

## Diseño de dispositivo de comunicación por luz visible aplicado a sistemas electromecánicos

Design of a visible light communication device applied to electromechanical systems

Elvia Guadalupe Preciado Márquez<sup>1</sup>, Juan de Anda-Suarez<sup>1</sup>, José Luis López-Ramírez<sup>1</sup>, Alan Fuentes-Garcidueñas<sup>1</sup>, Huetzin Aaron Pérez Oliva<sup>2</sup>

<sup>1</sup> División de Ingeniería Electromecánica, ITS de Purísima del Rincón, Tecnológico Nacional de México.  
elviapreciadomarquez@gmail.com

<sup>2</sup> Facultad: Ciencias Básicas, Departamento, ITES Los Cabos, Baja California Sur, Los Cabos.  
Irs19110452@purisima.tecnm.mx

### Resumen

En el trabajo presente se expone el diseño y desarrollo de un sistema de comunicación por luz visible (VLC o Li-Fi) aplicado a sistemas electromecánicos, el objetivo principal de este sistema es el de transmitir información mediante la modulación de señales luminosas generadas por diodos LED. El proyecto propone la creación de un prototipo funcional utilizando microcontroladores Raspberry Pi 4 como emisor y receptor, que sean capaces de enviar y recibir datos por medio de modulación PWM (Pulse Width Modulation). Este sistema se creó pensando en la aplicación orientada a aplicaciones en entornos electromecánicos, especialmente en el ámbito del transporte, en donde la comunicación entre vehículos e infraestructura puede contribuir a incrementar la seguridad vial y de igual forma la eficiencia del tráfico. La propuesta busca ofrecer una alternativa de comunicación de corto alcance, pero de bajo costo, a una alta velocidad y mayor seguridad frente a las interferencias electromagnéticas, integrando principios de automatización, electrónica y control.

**Palabras clave:** Comunicación por luz visible; Li-Fi, modulación PWM; Raspberry Pi 4; sistemas electromecánicos.

### Introducción

La tecnología de comunicación de luz visible está ofreciendo una extensa variedad de aplicaciones que la convierten en una alternativa interesante a las tecnologías ya existentes, sobre todo para la transmisión de datos a corta distancia. Como cualquier tecnología, tiene sus limitaciones, como la interferencia de la luz ambiente, la propagación de las ondas y la potencia de la señal, así como la compatibilidad con dispositivos existentes. La comunicación por luz visible, o VLC (por sus siglas en inglés), abarca un amplio rango de tecnologías que utilizan la luz para transmitir información, incluyendo sistemas de fibra y comunicaciones ópticas inalámbricas (OWC). Un ejemplo de esto es Li-Fi, que utiliza diodos LED para emitir un haz de luz modulada que puede transmitir datos. Esta tecnología trabaja en el espectro visible de la luz, entre 380 y 750 nanómetros de longitud de onda. Esto según (Viveros, 2019) que está citando a (Peña Herrera Aguilar, 2014).

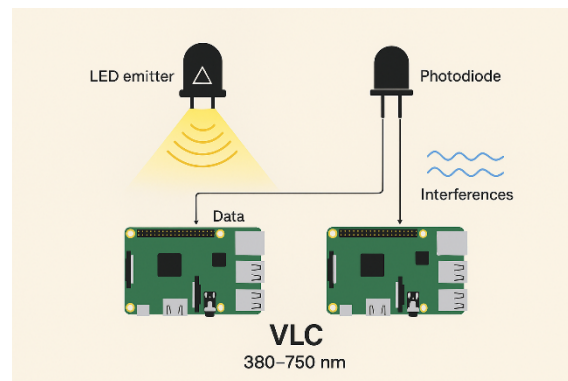


Figura 1. Esquema del espectro electromagnético.

El espectro de luz visible está comprendido entre los 400nm y los 700nm de longitud de onda, también son considerados dentro de este espectro, el final de los rayos Ultravioleta y el inicio de los Infrarrojo, aunque no estén en el rango que percibe para el ojo humano, como se ilustra en la Figura 2. Según (Viveros, 2019), que está citando a (Calzadilla & Ortuño, 2013; Cavanillas, 2015).

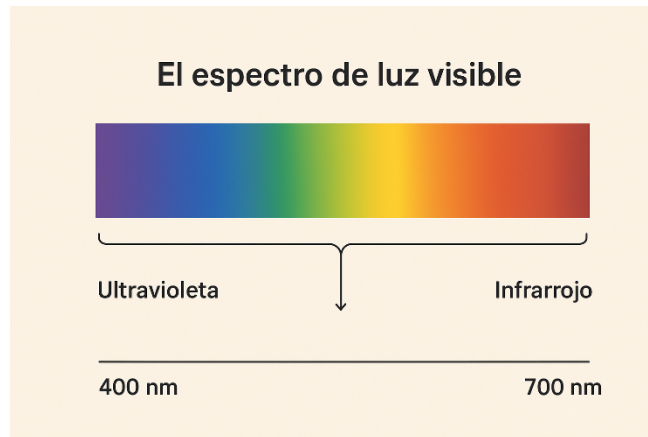


Figura 2. Espectro de luz visible.

