo de trabajo). Esto afecta a la señal de salida del LED, por lo que se considera que no es apropiado utilizar frecuencias superiores; afectaría negativamente a la sincronización durante la comunicación entre los sistemas T_x y R_x .

La Fig.5.3. muestra una captura del osciloscopio durante el registro de la tensión en el LED y en la RPi que alimenta el LED a una frecuencia de 100 kHz. Se puede apreciar un periodo constante en las dos señales. Por el contrario, en la Fig.5.4. se observa que, al aumentar la frecuencia a 250

kHz, el periodo de la señal de salida de la RPi transmisora, y por tanto de la señal de entrada al circuito modulador, presenta variaciones en el ciclo de trabajo. A 500 kHz y a frecuencias superiores, este fenómeno se ve acentuado.

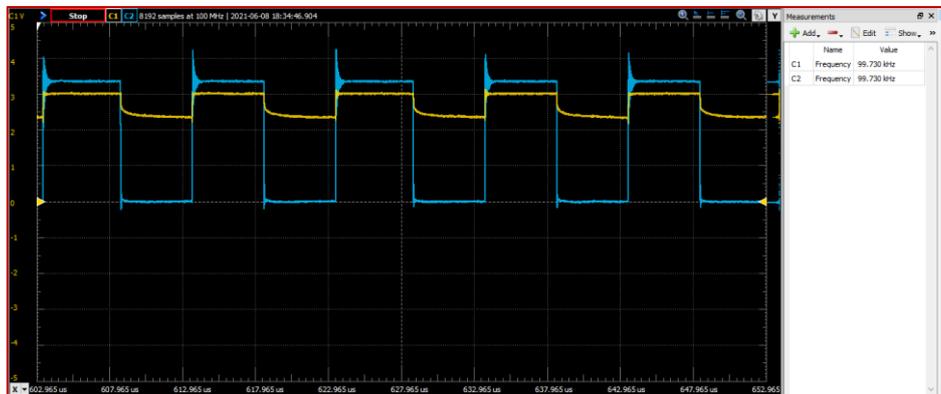


Fig. 5.3. Señal del LED (en amarillo) y de la salida de la Raspberry Pi transmisora (en azul) a 100 kHz

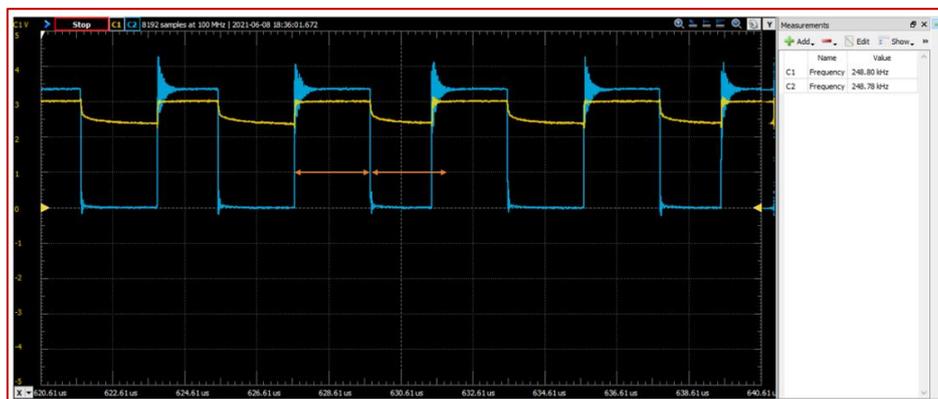


Fig. 5.4. Señal del LED (amarillo) y de la salida de la RPi transmisora (azul) a 250 kHz

Tras la realización de las anteriores pruebas se investigó la causa de la posible variación del ciclo de trabajo de la señal que provenía de la Raspberry Pi y se constató que se producía debido a la función predefinida ***delayMicrosecond(int microsegundos)*** usada en el software del transmisor para realizar tiempos de parada para generar la señal con su periodo correspondiente. Cuando esta función tenía como parámetro un valor inferior a **3**, producía paradas de tiempo variables y produciéndose el error comentado.

Como solución se probó a utilizar como alternativa una función auxiliar que se denominó ***retraso()*** y que se muestra a continuación:

```
void retraso(int tiempo){
    int i;
    for(i=0;i<tiempo;i++);
}
```

Al ejecutar el software con esta nueva función, el error desaparecía y se obtuvo una señal óptima incluso a una frecuencia de 1,5 MHz, como se puede apreciar en la Fig.5.5. Por lo tanto, el

circuito transmisor, tras esta modificación del software, puede llegar a trabajar a una frecuencia alrededor de los 2 MHz. A frecuencias superiores a este valor, la señal producida por la Raspberry Pi comienza a tener mayores oscilaciones y esto repercute también en el circuito transmisor, ver Fig.5.6.

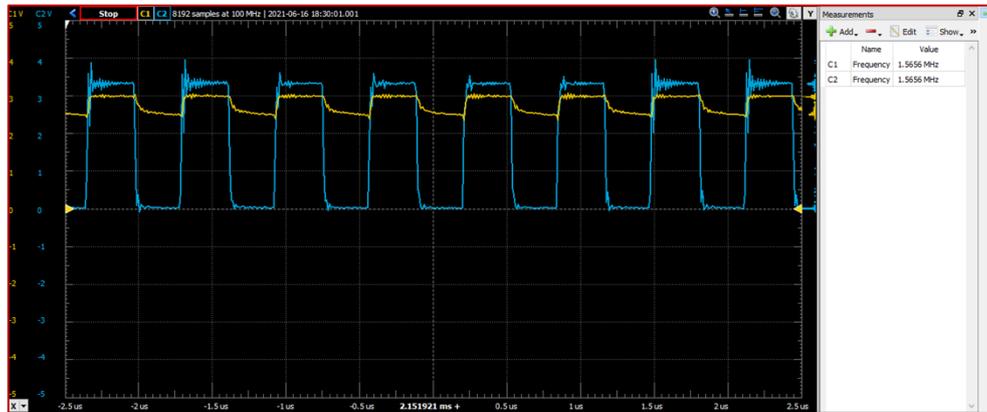


Fig. 5.5. Señal del LED (amarillo) y de la salida de la RPi transmisora (azul) a 1,5 MHz

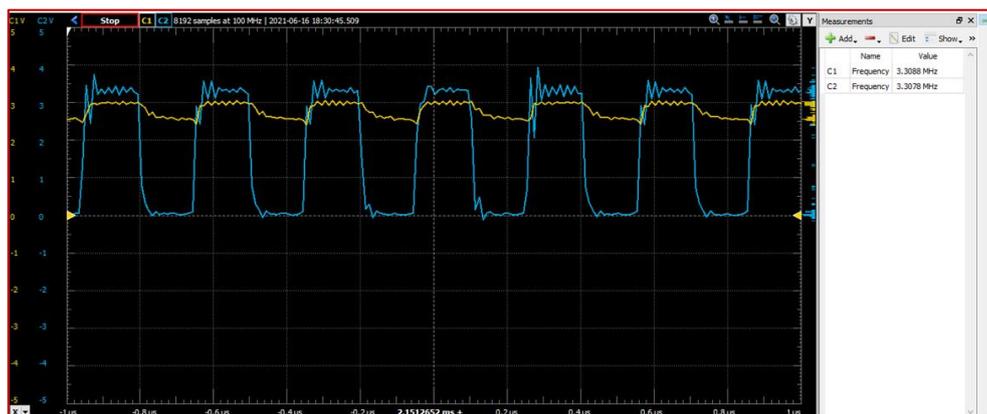


Fig. 5.6. Señal del LED (amarillo) y de la salida de la RPi transmisora (azul) a 3,3 MHz

5.2.2. Pruebas del receptor

En la sección 4.4.1. se discutió la posible utilización de varios fotodiodos con distintas sensibilidades espectrales, cubriendo el espectro visible e infrarrojo o sólo el visible. En este apartado se va a realizar el registro y análisis de la señal obtenida en el receptor, tras el amplificador de transimpedancia, utilizando ambos fotodiodos.

Además, se probarán diferentes valores de resistencias y condensadores de retroalimentación (R_f y C_f) para seleccionar la combinación que permita una señal amplificada, sin oscilaciones ni pico de ganancia, como ya fue comentado en el capítulo 4.

Posteriormente, se analizará la mejor señal obtenida durante las pruebas usando cada fotodiodo y se seleccionará uno de ellos. Por último, con el fotodiodo seleccionado se hará un análisis para ver su rendimiento en conmutación.

5.2.2.1. Selección del fotodiodo

Con las siguientes pruebas se pretende determinar los mejores componentes de R_f y C_f usando cada fotodiodo. Se van a realizar a una frecuencia de 10 kHz y de 50 kHz, aunque en este trabajo sólo se mostraran las realizadas a 10 kHz.

- **Fotodiodo PIN de silicio *SFH 206K Osram***

El fotodiodo PIN de silicio *SFH 206K* de *Osram* se eligió porque tenía una sensibilidad espectral entre los 420 nm y 1120 nm, un tiempo de subida y bajada de 0,02 μ s, y un coste muy bajo.

Para este caso, se hicieron diversas pruebas usando valores para R_f de 8,2 k Ω y 82 k Ω , y de 10 pF, 5 pF, 1 pF y 0,5 pF para C_f . Tras el análisis de los resultados, se concluyó que la señal con mejores características usando este fotodiodo era la obtenida con los valores de 8,2 k Ω y 10 pF. Esta señal se muestra en la Fig.5.7.

La señal usando la resistencia de 82 k Ω presentaba una mayor amplificación y, por tanto, la distancia entre el LED y el fotodiodo podía ser superior, pero la señal presentaba un aumento del *offset* debido a la luz ambiental, que quedaba también amplificada. La Fig.5.8. muestra la señal a la salida del TIA con dicho valor de la R_f . Por lo tanto, como el objetivo del trabajo no incluía la distancia como parámetro clave, se decidió elegir la resistencia de 8,2 k Ω para obtener una señal menos ruidosa, aunque en este caso se necesitará posicionar el LED y el fotodiodo a una distancia de unos 2 cm.

La variación del condensador usando los valores mencionados anteriormente, causaba un mayor o menor pico de ganancia, consiguiendo que este pico fuera casi despreciable con el condensador de valor 10 pF, y que aumentara si el valor del condensador disminuía.

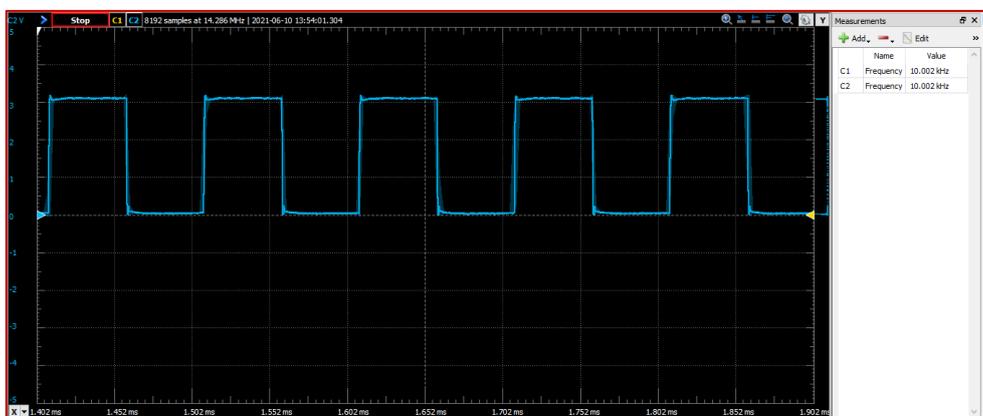


Fig. 5.7. Señal a la salida del TIA con el fotodiodo *SFH 206K*, $R_f= 8,2$ k Ω y $C_f=10$ pF

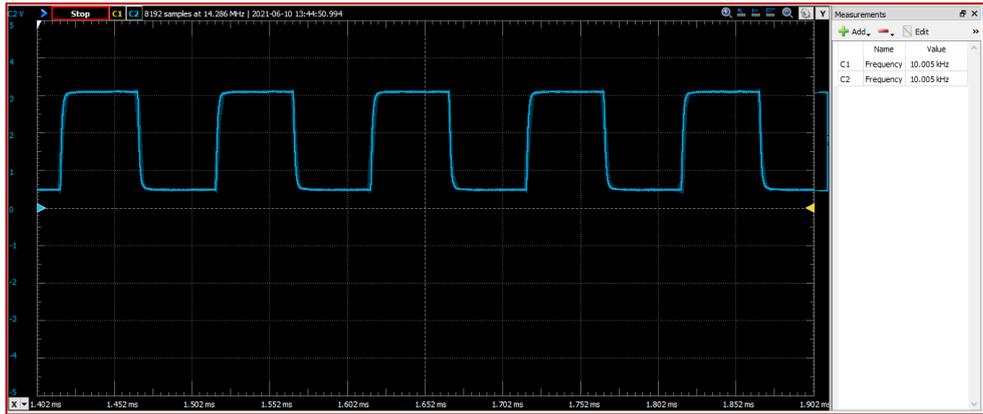


Fig. 5.8. Señal a la salida del TIA con el fotodiodo *SFH 206K*, $R_f = 82 \text{ k}\Omega$ y $C_f = 10 \text{ pF}$

- **Fotodiodo de silicio *BPW21R Vishay***

El otro fotodiodo elegido para realizar pruebas fue el fotodiodo de silicio *BPW21R* de *Vishay*, cuya sensibilidad espectral está entre 420 nm y 675 nm, posee un tiempo de subida de 3,1 μs y tiempo de bajada de 3 μs , aunque con un precio algo superior al fotodiodo anterior, como fue comentado en el capítulo 4.

