



Prototipo de sistema de comunicación con luz visible usando PAM y receptor basado en fotodiodo PIN

**Cristian Sebastián Giraldo González
Bryan Giovanni Urquijo Zapata**

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica
Villavicencio, Colombia

2021

Prototipo de sistemas de comunicación con luz visible usando PAM y receptor basado en fotodiodo PIN

**Cristian Sebastián Giraldo González
Bryan Giovanni Urquijo Zapata**

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Electrónico

Director (a):

Javier Fernando Castaño, Ing, PhD

Línea de Investigación:

Diseño de sistemas electrónicos

Grupo de Investigación:

Semillero de investigación en tecnologías analógicas y digitales (SITAD)

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Villavicencio, Colombia

2021

El futuro mostrará los resultados y juzgará a cada uno de acuerdo con sus logros.

Nikola Tesla

Agradecimientos

Primero que todo agradecemos a nuestras familias, por todo el apoyo brindado durante este largo camino, por el ánimo prestado y por siempre creer en nosotros. También agradecemos a nuestro director de proyecto, el ingeniero Javier Fernando Castaño PhD, ya que gracias a su constante colaboración logramos llevar a cabo el desarrollo de nuestro trabajo de grado. También un agradecimiento especial a los docentes de la facultad de ingeniería mecánica, electrónica y biomédica (FIMEB) sede Villavicencio, por su compromiso para enseñarnos durante toda la carrera. Por ultimo y no menos importante un agradecimiento a todas las personas que de una manera u otra estuvieron detrás apoyándonos y aconsejándonos en cada momento.

Resumen

En la actualidad la tecnología WiFi es utilizada a nivel mundial para comunicación inalámbrica. A pesar de su amplio uso el WiFi tiene algunas condiciones que se pretenden mejorar, como seguridad, interferencias con otras señales de radiofrecuencias (RF) y ancho de banda. Recientemente, la comunicación con luz visible (VLC, Visible Light Communication) se ha constituido en una alternativa frente a WiFi. Este trabajo aborda la implementación de sistema de comunicación con luz visible, usando modulación de amplitud de pulso (PAM, pulse-amplitude modulation) y un receptor basado en fotodiodo PIN, como dispositivo para interfaz de datos un *Microcontrolador de 32 bits* y en conjunto con una interfaz gráfica del software HTerm. Se plantea implementar un prototipo funcional que transmita y reciba información modulada/demodulada usando PAM mediante un fotodiodo PIN, que alcance tasas de transferencias en el orden de Kbps.

Palabras clave: comunicación con luz visible, PAM, fotodiodo PIN, microcontrolador de 32 bits

Abstract

Currently, WiFi technology is used worldwide for wireless communication. Despite its wide use, WiFi has some conditions that are intended to improve, such as security, interference with other radio frequency (RF) signals and bandwidth. Recently, Visible Light Communication (VLC) has become an alternative to WiFi. This work addresses the implementation of a communication system with visible light, using pulse-amplitude modulation (PAM) and a PIN photodiode-based receiver, as a device for data interface a 32-bit microcontroller and in conjunction with a graphical interface of HTerm software. It is proposed to implement a functional prototype that transmits and receives modulated / demodulated information using OFDM through a PIN photodiode, which achieves transfer rates in the order of Kbps.

Keywords: Visible light communication, PAM, PIN photodiode, 32-bits microcontroller

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Lista de figuras	XIII
Lista de tablas	XV
Introducción	1
1. Marco teórico	5
1.1 VLC.....	5
1.1.1 Características de VLC.....	6
1.2 Fotodiodo PIN.....	6
1.2.1 Especificaciones y características del Fotodiodo PIN	7
1.3 Microcontrolador 32 bits	8
1.3.1 Especificaciones y características del microcontrolador.....	9
1.4 Comunicación Serial UART	10
1.5 Conversor USB-UART	11
1.5.1 Especificaciones y características del conversor USB-UART	11
1.6 Modulación PAM	13
1.7 Conversor análogo-digital (ADC).....	13
1.8 Conversor digital-análogo (DAC).....	13
1.9 HTerm.....	14
1.9.1 Características:.....	14
1.10 Longitud de onda	15
1.11 Matlab	15
2. Metodología	18
2.1 Diseño e implementación de la estructura física del setup experimental	18
2.2 Implementación de la estructura física	19
2.3 Caracterización de los componentes.....	20
2.3.1 Transmisor.....	20
2.4 Receptor	22
2.5 Desarrollo del software para el microcontrolador.....	23
2.6 DAC (Conversor digital análogo)	24
2.7 ADC (Conversor análogo-digital).....	25
2.8 Interfaz UART con el software HTerm	25
2.9 Comunicación vía Matlab	26

3. Resultados	29
3.1 Setup experimental	29
3.2 Caracterización de los componentes electrónicos.....	30
3.2.1 Transmisor	30
3.2.2 Receptor.....	32
3.3 Adecuación del ADC.....	36
3.4 Modulación/demodulación PAM.....	37
3.5 Comunicación PAM	38
4. Conclusiones y recomendaciones	42
4.1 Conclusiones	42
4.2 Recomendaciones	43
Bibliografía	54

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Espectro de frecuencia de VLC	5
Figura 1-2: Configuración de pines	9
Figura 1-3: Conversor USB-UART.....	12
Figura 1-4: Producto de una señal portadora con una señal de mensaje mediante PAM	13
Figura 1-5: Interfaz HTerm	14
Figura 1-6: Forma de la longitud de onda.....	15
Figura 1-7: Interfaz de Matlab.....	16
Figura 2-1: Setup de la estructura	19
Figura 2-2: Estructura física de la caja negra.....	20
Figura 2-3: Circuito LED	21
Figura 2-4: Circuito receptor.....	23
Figura 2-5: Creación de la cuenta.....	24
Figura 2-6: Instalación del controlador del UART	25
Figura 2-7: Interfaz HTerm	26
Figura 3-1: Estructura del setup	29
Figura 3-2: Sensibilidad espectral relativa Vs Longitud de Onda.....	33
Figura 3-3: Montaje total del prototipo	38
Figura 3-4: Protocolo de comunicación basado en PAM.....	39
Figura 3-5: Envío de datos Matlab.....	40
Figura 3-6: Transmisión de un carácter ASCII y recepción en HTerm	41

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1: Parámetros máximos del fotodiodo PIN	7
Tabla 1-2: Características básicas	8
Tabla 1-3: Características del Mbed	10
Tabla 1-4: Características del conversor.....	11
Tabla 1-5: Pinouts (Pines de salida)	12
Tabla 2-1: Elementos que componen el setup experimental	18
Tabla 2-2: Valor de tensión dependiendo el color	21
Tabla 3-1: Caracterización LED rojo	31
Tabla 3-2: Valor de cada nivel	32
Tabla 3-3: Valor de cada grupo de Bits.....	32
Tabla 3-4: Promedio de tensión con LED azul	33
Tabla 3-5: Promedio de tensión con LED verde.....	34
Tabla 3-6: Promedio de tensión con LED blanco	35
Tabla 3-7: Promedio de tensión con LED rojo.....	35

Introducción

La comunicación con luz visible es una tecnología emergente basada en radiación electromagnética en el rango visible, que se vislumbra como una alternativa para los sistemas actuales de comunicación inalámbrica como WiFi y radiofrecuencia (RF). (Lorenzo, 2016)

VLC está en desarrollo y se constituye como una alternativa a Wifi; en todo sistema de comunicación inalámbrico un requerimiento importante es el ancho de banda, los usuarios demandan el mayor ancho de banda posible y adicionalmente, como es una técnica inalámbrica se hace un poco más difícil el acceso múltiple, el cual se constituye en otro requerimiento que debe ser cumplido.

VLC está en avance y necesita técnicas eficientes para aumentar el ancho de banda y garantizar el acceso a múltiples usuarios en tiempo razonable, con implementaciones técnicas que no sean muy costosas computacionalmente y que puedan a su vez ser implementadas teniendo en cuenta las características y limitaciones de fotodiodos y LEDs y el hecho mismo de comunicarse usando luz visible.

El presente proyecto está enfocado en implementar un sistema de transmisión y recepción óptica inalámbrica, con un receptor basado en fotodiodo PIN y un transmisor basado en LED. Este sistema servirá como base para experimentar la funcionalidad de la modulación PAM y su aplicación en comunicación con luz visible. Esta tecnología tiene numerosas ventajas con respecto a WiFi.

PAM es una técnica que ya ha sido ampliamente usada, la idea es implementar PAM en el escenario de VLC para brindar una alternativa funcional al WiFi, ya que se trata de una tecnología emergente que requiere la implementación de tecnologías de base.

PAM se constituye en una opción porque es usado en algunos sistemas de comunicación inalámbrica, se puede tomar como base las implementaciones actuales, pero las condiciones técnicas son muy diferentes por tratarse de luz visible y de dispositivos no lineales como fotodiodos PIN y LEDs.

VLC está demostrando ser una técnica eficiente comparada con WiFi y es importante tener técnicas que permitan acceso a múltiples usuarios, porque esto implica por ejemplo tener un sistema de iluminación y transmisión simultánea y a su vez optimizar la comunicación en los dispositivos involucrados. Contando con este tipo de transmisión se puede explotar el potencial que tiene VLC de iluminación y transmisión en doble propósito. Explorar los requerimientos de PAM para poder ser implementados en el escenario de VLC es muy importante para tener dicha técnica optimizada en este nuevo escenario. (Xataca, 2013)

Las comunicaciones por radiofrecuencia explotan la región del espectro electromagnético que abarca de 3 kHz a 300 GHz. Sin embargo, VLC trabaja en el rango de 400 a 800 THz.

Este rango de frecuencia implica de manera inherente un menor requerimiento de potencia de emisión, pero a la vez un corto alcance, esto unido a una técnica de modulación eficiente permite tener un sistema de comunicación para espacios cerrados, de baja potencia y alta tasa de transferencia, con capacidad de acceso a múltiples usuarios. (Lorenzo, 2016)

En el capítulo 1 se hace referencia a todos los elementos y técnicas utilizadas en el proyecto, explicando sus características y especificaciones; en el capítulo 2 se explica el desarrollo del proyecto y como se llevó a cabo cada una de las decisiones tomadas; en el capítulo 3 se describen los resultados que se obtuvieron en los capítulos anteriores a través de los métodos usados, consiguiendo el cumplimiento total del proyecto. Finalmente, en el capítulo 4 se indican las conclusiones obtenidas durante el desarrollo del proyecto y recomendaciones para futuros trabajos. Al final de este documento se encuentran los anexos como información adicional.