El objetivo de este proyecto es diseñar un dispositivo que mejore la seguridad vial en sistema de transporte, ya que lo que se busca es poder hacer un intercambio de información entre vehículos en tiempo real y reduzca los accidentes viales. Ya que de esta forma de comunicación puede mejorar un poco más la seguridad vial de los pasajeros al permitirles que sus vehículos puedan recibir información en tiempo real y así reducir el riesgo de tener futuros accidentes viales.

La aplicación de VLC en los vehículos trata de aumentar la seguridad vial en las calles y autopistas que estén más transitadas, estableciendo una comunicación entre los vehículos o una realimentación para evitar colisiones, también se podría implementar en semáforos inteligentes para crear una red dinámica y mejorar la seguridad en las vías, ver Figura 3.

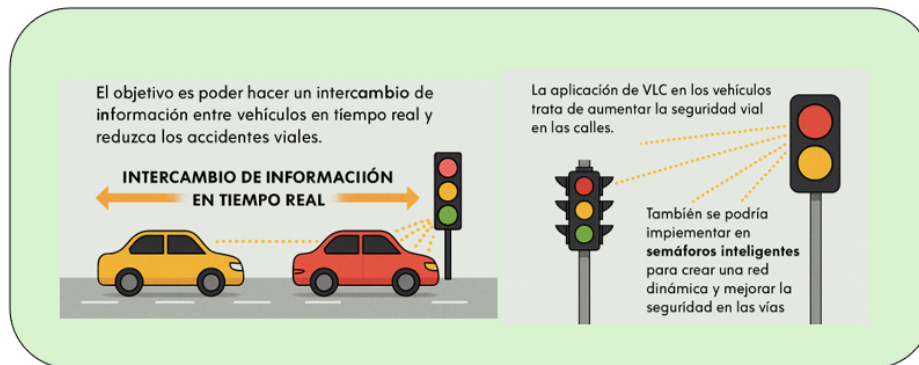


Figura 3. VLC para Vehículos y Transporte.

Como lo menciona (Viveros, 2019), que está citando a (Tomasi, 2003), un sistema de comunicación electrónico básicamente se compone de tres partes clave: un transmisor, un medio de transmisión y un receptor.

La base de cualquier sistema de comunicación eléctrica reside en la interacción de tres elementos: el transmisor, encargado de modular la información en una señal; el medio de transmisión, que facilita la propagación de la señal; y el receptor, que demodula la señal para obtener la información original. El medio de transmisión puede ser un conductor físico como el cobre o la fibra óptica, o un medio inalámbrico como las ondas de radio o la luz.

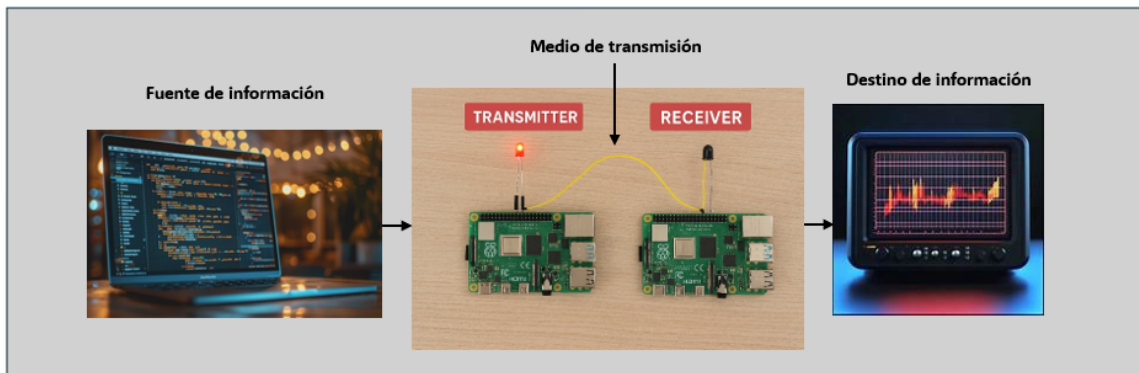


Figura 4. Diagrama de sistema de comunicación.

A continuación, se describen algunos de los componentes básicos que forman parte de un sistema VLC para su funcionamiento.