En este caso se estudió su respuesta a la señal emitida por el sistema transmisor probando valores para la resistencia R_f de 8,2 k Ω y 82 k Ω , y para el condensador C_f de 100 pF, 50 pF, 10 pF y 5 pF. Tras el análisis de las señales, se concluyó que la señal resultante con mejores características usando este fotodiodo era la obtenida con los valores de 8,2 k Ω y 100 pF. La Fig.5.9. muestra dicha señal.

Al igual que con el fotodiodo anterior, la señal resultante con la resistencia de 82 k Ω presentaba un aumento del offset debido a la luz ambiental, por lo que en este caso también se seleccionó la resistencia de 8,2 k Ω posicionando el fotodiodo a una distancia de 2 cm del LED.

Con respecto a la variación del condensador, al introducir valores menores de 100 pF, la señal resultante comenzaba a mostrar mayor pico de ganancia (ver Fig.5.10.), llegando a tener oscilaciones cuando se usaba el condensador de 10 pF (ver Fig.5.11.). Por lo tanto, se seleccionó el condensador con valor 100 pF con el que el pico de ganancia de la señal era inexistente.

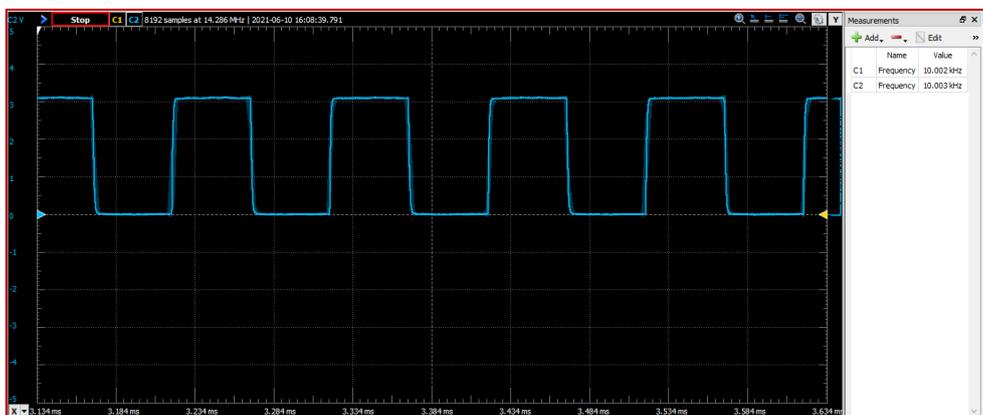


Fig. 5.9. Señal del fotodiodo *BPW21R*, $R_f = 8,2 \text{ k}\Omega$ y $C_f = 100 \text{ pF}$, después de su amplificación con el TIA

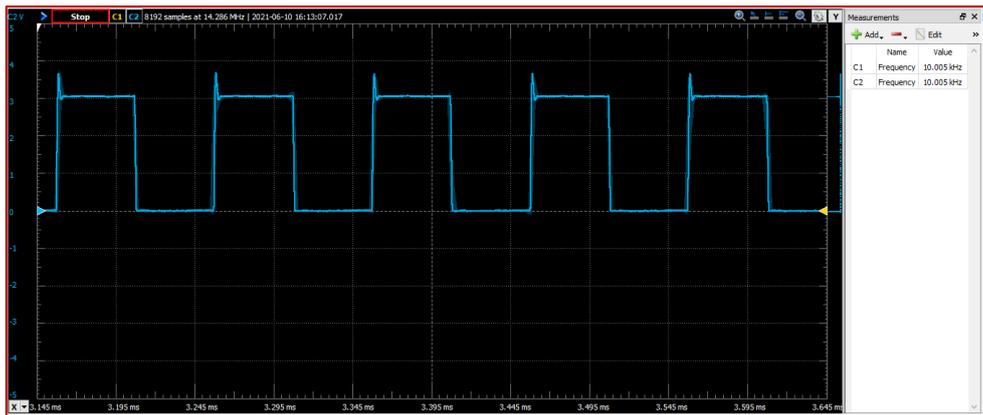


Fig. 5.10. Señal a la salida del TIA con el fotodiodo *BPW21R* Vishay, $R_f= 8,2 \text{ k}\Omega$ y $C_f= 50 \text{ pF}$



Fig. 5.11. Señal a la salida del TIA con el fotodiodo *BPW21R* Vishay, $R_f= 8,2 \text{ k}\Omega$ y $C_f= 10 \text{ pF}$

Comparando los mejores resultados obtenidos con cada fotodiodo, Fig.5.7. y Fig.5.9., se decidió utilizar el fotodiodo PIN de silicio *SFH 206K*. Ambas señales eran relativamente buenas y tenían características muy similares por lo que eran opciones válidas, pero se prefirió este fotodiodo, ya que su coste era menor.

5.2.2.2. Elección de la frecuencia máxima del receptor

En este apartado, se muestran los resultados de algunas de las pruebas realizadas para ver la respuesta del circuito receptor usando el fotodiodo elegido (Osram SFH 206K) con el amplificador de transimpedancia formado por la resistencia de $8,2 \text{ k}\Omega$, el condensador de 10 pF y el amplificador operacional *MCP6022*. Se busca determinar la frecuencia máxima a la que es capaz de trabajar el circuito receptor obteniendo una señal que posea cierta similitud con la señal transmitida.

Se obtiene una señal no distorsionada a la salida del TIA hasta frecuencias del orden de 250 kHz , pero como se ha comentado en el apartado 5.2.1., el hecho de que la señal generada por la Raspberry Pi transmisora tuviera variaciones del ciclo de trabajo a frecuencias superiores a 100

kHz, también produce este efecto en esta señal. La Fig.5.12. muestra la comparativa de la señal emitida por el LED y la señal detectada por el fotodiodo después de ser amplificada por el TIA diseñado a una frecuencia de 250 kHz.

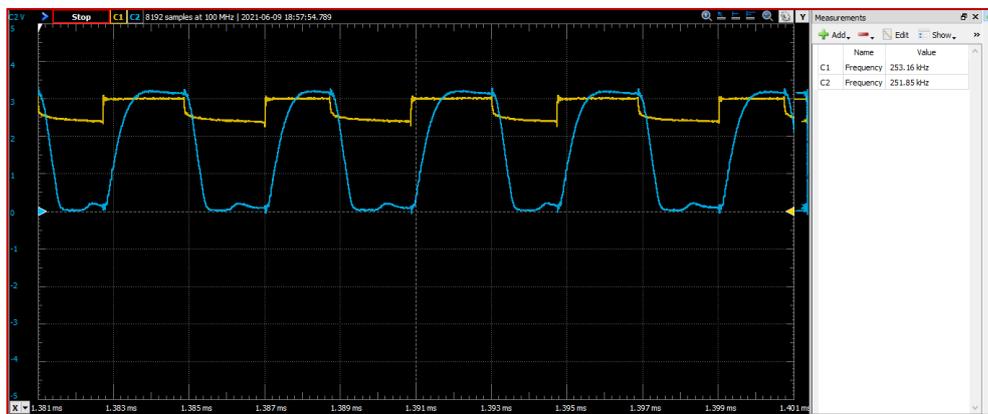


Fig. 5.12. Señal a la salida del TIA (azul) y señal del LED (amarilla) a 250 kHz

Como se ha comentado, el resultado anterior se obtuvo usando la función predefinida *delayMicrosecond(int microsegundos)* en el software de la Raspberry Pi transmisora, por lo que la señal presentaba los errores mencionados. Como se determinó en la sección 5.2.1., este error se solucionaba utilizando la función auxiliar *retardo()*. Tras esta modificación, se volvieron a realizar las pruebas en el circuito receptor. Con ello, se obtuvieron señales sin variaciones del ciclo de trabajo, llegando a obtener a una frecuencia de 360 kHz la señal mostrada en la Fig.5.13. Como se puede apreciar, la señal comenzaba a perder su forma cuadrada original y esta propiedad se iba incrementando a medida que aumentaba la frecuencia de la señal.

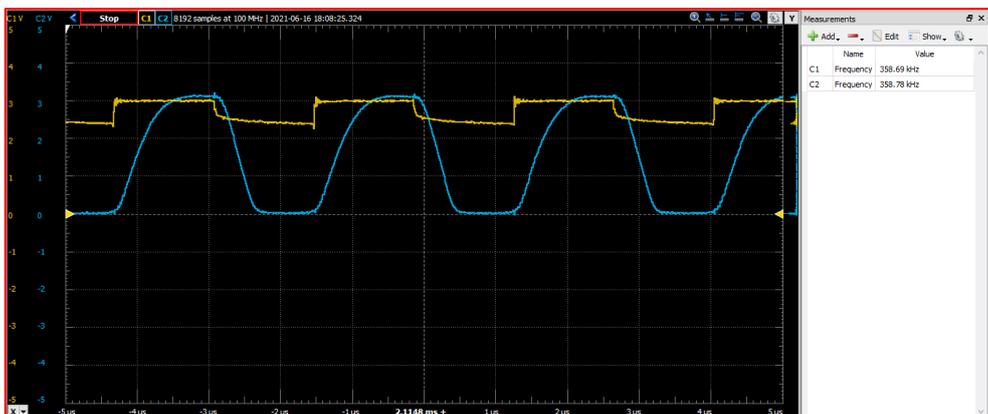


Fig. 5.13. Señal a la salida del TIA (azul) y señal del LED (amarilla) a 360 kHz

5.2.3. Selección de la frecuencia para el prototipo

Dado que se ha analizado que la máxima frecuencia óptima en el circuito transmisor era de 2 MHz y en el circuito receptor de 360 kHz, para la frecuencia del prototipo de VLC de bajo coste se utilizará una frecuencia con un valor de 20 kHz. Una frecuencia a la que, tanto el circuito

transmisor como el receptor, pueden trabajar, y en la que se obtiene una señal considerada como muy buena para la comunicación que se va a realizar con este prototipo, al ser, la señal transmitida por el LED y obtenida tras el TIA, prácticamente idénticas. La Fig.5.14. muestra tanto la señal enviada como la recibida a la frecuencia de 20 kHz.

Aunque el prototipo funciona hasta los 360 kHz, se seleccionó la frecuencia de 20 kHz, ya que, si la señal tuviera algún defecto, podría desencadenar un incremento del número de errores, ya que la sincronización es un factor clave en este sistema de comunicación por luz visible unidireccional para corta distancia y en presencia de luz ambiental.

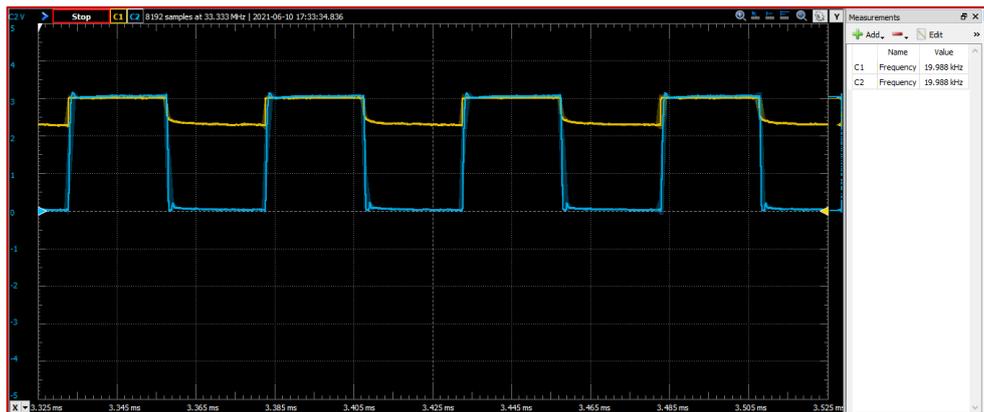


Fig. 5.14. Señal a la salida del TIA (azul) y señal del LED (amarilla) a 20 kHz

5.3. Ensayos de comunicación en el prototipo VLC de bajo coste

Finalmente, tras tener el prototipo completamente implementado se hicieron pruebas para analizar los resultados obtenidos al realizar la comunicación entre transmisor (T_x) y receptor (R_x). La Fig. 5.15. muestra el **prototipo** desarrollado basado en la **placa RPi**, para **VLC unidireccional** a corta distancia en presencia de luz ambiental, compuesta por dispositivos de **bajo coste**.