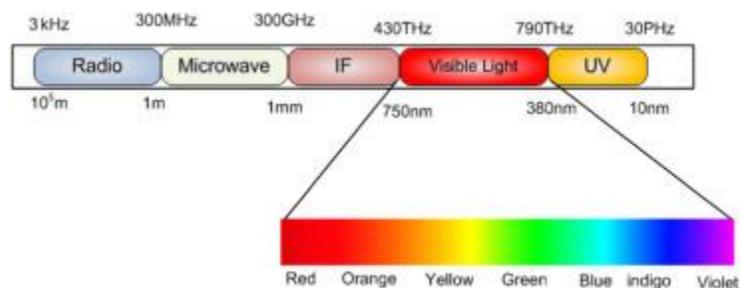
1. Marco teórico

1.1 VLC

La comunicación con luz visible (VLC) es un método inalámbrico que permite la transmisión de datos a alta velocidad con luz visible. Estos datos se transmiten modulando la intensidad de la luz emitida por una fuente de luz. La señal es recibida por un dispositivo fotodiodo que transforma los datos en formas que los usuarios finales pueden leer y consumir fácilmente. (Khan, 2016)

VLC es un método inalámbrico que posibilita la transferencia de datos a altas velocidades mediante la luz visible. Dichos datos se transfieren modulando la intensidad de la luz despedidos por una fuente de luz. El receptor de esta señal es un dispositivo fotodiodo que convierte los datos a una manera que los usuarios puedan comprender fácilmente. El problema de bajo ancho de banda en la comunicación de RF se resuelve en VLC debido a la disponibilidad del gran ancho de banda como se ilustra en la Figura 1-1.

Figura 1-1: Espectro de frecuencia de VLC



Nombre de la fuente:(Khan, 2016)

1.1.1 Características de VLC

Algunas características son únicas del VLC. Estas características son:

- **Confinamiento de señales**

La principal propiedad de la luz es que no puede traspasar paredes u objetos sólidos. Esto facilita el confinamiento de la señal dentro de un solo lugar o área, lo que incrementa el nivel de complejidad de la red. (Khan, 2016)

- **No tiene línea de visión**

Muchos piensan que como los sistemas VLC necesariamente utilizan luz, cualquier tipo de obstáculo es necesario para obstruir seriamente su facultad para comunicación de datos. Este no es el caso ciertamente, ya que la línea de visión no es un problema. En realidad, hay estudios que han demostrado que su funcionamiento no se limita en habitaciones que están severamente obstruidas. (Khan, 2016)

- **Es seguro en entornos vulnerables**

La comunicación por luz visible puede ser usada como una útil alternativa para lugares donde las señales de RF se perciben como un peligro. Además del uso de esta tecnología sin RF para proveer datos, la fuente de luz utilizada en estos sistemas emite energías muy bajas, lo cual garantiza un uso totalmente seguro. Estos sitios "peligrosos" incluyen hospitales, aviones, minas o con cierto tipo de máquinas. (Khan, 2016)

1.2 Fotodiodo PIN

Un fotodiodo es un semiconductor construido con una unión PN, sensible a la incidencia de la luz visible o infrarroja. Para que su funcionamiento sea correcto se polariza inversamente y cuando es iluminado en ausencia de una fuente exterior de energía generan una corriente muy pequeña con el positivo en el ánodo y el negativo en el cátodo (VISHAY, 2014).

El TEFD4300 es un fotodiodo PIN de silicio con alta radiación sensibilidad en paquete de plástico transparente T-1. Es sensible a radiación visible e infrarroja cercana (VISHAY, 2014).

1.2.1 Especificaciones y características del Fotodiodo PIN

Los fotodiodos poseen rangos, especificaciones y características idóneas para la construcción de parámetros de calibración (Tabla 1-1).

Tabla 1-1: Parámetros máximos del fotodiodo PIN

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS ($T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, unless otherwise specified)				
PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	VALUE	UNIT
Reverse voltage		V_R	60	V
Power dissipation	$T_{amb} \delta 25\text{ }^{\circ}\text{C}$	P_V	215	mW
Junction temperature		T_j	100	$^{\circ}\text{C}$
Operating temperature range		T_{amb}	-40 to +100	$^{\circ}\text{C}$
Storage temperature range		T_{stg}	-40 to +100	$^{\circ}\text{C}$
Soldering temperature	$t \delta 3\text{ s}$, 2 mm from case	T_{sd}	260	$^{\circ}\text{C}$
Thermal resistance junction/ambient	Connected with Cu wire, 0.14 mm ²	R_{thJA}	450	K/W

Nombre de la fuente: (VISHAY, 2014)

Recuperado 21 de abril del 2021 <https://www.vishay.com/docs/83471/tefd4300.pdf>

Además, es necesario saber las características básicas de fabricante que será útil al momento de realizar la implementación y suministrar tensión.

Tabla 1-2 Características básicas

BASIC CHARACTERISTICS ($T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, unless otherwise specified)						
PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	MIN	TYP	MAX	UNIT
Forward voltage	$I_F = 50\text{ mA}$	V_F		1		V
Breakdown voltage	$I_R = 100\text{ }\mu\text{A}, E = 0$	$V(BR)$	60			V
Reverse dark current	$V_R = 10\text{ V}, E = 0$	I_{ro}		0.15	3	nA
Open circuit voltage	$E_e = 1\text{ mW/cm}^2, \lambda = 950\text{ nm}$	V_{OC}		350		mV
Temperature coefficient of V_O	$E_e = 1\text{ mW/cm}^2, \lambda = 950\text{ nm}$	$^{TK}V_O$		-2.6		mV/K
Short circuit current	$E_e = 1\text{ mW/cm}^2, \lambda = 950\text{ nm}$	I_k		15		μA
Temperature coefficient of I_k	$E_e = 1\text{ mW/cm}^2, \lambda = 950\text{ nm}$	$^{TK}I_k$		0.1		%/K
Reverse light current	$E_e = 1\text{ mW/cm}^2, \lambda = 950\text{ nm}, V_R = 5\text{ V}$	I_{ra}	9	17	27	μA
Angle of half sensitivity		ϕ		± 20		deg
Wavelength of peak sensitivity		λ_p		950		nm
Range of spectral bandwidth		$\lambda_{0.1}$	350		1120	nm
Rise time	$V_R = 10\text{ V}, R_L = 1\text{ k}\Omega, \lambda = 820\text{ nm}$	t_r		100		ns
Fall time	$V_R = 10\text{ V}, R_L = 1\text{ k}\Omega, \lambda = 820\text{ nm}$	t_f		100		ns
Diode capacitance	$V_R = 0\text{ V}, f = 1\text{ MHz}, E = 0$	C_D		3.3		pF
	$V_R = 5\text{ V}, f = 1\text{ MHz}, E = 0$	C_D		1.2		pF

Nombre de la fuente: (VISHAY, 2014)

Recuperado 21 de abril del 2021 <https://www.vishay.com/docs/83471/tefd4300.pdf>

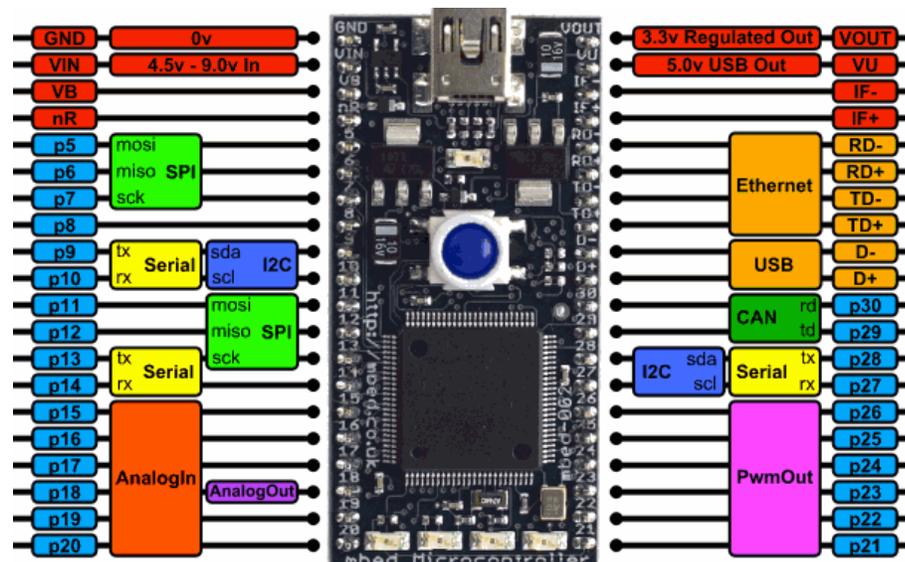
1.3 Microcontrolador 32 bits

Los microcontroladores Mbed son una serie de placas de desarrollo de microcontroladores ARM diseñadas para la creación rápida de prototipos (ARM, 2018).

El Mbed LPC1768 es un microcontrolador que está particularmente diseñado para la creación de prototipos de todo tipo de dispositivos, en especial aquellos que incluyen Ethernet, USB y la flexibilidad de muchas interfaces periféricas y memoria FLASH. Está montado como un pequeño factor de forma DIP para la creación de prototipos con PCB de orificios pasantes, placa de separación y placa de pruebas, e incluye un programador USB FLASH incorporado (arm, 2018).

1.3.1 Especificaciones y características del microcontrolador

Figura 1-2 Configuración de pines



Nombre de la fuente: (arm, 2018)

Recuperado 21 de abril del 2021 <https://os.mbed.com/platforms/mbed-LPC1768/>

El dispositivo presenta unas características esenciales, las cuales componen internamente el hardware, las características serán necesarias para realizar las conexiones, además de programación en la caracterización del dispositivo (Tabla 1-3).

Tabla 1-3: Características del Mbed

Núcleo ARM Cortex-M3	Operación de 100 MHz
	Controlador de interrupción vectorizado anidado para interrupciones deterministas rápidas
	Wakeup Interrupt Controller permite la activación automática de cualquier interrupción prioritaria
	Unidad de protección de la memoria
Memories	Cuatro modos de potencia reducida: sueño, sueño profundo, apagado y apagado profundo
	512 KB de memoria Flash
Serial peripherals	64 KB de SRAM
	MAC Ethernet 10/100
	Dispositivo usb 2.0 de velocidad completa / host / otg controlador con PHY en chip
	Cuatro UARTs con generación fraccionaria de velocidad en baudios, RS-48, control de módem e IrDA
	Dos controladores CAN 2.0B
	Tres controladores SSP/SPI
	Tres interfaces de bus Cde 2I con una compatible con Fast Mode Plus (velocidades de datos de 1 Mbit/s)
Periféricos analógicos	Interfaz I2S para audio digital
	ADC de 12 bits con ocho canales
Other peripherals	DAC de 10 bits
	Ultrabajos (< 1 uA)RTC
	Controlador DMA de uso general con ocho canales
	Hasta 70 GPIO
	Control del motor PWM y Quadrature Encoder Interface para soportar motores trifásicos
Package	Cuatro temporizadores/contadores de propósito general de 32 bits
	LQFP de 100 pines (14 x 14 x 1,4 mm)

Nombre de la fuente: (arm, 2018)

Recuperado 21 de abril del 2021

1.4 Comunicación Serial UART

La comunicación serie consiste en el envío de bits de información de manera secuencial a través de una única línea. Este tipo de comunicación difiere completamente de la comunicación en paralelo que consiste en enviar simultáneamente un conjunto de datos a través de varias líneas. (Borja)

1.5 Conversor USB-UART

El chip CP2102 de SiLabs es un dispositivo de interfaz común de puente USB a UART de un solo chip. Requiere componentes externos mínimos. CP2102 se puede utilizar para migrar dispositivos basados en puertos serie heredados a USB. (Silicon Labs, 2017)

1.5.1 Especificaciones y características del conversor USB-UART

El conversor USB-UART expone una serie de características respecto a su hardware (Tabla 1-4).