Un diodo LED es un componente electrónico que produce luz al recibir corriente en la dirección correcta. Está fabricado con semiconductores como es el arseniuro de aluminio y galio (AlGaAs) o el arseniuro de fósforo de galio (GaAsP), que contienen una unión P-N. Al combinarse electrones y huecos, se libera energía en forma de fotones, creando luz. El color de la luz emitida varía según la energía de estos fotones, la cual depende del intervalo de banda de energía del semiconductor (Viveros, 2019), citando a (Lorenzo Grandes, 2016).



Figura 5. Diodo LED.

La Raspberry Pi 4, ilustrada en la Figura 6, representa una solución informática accesible y de alto rendimiento, su bajo costo la convierte en una herramienta ideal para usuarios de todos los niveles socioeconómicos que deseen desarrollar un prototipo, además su compatibilidad con Python facilita la programación y la implementación de proyectos (Delgado, 2020).



Figura 6. Raspberry Pi 4 Model B.

Hay que tener muy en cuenta las precauciones de seguridad que es de suma importancia de que nos aseguremos de que haya una alimentación eléctrica adecuada y evitar exceder los niveles de voltaje recomendados para evitar daños a la placa ya que se estará trabajando con conexiones eléctricas y así evitar riesgos eléctricos. (Fleetstack.io & hackers, 2025)

Con la Raspberry esperamos obtener una comunicación fiable en situaciones controladas y reales, mediante un código con el que se estará mandando desde un mensaje o hasta algún texto unas de un texto por medio de frecuencias PWM del emisor al receptor, esto con el propósito de brindar información a tiempo real a los usuarios de la vía y tengan conocimiento de lo que está pasando a su alrededor.

Asimismo, se pretende que el intercambio entre vehículo e infraestructura será posible, esto permitiría que el vehículo en cuestión reciba información sobre las condiciones del clima, el estado de las vías y el tráfico, todo ello en tiempo real. Esto mejoraría la seguridad vial, reducir la congestión y optimizar el tráfico.

Esta clase de sistema de comunicación se tiene la posibilidad de transmitir de manera análoga o digital. Al variar la intensidad de la iluminación se relaciona a la modulación análoga. Por otra parte, modulación digital se codifica en una serie de pulsos. Lo que equivale a varias ventajas como: la detección, corrección de errores y una significativa reducción de ruido durante la transmisión.

Dentro de la codificación digital encontramos varias técnicas. Todas ellas con diferentes características como símbolos por bit, sincronización del reloj, ciclo de trabajo, componente DC, etc. Según Viveros (2019), que está citando Llanos Flores (2014) se afirma:

“Debido a la naturaleza de la luz visible, se espera que las técnicas a utilizar sean de origen análogo, sin embargo, algunas de las técnicas de modulación digital como el OOK (On-Off Keying), donde los pulsos de luz son traducidos como señales digitales. Finalmente, en este caso se estará modulando con Modulación por Ancho de Pulsos (PWM, por sus siglas en inglés), que se utiliza para señales de control que por lo general se utilizan para la regulación de potencia o bien, para la regularización de velocidad a la que un dispositivo tiene como funcionamiento.”

Estos tipos de señales cuenta con una frecuencia fija y que además cuenta con una amplitud variables. El PWM se puede utilizar en cualquier tipo de sistema en el que se requiera la regularización de un sistema de control ya sea automatizado o electrónico como lo es en la intensidad del brillo de los leds, especialmente en frecuencias en que no se pueden apreciar a simple vista, ya que, las frecuencias son muy altas y no se aprecia ningún parpadeo (Bercial, 2023). Para poder modular una señal de tipo análoga se cambia el ciclo de trabajo de tal manera que el valor promedio de la señal sea el voltaje aproximado que se desea obtener, lo que nos permite enviar voltajes entre 0[V] y el máximo que pueda soportar el dispositivo PWM utilizado, en algunos casos solo alcanza a un máximo de 5[V] (Gomez, 2020).

## Metodología Propuesta

El proceso de desarrollo se estructura por pasos:

### 1. Capacitación y fundamentos teóricos:

Se obtuvo una semana de capacitación en las cuales vimos los principales fundamentos teóricos y realizamos varias prácticas con las que se nos ayudó a adquirir todo tipo de conocimientos sobre la comunicación por luz visible (Li-Fi) y sobre todo tener conocimiento sobre la modulación PWM.

### 2. Diseño y programación del sistema emisor – receptor:

#### 2.1. Emisor:

Es el que va a emitir un mensaje, se realizara un código con el que sea posible mandar un mensaje por medio de frecuencia PWM.

#### 2.2. Receptor:

Es el que recibe y se encarga de decodifica el mensaje recibido, se realizara un código que sea capaz de decodificar el mensaje que le fue mandado desde el emisor.