En primer lugar, se estudió la parte **analógica del prototipo** para comparar la **señal entrante** del circuito transmisor; es decir, la señal que provenía del pin 11 de la Raspberry Pi transmisora, y la **señal de salida** del amplificador de transimpedancia y entrada por el pin 13 de la Raspberry Pi receptora. Para ello, se codificó en **lenguaje de programación C** una simple **señal periódica cuadrada** de frecuencia **20 kHz**, para ser emitida por el LED.

La señal generada por la Raspberry Pi transmisora y la señal recibida tras el TIA resultaron ser prácticamente idénticas, como se muestra en la Fig.5.16., por lo que se considera que los circuitos implementados realizan correctamente su función al ser capaces de modular la señal en el circuito transmisor, recibirla en el circuito receptor, y demodularla para recuperarla de manera correcta.

Posteriormente, se realizaron pruebas con la integración total de la **parte digital del prototipo**. Para ello, se llevaron a cabo **transmisiones de diferentes archivos de texto**, que contenían 1 carácter, 10 caracteres y, por último, 30 caracteres. Se realizan 50 envíos de cada archivo de texto mencionado. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente TABLA 5.1.

TABLA 5.1. RESULTADOS DE LA TRANSMISIÓN DE ARCHIVOS CON EL PROTOTIPO

Número de caracteres en el archivo	Número total de caracteres enviados	Número de caracteres erróneos obtenidos	Probabilidad de carácter erróneo (%)
1	50	0	0
10	500	58	11,6
30	1500	181	12,06

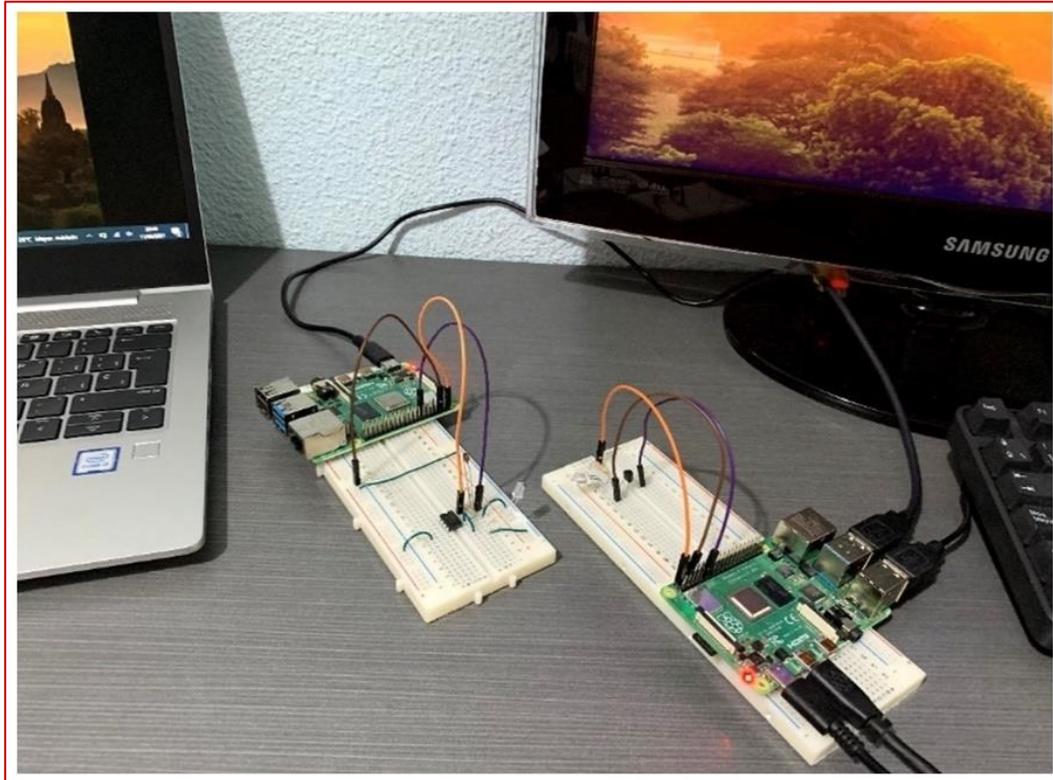


Fig. 5.15. Prototipo VLC de bajo coste diseñado para este TFG, T_x a la derecha y R_x a la izquierda

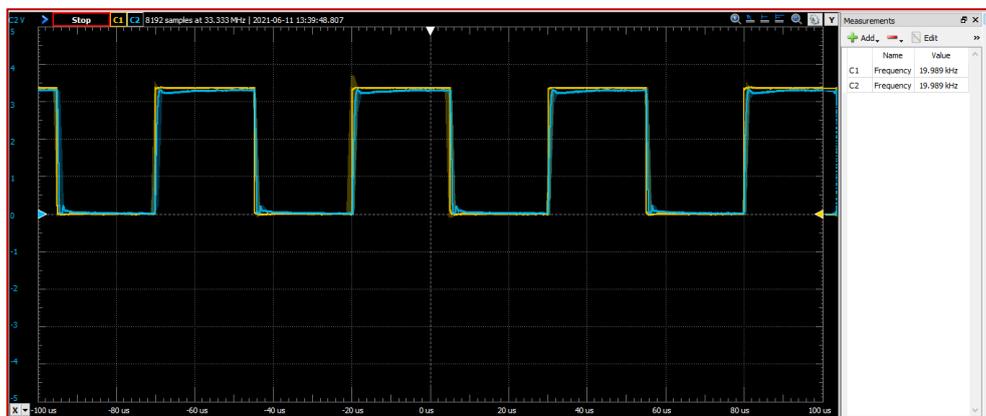


Fig. 5.16. Señal proveniente de la Raspberry Pi (amarilla) y a la salida del TIA (azul) a 20 kHz

Tras el estudio de estos resultados, se apreció que el envío del archivo de texto con 1 solo carácter tenía una mayor efectividad al no producirse ningún error en la transmisión, mientras que, con un mayor número de caracteres, el error aumentaba. Ahora bien, el incremento en el número de caracteres que contenía el fichero de texto no afectaba directamente al número de errores relativo, ya que la probabilidad de carácter erróneo obtenida con estas pruebas era similar en los envíos de archivos de texto con 10 caracteres y 30 caracteres, obteniendo alrededor de un 12 % de caracteres erróneos con ambos.

Se comprobó el **funcionamiento** de ambos **códigos software** del sistema transmisor y receptor, y se observó que realizaban correctamente la **codificación** y **decodificación** de los datos. El código transmisor extraía los datos del archivo de texto, realizaba la conversión de los caracteres a bytes y los envía generando una señal digital, todo ello de manera correcta. De igual manera ocurría en el código receptor, convirtiendo bytes a caracteres y generando un archivo nuevo con estos datos. La Fig.5.17. muestra un detalle de la señal del osciloscopio durante la transmisión de caracteres con el prototipo **T_x/R_x VLC de bajo coste**.

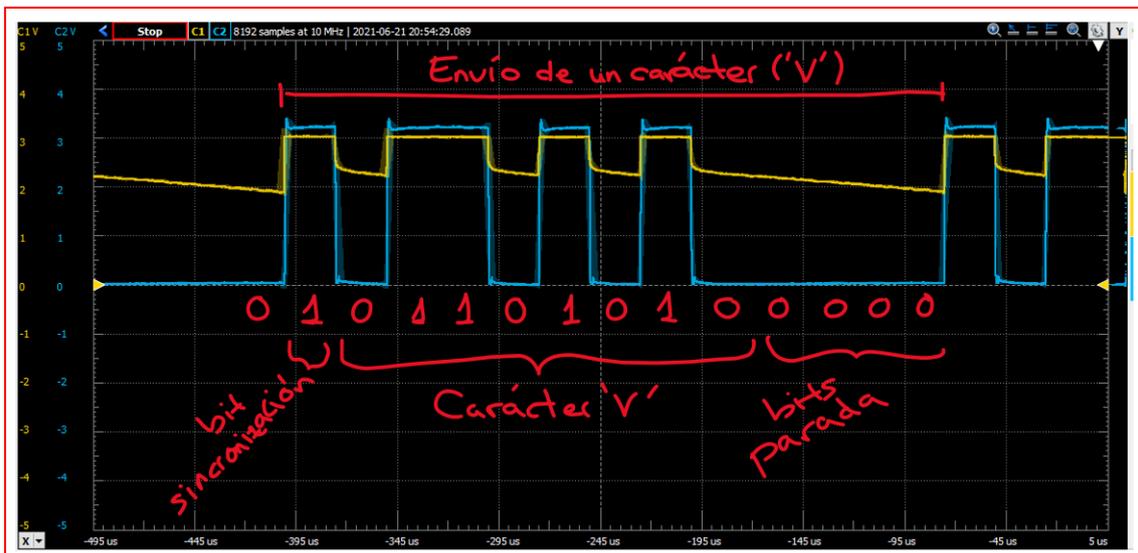


Fig. 5.17. Detalle gráfico de un envío y recepción de un carácter (Amarillo: LED; Azul: TIA)

Se concluyó, que la aparición de caracteres erróneos se debía a fallos de sincronización durante la comunicación. Este tipo de problema es común en los prototipos de comunicación por luz visible de bajo coste, ver por ejemplo referencias [53], [54] y [55]. Esta sincronización se implementó para realizarse durante la transmisión, para que el receptor obtuviera los datos correspondientes en el momento preciso. Esto se realizaba en el software, modificando los tiempos de parada entre recepción y recepción de los bits.

Cabe destacar que el número de caracteres erróneos no es concluyente, ya que se trata de un número pequeño de pruebas. Por lo que para ver la eficiencia de esta comunicación se deberían realizar mayor número de envíos, pero no es uno de los objetivos que nos habíamos fijado (apartado 1.2.).

6. ENTORNO SOCIOECONÓMICO

En este capítulo se va a detallar el **presupuesto total** de la elaboración de este trabajo. Además, se va a realizar un análisis del **impacto** que supone el desarrollo de un prototipo de comunicación por luz visible de bajo coste, desarrollado en este TFG, tanto a nivel **económico, medioambiental** y **social**.

6.1. Presupuesto del trabajo

Este trabajo ha tenido diferentes costes para su elaboración, entre los que se encuentran los costes de personal y los costes de los materiales, que incluyen los costes de los componentes electrónicos usados.

Los costes de personal se recogen en la TABLA 6.1., en la que se muestra el personal que ha llevado a cabo este proyecto, además de las horas de trabajo y el salario total:

TABLA 6.1. COSTE DE PERSONAL

Personal	Costes por hora (€/hora)	Tiempo de trabajo estimado (horas)	Salario total (€)
Alumno	25	400	10.000
Tutor	60	40	2.400
COSTE TOTAL:			12.400 €

Los costes materiales incluyen todos los elementos hardware utilizados para la elaboración de este trabajo tanto para el prototipo final, como para el desarrollo del mismo.

TABLA 6.2. COSTES MATERIALES DEL PROTOTIPO

Material	Precio por unidad (€)	Número de unidades	Precio total (€)
Pantalla	100,00	1	100,00
Teclado	10,00	1	10,00
Ratón	10,00	1	10,00
Ordenador portátil	300,00	1	300,00
Raspberry Pi 4 Model B ¹	61,61	2	123,22
Cable micro-HDMI a HDMI	5,53	1	5,53
Fuente de alimentación	9,03	2	18,06
Tarjeta microSD	16,11	2	32,22
Placa de pruebas (protoboard)	10,00	2	20,00
Componentes electrónicos	7,80	1	7,80
COSTE DE TODOS LOS ELEMENTOS DEL PROTOTIPO:			626,83 €
Osciloscopio Analog Discovery 2	390,00	1	390,00
Multímetro	30,00	1	30,00
COSTE TOTAL:			1.046,83 €

¹ Existen en el mercado otros modelos, como la Raspberry Pi 3 Model B desde 39 €, con la que se podría haber realizado también este TFG.