Tabla 1-4: Características del conversor

CARACTERISTICAS
Conjunto de chips CP2102 estable y confiable.
Especificación USB 2.0 compatible con 12 Mbps de velocidad completa.
Conector estándar USB tipo A macho y TTL de 6 pines.
6 pines para 3.3V, RST, TXD, RXD, GND y 5V.
Todas las señales de la interfaz del módem y del protocolo de enlace.
Tasas de baudios: 300 bps a 1,5 Mbps.
Búfer de recepción de bytes; Búfer de transmisión de 640 bytes.
Compatible con hardware o protocolo de enlace X-On / X-Off.
Soporte de carácter de evento Transmisión de salto de línea.
Estados de suspensión USB admitidos a través de pines SUSPEND.
Rango de temperatura: -40 a +85.
Tamaño: 42 mm x 15 mm.
Peso: 4g

Nombre de la fuente: (SUNROM)

Modificado 21 de abril del 2021 <https://www.sunrom.com/p/cp2102-usb-ttl-uart-module>

Este módulo tiene una ruptura de 6 pines encargados de administrarse entre salidas y entradas (Tabla 1-5).

Tabla 1-5: Pinouts (Pines de salida)

TXD	Salida de transmisión: se conecta al pin de recepción (RXD) del microcontrolador. Este pin es el pin TX de CP2102 a bordo.
RXD	Entrada de recepción: se conecta al pin de transmisión (TXD) del microcontrolador. Este pin es el pin RX de CP2102 a bordo.
GND	Debería ser común a la tierra del microcontrolador.
3V3	Salida opcional para alimentar circuito externo hasta 50mA.
5V	Salida opcional para alimentar circuito externo hasta 500mA
DTR / RST	Pin de salida opcional para reiniciar microcontroladores externos como Arduino.

Nombre de la fuente: (SUNROM)

Modificado 21 de abril del 2021

En la Figura 1-3 se muestra el dispositivo conversor UART encargado de comunicar el pc con el microcontrolador Mbed.

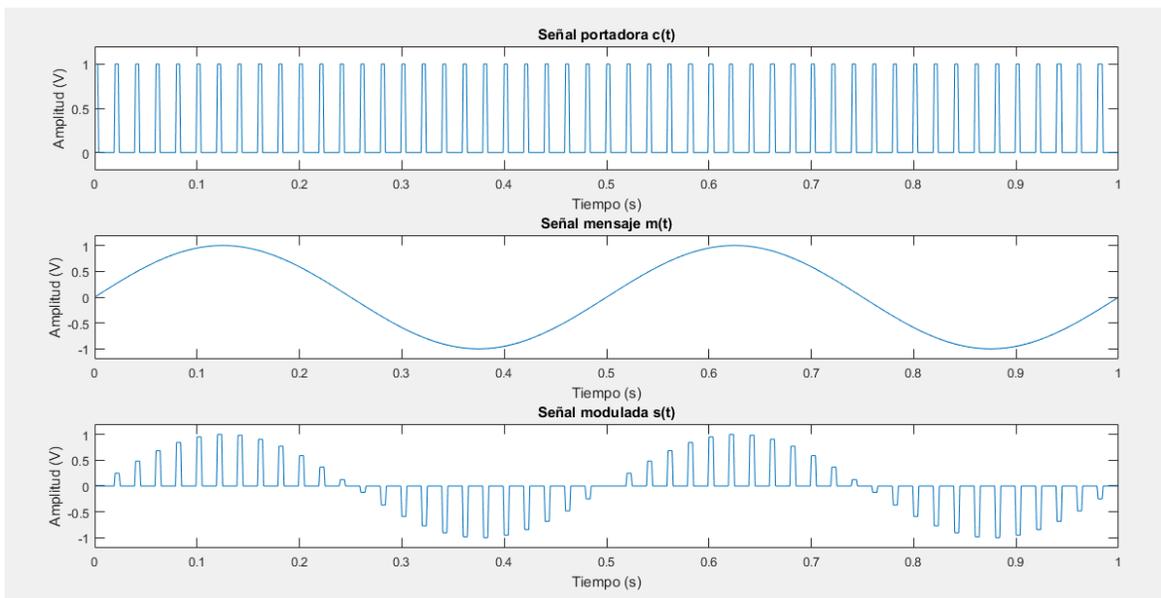
Figura 1-3: Conversor USB-UART

Nombre de la fuente: imagen propia

1.6 Modulación PAM

La modulación por amplitud de pulsos (PAM) es una técnica en la cual consiste en cambiar la amplitud de la señal trabajando a una frecuencia constante en función a lo que se quiera transmitir. En este tipo de modulación es constante el ancho y la separación de los pulsos. (Rodríguez, 2019)

Figura 1-4: Producto de una señal portadora con una señal de mensaje mediante PAM



Nombre de la fuente: (Medium, 2019)

1.7 Conversor análogo-digital (ADC)

Un ADC por sus siglas en inglés “analog to digital converter” o conversor analógico a digital, es un sistema el cual convierte señales continuas a datos binarios (1 y 0). Estos datos son adquiridos de la toma de muestras de una señal analógica como lo son las señales de voltaje y corriente a esto también se le conoce como discretizar una señal. (Electronicworld, 2020)

1.8 Conversor digital-análogo (DAC)

Un conversor digital a analógico o DAC es un dispositivo que convierte los datos de señales binarias a señales analógicas o señales en tiempo continuo ya sea de corriente o

voltaje, existen diferentes componentes que pueden realizar este proceso como los son de arreglos de resistencias, circuitos con amplificadores operacionales, resistencias y capacitores, resistencias y amplificadores, convertidores de circuito integrado DAC que a menudo se utilizan en los controladores y microcontroladores. (Electronicworld, 2020)

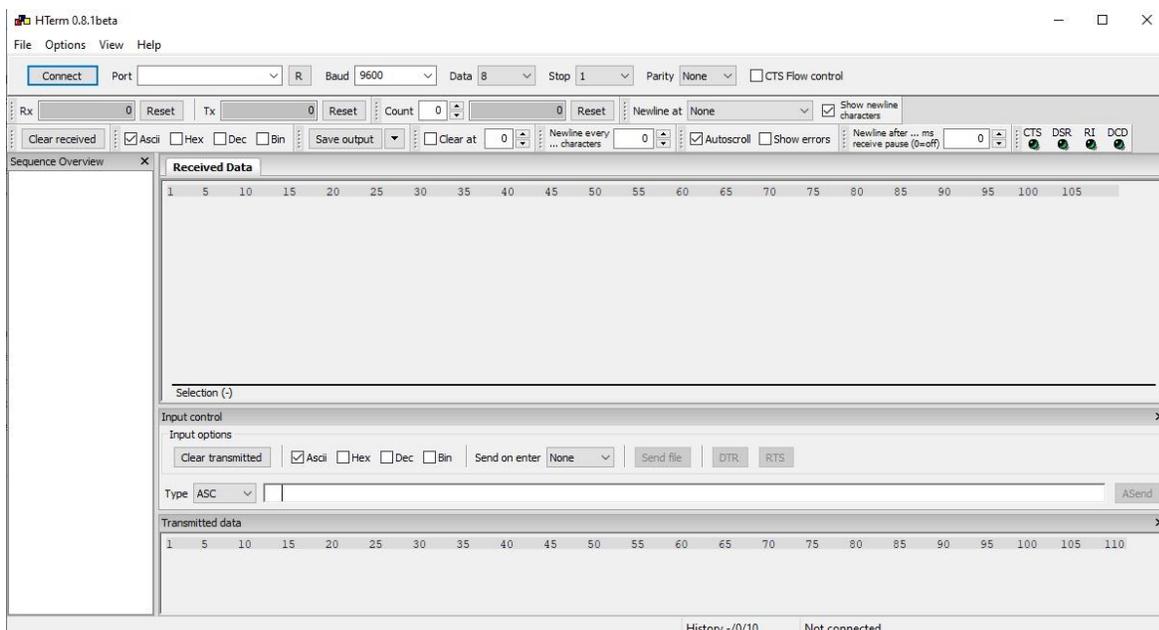
1.9 HTerm

Es un programa de terminal para comunicaciones en serie que se ejecuta en Windows y Linux. (der-hammer, 2020)

1.9.1 Características:

- Admite todo el hardware disponible y los puertos USB serie rs232 virtuales
- Admite todas las velocidades en baudios proporcionadas por el puerto
- Entrada y salida en ASCII, hexadecimal, binario y decimal
- Envío y recepción de archivos
- Paridad y control de flujo
- Personalización mediante archivo de configuración XML (der-hammer, 2020)

Figura 1-5: Interfaz HTerm



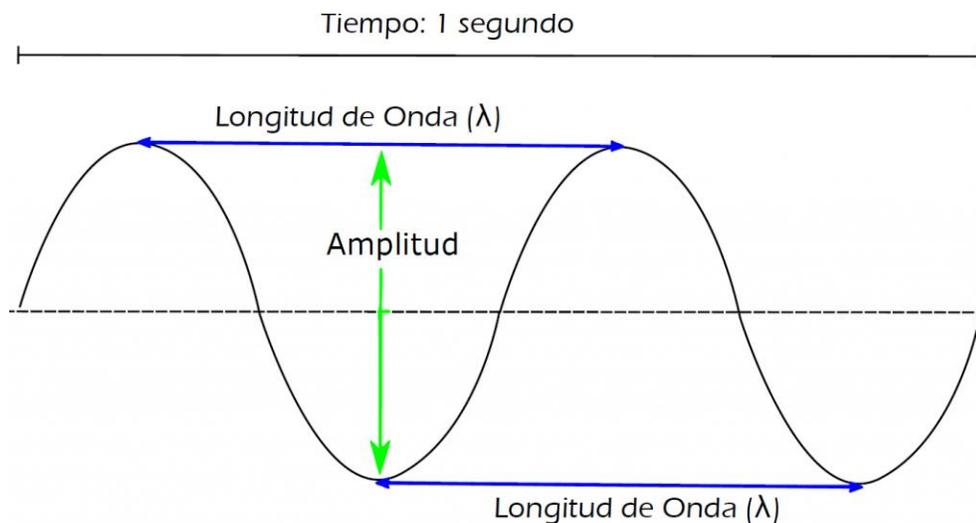
Nombre de la fuente: Imagen propia

1.10 Longitud de onda

Es la distancia mínima entre dos puntos de la onda que se encuentran en el mismo estado de vibración, esto ocurre, por ejemplo, entre dos crestas consecutivas o dos valles sucesivos. La longitud de onda es representada por la letra griega λ (lambda) y es medida en metros (m). La frecuencia se representa con la letra f , y es el número de vibraciones que se producen en una unidad de tiempo. Es decir, cuántas crestas o valles se repiten en una unidad de tiempo. Si la unidad de tiempo es un segundo entonces la frecuencia se mide en Hertz (Hz) (ESOPO, s.f.).