Para ambas tarjetas raspberry se diseñará e imprimirá en 3D unas cajas para la protección de cada una de ellas y mantener los circuitos en buenas condiciones y que sea más practico a la hora de estar realizando las pruebas y más atractivo visualmente.

### 3. Selección de componentes:



Seleccionamos los componentes que nos permita hacer un circuito, identificando aquellos que más se apeguen a las necesidades de este proyecto.

#### 4. **Diseño electrónico:**

Se hace el diseño electrónico, para esto realizamos el circuito prueba en una Protoboard y después de realizar varias pruebas y correcciones (en caso de ser necesarias y que no muestre ningún error) nos pasamos a realizar el diseño de la placa en la que utilizamos Proteus 8.13 para hacerla, ya que es una plataforma que se dé fácil entendimiento y de uso, que nos permite realizar la simulación den 2D y 3D de la placa y está la diseñamos después de que no se hayan obtenido ningún error en el circuito anteriormente realizado.

#### 5. **Fabricación de PCB:**

Fabricación de placa PCB haciendo uso de la CNC, después de a ver realizado el diseño electrónico en Proteus 8.13 este se exporta a FlatCAM para realizar el código G para así poder utilizar la CNC y hacer la placa y una vez realizada la placa se hace el montaje de componentes y soldadura.

#### 6. **Programación de Raspberry Pi 4:**

La programación de la Raspberry, se realizará la codificación en Python para así poder generar el código que estaremos utilizando, para después poder modular la señal y mandar un mensaje para que la otra Raspberry la pueda recibir y después que esta pueda decodificar la señal PWM y saber que fue el mensaje que fue mandado.

#### 7. **Pruebas experimentales:**

##### 7.1. **Pruebas unitarias (hardware y software).**

Estas pruebas se realizan para asegurarse de que cada componente individual (emisor, receptor y software) funcione correctamente antes de integrarlos.

##### **Emisor:**

En este punto se tiene que verificar que el emisor esté funcionando adecuadamente desde la programación hasta el circuito mismo y que este esté mandando un mensaje al receptor y para eso con ayuda de un osciloscopio mediremos la forma de la onda que se está transmitiendo todo esto esperando que la señal sea lo más limpia posible con encendidos y apagados rápidos en donde no tengamos picos ni retardos exagerados para verificar que no tenga errores para realizar ajustes hasta que esté bien.

##### **Receptor:**

El propósito del receptor es que este sea capaz de detectar correctamente la luz emitida, en este también es recomendable que hagamos uso del osciloscopio para poder observar la señal que este esté generando, si la señal varía claramente entre niveles altos (cuando hay luz) y bajos (cuando no hay), eso significa que esta funciona bien, todo esto esperado es una señal con una diferencia clara entre encendido y apagado del LED, lo que indica que el receptor puede distinguir los pulsos de luz.

##### 7.2. **Prueba del software (unitario).**

En esta prueba lo principal en lo que nos enfocamos es que tanto como el emisor como el receptor estén funcionando, con el objetivo de asegurar que el código que se está mandando el mensaje y que el que recibe la información es funcionando correctamente.

##### 7.3. **Pruebas de integración.**

Una vez que se haya verificado el funcionamiento de cada uno individualmente realizaremos la integración del sistema completo, entonces pondremos el emisor enfrente del receptor y una vez alineados e iniciar las pruebas de la velocidad a la cual la secuencia va del emisor al receptor, para saber hasta qué cantidad de errores podremos tener y así poder encontrar cual sería el límite máximo de velocidad que puede soportar el sistema. Al realizar este tipo de pruebas estamos esperado que a bajas velocidades la comunicación sea estable y sin errores, y que el rendimiento disminuya progresivamente al aumentar la velocidad.

##### 7.4. **Pruebas de alcance y ángulo.**

Realizando estas pruebas nos permitirá que nuestro alineamiento angular sea el correcto, por lo que estaremos realizando pruebas de distancia de 0.5 m a 2m o hasta que perdamos por completo la comunicación y, así, saber cuál sería nuestro parámetro para después realizar el registro de las pruebas obtenidas al mismo tiempo realizaremos las pruebas angular del



receptor modificando los ángulos y si este llegase a recibir bien la señal a pesar del ángulo, esto con la finalidad que los resultados esperados es llegar a obtener un "mapa" que relacione la distancia y el ángulo con la tasa de error, lo que nos ayudara a definir el rango operativo y la directividad del sistema.

#### **7.5. Pruebas de luz ambiente e interferencia.**

En esta prueba se estará evaluando como es que puede estar afectando el nivel de la iluminación natural o artificial a la señal que se esté mandando y al mismo tiempo estar registrando los errores que esta situación nos esté generando, también tener en consideración como la señal podría comportarse si estuviera en un lugar donde la luz este parpadeando, al estar realizando estas pruebas lo que estamos esperando es determinar la tolerancia del sistema frente a diferentes condiciones de iluminación.