El coste de los componentes electrónicos del prototipo desarrollado que le confiere la característica de **VLC de bajo coste**, se desglosan en la TABLA 6.3.:

TABLA 6.3. COSTES DE LOS COMPONENTES ELECTRÓNICOS DEL PROTOTIPO VLC

Componente	Precio por unidad (€)	Número de unidades	Precio total (€)
Pack cables macho-hembra	3,34	1	3,34
Transistor MOSFET	0,24	1	0,24
Resistencia 100 Ω	0,20	1	0,20
LED azul	0,84	1	0,84
Fotodiodo PIN de silicio	1,56	1	1,56
Amplificador operacional	0,92	1	0,92
Resistencia 8,2 Ω	0,20	1	0,20
Condensador 10 pF	0,50	1	0,50
COSTE TOTAL:			7,80 €

Además, para obtener el presupuesto total del proyecto, hay que tener en cuenta que diversos materiales de la TABLA 6.2. tienen amortización, por lo que es necesario calcular este coste.

TABLA 6.4. COSTES DE AMORTIZACIÓN DEL MATERIAL DEL PROTOTIPO

Material	Precio total (€)	Vida útil (años)	Amortización (%)	Coste de amortización (€)
Pantalla	100,00	5	20	20
Teclado	10,00	5	20	2
Ratón	10,00	5	20	2
Ordenador portátil	300,00	5	20	60
Raspberry Pi 4 Model B	123,22	1	100	123,22
Cable micro-HDMI a HDMI	5,53	10	10	0,553
Fuente de alimentación	18,06	10	10	1,806
Tarjeta microSD	32,22	1	100	32,22
Placa de pruebas (protoboard)	20,00	1	100	20,00
Componentes electrónicos	7,80	1	100	7,80
Osciloscopio Analog Discovery 2	390,00	10	10	39
Multímetro	30,00	10	10	3
COSTE TOTAL DE AMORTIZACION DEL MATERIAL:				311,599 €

Finalmente, en la TABLA 6.5. se estima el precio total de este trabajo, que consta del coste total del personal, el coste del material amortizado, los costes indirectos, que incluyen gastos adicionales por electricidad, material de oficina y componentes de repuesto, y el 21% de la tasa de IVA.

TABLA 6.5. COSTES DEL TRABAJO

COSTE DE PERSONAL	12.400 €
COSTE DE MATERIAL AMORTIZADO	311,60 €
21 % COSTES INDIRECTOS ²	2.669,44 €
COSTE TOTAL DEL TRABAJO SIN IVA	15.381,04 €
21 % IVA	3.230,02 €
COSTE TOTAL DEL TRABAJO	18.611,06 €

6.2. Impacto socioeconómico

El desarrollo de las comunicaciones por luz visible supone un gran impacto para diversas áreas, en las que debido a sus características es destacable, como el económico, el social y el medioambiental.

6.2.1. Impacto económico

La utilización de la comunicación por luz visible de bajo coste, con el fundamento del prototipo desarrollado en este TFG, supondría una gran disminución del coste de algunas de las comunicaciones inalámbricas actuales. En primer lugar, como ya ha sido destacado a lo largo de este proyecto, es una tecnología que utiliza componentes de bajo coste como los LED, que además tienen un largo ciclo de vida frente a otros sistemas de iluminación. En segundo lugar, debido a su eficiencia energética, supondría un gran ahorro de energía eléctrica y por tanto económico. En tercer lugar, sistemas como el desarrollado en este TFG se pueden implementar sobre la luminaria LED actual, por lo que el coste de implementación sería muy inferior al coste actual para infraestructuras de comunicaciones por radiofrecuencia.

Además, para sectores como el de la Industria 4.0, o para la implementación de domótica e IoT (Internet de las cosas) en interiores, como se menciona en el apartado 3.3.1. de este trabajo, la utilización de dispositivos que emplean la tecnología de VLC, además del impacto positivo de seguridad y de comodidad debido al control remoto, supondría un gran atractivo debido a la utilización de componentes de bajo coste y, por consiguiente, un ahorro económico adicional al ahorro energético.

² Los costes indirectos se han calculado aplicando el 21% a la suma de los costes de personal y los costes de material amortizados.

Finalmente, hay que destacar que al tratarse de una tecnología que trabaja sobre una banda del espectro no regulada (400 THz – 780 THz), no supondría un coste adicional por su uso, como si ocurre con las radiofrecuencias. Un ejemplo actual de este coste añadido a la implantación de una nueva tecnología sería la subasta que se va a producir en España este año 2021 de la banda de los 700 MHz para el 5G, cuyos precios de salida rondan los 995,5 millones de euros.

6.2.2. Impacto social

En cuanto al impacto social, señalar que la posibilidad de realizar ciertas comunicaciones inalámbricas por luz visible, al estar libres de interferencias electromagnéticas, permitiría una conexión más segura y de mayor calidad en lugares, como la industria, laboratorios, hospitales o aviones. En estos espacios, el uso de comunicaciones por radiofrecuencias no es posible, o no está recomendado debido a las interferencias que podrían producirse con los dispositivos que forman parte o se utilizan en estas zonas.

6.2.3. Impacto medioambiental

En la actualidad, nos encontramos en un momento en el que el calentamiento global es un problema real y todo lo que contribuya a mejorar este factor tiene un gran valor añadido. Así, el **Protocolo de Kioto** tiene como objetivo reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (entre ellas el CO₂) que causan el cambio climático. Las comunicaciones por luz visible, fundamentalmente si se realizan a través de LEDs, se consideran como una tecnología ecológica, ya que requieren un bajo consumo energético, y en algunas ocasiones se puede utilizar la misma luz tanto para iluminar como para transmitir datos.

Por otra parte, cabe destacar que el LED y el resto de los componentes utilizados en este prototipo de VLC de bajo coste son conformes con **RoHS**. Las Directivas de la Unión Europea RoHS (*Restriction of use of certain Hazardous Substances*) 2011/65/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 8 de junio de 2011 y 2015/863, restringe el uso de plomo y otras sustancias potencialmente peligrosas incluyendo cadmio, mercurio y cromo, PBB y PBDE, contenidos en productos eléctricos y electrónicos, con la finalidad de proteger el medio ambiente. Entre dichos grupos de productos electrónicos se encuentran los dispositivos TIC, los equipos de telecomunicaciones, aparatos de alumbrado, juguetes, equipos de recreación y deporte, etc. En todos estos grupos es posible la utilización de la tecnología VLC de bajo coste. La Fig.6.1. muestra como ejemplo un detalle del certificado de conformidad RoHS del LED utilizado en este TFG.

Para finalizar, señalar que el *Ministerio de Comercio Internacional e Industria* de Japón realizó un estudio que demostró que, si la mitad de las lámparas incandescentes y fluorescentes se reemplazaran por lámparas LED, Japón podría ahorrar lo mismo que la producción de seis centrales eléctricas de tamaño medio y, como consecuencia, reduciría la producción de gases de efecto invernadero [56].



RS Components

Declaración de Conformidad con la Directiva RoHS

Las directivas de la UE 2011/65/UE y 2015/863 restringen el uso de las 10 sustancias siguientes en la fabricación de ciertos tipos específicos de equipos eléctricos.

Aunque la restricción no es legalmente aplicable a los componentes, se reconoce que la conformidad de los mismos es relevante para muchos clientes.

Definición de conformidad con la directiva RoHS:

- Conforme a RoHS significa que el producto no contiene ninguna de las sustancias restringidas en las concentraciones y aplicaciones prohibidas por la directiva Y (para componentes)
- El producto es capaz de ser procesado a las temperaturas mayores que requiere la soldadura sin plomo respecto a la soldadura convencional

Detalles del producto al que hace referencia este certificado

Código RS:	769-3533
Descripción	LED Broadcom, Montaje en orificio pasante, Azul, 470 nm, 9,6 cd, 3,2 V, 15 °, 5 mm (T-1 3/4)
Nombre del Fabricante/Marca	Broadcom
Ref. del Fabricante	HLMP-CB1B-XY0DD

La información anterior se refiere al producto vendido a partir de la fecha mostrada más abajo

Fecha **16/6/2021**

Amidata S.A.U Avenida de Bruselas, 6, 28108 Alcobendas, Madrid

Fig. 6.1. Detalle del certificado de conformidad del LED utilizado en el prototipo

7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO

Este Trabajo Fin de Grado (TFG) ha logrado su objetivo de diseñar e implementar un prototipo VLC de bajo coste mediante Raspberry Pi. El sistema T_x/R_x funciona y ha demostrado la aplicación de la luz visible de forma unidireccional como modo de transmisión y recepción de datos a través del aire a distancias cortas, usando una parte software para la codificación y decodificación de la información a transmitir.

En este último capítulo se discutirá sobre el TFG realizado, comparando los resultados obtenidos con los objetivos establecidos al comienzo de este trabajo, en la sección 1.2. Además, se propondrán futuras líneas de trabajo debido a que todavía hay muchas áreas de mejora en la comunicación por luz visible de bajo coste basada en Raspberry Pi, como el estudio de la interferencia de la luz ambiental y la influencia de la distancia de transmisión, entre otras. Este asunto se discutirá en la sección 7.2.

7.1. Discusión y conclusiones

En este proyecto se ha descrito el diseño y la implementación de un prototipo de sistema de comunicaciones por luz visible, utilizando componentes comerciales de bajo coste (incluidas dos Raspberry Pi), considerando un uso de la VLC para interiores a corto alcance. Una línea seguida para la implementación de este prototipo fue utilizar técnicas de software, basadas en el lenguaje de programación C, que ha permitido conseguir una solución con un alto grado de modularidad y flexibilidad.

La interfaz entre los subsistemas de hardware y software se realizó con la ayuda del dispositivo Raspberry Pi que proporciona funcionalidades como el procesamiento de los datos, mediante la codificación y la decodificación de los mismo, la creación de la señal digital de entrada del circuito modulador y la interpretación o lectura de la señal demodulada.

Se han realizado diversas pruebas para presentar las capacidades del sistema. Primero, se obtuvieron las señales de entrada del circuito modulador y de salida del circuito demodulador. Ambas señales cuadradas tenían una forma muy similar, por lo que se pudo concluir que la parte hardware del prototipo tenía el comportamiento esperado. Finalmente, se realizaron diversos envíos de archivos de texto modificando el número de caracteres de su interior para analizar el comportamiento del prototipo completo. Se puede considerar que el transmisor envía los datos correctamente, y el receptor los interpretaba y generaba nuevamente un archivo con ellos. Este nuevo archivo de texto no siempre contenía los mismos datos que el archivo original, ya que algunos caracteres eran erróneos. La disminución del número de caracteres erróneos es otra de las líneas futuras de trabajo que debería ser desarrollada.

Aunque los resultados de esta segunda prueba no fueron concluyentes debido al bajo número de intentos de envío, se constató que cuando se enviaba más de 1 carácter, aumentaba el número de caracteres erróneos al regenerar el archivo enviado en el receptor, manteniéndose una tasa de error que no parecía depender del número de caracteres.

Tras analizar el rendimiento del prototipo en esta segunda prueba, se ha concluido que los caracteres erróneos obtenidos en el archivo recibido se deben a fallos en la sincronización entre transmisor y receptor. La sincronización ha sido uno de los aspectos más complicados de implementar en este TFG, al tratarse de una comunicación unidireccional entre dos elementos, transmisor y receptor, totalmente independientes sin reloj interno común. La sincronización se implementó añadiendo tiempos de espera en el receptor, para que este leyera los datos en el momento exacto en el que el transmisor los enviaba, para poderlos interpretar de manera correcta. Dado los resultados, este aspecto se podría estudiar con mayor profundidad para intentar conseguir mejorar el rendimiento del prototipo diseñado.

Como conclusión, se ha diseñado e implementado un sistema unidireccional VLC de bajo coste basado en Raspberry Pi. Este sistema es capaz de enviar y recibir datos a través de luz visible en distancias cortas, es decir, una línea de comunicación unidireccional entre dos Raspberry Pi. El sistema utiliza el lenguaje de programación C para la codificación y decodificación de los datos. Los circuitos hardware se encargan de modular y demodular las señales visibles. Además, este trabajo ha abarcado todos los objetivos mencionados en el subcapítulo 1.2.; el proyecto se finalizó alcanzando casi todos los objetivos previstos.