La longitud de onda (λ) y la frecuencia (f) son dos parámetros inversamente proporcionales y relacionados mediante la velocidad de propagación (ESOPO, s.f.).

Figura 1-6: Forma de la longitud de onda



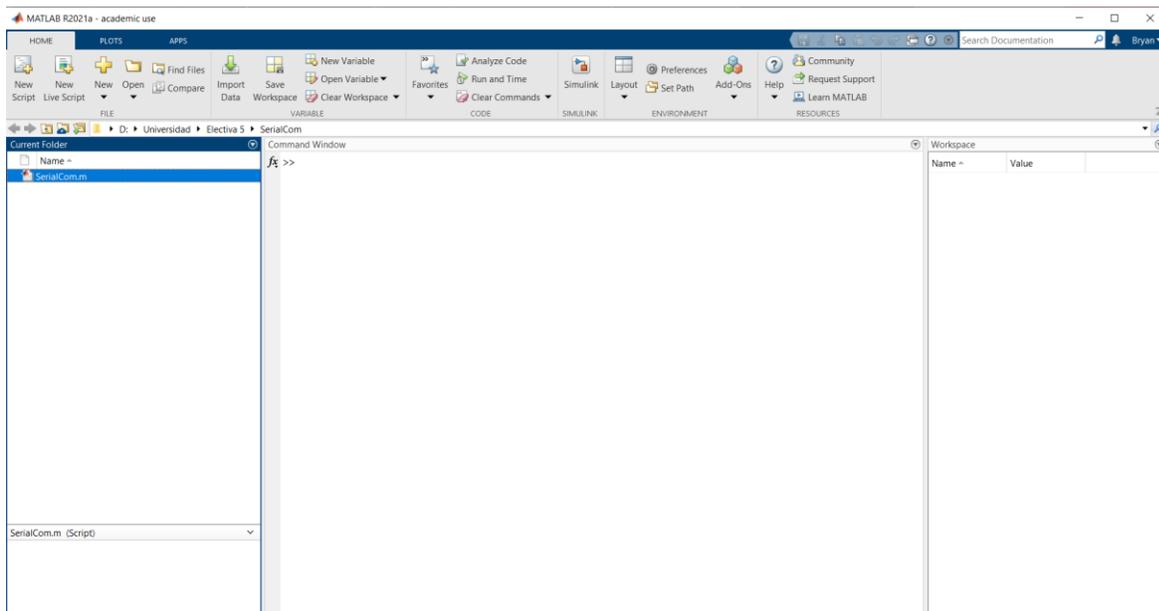
Nombre de la fuente: (ESOPO, s.f)

1.11 Matlab

MATLAB es una plataforma de programación y cálculo numérico utilizada por millones de ingenieros y científicos para analizar datos, desarrollar algoritmos y crear modelos. Entre sus prestaciones básicas se hallan la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y

la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos *hardware*. El paquete MATLAB dispone de dos herramientas adicionales que expanden sus prestaciones, a saber, Simulink (plataforma de simulación multidominio) y GUIDE (editor de interfaces de usuario - GUI). Además, se pueden ampliar las capacidades de MATLAB con las *cajas de herramientas (toolboxes)*; y las de Simulink con los *paquetes de bloques (blocksets)*.

Figura 1-7: Interfaz de Matlab



Nombre de la fuente: Imagen propia

2. Metodología

2.1 Diseño e implementación de la estructura física del setup experimental

La estructura fue diseñada pensando en aislar la luz del transmisor con la luz exterior para no provocar interferencias en la recepción de datos del fotodiodo PIN.

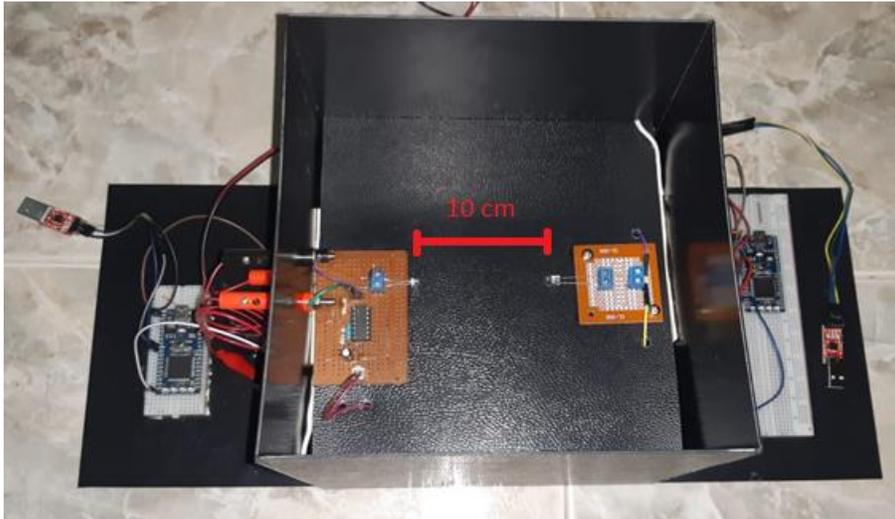
Los elementos materiales y componentes usados en el diseño e implementación del setup experimental se indican a continuación (Tabla 2-1).

Tabla 2-1: Elementos que componen el setup experimental

Caja negra de 20 cm x 20 cm, Aletas de 20 cm x 15 cm
Transmisor (Led convencional)
Receptor (Fotodiodo Pin TEFD4300)
8 bornera de fuente
2 microcontrolador Mbed NXP (LPC1768)
2 conversores USB-SERIAL RS232 UART TTL (CP 2102)
Fuente de voltaje variable

Nombre de la fuente: Tabla propia

Figura 2-1: Setup de la estructura



Nombre de la fuente: imagen propia

2.2 Implementación de la estructura física

El desarrollo de la estructura física mostrado en la Figura 2-2 se realizó mediante un procedimiento efectuado en tres etapas:

- En la primera etapa fue la elaboración de caja negra con las medidas establecidas donde el material utilizado fue acrílico color negro donde fueron soldadas, para que quedara totalmente selladas y aislada de la luz exterior.
- En la segunda etapa, se instalaron dos soportes para que la caja negra fuera de dos pisos, donde en la parte de abajo va el cableado de las conexiones y en la parte de arriba los circuitos implementados para Led y Fotodiodo Pin.
- En la última etapa, se perforaron las láminas para empotrar los conectores (Bananas hembra) para comunicar los dispositivos internos de la caja negra con los del exterior.

Figura 2-2: Estructura física de la caja negra.



Nombre de la fuente: imagen propia

La caja cuenta con una forma cúbica de 20 cm x 20 cm x 20 cm y en su base una placa en el medio de 50 cm. Adicionalmente, cuenta con dos laterales de 15 cm x 15 para ubicar los diferentes circuitos requeridos en el setup.

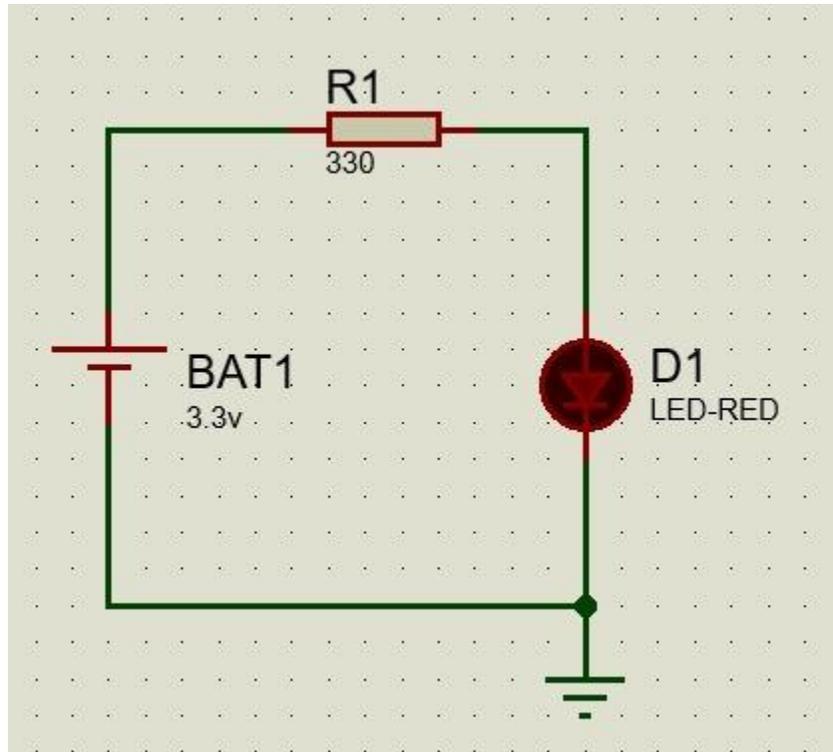
2.3 Caracterización de los componentes

2.3.1 Transmisor

Para la caracterización del Diodo LED, se utilizó un circuito básico compuesto por una resistencia de 330 ohmios conectada al LED, para evitar una sobrecarga de voltaje, y este a su vez se alimenta por medio de una fuente de voltaje regulable, como se observa en la Figura 2-3. Este circuito se implementa para 4 leds de diferentes colores que están en el rango de luz visible (blanco, verde, azul y rojo), donde hallamos su rango dinámico de

conducción con un máximo de 3.3 V (Tabla 2-2), cada uno de estos LED cuentan con diferentes rangos, la intensidad de la luz se relaciona con la cantidad de corriente que fluye a través del dispositivo, así también una relación en la longitud de onda que corresponde a cada color (Mecatrónica LATAM, 2021).

Figura 2-3: Circuito LED



Nombre de la fuente: Imagen propia

La tensión de cada diodo LED varía de acuerdo con su color, en donde si la tensión es una para el led rojo, los demás cambiarán hasta el punto en que cada uno encienda (Tabla 2-2). Estos valores fueron hallados en forma experimental.

Tabla 2-2: Valor de tensión dependiendo el color

Color	Tensión Inicio (v)	Tensión Final (v)
Azul	2,22	3,3
Blanco	2,25	3,3
Rojo	1,5	3,3
Verde	1,7	3,3

Nombre de la fuente: Tabla propia

Las mediciones hechas con cada LED se realizaron desde su tensión de inicio correspondiente hasta 3.3 V, aumentando cada 100mv, dando como resultado que el LED azul cuenta con 12 intervalos, el LED blanco cuenta con 10 intervalos, el LED rojo con 19 intervalos y por último el LED verde 17 intervalos.

En nuestro trabajo de grado vamos a hacer uso del LED rojo, ya que cuenta con más intervalos de tensión, que son necesarios para poder definir 4 niveles de amplitud, que corresponden a cada uno de los niveles de la modulación 4-PAM, que puede en este caso transmitir en cada intervalo de tiempo 2 bits: 00, 01, 02, 03, correspondientes con cada nivel de la modulación y su valor en voltaje.

El tratamiento de la señal, si aplicamos esta modulación, consiste en cambiar su amplitud, trabajando a una frecuencia fija, en función del símbolo que se vaya a transmitir.