#### **7.6. Prueba de robustez electromecánica.**

El propósito de esta prueba es saber cuál sería el comportamiento de nuestro sistema si este estuviera sometido en lugares donde pueda estar sufriendo de muchas vibraciones o movimiento y si estas son a una escala leve o alta, al realizar esta prueba lo que estamos esperando es que podamos saber si sería necesario que el sistema deba de tener un montaje más firme o una protección adicional para mantener la señal estable.

#### **7.7. Pruebas de latencia y tiempo de repuesta.**

Aquí se estará evaluando el tiempo total en la que se tarda la señal desde que el emisor manda el mensaje al receptor, este tipo de acción se podría repetir todas las veces que sean necesarias que se considere el límite de pruebas para poder calcular el promedio, la variación y la consistencia del tiempo de respuesta, al realizar esta prueba lo que se espera que al momento de mandar la señal saber con qué velocidad se pueda recibir el mensaje.

#### **7.8. Pruebas de consumo eléctrico y temperatura.**

Se estará midiendo cada cierto tiempo el consumo y temperatura del led y componentes que están recibiendo una alimentación eléctrica con el objetivo de que no haya sobrecalentamiento ni un consumo excesivo que pueda afectar la vida útil de los componentes o la seguridad del sistema, al estar realizando esta prueba lo que se está esperando es podamos obtener una temperatura estable y un consumo dentro de los límites seguros recomendados por el fabricante.

### **8. Registro de resultados:**

Se implemento un enfoque sistemático para recopilar de los datos obtenidos de cada una de las pruebas que se realizaron para analizar los datos; los resultados del proyecto se presentarán en forma gráfico y en tablas, y para realizar el registro final se incluirá una descripción detallada de los resultados obtenidos, conclusiones y una que otra recomendación.

## **Resultados**

Ente apartado estaremos presentando los resultados obtenidos durante el desarrollo e implementación de este dispositivo de comunicación por luz visible. A continuación, prestamos los resultados del diseño del prototipo y algunas de las pruebas y experimentos que sean realizado para la evaluación del desempeño del sistema en diferentes escenarios y condiciones, demostrando su capacidad de mandar datos de una manera confiable y eficiente.

### **1. Diseño electrónico y primeras pruebas:**

Se hace el diseño electrónico, para esto realizamos el circuito prueba en una Protoboard, donde se está haciendo uso de una Esp32 a la que se le manda un código en Arduino, el cual estará mandando una frecuencia PWM la cual se transmite por medio de un led, también se hace uso de un potenciómetro esto para modular el nivel de brillo del led y después se realizaron varias pruebas utilizando un sensor que hará lectura de la frecuencia que se está mandando esto utilizando Spectroid desde el teléfono móvil como se ilustra en las Figuras 8-12, después se realizan correcciones si estas son necesarias y verificar que no tenga ningún error nos pasamos a realizar el diseño de la placa en la que utilizamos Proteus 8.13.



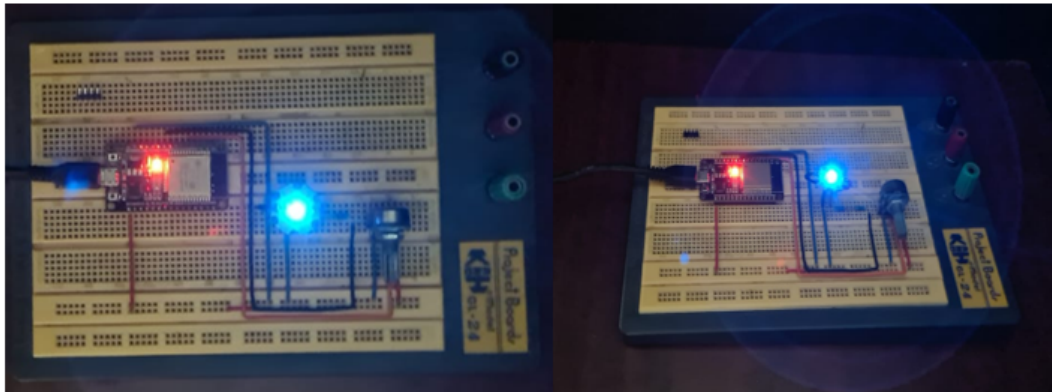


Figura 7. Circuito de pruebas.