7.2. Futuras líneas de trabajo

Tras el desarrollo de este trabajo, se proponen diversas mejoras y nuevas líneas de estudio para el futuro:

1. Existen métodos alternativos de interconexión de LEDs y Fotodiodos al RPi a través de buses eléctricos (por ejemplo, I2C o SPI). Estos sistemas podrían explorarse para conocer su influencia sobre la rapidez, la calidad y la facilidad de implementación de la comunicación por luz visible.
2. Un análisis más profundo del BER (Tasa de error binario - *Bit Error Rate*) de este dispositivo VLC de bajo coste. Por ejemplo, estudio de la:
 - a) Influencia de los niveles de luz ambientales en el BER.
 - b) Influencia de la tasa de símbolo (en inglés *Symbol Rate*) en el BER.
 - c) Influencia de la distancia entre el LED y el fotodiodo en el BER.
 - d) Estudio profundo del tamaño del búfer del transmisor y receptor en el BER.
3. Ensayar el fotodiodo en modo fotovoltaico y fotoconductor para observar las diferencias en velocidad de transmisión, ruido generado o calidad de señales obtenidas.
4. Utilización de amplificadores de transimpedancia (TIA) de mayor ancho de banda. Se pueden utilizar para intentar mejorar el rendimiento de la velocidad de transmisión.
5. Se pueden agregar más longitudes de onda (añadir un mayor número y tipos LED) al subsistema transmisor, para estudiar si la velocidad de datos del sistema y la distancia de comunicación se pueden incrementar.

Además, este proyecto se puede desarrollar y mejorar en el futuro teniendo en cuenta que el rendimiento del LED y fotodiodo empleados se ven afectados por la luz ambiental; lo que supone una restricción en el uso de este sistema en grandes distancias. Este problema se puede trabajar mediante el uso de un mejor fotodiodo para luz visible y/o la utilización de un diodo láser, aunque aumentaría el coste del nuevo prototipo de forma apreciable.

Centrándose en una aplicación actual, se puede trabajar en la implementación de una comunicación unidireccional entre un transmisor compuesto de una Raspberry Pi, como en este trabajo, y un teléfono móvil como receptor, haciendo uso, como fotodetector, de la cámara de la que disponen estos dispositivos móviles. Esta funcionalidad sería de gran utilidad para espacios en los que se quiere evitar las interferencias electromagnéticas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Z. Ghassemlooy, M. Uysal, M. Khalighi, V. Ribeiro, F. Moll, S. Zvanovec y A. Belmonte, «An Overview of Optical Wireless Communications,» de *Optical Wireless Communications*, Springer International Publishing, 2016, pp. 1-23.
- [2] X. Lin, T. Matsumura y B. Mukherjee, «Visible Light Communications,» de *Springer Handbook of Optical Networks*, Springer, 2020, pp. 1105-1124.
- [3] «ISO/IEC 9899:2011 Information technology - Programming languages - C,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.iso.org/standard/57853.html>. [Último acceso: Junio 2021].
- [4] «Japan Electronics and Information Technology Industries Association (JEITA),» [En línea]. Available: <https://www.jeita.or.jp/english/>. [Último acceso: Junio 2021].
- [5] «IEEE Standard for Local and metropolitan area networks--Part 15.7: Short-Range Optical Wireless Communications,» *IEEE Std 802.15.7-2018 (Revision of IEEE Std 802.15.7-2011)*, pp. 1-407, 2019.
- [6] D. C. O'Brien, L. Zeng, H. Le-Minh, G. Faulkner, J. W. Walewski and S. Randel, "Visible light communications: Challenges and possibilities," *2008 IEEE 19 th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, pp. 1-5, 2008.
- [7] «IMDEA Networks - IMDEA Networks : IMDEA Networks,» [En línea]. Available: <https://networks.imdea.org/>. [Último acceso: Mayo 2021].
- [8] «LiFi Companies | LiFi.co,» [En línea]. Available: <https://lifi.co/lifi-companies/>. [Último acceso: Mayo 2021].
- [9] «pureLiFi products - LiFi-XC - Access Point - pureLiFi,» Mayo 2021. [En línea]. Available: <https://purelifi.com/lifi-products/ap/>. [Último acceso: Mayo 2021].
- [10] «Light Fidelity (LiFi) Internet Service Provider Company - Oledcomm,» [En línea]. Available: <https://www.oledcomm.net/>. [Último acceso: Mayo 2021].
- [11] «VLNComm -- LumiStick II: LiFi USB Adapter,» [En línea]. Available: <https://vlncomm.com/LumiStick2.html>. [Último acceso: Mayo 2021].
- [12] «Teach, Learn, and Make with Raspberry Pi,» [En línea]. Available: <https://www.raspberrypi.org/>. [Último acceso: Mayo 2021].
- [13] K. Hunter, J. M. Conrad y A. R. Willis, «Visible light communication using a digital camera and an LED flashlight,» *IEEE SOUTHEASTCON 2014*, pp. 1-5, 2014.
- [14] D. Tsonev, H. Chun, S. Rajbhandari, J. McKendry, S. Videv, E. Gu, M. Haji, M. Watson, H. Haas y D. O'Brien, «A 3-Gb/s Single-LED OFDM-Based Wireless VLC Link Using a Gallium Nitride μ LED,» *IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS*, vol. 26, nº 7, pp. 637-640, 2014.
- [15] P. H. Pathak, X. Feng, P. Hu y P. Mohapatra, «Visible Light Communication, Networking, and Sensing: A Survey, Potential and Challenges,» *IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS*, vol. 17, nº 4, pp. 2047-2077, 2015.
- [16] L. P. Klaver, Design of a network stack for directional visible light communication, Ph.D. dissertation, Faculty Elect. Eng., Math. Comput. Sci., Delft Univ. Technol., Delft, The Netherlands, 2014.

- [17] C. Han, X. Sun y S. Cui, «Design of 100Mbps White Light LED based Visible Light Communication System,» *2017 4th International Conference on Systems and Informatics*, pp. 1035-1039, 2017.
- [18] S. Das, A. Chakraborty, D. Chakraborty y S. Moshat, «PC to PC Data Transmission using Visible Light Communication,» *2017 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI)*, pp. 1-5, 2017.
- [19] R. Bian, I. Tavakkolnia y H. Haas, «15.73 Gb/s Visible Light Communication With Off-the-Shelf LEDs,» *Journal of Lightwave Technology*, vol. 37, nº 10, pp. 2418-2424, 2019.
- [20] Z. Abidin, A. Mahendra, D. Mahendra y M. Imami, «Performance Analysis of LED Driver for Transmitter of Visible Light Communication Using Pulse Width Modulation,» *2020 10th Electrical Power, Electronics, Communications, Controls and Informatics Seminar (EECCIS)*, pp. 178-182, 2020.
- [21] H. Huang, T. Lan, C. Huang, C. Wang, C. Huang, S. Zhou y L. Lu, «Visible-light communication using high-power LED panel-lamp and low-complexity MOSFET circuit,» *Optical and Quantum Electronics*, vol. 53, nº 38, 2021.
- [22] D. Karunatilaka, F. Zafar, V. Kalavally y R. Parthiban, «LED Based Indoor Visible Light Communications: State of the Art,» *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 17, nº 3, pp. 1649-1678, 2015.
- [23] A. Cailean y M. Dimian, «Impact of IEEE 802.15.7 Standard on Visible Light Communications Usage in Automotive Applications,» *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, nº 4, pp. 169-175, 2017.
- [24] P. Pathak, X. Feng, P. Hu y P. Mohapatra, «Visible Light Communication, Networking, and Sensing: A Survey, Potential and Challenges,» *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 17, nº 4, pp. 2047-2077, 2015.
- [25] «United States Department of Energy. Energy Information Administration (EIA),» 2015. [En línea]. Available: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=15471>. [Último acceso: mayo 2021].
- [26] J. Luo, L. Fan y H. Li, «Indoor Positioning Systems Based on Visible Light Communication: State of the Art,» *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 19, nº 4, pp. 2871-2893, 2017.
- [27] M. Z. Chowdhury, M. T. Hossan, A. Islam y Y. M. Jang, «A Comparative Survey of Optical Wireless Technologies: Architectures and Applications,» *IEEE Access*, vol. 6, pp. 9819-9840, 2018.
- [28] A. Aljaberi, P. Sofotasios y S. Muhaidat, «Modulation Schemes for Visible Light Communication,» de *2nd International Conference on Advanced Communication Technologies and Networking (CommNet)*, Rabat, 2019.
- [29] L. Khan, «Visible light communication: applications, architecture, standardization and research challenges,» *Digital Communications and Networks*, vol. 3, nº 2, pp. 78-88, 2017.
- [30] H. Hass y S. Dimitrov, *Principles of LED Light Communications. Towards Networked Li-Fi*, Reino Unido: Cambridge University Press, 2015.
- [31] D. Karunatilaka, F. Zafar, V. Kalavally y R. Parthiban, «LED Based Indoor Visible Light Communications: State of the Art,» *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 17, nº 3, pp. 1649-1678, 2015.
- [32] J. Armstrong, «OFDM for Optical Communications,» *Journal of Lightwave Technology*, vol. 27, nº 1-4, pp. 189-204, 2009.

- [33] R. Mesleh, H. Elgala y H. Haas, «On the Performance of Different OFDM Based Optical Wireless Communication Systems,» *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 3, nº 8, pp. 620-628, 2011.
- [34] R. Mesleh, H. Elgala y H. Haas, «Performance Analysis of Indoor OFDM Optical Wireless Communication Systems,» de *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, 2012.
- [35] E. Shawky, M. El-Shimy, H. J. Shalaby, A. Mokhtar y E. El-Badawy, «Kalman Filtering for VLC Channel Estimation of ACO-OFDM Systems,» de *2018 Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition (ACP)*, 2018.
- [36] L. Matheus, A. Vieira, L. Vieira, M. Vieira y O. Gnawali, «Visible Light Communication: Concepts, Applications and Challenges,» *IEEE Communcations Surveys and Tutorials*, vol. 21, nº 4, pp. 3204-3237, 2019.
- [37] Z. Tian, K. Wright y X. Zhou, «The DarkLight Rises: Visible Light Communication in the Dark,» de *22nd Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, 2016.
- [38] A. Cailean y M. Dimian, «Impact of IEEE 802.15.7 Standard on Visible Light Communications Usage in Automotive Applications,» *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, nº 4, pp. 169-175, 2017.
- [39] J. Luo, L. Fan y H. Li, «Indoor Positioning Systems Based on Visible Light Communication: State of the Art,» *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 19, nº 4, pp. 2871-2893, 2017.
- [40] Y. Kuo, P. Pannuto, K. Hsiao y P. Dutta, «Luxapose: Indoor Positioning with Mobile Phones and Visible Light,» de *20th ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, 2014.
- [41] M. Nakajima y S. Haruyama, «New indoor navigation system for visually impaired people using visible light communication,» *J Wireless Com Network 2013*, nº 37, 2013.
- [42] H. Kaushal y G. Kaddoum, «Underwater Optical Wireless Communication,» *IEEE Access*, vol. 4, pp. 1518-1547, 2016.
- [43] H. Oubei, C. Li, K. Park, T. Ng, M. Alouini y B. Ooi, «2.3 Gbit/s underwater wireless optical communications using directly modulated 520 nm laser diode,» *Optics Express*, vol. 23, nº 16, pp. 20743-20748, 2015.
- [44] «Raspberry Pi Foundation - About Us,» [En línea]. Available: <https://www.raspberrypi.org/about/>. [Último acceso: Junio 2021].
- [45] «BCM2711 - Raspberry Pi Documentation,» [En línea]. Available: <https://www.raspberrypi.org/documentation/hardware/raspberrypi/bcm2711/README.md>. [Último acceso: Junio 2021].
- [46] «Operating system images - Raspberry Pi,» [En línea]. Available: <https://www.raspberrypi.org/software/operating-systems/>. [Último acceso: Junio 2011].
- [47] D. Mollloy, *Exploring Raspberry Pi: Interfacing to the Real World with Embedded Linux*, New York: Wiley, 2016.
- [48] «WiringPi,» [En línea]. Available: <http://wiringpi.com/>. [Último acceso: Junio 2021].

- [49] «BS270 N-Channel Enhancement Mode Field Effect Transistor,» [En línea]. Available: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/bs270-d.pdf>. [Último acceso: Junio 2021].
- [50] «HLMP-CB1B-XY0DD | LED Broadcom,» [En línea]. Available: <https://docs.broadcom.com/doc/AV02-2228EN>. [Último acceso: Junio 2021].
- [51] «Radial Sidelooker, SFH 206 K | OSRAM Opto Semiconductors,» [En línea]. Available: https://dammedia.osram.info/media/resource/hires/osram-dam-5488346/SFH%20206%20K_EN.pdf. [Último acceso: Junio 2021].
- [52] «bpw21r.pdf,» [En línea]. Available: <https://www.vishay.com/docs/81519/bpw21r.pdf>. [Último acceso: Junio 2021].
- [53] D. P. Calero, Implementación de un Tx/Rx VLC en Raspberry Pi, Universidad Carlos III de Madrid, 2019.
- [54] R. D. L. Castillo, Sistema de comunicación óptico no guiado basado en Raspberry Pi, Universidad Politécnica de Cataluña, 2016.
- [55] S. Yin y O. Gnawali, «Towards Embedded Visible Light Communication Robust to Dynamic Ambient Light,» de *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Washington, DC, USA, 2016.
- [56] T. Komine y M. Nakagawa, «Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights,» *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 50, nº 1, pp. 100-107, 2004.