Dependiendo del número de símbolos que se vayan a transmitir la modulación se llamará M-PAM, pudiendo ser 2-PAM, 4-PAM, 260PAM. (Rodríguez, 2019)

Se caracterizaron hasta 3,3 voltios, ya que es el rango de entrega el DAC del Mbed y es suficiente para la realización de la comunicación.

2.4 Receptor

En esta caracterización se utilizó un amplificador operacional configurado como un amplificador de transimpedancia para amplificar la luz que es recibida por el transmisor.

Se estableció que la frecuencia de salida fuera de 1 kHz. Para hallar dicha frecuencia se calculó el uso de un condensador, de una resistencia de 160 ohmios y otra de 4 kilo-ohmios (ver (Ecuación 2-1)) (ver (Ecuación 2-4)).

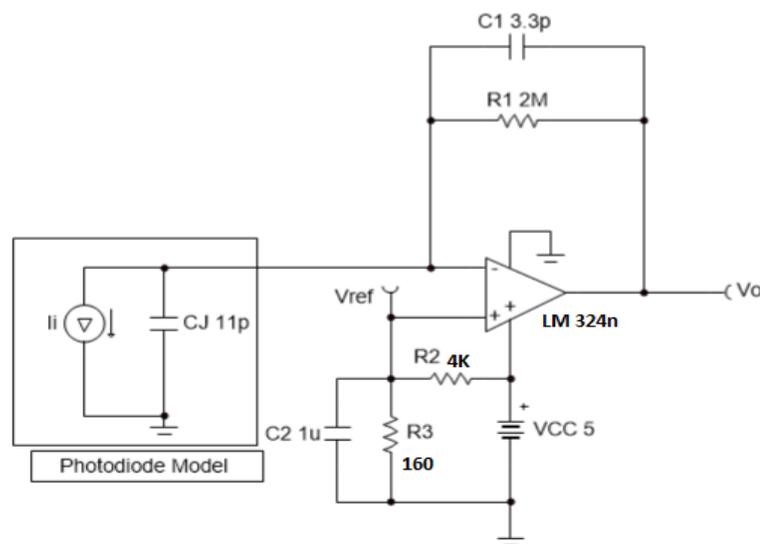
$$f_p = \frac{1}{(2\pi C_2)(R_2 \parallel R_3)} \quad (2.1)$$

$$(R_2 \parallel R_3) = \frac{1}{(2\pi C_2)(1Khz)} \quad (2.2)$$

$$(R_2 \parallel R_3) = \frac{1}{(2\pi 1\mu f)(1Khz)} \approx 160\Omega \quad (2.3)$$

$$(R_2 \parallel R_3) = \frac{1}{\frac{1}{160} + \frac{1}{4000}} \approx 154\Omega \quad (2.4)$$

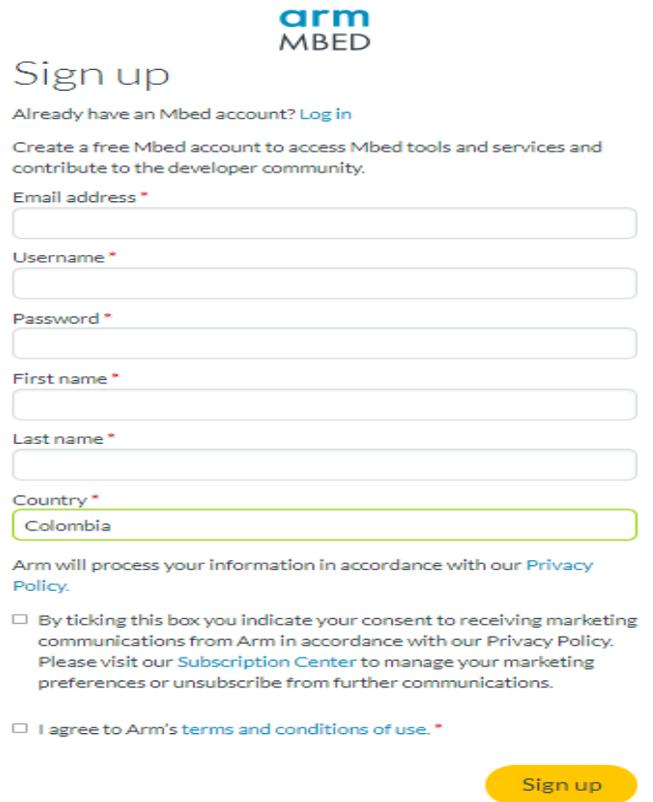
Figura 2-4: Circuito receptor.



Nombre de la fuente: (Texas Instruments incorporated, 2018)

2.5 Desarrollo del software para el microcontrolador

En este apartado la plataforma Mbed.org cuenta con su propio compilador en línea, pero para hacer uso de este debemos crear una cuenta, la cual fue creada con el correo institucional de la universidad UAN. En la (figura 2-4) se muestra la sección para la creación de esta cuenta.

Figura 2-5: Creación de la cuenta

arm
MBED

Sign up

Already have an Mbed account? [Log in](#)

Create a free Mbed account to access Mbed tools and services and contribute to the developer community.

Email address *

Username *

Password *

First name *

Last name *

Country *

Colombia

Arm will process your information in accordance with our [Privacy Policy](#).

By ticking this box you indicate your consent to receiving marketing communications from Arm in accordance with our Privacy Policy. Please visit our [Subscription Center](#) to manage your marketing preferences or unsubscribe from further communications.

I agree to Arm's [terms and conditions of use](#).

Sign up

Nombre de la fuente: Imagen propia

Teniendo la cuenta tenemos acceso al programador, donde se realiza la programación del (convertor digital análogo) DAC y el (convertor análogo digital) ADC para poder realizar la debida comunicación (Modulación y demodulación).

2.6 DAC (Convertor digital análogo)

Se desarrolló una librería que genera cuatro 4 niveles de voltaje, donde cada nivel varía la amplitud de la señal de voltaje aplicada en el LED y por lo tanto varía su luminancia.

Las pruebas experimentales para caracterizar al LED en términos de voltaje aplicado vs luminancia no pudieron ser realizadas debido a la carencia de un luxómetro propio y a las dificultades para acceder al Laboratorio de Detectores en la Sede Villavicencio, donde se cuenta con uno de estos dispositivos de medición. Sin embargo, se verificó con pruebas de detección en el PD-PIN la validez de los niveles especificados, ya que se debe tener en

cuenta que por su naturaleza PAM es una técnica de modulación en la cual lo importante es garantizar una amplitud dentro de un rango determinado, de esta manera se trata de una técnica basada en niveles DC, no en señales variables y aleatorias en amplitud, las cuales requerirían obligatoriamente la caracterización del LED en términos de luminancia.

2.7 ADC (Convertor análogo-digital)

Se desarrolló una librería en C que realiza la conversión analógica-digital de la señal de salida del circuito de adquisición del fotodiodo PIN y evalúa y determina el nivel de tensión correspondiente, para proceder a asignar el nivel que corresponda y de manera directa a su vez los 2 bits que corresponden a la información demodulada; en este apartado se está haciendo el proceso de demodulación de la información, reconstruyendo de nuevo la señal enviada desde el transmisor.

2.8 Interfaz UART con el software HTerm

En este apartado hacemos uso del convertor USB-Serial Cp2102, el cual debemos primero que todo instalarle el controlador para ser reconocido por los PC's.

Figura 2-6: Instalación del controlador del UART

Descargue e instale los controladores VCP

Descargas para Windows, Macintosh, Linux y Android a continuación.

* Nota: La versión de Linux 3.xx y 4.xx del controlador se mantiene en el árbol actual de Linux 3.xx y 4.xx en www.kernel.org.

Descargas de software

Software (11)

Software · 11

Controlador universal de Windows CP210x	v10.1.10 13/01/2021
Controlador CP210x VCP Mac OSX	v6.0.1 31/03/2021
CP210x VCP Windows	v6.7 03/09/2020
Controladores de Windows CP210x	v6.7.6 03/09/2020
Controladores de Windows CP210x con enumerador en serie	v6.7.6 03/09/2020

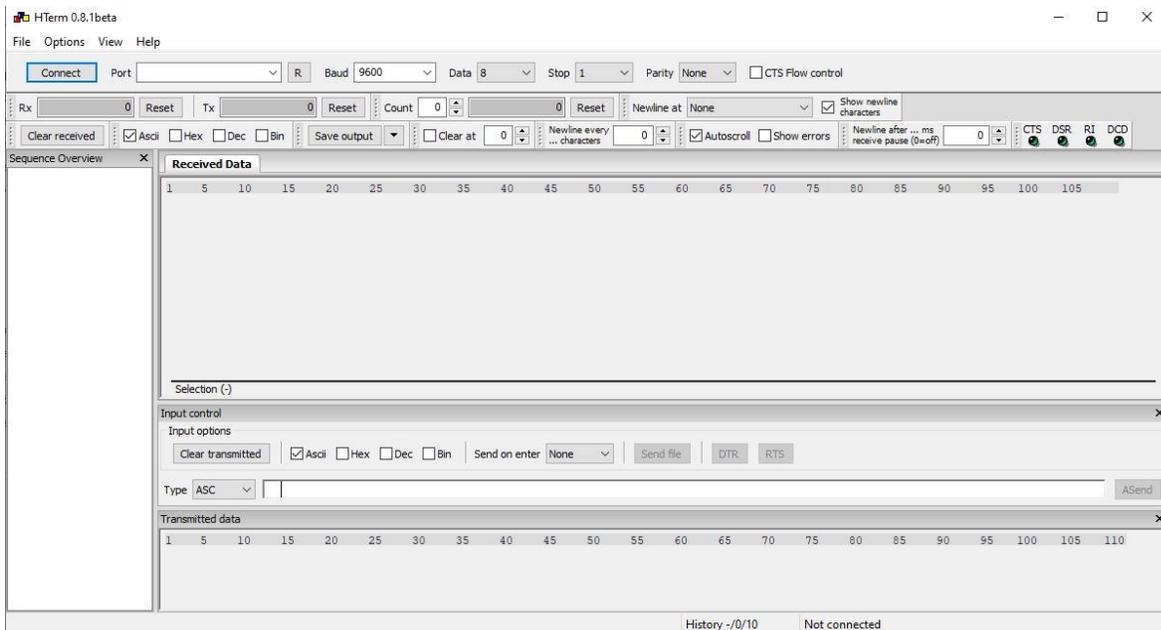
[Mostrar 6 software más](#)

Nombre de la fuente: Imagen propia

Una vez teniendo instalado el controlador, ya se puede hacer uso de este, el cual va conectado al PC y sus terminales al microcontrolador MBED (Rx, Tx, Gnd). Cuando finalizamos la programación del DAC Y ADC, abrimos el software HTerm y configuramos la tasa de transferencia en ambos computadores a 9600 baudios.

En la etapa de transmisión con los 4 niveles ya definidos de 2 bits, este es enviado al módulo MBED programado como DAC donde se hace el proceso de conversión de bits de digital a análogo. Cada nivel corresponde a un voltaje que es enviado a través de la modulación PAM del LED y recibida al otro extremo por el fotodiodo PIN, donde los bits enviados por el transmisor son convertidos de análogo a digital por el ADC y finalmente mostrándose en la interfaz del software HTERM.