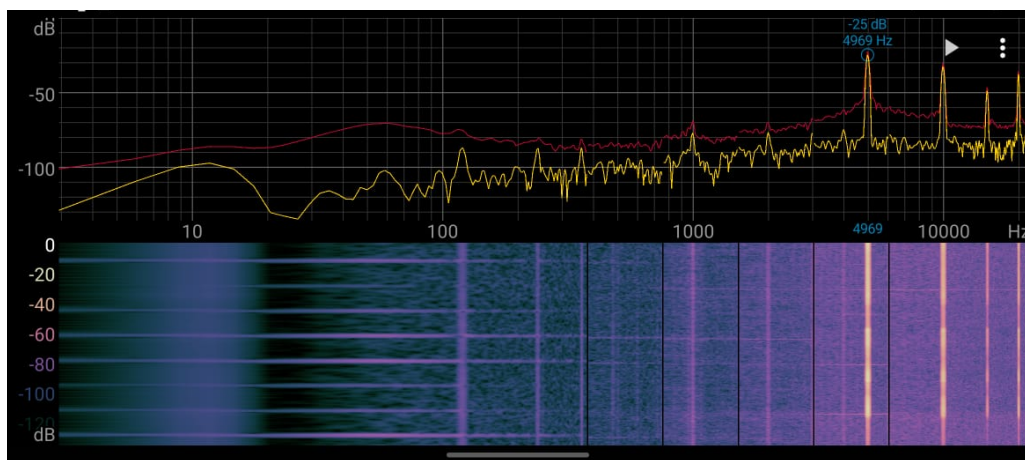


Figura 8. Con una frecuencia PWM de 5000.

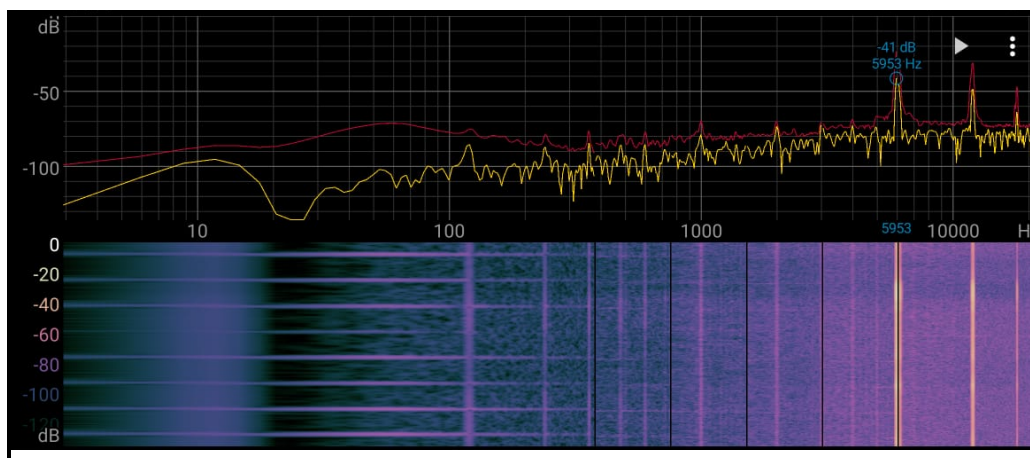


Figura 9. Con una frecuencia PWM de 6000.

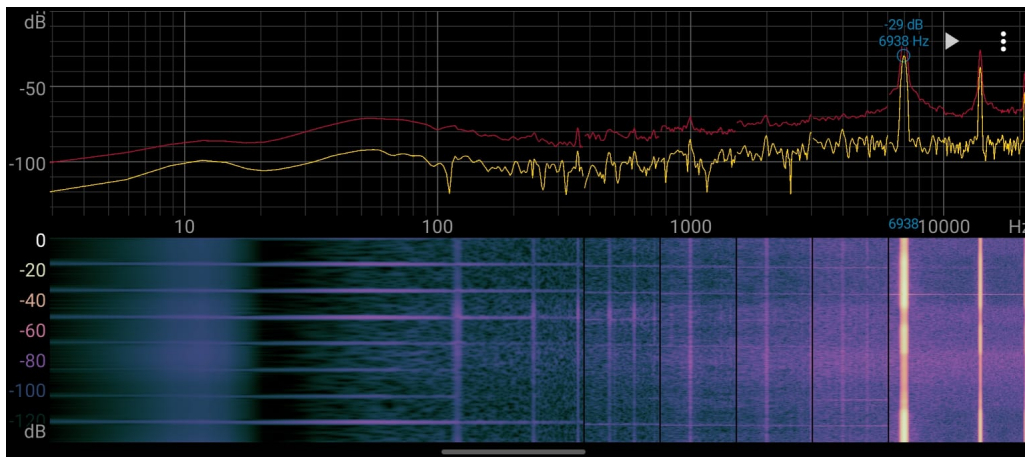


Figura 10. Con una frecuencia PWM de 7000.