ANEXO A - EXTENDED ABSTRACT

A.1. Introduction

Visible light communication (VLC) exhibits rapid development tendency in recent years since it has many attractive features, such as its low cost and energy efficiency, its immunity to electromagnetic interference, license-free spectrum, security against undesired access, large bandwidth and due to the electromagnetic spectrum limitation problem of Radiofrequency communications. However, there are also some drawbacks in VLC, TABLE A.1. list some advantages and disadvantages of these systems. This technology uses the visible region of the electromagnetic spectrum, between 380 nm (ultraviolet) and 780 nm (infrared), to perform data transmissions wirelessly over 400 THz bandwidth, see Fig.A.1. [17] [18].

TABLE A.1. ADVANTAGES AND DRAWBACKS OF VLC

ADVANTAGES	DRAWBACKS
Large bandwidth capacity	High noise in outdoor applications
Non-regulatory spectrum band	Signal attenuation over long distances
No electromagnetic interference	Blocking by obstacles
More secure communications	Limited transmission power
No harmful effects on people	Interferences due to natural or artificial light
Efficient energy consumption	
Low cost	

To carry out this type of communication, systems with **LOS** configuration are used, since a direct vision between transmitters and receivers is required. These are composed of a transmitter, which modulates the light produced by an **LED** or **LD** and a receiver; that is, a **photodetector** or **camera sensor** whose signal will be demodulated so that a complete communication occurs [17] [19].

In VLC, the signal is positive and real, so in the transmitter the variation of the light intensity is used to transmit the data. In the receiver, demodulation is done using direct detection. That is why the modulations used in VLC follow the **IM/DD** scheme [19].

In addition, any modulation scheme in VLC must meet the requirements demanded of the light perceived by humans. These demands on perceived light can be characterized by the following factors: **Dimming** and **Flicker**. Regardless of the degree of illuminance chosen (dimming) by the user, the VLC should not be affected. In addition, it is an important consideration for power savings and energy efficiency. Flicker refers to the fluctuation of the luminosity of light. Any potential flicker resulting from modulating the light must be mitigated because it can cause harmful to the health of humans. A flicker frequency higher than 200 Hz is generally considered safe [20].

According to the number of carrier waves used in the modulation for the transmission of information, we can distinguish two types of modulations: single-carrier modulation and multicarrier modulation. The first uses a single carrier with a single frequency, while the second uses multiple carrier waves to transmit the information.

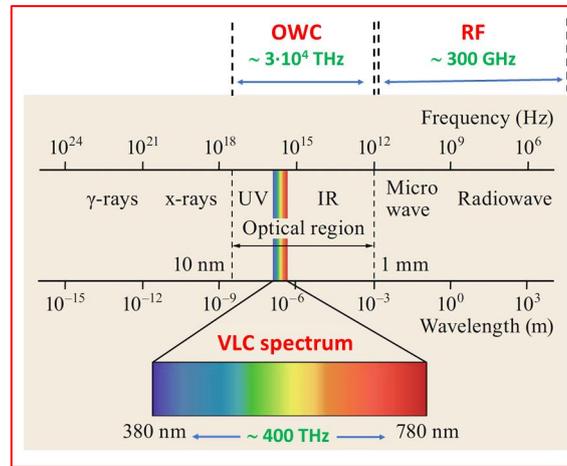


Fig. A.1. Frequencies and wavelengths of RF, OWC and VLC based on [2]

Some examples of **single-carrier modulation** are: **OOK (On-Off Keying)** is one of the most widely used modulation schemes in wireless optical communications type VLC due to its simplicity in design and its easy implementation [24] [5], which entails a low-cost. The data is represented using a digital *0* or *1*, which is equivalent to the *off* or *on* state, respectively. Its main limitation is its low data rate. **PWM (Pulse Width Modulation)** is a modulation in which the modulated signal is sent by adjusting the widths of the pulses to obtain the attenuation that is required. The data rate of the modulated signal must be adjusted according to the required attenuation. The drawback of PWM modulation remains in the limited rate of sending data; some authors have published values of 4.8 kbps [19]. **PPM (Pulse Position Modulation)** is characterized by transmitting information in short pulses. These pulses all have the same duration and amplitude, modifying only the position of each pulse on a time basis, depending on the signal that is transmitted. **PAM (Pulse Amplitude Modulation)** is very basic and bandwidth efficient [26]. The transmitted information is modulated in the pulse amplitude of the signal.

Single-carrier modulations may become ineffective when a high rate of information transfer is required. In these cases, problems arise such as the nonlinearity of the signal sent by the LEDs, or the high values of interference between symbols (ISI). **Multi-carrier modulations** manage to mitigate these problems at high data transfer rates. One of the most widely used modulations is known as **Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)**, which divides the bandwidth into multiple subcarriers with different frequencies that transmit the information in parallel.

Due to the essential features offered by VLC systems there is a wide range of applications, including underwater visible-light wireless communication, localization systems, indoor information services, vehicle-infrastructure and vehicle-vehicle communications, in which you could make use and take advantage of the benefits this technology provides.

The great potential of VLC technology for communication has made it possible for numerous companies and research groups to focus on the development of this communication technique.

They have been created different proposals for low-cost experimental developments ([14], [19], [21]) and various commercial solutions. Within the latter, they stand out *LiFi-XC* from de company **PureLifi**, *LiFiNET®* &/o *GEOLiFi®* and *LiFiMAX®* technology from **Oledcomm**, and *LumiStick II*, *LumiLamp* and *LumiNex* products from **VLNcomm**. These products are characterised for their compact design, easy installation, and great performance, although their price is high.

Regarding the standard applicable to low-cost visible light communication systems, we must mention the latest known regulation on the C programming language: **ISO/IEC 9899:2011/COR:2018 Information Technology-Programming Languages-C**, also known as C11, and its latest revision published in 2018. This international standard specifies the form of the language and establishes the interpretation of programs written in the C programming language [3].

On the other hand, the JEITA accepted three standards for VLC: **JEITA CP-1221**, **JEITA CP-1222** and **JEITA CP-1223** in 2007 and 2013. Also, the IEEE (organization proposed in 2011 its first IEEE standard for visible light communications as **IEEE 802.15.7-2011: Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light**. Later, in 2018, it was replaced by the IEEE 802.15.7-2018: Short-Range Optical Wireless Communications [5]. Finally, the UNE ratified in 2017, the standard **UNE-EN 62943:2017**, called **Visible light beacon system for multimedia applications**. This standard specifies a protocol for one-way visible light communication.

This project describes the design and implementation of a prototype system of communications by visible light, using low-cost commercial components (including two Raspberry Pi boards) and based on the **OOK modulation** due to its greater simplicity and low cost. A short-range VLC is considered, for indoor applications. Another line for the implementation of this prototyping system is to use software techniques based on the **C programming languages** since it allows to achieve a solution with a high degree of modularity and flexibility.

It is a work based on a current technology of great relevance, which will be applied in a practical way, by developing a complete communications system, environmentally friendly, and making use of low-cost electronic components such as **LEDs**, **transistors**, **photodiodes**, **operational amplifiers**, and the **Raspberry Pi (RPI) platform**.

This project presents the following objectives:

- Design and implement a transmitter (T_x) and a receiver (R_x) circuit composed of low-cost components capable of modulating and demodulating a signal.
- Develop a software for de encoding, decoding, transmission and reception of data.
- Integrate the hardware and software subsystems of the transmitter and receiver using two Raspberry Pi.
- Evaluation of the hardware and software subsystems independently and evaluation of the complete prototype by sending different text files.

A.2. Design and implementation of the prototype

The described prototype consists of a hardware part, composed of low-cost components and two **RPI** boards, one for the transmission system and the other for the reception system, as well as the software, implemented in the RPi to process the data to be transmitted (See Fig.A.2.).

In this work, it has been used the RPi, which is a computer of reduced dimensions and low cost. For this device, the **Raspberry Pi OS** was chosen over other possible operating systems because it is the default operating system and offers the necessary functions for the development of this work. Both RPis used in this project were configured and prepared for proper operation.

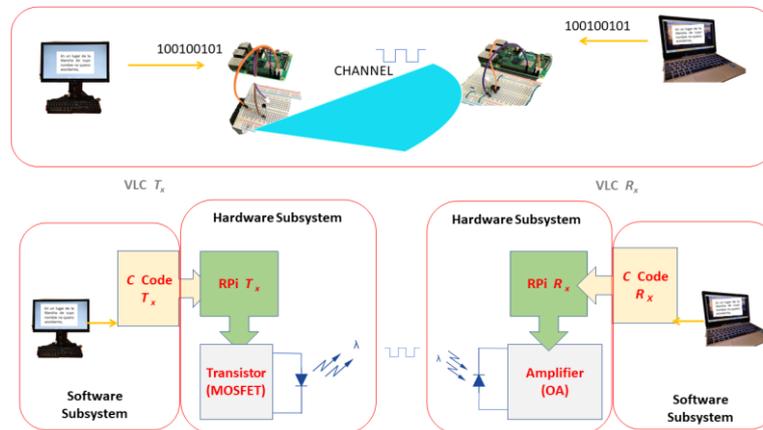


Fig. A.2. Experimental set-up and block diagram of the low-cost VLC system

A.2.1. Hardware Subsystem

The hardware subsystem consists of a transmitter circuit and a reception circuit.

The transmitter circuit will be responsible for converting the digital signal to be transmitted into visible light. This will be done by modulating the signal so that a light-emitting device, in this case a LED, generates a pulsed light signal for a short interval of time, at a given frequency. A quick and easy solution that can be used for controlling the LED consists of using a MOSFET transistor, providing the needed current to the emitting LED.

The RPi of the transmitter will be responsible for encoding the information generating values of 0 or 1 . Since you can only convert data to voltage, 0 will correspond to 0 V and 1 to 3.3 V . This voltage will output one of the selected pins on the RPi and will be connected to the transmitter circuit. That is why an element that can operate voltage will be needed. Due to this, it has been decided to use the component **BS270 MOSFET**, an N-channel MOSFET transistor very useful for low voltage and low current applications, designed to have a high-speed switching.

The LED used in this VLC prototype presented in this TFG was the model of **Broadcom HLMP-CB1B-XYODD**, with a viewing angle of 15° , a typical luminous intensity of 9.6 cd . It was chosen because the forward voltage ranges between 2.8 V and 3.8 V , and for its low cost.

The final design of the transmitter circuit, implemented on a test board, consists of the LED and MOSFET named before, and a current limiting resistor ($100\ \Omega$) to protect the LED. As is shown, the T_x solution chosen does not require complex LED driving circuitry.

The transmitter system was tested with an OOK modulation technique, since in VLC systems, LEDs and OOK are widely preferred due to its low energy consumptions. The transmitting RPi has three pins connected to this circuit, a pin that supplies 5 V , a ground pin, and pin number 11 (GPIO17), see Fig.A.3. The GPIO17 provides the voltage required to switch the MOSFET transistor

on or off, depending on whether the state is *high* or *low*. The bits generated by the software, due to the data you want to transmit, are sent via this pin, to be modulated in the circuit.

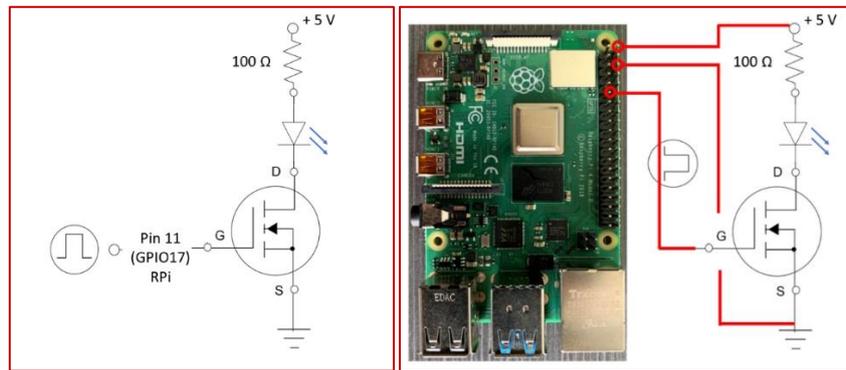


Fig. A.3. The 5V LED circuit using a MOSFET transistor

The receiver system will get the light transmitted by the LED and transform it back into the corresponding data. It will be composed of a photodiode, which will have the function of transforming the incident light into electric current. In addition, as the RPi can only process voltage, it will be required the use of a **TIA**, which will convert this current generated by the photodiode into voltage.