Figura 2-7: Interfaz HTerm



Nombre de la fuente: Imagen propia

2.9 Comunicación vía Matlab

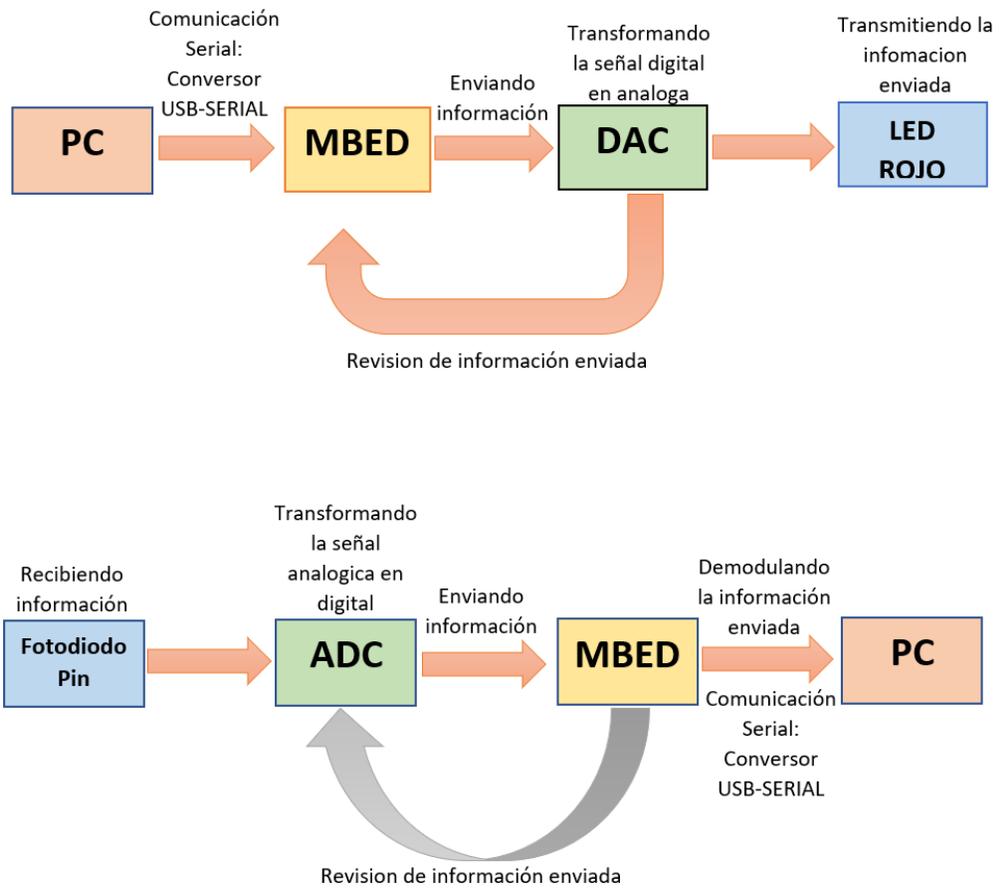
Para la comunicación serial se usa del software Matlab donde se modulan y envían los caracteres alfanuméricos en formato ASCII y son recibidos por el Mbed, posteriormente transmitidos y luego recibidos y demodulados nuevamente por Matlab. Para este proceso

se usa una librería compatible con comunicación serial mediante el microcontrolador Mbed, con una tasa de transferencia de 9600 bps por defecto.

3.Resultados

3.1 Setup experimental

Figura 3-1: Estructura del setup



Nombre de la fuente: Imagen propia

En la figura 3-1 se aprecia el diagrama de bloques del setup experimental implementado.

Está compuesto por dos etapas, la primera es el módulo de transmisión y la segunda el de recepción. Cada uno de estos módulos está soportado por un sistema microcontrolador Mbed.

El Mbed encargado de la transmisión, tiene una interfaz USB-serial conectada a un PC, a su vez, con el DAC embebido se encarga de generar el voltaje que alimenta el circuito LED Driver y a su vez controla la luminancia del LED.

En este caso el medio de transmisión entre los dos módulos es inalámbrico, la portadora es la señal lumínica generada por el LED, el cual se encuentra separado según se indica en la figura 2-1.

El Mbed 2 encargado de la recepción, recibe la señal proveniente del circuito de acondicionamiento del fotodiodo PIN por uno de los canales de conversión analógica-digital, con el fin de tomar este valor y realizar el proceso de demodulación.

3.2 Caracterización de los componentes electrónicos

3.2.1 Transmisor

Se eligió el LED rojo ya que cuenta con más intervalos de tensión y con base en el datasheet del Fotodiodo Pin TEFD4300 evidenciamos que éste tiene mejor respuesta al color rojo, en la siguiente tabla se mostrará detalladamente como se logró obtener los 4 niveles de tensión para implementar PAM (Tabla 3-1). Además, en las pruebas encontramos que el LED blanco presenta un comportamiento particular y consiste en que su rango de variación es muy pequeño, presumimos que debido a que está diseñado con fines de iluminación, por esta causa, el modelo específico de LED blanco que pudimos adquirir en el mercado disponible no es apropiado para el propósito de este proyecto.

Tabla 3-1: Caracterización LED rojo

Niveles	LED ROJO tensión(v)
	1.5
	1.6
	1.7
0	1.8
0	1.9
0	2
0	2.1
1	2.2
1	2.3
1	2.4
1	2.5
2	2.6
2	2.7
2	2.8
2	2.9
3	3
3	3.1
3	3.2
3	3.3

Nombre de la fuente: Tabla propia

El DAC del MBED es de 10 bits, lo que significa $2^{10} = 1023$, donde este valor lo dividimos

$\frac{3.3\text{ v}}{1023} = 3.2258 \times 10^{-3}$, con este resultado, ahora dividimos el inicio de cada nivel

$1.8/3.2258 \times 10^{-3} = 558$, $2.2/3.2258 \times 10^{-3} = 682$, $2.6/3.2258 \times 10^{-3} = 806$,

$3/3.2258 \times 10^{-3} = 930$, $3.3/3.2258 \times 10^{-3} = 1023$, luego sacar el promedio de cada intervalo

$558 + 682/2 = 620$, $682 + 806/2 = 744$, $806 + 930/2 = 868$, $930 + 1023/2 = 976$, y por ultimo

multiplicamos este último valor por $3.2258 \times 10^{-3} = 620 \times 3.2258 \times 10^{-3} = 2$, $744 \times$

$3.2258 \times 10^{-3} = 2.4$, $868 \times 3.2258 \times 10^{-3} = 2.8$ y $976 \times 3.2258 \times 10^{-3} = 3.14$, teniendo como

resultado los 4 niveles de tensión , serán constante la separación y la anchura de los pulsos, siendo la amplitud la única propiedad que varía según el valor de la amplitud de la moduladora. (Tabla 3-2)

Tabla 3-2: Valor de cada nivel

Primer nivel	2 v
Segundo nivel	2.4 v
Tercer nivel	2.8 v
Cuarto nivel	3.14 v

Nombre de la fuente: Tabla propia

A los valores se le asignan los bits a transmitir. Tabla (3-3)

Tabla 3-3: Valor de cada grupo de Bits

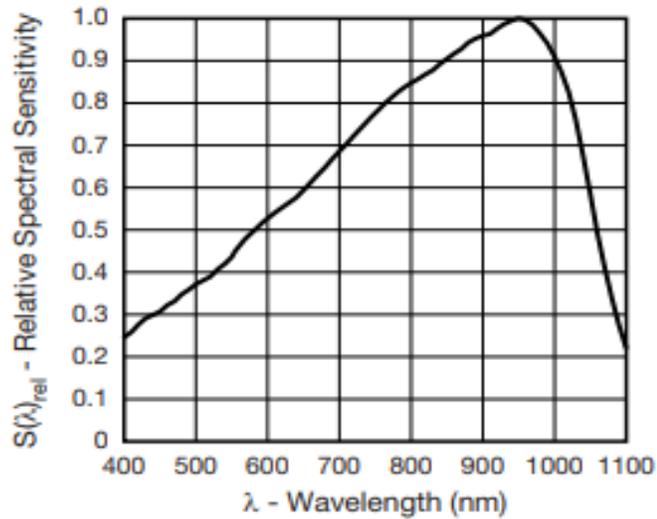
Bits a transmitir (símbolo PAM)	Tensión (v)
00	2
01	2.4
02	2.8
03	3.14

Nombre de la fuente: Tabla propia

3.2.2 Receptor

Teniendo en cuenta que el rango dinámico del fotodiodo PIN se encuentra entre 350 a 1120 nm, como se muestra en la figura 3-2 y como se mencionó anteriormente, este responde mejor con la luz roja, ya que el pico en la curvatura de longitud de onda del fotodiodo PIN se encuentra alrededor de 950 nm y la longitud de onda del color rojo varía entre 620 a 740 nm.

Se observa la longitud de onda en la Figura 3-2.

Figura 3-2: Sensibilidad espectral relativa Vs Longitud de Onda

Nombre de la fuente: Datasheet

Para hacer la caracterización del Fotodiodo PIN, se realizaron 100 mediciones con los intervalos de cada Led para hallar su respuesta, luego se obtuvo el promedio de tensión en cada caso, dando como resultando los valores específicos de los rangos de voltaje.

El led azul presentó tensiones promedio como se muestra a continuación (Tabla 3-4).

Tabla 3-4: Promedio de tensión con LED azul

LED AZUL (V)	PROMEDIO FOTODIODO PIN (V)
2,22	0,07
2,3	0,07
2,4	0,08
2,5	0,1
2,6	0,2
2,7	0,45
2,8	0,83
2,9	1,36
3	2,03

Tabla 3-4: (continuación)

3,1	2,75
3,2	3,12
3,3	3,23

Nombre de la fuente: Tabla propia

El led verde presentó tensiones promedio entre rangos un poco más bajos que el azul (Tabla 3-5).

Tabla 3-5: Promedio de tensión con LED verde

LED VERDE (V)	PROMEDIO FOTODIODO (V)
1,7	0,071
1,8	0,081
1,9	0,11
2	0,17
2,1	0,26
2,2	0,38
2,3	0,53
2,4	0,7
2,5	0,88
2,6	1,06
2,7	1,29
2,8	1,51
2,9	1,73
3	1,96
3,1	2,22
3,2	2,43
3,3	2,68

Nombre de la fuente: Tabla propia

El led blanco presento tensiones promedio entre rangos (Tabla 3-6).

Tabla 3-6: Promedio de tensión con LED blanco

LED BLANCO (V)	PROMEDIO FOTODIODO PIN (V)
2,25	0,07
2,3	0,07
2,4	0,07
2,5	0,08
2,6	0,17
2,7	0,59
2,8	1,33
2,9	2,21
3	3,03
3,1	3,24

Nombre de la fuente: Tabla propia

El led rojo presentó tensiones promedio entre rangos como se muestra en la Tabla 3-7.