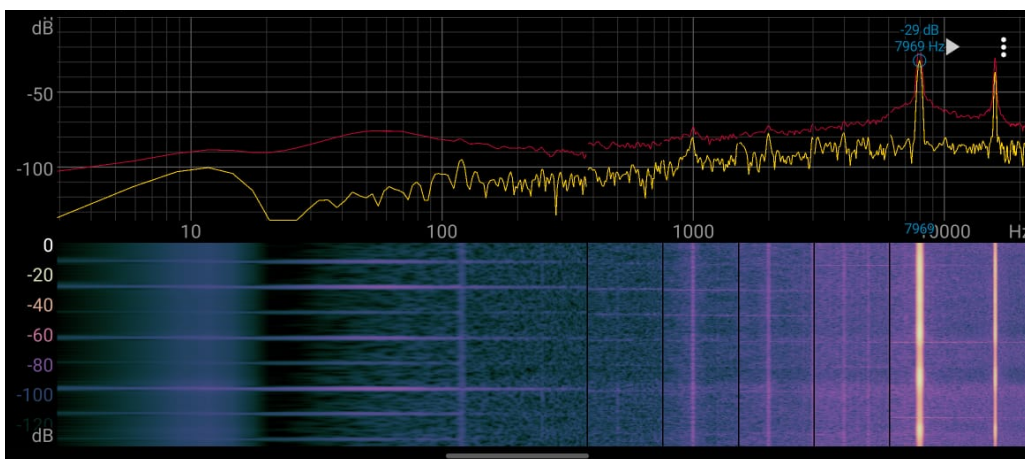


Figura 11. Con una frecuencia PWM de 8000.

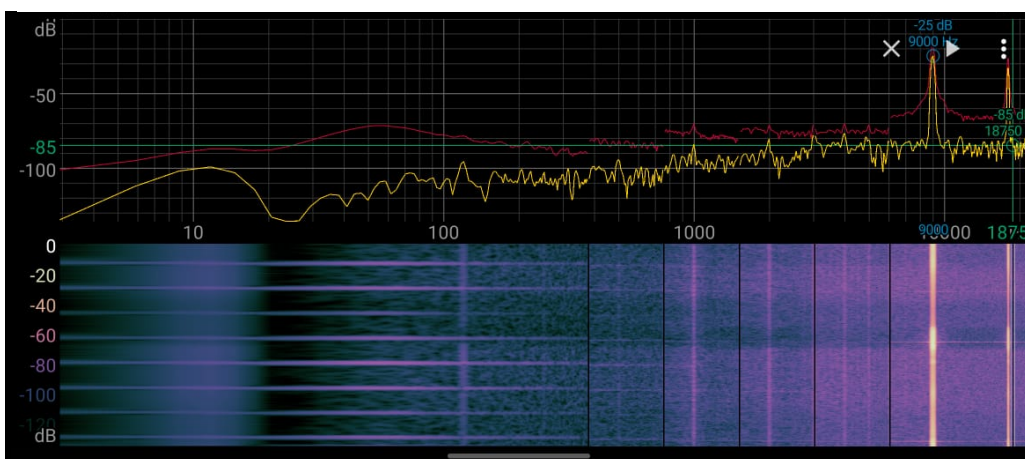


Figura 12. Con una frecuencia PWM de 9000.

## 2. Fabricación de PCB:

- 2.1. Primero debemos de verificar que nuestro circuito este en perfectas condiciones y realizar pruebas con estel, después nos dirigimos a realizar el diseño y simulación de la placa y para esto se estará utilizando Proteus 8.13 como se ilustra en la Figura 13; antes de guárdalo generamos el archivo Gerber y se generan tres archivos que son: Top Copper, Bottom Copper y Dill.