Two photodiodes were selected, **Osram SFH 206K** silicon PIN photodiode and **Vishay BPW21R** silicon photodiode, as both have a fast response time, a spectral sensitivity in the visible light spectrum and a low cost.

In addition, for this work, we have chosen the operational amplifier **MCP6022 Microchip**, whose typical application is for **TIA**. It has a gain bandwidth of 10 MHz and needs a power voltage of between 2.5 V and 5 V, values that can be provided by the RPi. Moreover, it affords a low noise level and low cost.

The final design of the receiver will consist of the selected photodiode, and operational amplifier, with a resistor and a capacitor in parallel. The values of the resistor and capacitor will be chosen looking for a balance between gain and good quality of the signal produced.

The receiving Raspberry Pi will have three pins connected to this circuit, a pin that offers 5 V, a ground pin, and pin number 13 (GPIO27), see Fig.A.4., by which the demodulated signal will have input for decoding by means of software.

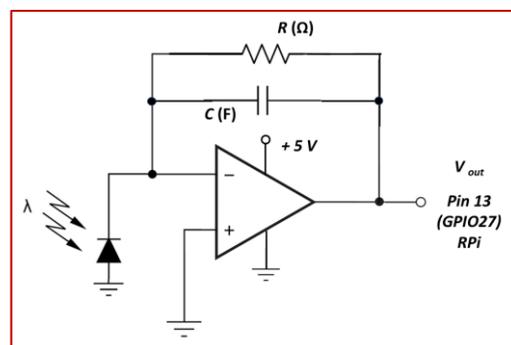


Fig. A.4. Transimpedance Amplifier circuit of the final R_x receiver design

A.2.2. Software Subsystem

The software subsystems consist of two programs, one for the transmitter and the other for the receiver, that will be executed on each of the two RPi used in this work. The programs have been made using **C programming language** with the help of the **Wiring Pi library** [43], an extensive GPIO control library for the RPi. C languages is selected over other such as JAVA or Python, because although its complexity is higher, the development of a low-cost communication system using RPi does not require an excessively high level of programming. In addition, it is the most powerful language of the three, which will help us to generate square signals at a high frequency. It should also be noted that it has libraries such as Wiring Pi created expressly for the use of RPi, which will help make the control of the GPIO pins easier, and it is recommended for fast-response of the pins and/or when fast GPIO switching is required [42].

The transmitting software will initialize and proceed to the configuration of the GPIO using the numbering provided by the Wiring Pi library. Subsequently, the text file that it wants to transmit is processed to obtain the text that forms it and encode it for sending. The transmission will begin with an initialization sequence that warns the receiver to prepare for the receipt of data and then the bytes corresponding to the characters will be sent one after the other (bit by bit). Each character will be sent three times in a row to increase the chance of a successful submission. This process is shown in the block diagram of Fig.A.5.

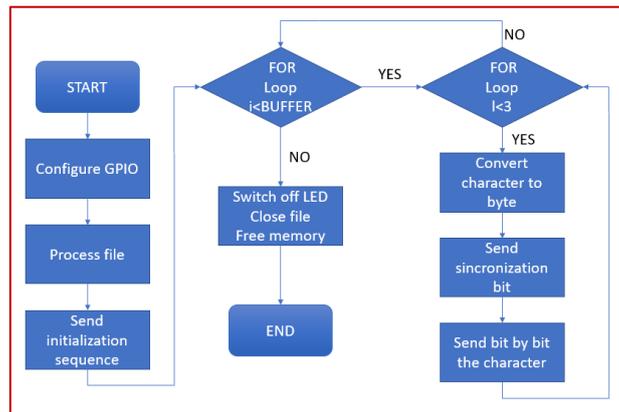


Fig. A.5. Block diagram of the software algorithm for the transmitter subsystem T_x

The receiving RPi software starts by initializing the receiver and configuring the GPIO with Wiring Pi. After that, it will wait until the initialization sequence is received. Once received, the 8-bit sequences corresponding to the characters sent will be read to decode them. Each character will be received 3 times to increase the chance of getting the right character and avoid mistakes that would prevent good communication. Finally, we proceed to enter these characters into a new text file. The process is shown in Fig.A.6.

A.3. Testing and validation

First, hardware testing was mainly performed to select the photodiode and combination of R_f and C_f that would provide better results, and for obtaining the optimal frequency (data rate) for the final prototype.

The **Osram SFH 206K** silicon PIN photodiode was tested with the values for R_f of 8.2 k Ω and 82 k Ω , and for C_f of 10 pF, 5 pF, 1 pF and 0.5 pF, while **Vishay BPW21R** silicon photodiode was tested with the values for R_f of 8.2 k Ω and 82 k Ω , and for C_f of 100 pF, 50 pF, 10 pF y 5 pF.

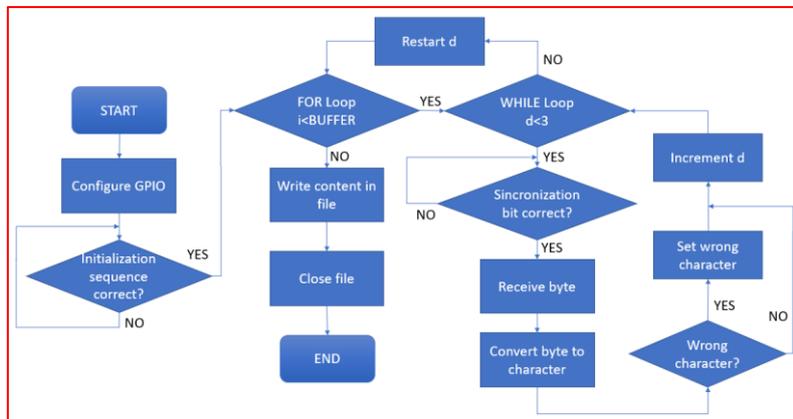


Fig. A.6. Block diagram of the software algorithm for the receiver subsystem R_x

The best result with the *Osram* photodiode was obtained with 8.2 k Ω and 10pF (see Fig.A.7.), while with the *Vishay* were obtained with 8.2 k Ω and 100 pF (see Fig.A.8.). Comparing both results, it was decided to use the **SFH 206K** silicon PIN photodiode. Both signals were relatively good and had very similar characteristics, so they were valid options, but this one was preferred as its cost was lower.

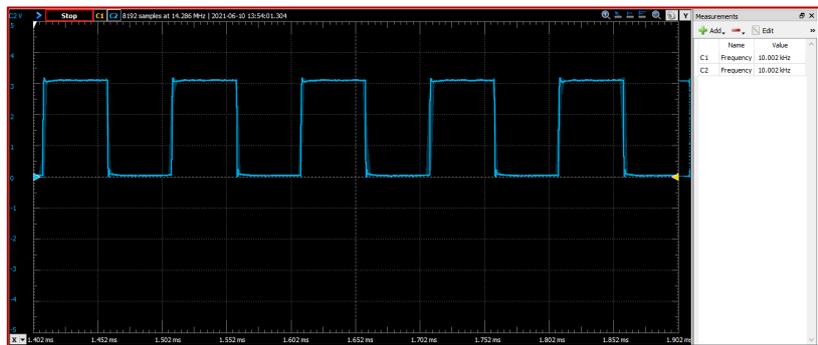


Fig. A.7. The TIA output amplified signal for the photodiode *SFH 206K*, $R_f = 8.2$ k Ω y $C_f = 10$ pF

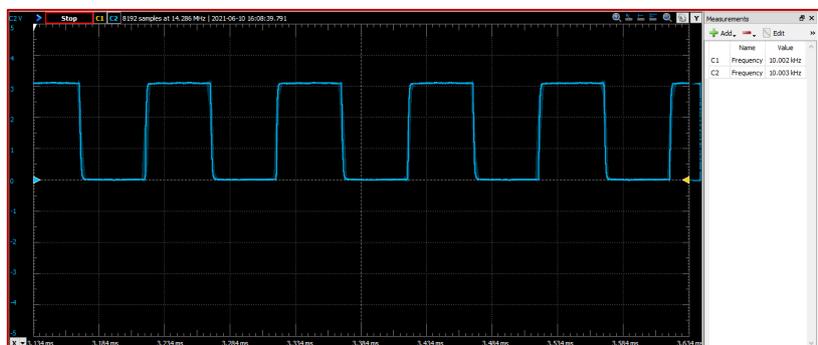


Fig. A.8. The TIA output amplified signal for the photodiode *BPW21R*, $R_f = 8.2$ k Ω y $C_f = 100$ pF

Moreover, the transmitter and receiver circuits were tested to select the **optimal frequency (data rate)** for the prototype. For the frequency of the low-cost VLC prototype, a frequency with a value of 20 kHz shall be used. It is a frequency in which both circuits, T_x and R_x , can work and

in which the signal obtained is considered as very good for the communication. Although higher frequencies are possible, this lower frequency was selected because, if the signal had any defects, it could lead to an increase in the number of bit errors, since synchronization is a key factor in this one-way visible light communication system for short distances, and in the presence of ambient light.

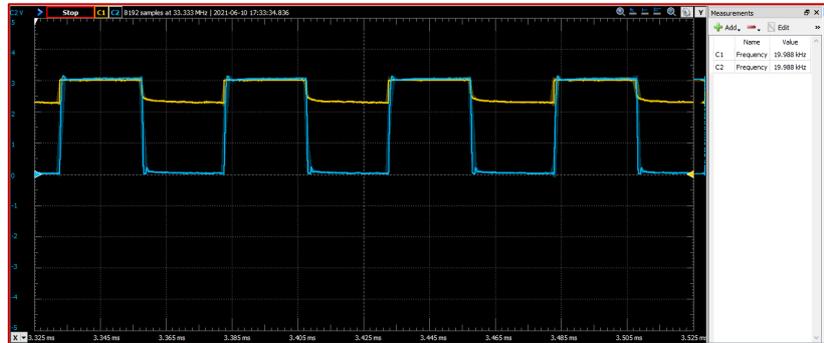


Fig. A.9. The TIA output amplified signal (blue) and LED (yellow) emitted signal at 20 kHz

Finally, after having the **prototype fully implemented**, tests were made to analyse the results obtained when performing the communication between transmitter (T_x) and receiver (R_x).

First, the hardware part of the prototype was studied to compare the incoming signal of the transmitting circuit and the output signal of the TIA. For this purpose, a simple square periodic signal of frequency 20 kHz was encoded in C programming language, to be emitted by the LED. Both signals turned out to be identical, as shown in Fig.A.10. so, the implemented circuits correctly perform their function by being able to **modulate** the **signal** in the **transmitting** circuit, receive it in the receiving circuit and **demodulate** it to **recover** it **correctly**.

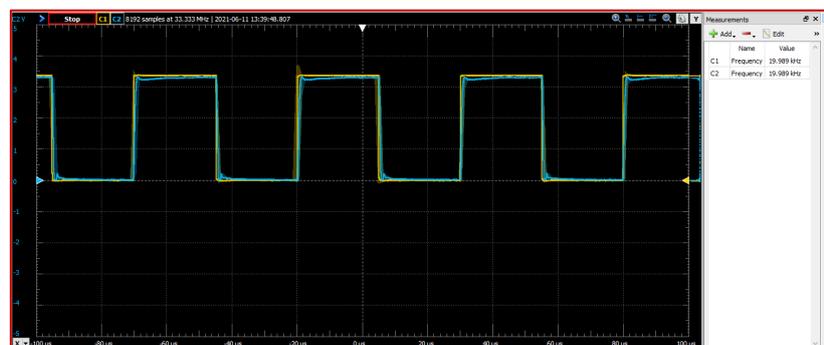


Fig. A.10. The Raspberry Pi Tx output signal (yellow) and output TIA signal (blue) at 20 kHz

Subsequently, tests were carried out with the full integration of the digital part of the prototype. To do this, **transmissions** of different **text files** were carried out. In the transmission of text files containing 1, 10 and 30 characters, they were obtained 0, 58 and 181 erroneous characters, respectively, from 50 submissions that were made from each of these files.

After the analysis of these results, it was appreciated that sending the text file with 1 single character is much more effective as there is no error in the transmission, while with a greater number of characters, the error increased. The probability of erroneous character obtained with

these tests was relatively similar in the sending of text files with 10 characters and 30 characters, about **12%** of erroneous characters (at a rate of **40 kbit/s**).

The operation of both the transmitting and receiving system software codes was checked and observed to correctly perform the encoding and decoding of the data. So, the appearance of erroneous characters is due to synchronization failures during communication.

A.4. Socio-economic environment

The work developed in this Bachelor's Degree Final Project (TFG) has had different costs for its elaboration, among which are the **costs of personal** and the costs of the materials, specifically the **cost of electronic components**, including the board Raspberry Pi, that is represented in TABLE A.2.