Tabla 3-7: Promedio de tensión con LED rojo

LED ROJO (V)	PROMEDIO FOTODIODO PIN (V)
1,5	0,07
1,6	0,08
1,7	0,1
1,8	0,17
1,9	0,3
2	0,44
2,1	0,59
2,2	0,76
2,3	0,97
2,4	1,16
2,5	1,31
2,6	1,48

Tabla 3-7: (continuación)

2,7	1,69
2,8	1,94
2,9	2,08
3	2,28
3,1	2,47
3,2	2,74
3,3	2,82

Nombre de la fuente: Tabla propia

Se tuvo en cuenta que cuando el LED está a 3.3 V la respuesta en tensión que está entregando el Fotodiodo PIN no puede superar los 3.3 V, ya que el ADC del MBED solo soporta 3.3 v y si sobrepasa este valor, se podría ver afectado la integridad del microcontrolador, de tal modo que el circuito receptor fue alimentado con 5 V, ya que encontramos que, si se alimentaba con un voltaje mayor, este valor iba a sobrepasar los 3,3 V en respuesta.

Ya teniendo los nuevos valores de los cuatro niveles, se realizaron nuevas pruebas, estas pruebas fueron tomadas con la fuente de voltaje regulable (Tabla 3-8)

Tabla 3-8: Respuesta a niveles por tensión

<i>Transmitir (bits)</i>	<i>Tensión LED (V)</i>	<i>Promedio Fotodiodo PIN (V)</i>
00	2	0,46
01	2,4	1,17
02	2,8	1,95
03	3,14	2,66

Nombre de la fuente: Tabla propia

3.3 Adecuación del ADC

Para la implementación y calibración del Fotodiodo PIN, se hace el proceso inverso. Este recibe la amplitud y genera un valor de tensión que es convertido a digital en el ADC. Este es comparado con la información transmitida e inicia el proceso de demodulación. En el

programa implementado en C y ejecutado en el Mbed, se evalúa el valor convertido por el ADC y se establece a cuál de los 4 niveles pertenece (Tabla 3-8), para finalmente encontrar el símbolo de dos bits que corresponde, es decir, demodular la señal recibida.

3.4 Modulación/demodulación PAM

El proceso de modulación consiste, como se describió anteriormente, en recibir un símbolo de dos bits, en este caso representado por los dos bits de menor peso de un byte, de tal forma que se tienen los valores 0, 1, 2 y 3 en decimal (00h, 01h, 02h, 03h). Las pruebas específicas de modulación/demodulación se realizaron usando el programa HTerm.

Usando este programa se enviaron diferentes valores de los 4 bytes especificados, que son tomados por el microcontrolador e interpretados como un símbolo de 2 bits, luego este dispositivo realiza la asignación del valor correspondiente en el DAC y de esta manera la modulación, como se describió en un apartado anterior. El envío se hace de forma continua para de esta manera evaluar la capacidad de respuesta de ambos módulos.

El proceso de demodulación es realizado en forma inversa: el Mbed realiza la conversión analógica-digital de la señal generada por el módulo de fotodetección y finalmente interpreta este valor asignando uno de los 4 niveles y de esta manera recuperando (demodulando) el símbolo que corresponde y luego envía por la interfaz serial el byte correspondiente como se explicó anteriormente.

En la figura 3-3 se aprecia el resultado de la prueba de modulación/demodulación usando el setup completo. De igual forma, en la figura 3-3 se aprecia el montaje total del prototipo.

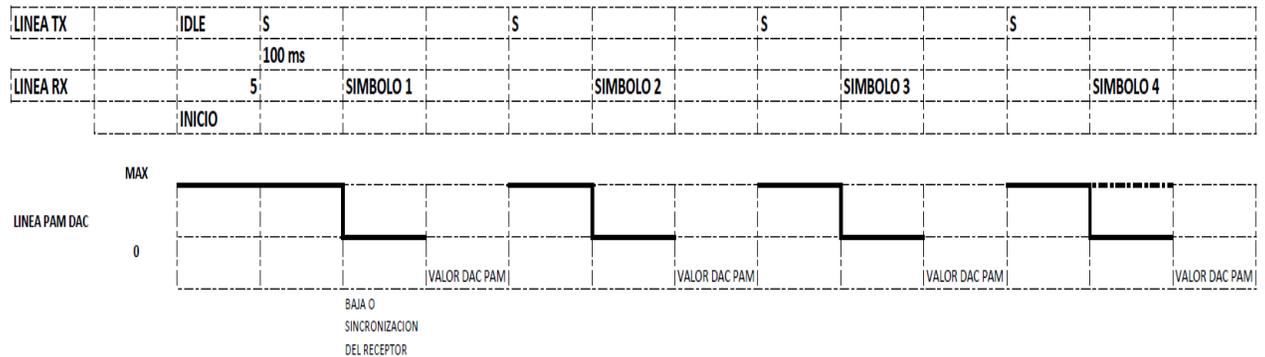
Figura 3-3: Montaje total del prototipo



Nombre de la fuente: imagen propia

3.5 Comunicación PAM

Usando la modulación/demodulación PAM descrita anteriormente, se procedió a implementar un protocolo básico de comunicación simplex (unidireccional) entre dos computadores, usando dos scripts desarrollados en Matlab, los cuales permiten enviar y recibir un carácter ASCII. Este protocolo puede apreciarse en la figura 3-4

Figura 3-4: Protocolo de comunicación basado en PAM

Nombre de la fuente: imagen propia

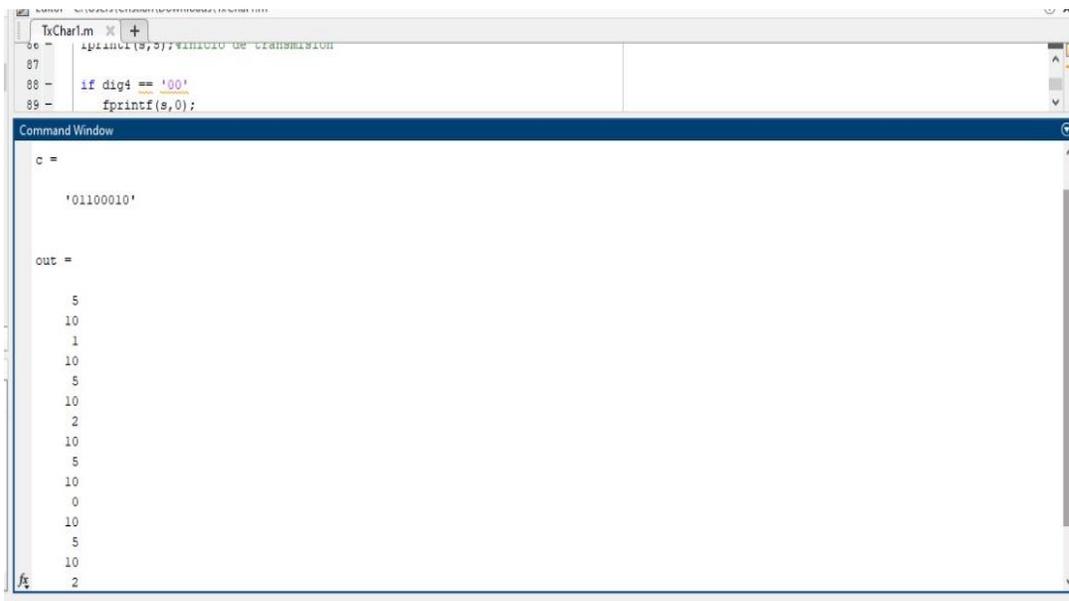
En Matlab se implementaron scripts que implementan el siguiente proceso lógico (de acuerdo con la figura 3-4):

1. La línea PAM tiene un estado normal (idle) en el cual se coloca el voltaje máximo aplicable en el DAC, se considera que este valor es el de reposo y se usa para que el receptor pueda detectar el evento de transmisión y auto sincronizarse con el receptor, por este motivo se trata de un protocolo asíncrono, similar a UART en ese aspecto
2. Desde Matlab se inicializa la transmisión leyendo el carácter a enviar, el cual a su vez es convertido a binario y separado en sus 4 símbolos de 2 bits que lo componen
3. Matlab inicia el protocolo enviando vía serial un 5 en decimal al Mbed 1 (Tx)
4. El Mbed detecta este valor y confirma a Matlab enviando a su vez un 5 en decimal
5. Inmediatamente después Matlab envía el primer símbolo, en forma de un byte correspondiente donde los dos bits de menor peso son el símbolo (como se explicó anteriormente)
6. El Mbed lee este byte y coloca la línea PAM en 0 Voltios para indicar al receptor el evento de transmisión, este evento dura 100 ms.
7. Una vez pasado los 100 ms, el Mbed modula el símbolo recibido usando PAM, es decir, genera el valor correspondiente en el DAC
8. Durante el paso 7, el receptor ha detectado el evento de pasar a 0 V la línea PAM y se coloca en modo recepción, de tal forma que puede leer el valor generado por el LED y demodularlo
9. Una vez termina de modular el símbolo 1, el Mbed confirma a Matlab enviando un 5 en decimal vía serial

10. Se repiten los pasos 3 a 8 para los tres símbolos restantes.
11. Una vez se termina de enviar el byte completo, sus 4 símbolos, termina el proceso y la línea PAM se coloca nuevamente en valor máximo
12. Durante el proceso de envío de cada símbolo, el Mbed 2 encargado de la recepción almacena los 4 bytes recibidos y los transmite a Matlab vía serial, donde una función específica realiza el proceso inverso a la transmisión, toma los 4 símbolos, los concatena, decodifica el byte correspondiente y muestra el carácter ASCII equivalente, finalizando de esta manera el proceso de transmisión de 1 carácter.
13. Se repite el proceso en caso de que existan más caracteres a transmitir

En la figura 3-5 se aprecia una prueba específica realizada en este caso al proceso de transmisión de un carácter (b en este caso), el cual es primero convertido a su equivalente binario, que se muestra y a continuación se envía como prueba un 5 en decimal y los 4 símbolos. Para esta prueba se conectó en loopback el convertidor USB-serial y de esta manera se recibieron los mismos bytes transmitidos, pueden apreciarse que se envían los equivalentes 0, 1, 2 o 3 que corresponden al valor en binario del carácter.

Figura 3-5: Envío de datos Matlab



The image shows a MATLAB script window titled 'TxChar1.m' and its Command Window. The script contains the following code:

```
86 - fprintf(s,0); %INICIO DE TRANSMISION
87 -
88 - if dig4 == '00'
89 -     fprintf(s,0);
```

The Command Window displays the following output:

```
c =
    '01100010'

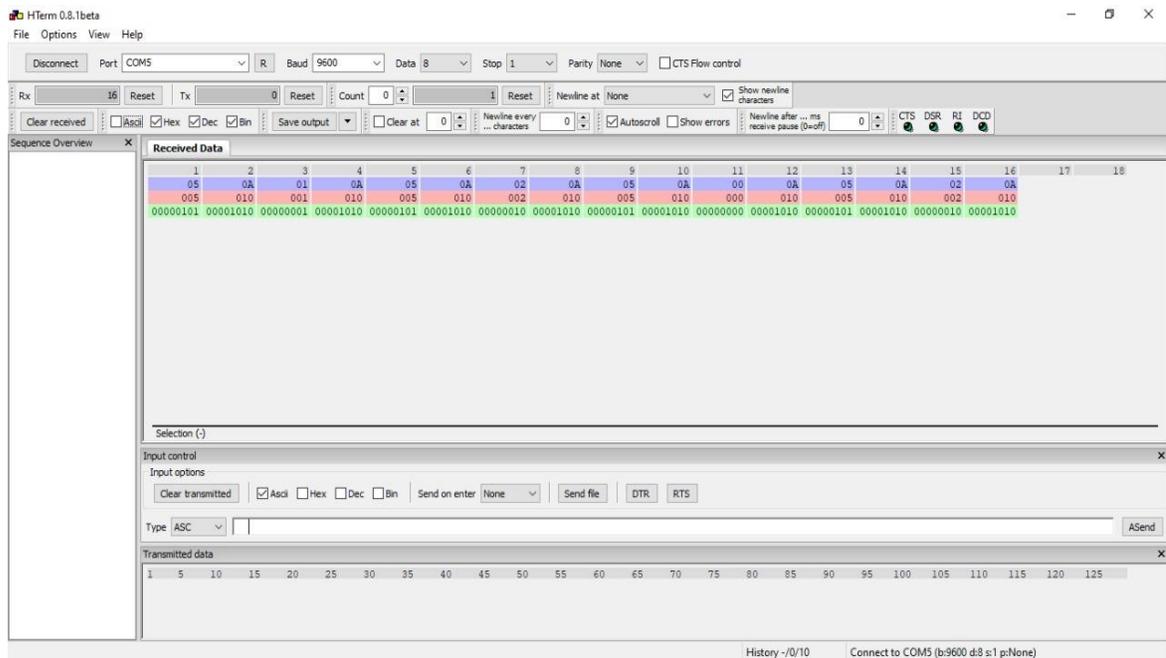
out =

     5
    10
     1
    10
     5
    10
     2
    10
     5
    10
     0
    10
     5
    10
     2
```

Nombre de la fuente: imagen propia

En la figura 3-6 se aprecia la prueba experimental del mismo protocolo de transmisión, pero en este caso escalado a los dos convertidores USB-serial conectados en forma cruzada, realizando la transmisión en Matlab y recibiendo en HTerm, puede apreciarse en HTerm la recepción de los valores correspondientes.

Figura 3-6: Transmisión de un carácter ASCII y recepción en HTerm



Nombre de la fuente: imagen propia

Es importante anotar que este protocolo de comunicación es bastante básico e integra la estrategia de confirmación de cada etapa, con el fin de mitigar los efectos de la sincronización, esto teniendo en cuenta que se trata de un proceso con un costo computacional más alto que por ejemplo el usado en UART, donde solo se tiene la sincronización al inicio de la transmisión de un byte individual.

Por esta razón, no se explota al máximo la capacidad del modulador/demodulador, pero permite probar éste en un escenario práctico de comunicación.

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

- La efectividad de VLC depende de su técnica de modulación y de las características del led y fotodiodo PIN, ya que entre más avanzada sea la técnica y mejores las prestaciones de los componentes, más precisa va a ser la comunicación entre emisor receptor
- Las condiciones que se requieren para tener un dispositivo final comercial son complicadas debido a que depende de la línea de vista y la luz visible tiene un comportamiento diferente a las ondas electromagnéticas en el rango de radiofrecuencias, más aún cuando se usa en comunicaciones.
- El setup experimental desarrollado será una herramienta para el Laboratorio de Detectores y permitirá el desarrollo de trabajos futuros, en los cuales se aborden otros tipos de modulación más sofisticados como OFDM, CDMA, entre otros.

4.2 Recomendaciones

A la hora de trabajar en esta línea en un futuro se recomienda aumentar los niveles para poder transmitir 3 bits o más y esto exige mejores LED, un mejor fotodiodo PIN para que respondan de manera más precisa.

Como segunda recomendación se sugiere explorar más alternativas de modulación para lograr un prototipo final más robusto y una aplicación más puntual.

A. Anexo: Código del Mbed modulación

```
#include "mbed.h"

AnalogIn ain(A5);
Serial device (p9, p10); // tx, rx

float ADCdata;

int main(void){
    device.baud(9600); //LISTO

    while (1) {

        ADCdata = (ain*3.3);

        if (ADCdata > 0.48 and ADCdata <= 0.50) { device.printf(" 00 ");
            wait (0.3); }
        else if (ADCdata > 1.19 and ADCdata <= 1.21) { device.printf(" 01 ");
            wait (0.3);}
        else if (ADCdata > 1.98 and ADCdata <= 2) { device.printf(" 02 ");
            wait (0.3); }
        else if (ADCdata > 2.68 and ADCdata <= 2.7) { device.printf(" 03 ");
            wait (0.3);}
    }
}
```

B. Anexo: Código del Mbed demodulación

```
#include "mbed.h"

Serial pc(USBTX, USBRX); // tx, rx
Serial device(p9, p10); // tx, rx

int main() {

    AnalogOut Aout(p18);

    while(true) {

        if(device.readable()) {
            int command = device.getc();

            switch (command){

                case 00:
                    Aout=0.257; //=2V
                    break;

                case 01:
                    Aout=0.352; //=2.4V
                    break;

                case 02:
                    Aout=0.449; //=2.8V
                    break;

                case 03:
```

```
Aout=0.532; //=3.14V
```

```
break;
```

```
}
```

```
}
```

```
}
```

```
}
```

C. Anexo: Código de recepción de Matlab

```
function RxChar(puerto)

s = serial(puerto);
fopen(s);
caracter = [];

for i=0:3

    out = fread(s,s.BytesAvailable,'uint8');%

    if out == 5%confirma dígito

        fprintf(s,5);
        dig(i) = fread(s,s.BytesAvailable,'uint8');
    end
end

for j=0:3

    if dig(i) == 0
        caracter = caracter & '00';
    elseif dig(i) ==1
        caracter = caracter & '01';
    elseif dig(i) ==2
        caracter = caracter & '10';
```

```
else
  caracter = caracter & '11';
end
end
```

D. Anexo: Código de transmisión de Matlab

```
function TxChar(char,puerto)
```

```
a=sprintf('%X', char);
```

```
b = hex2dec(a);
```

```
c = dec2bin(b,8)
```

```
if c(1) == '0' && c(2) == '0'
```

```
    dig1= '00';
```

```
elseif c(1) == '0' && c(2) == '1'
```

```
    dig1= '01';
```

```
elseif c(1) == '1' && c(2) == '0'
```

```
    dig1= '10';
```

```
else
```

```
    dig1='11';
```

```
end
```

```
if c(3) == '0' && c(4) == '0'
```

```
    dig2= '00';
```

```
elseif c(3) == '0' && c(4) == '1'
```

```
    dig2= '01';
```

```
elseif c(3) == '1' && c(4) == '0'
```

```
    dig2= '10';
```

```
else
```

```
    dig2='11';
```

```
end
```

```
if c(5) == '0' && c(6) == '0'
```

```
    dig3= '00';
```

```
elseif c(5) == '0' && c(6) == '1'
```

```
    dig3= '01';
```

```
elseif c(5) == '1' && c(6) == '0'
    dig3= '10';
else
    dig3='11';
end

if c(7) == '0' && c(8) == '0'
    dig4= '00';
elseif c(7) == '0' && c(8) == '1'
    dig4= '01';
elseif c(7) == '1' && c(8) == '0'
    dig4= '10';
else
    dig4='11';
end

s = serial(puerto);
fopen(s);

fprintf(s,5);%inicio de transmisión

if dig1 == '00'
    fprintf(s,0);
elseif dig1 == '01'
    fprintf(s,1);
elseif dig1 == '10'
    fprintf(s,2);
else
    fprintf(s,3);
end

out = fread(s,s.BytesAvailable,'uint8')%confirma dígito

if out == 5%confirma dígito
```

```
if dig2 == '00'
    fprintf(s,0);
elseif dig2 == '01'
    fprintf(s,1);
elseif dig2 == '10'
    fprintf(s,2);
else
    fprintf(s,3);
end

end

out = fread(s,s.BytesAvailable,'uint8')

if out == 5

if dig3 == '00'
    fprintf(s,0);
elseif dig3 == '01'
    fprintf(s,1);
elseif dig3 == '10'
    fprintf(s,2);
else
    fprintf(s,3);
end

end

out = fread(s,s.BytesAvailable,'uint8')

if out == 5

if dig4 == '00'
```

```
    fprintf(s,0);  
elseif dig4 == '01'  
    fprintf(s,1);  
elseif dig4 == '10'  
    fprintf(s,2);  
else  
    fprintf(s,3);  
end  
end  
  
fclose(s)  
delete(s)  
clear s
```


Bibliografía

- arm.* (2018). Obtenido de <https://os.mbed.com/platforms/mbed-LPC1768/>
- Borja, M. (s.f.). UART. *UART*. Universidad Carlos III de Madrid, Madrid. Obtenido de https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/23730/TFG_Borja_Diaz_Mulas.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- der-hammer.* (2020). Obtenido de <https://www.der-hammer.info/pages/terminal.html>
- Electronicworld.* (2020). Obtenido de <http://www.electronicworld.com.mx/uncategorized/convertidor-analogico-a-digital-adc-y-digital-a-analogico-dac/>
- ESOPO.* (s.f.). Obtenido de <https://iie.fing.edu.uy/proyectos/esopo/caracteristicas-ondas/>
- Khan, L. (15 de Agosto de 2016). *Visible light communication: applications, architecture, standardization and research challenges*. (ELSEVIER, Ed.) Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352864816300335>
- Lorenzo, B. (2016). Estudio del arte de los sistemas de comunicacion por luz visible (VLC). *Estudio del arte de los sistemas de comunicacion por luz visible (VLC)*. Universidad de Sevilla, Sevilla.
- Mecatronica LATAM.* (23 de abril de 2021). Obtenido de <https://www.mecatronicalatam.com/es/tutoriales/electronica/componentes-electronicos/diodo/diodo-led/>
- Medium.* (11 de Noviembre de 2019). Obtenido de <https://medium.com/modulaciones-de-pulsos-muestreo-pam-ppm-pcm-y/pam-a5e6d926fcae>
- Rodriguez, N. (2019). Analisis de las comunicaciones mediante luz visible en el marco de la industria 4.0. *Analisis de las comunicaciones mediante luz visible en el marco de la industria 4.0*. Universidad Carlos III de Madrid, Madrid.
- Silicon Labs.* (2017). Obtenido de <https://www.silabs.com/documents/public/data-sheets/CP2102-9.pdf>
- VISHAY.* (04 de Agosto de 2014). Recuperado el 21 de 04 de 2021, de <https://www.vishay.com/docs/83471/tefd4300.pdf>

Xataka. (05 de 02 de 2013). Obtenido de <https://www.xatakahome.com/la-red-local/comunicaciones-por-luz-visible-cuando-los-bits-nos-lleguen-de-las-bombillas>