TABLE A.2. COSTS OF THE ELECTRONIC COMPONENTS OF THE VLC PROTOTYPE

Components	Price per unit (€)	Number of units	Total Price (€)
Jumper wires male-female	3,34	1	3,34
Transistor MOSFET BS270	0,24	1	0,24
Resistance 100 Ω	0,20	1	0,20
Blue LED Broadcom HLMP-CB1B-XY0DD	0,84	1	0,84
Photodiode PIN Osram Opto, SFH 206 K	1,56	1	1,56
Operational Amplifier MCP6022-E/P Microchip	0,92	1	0,92
Resistance 8.2 k Ω	0,20	1	0,20
Capacitor 10 pF	0,50	1	0,50
Raspberry Pi 4 Model B ³	61,61	2	123,22
Wire microHDMI to HDMI	5,53	1	5,53
Power supply	9,03	2	18,06
MicroSD Card	16,11	2	32,22
Protoboard	10,00	2	20,00
GOODS GRAND TOTAL:			206,83 €

The development and commercialization of low-cost visible light communications could have a great impact in various areas such as the economic, since it would mean a great decrease in the cost of some of the current wireless communications; the social, since they would allow a more secure connection in places such as industry, laboratories, hospitals and airplanes due to being free of electromagnetic interference; and for the environment, as it is considered a green technology and the electric components used in this low-cost VLC prototype follow the **RoHS** Directive of the European Union.

A.5. Conclusions and future works

It can be highlighted that, a low-cost VLC unidirectional system based on Raspberry Pi has been designed and implemented. This system is capable of sending and receiving data through visible light over short distances, that is, a one-way communication line between two Raspberry Pis. The system uses the C programming language for encoding and decoding the data. Hardware

³ Raspberry Pi 3 Model B can be obtained for around 39 €

Circuits are responsible for modulating and demodulating visible signals. In addition, this work has covered all the objectives mentioned in section A.1. of this Bachelor's Degree Final Project (TFG); the project was completed by achieving almost all the intended objectives.

Various tests have been performed to present the capabilities of the system. First, the input signals of the modulator circuit and output of the demodulator circuit were obtained. Both square signals had a very similar shape, so it could be concluded that the hardware part of the prototype had the expected behaviour. Finally, several submissions of text files were made modifying the number of characters inside, to analyse the behaviour of the complete prototype. The transmitter can be considered to send the data correctly, and the receiver interpreted it and generated a file with it again. This new text file does not always have the same content as the original, as some characters were wrong; it was concluded that this was due to failures in the synchronization between transmitter and receiver. Given the results, this aspect could be studied in greater depth to try to improve the performance of the designed prototype, addition to other research lines.

Fig.A.11., shows an image selected to help the reader to quickly gain a summary of this TFG and to ascertain the scope and results of this work.

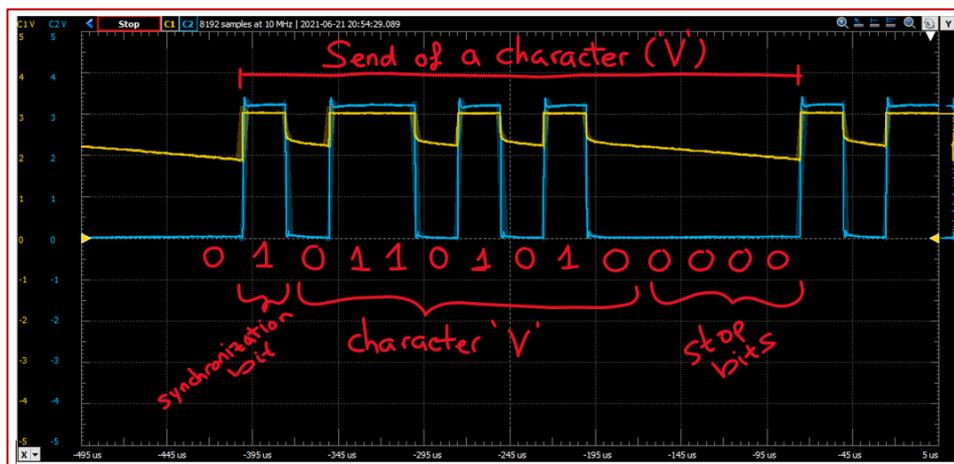
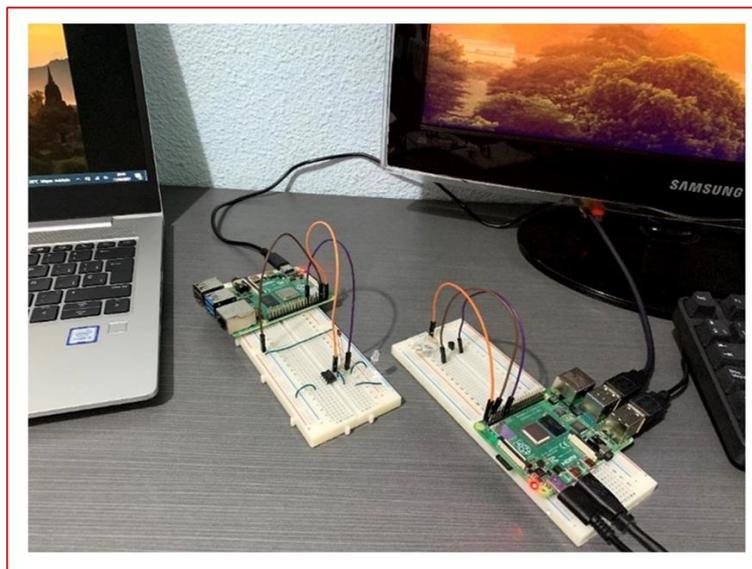


Fig. A.11. Graphical summary of the Bachelor's Degree Final Project (TFG)

ANEXO B - CONFIGURACIÓN DE LAS RASPBERRY PI

Una vez instalado el sistema operativo en la tarjeta microSD, sólo habrá que introducirla en la ranura para microSD que dispone la Raspberry Pi y continuar con la configuración de esta, ver por ejemplo la referencia [12].

Cabe destacar que, al disponer únicamente de un ordenador portátil, la configuración de las dos Raspberry Pi será diferente. Una de ellas se conectará al ordenador haciendo uso de una conexión remota, mientras que la otra estará conectada de forma física a los distintos periféricos (pantalla, teclado y ratón), desde donde será gobernada.

B.1. Raspberry Pi Transmisora

En este proyecto, la Raspberry Pi transmisora es la seleccionada para conectarse de forma directa, aunque esta elección es indiferente para el desarrollo de este trabajo.

La configuración es relativamente sencilla. Simplemente, habrá que conectar los diferentes periféricos, el teclado y ratón, y una pantalla para visualizar la Raspberry Pi, y realizar la configuración de inicio, en la que habrá que seleccionar un lugar, un idioma y la conexión WIFI, además, de establecer el usuario y contraseña del dispositivo.

B.2. Raspberry Pi Receptora

La configuración para la Raspberry Pi receptora será distinta, debido a que la usaremos a través de conexión remota.

Para su configuración realizamos los mismos pasos seguidos en la configuración de la Raspberry Pi transmisora. Tras ello, accederemos al '*Menú de Aplicaciones*' y seleccionaremos las '*Preferencias*', '*Configuración de Raspberry Pi*'. Una vez aquí, entraremos en '*Interfaces*' y activaremos la interfaz **VNC (Virtual Network Computing)**, tal como se muestra en la Fig.4.6. Esto va a permitir poder visualizar y controlar la Raspberry Pi desde un ordenador usando el programa **VNC Viewer**. Simplemente será necesario introducir la dirección IP, el usuario y contraseña de la Raspberry Pi receptora. En esta figura también se muestran otras opciones de comunicación con la Raspberry como **SSH (Secure SHell)**, **SPI (Serial Peripheral Interface)** o **I2C (Inter-Integrated Circuit)**.

Una acción importante que se puede realizar es establecer la dirección IP de la Raspberry Pi como estática para que la dirección no se modifique y no tengamos ningún problema al intentar acceder en otro momento a la Raspberry Pi. Para ello, se debe introducir en el terminal el comando Linux **sudo nano /etc/dhcpd.conf**. Esto hará que se nos muestre un archivo que deberemos modificar, quitando los símbolos de comentario, #, de las líneas situadas debajo del apartado **Example static IP configuration**, e introduciendo la dirección IP con la que queramos acceder, quedando como se muestra en la Fig.B.2.

Finalmente, solo habría que reiniciar la Raspberry Pi y ya se podría acceder desde el programa **VNC Viewer** a través de la dirección IP que se escribió en el archivo anterior, como se muestra en la Fig.B.3.

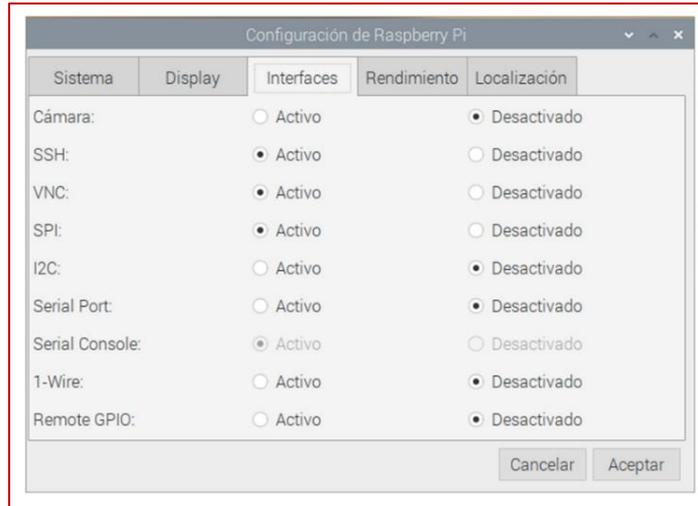


Fig. B.1. Pantalla de configuración para activar el interfaz VNC

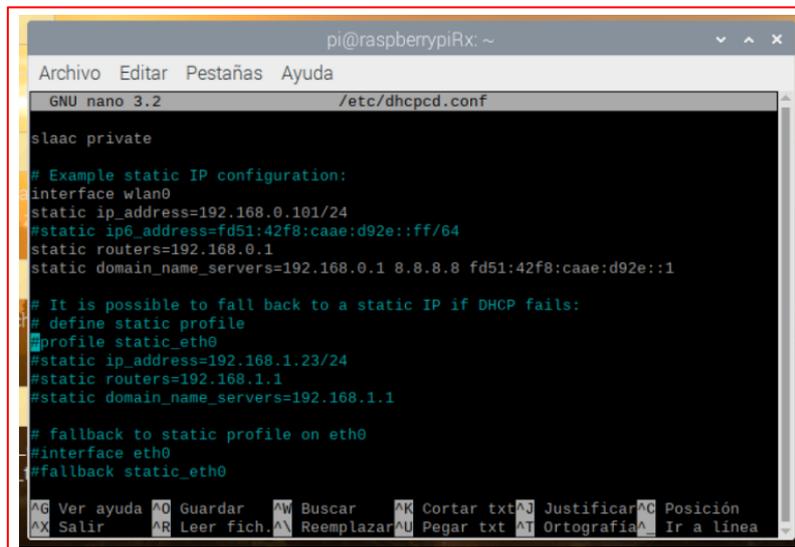


Fig. B.2. Archivo modificado para establecer la dirección IP estática de la Raspberry Pi R_x

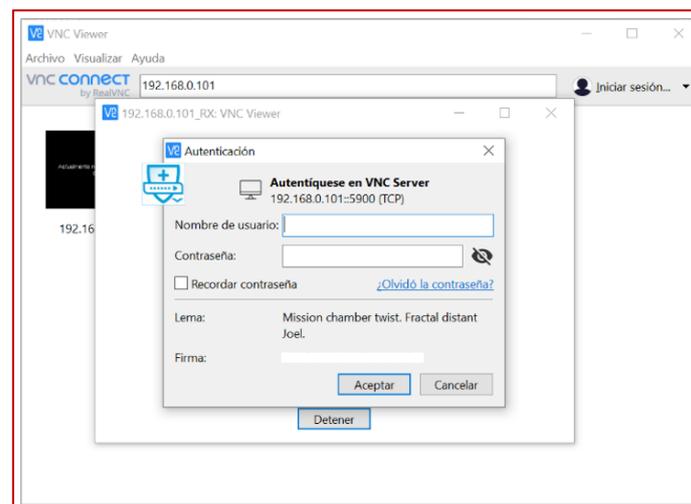


Fig. B.3. Pantalla de acceso a la Raspberry Pi receptora a través de VNC Viewer