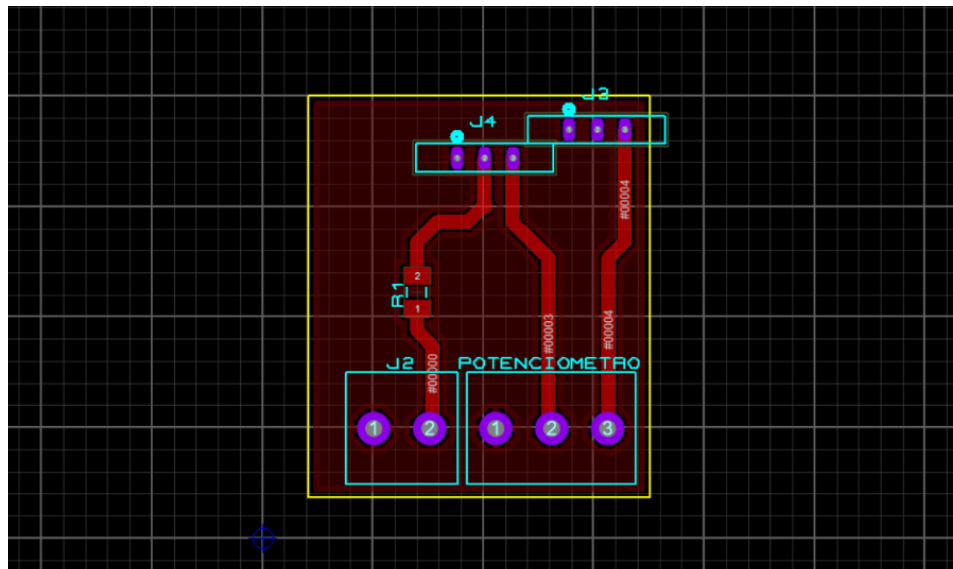


Figura 13. Diseño en Proteus 8.13.

- 2.2. Después de realizar el diseño y simulación en Proteus 8.13, se genera un archivo llamado Gerber y este se exporta a FlatCAM en el que se realiza el punto G. En FlatCAM se exporta el archivo Gerber Top Copper para realizar el cálculo de distancia de la broca y la placa con respecto al ángulo de la fresa y el diámetro de la punta, después abrimos el de Drill para las perforaciones y por último abrimos nuevamente el Gerber Top Copper, pero en este caso es para realizar el corte de la PCB, como se ilustra en la Figura 14.

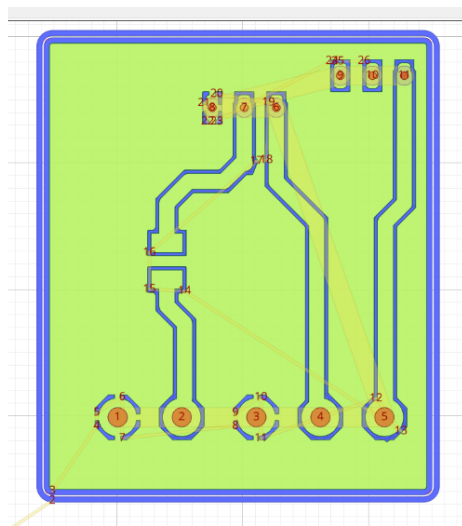


Figura 14. Se genera punto Gen FlatCAM.



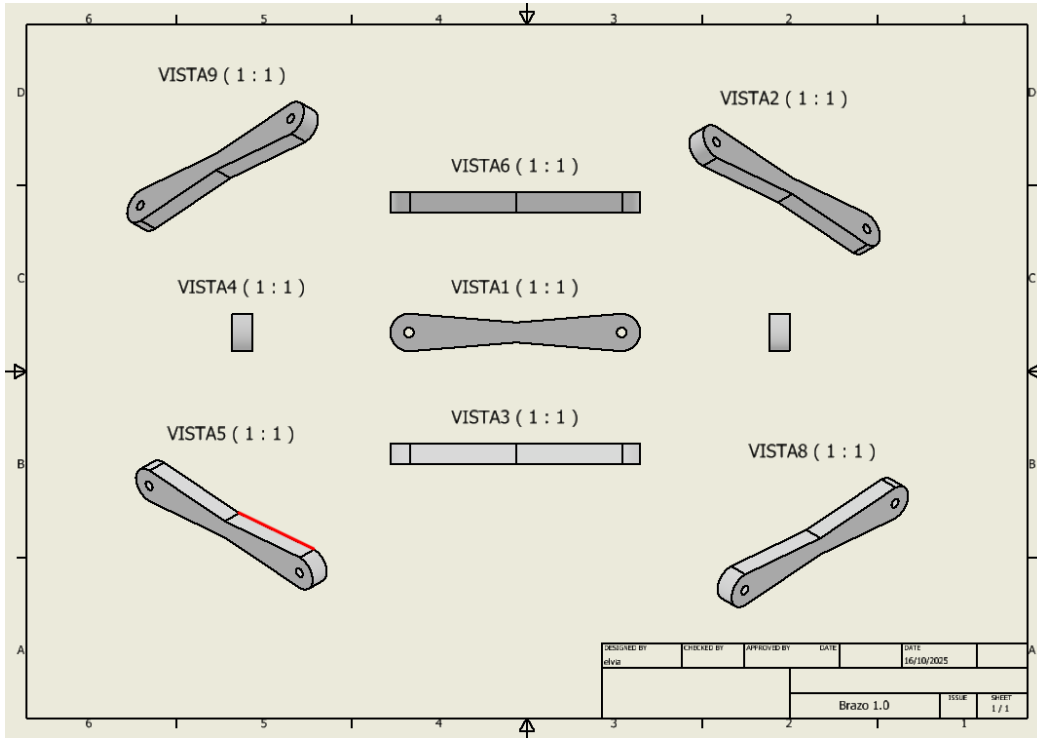


Figura 17. Brazo.

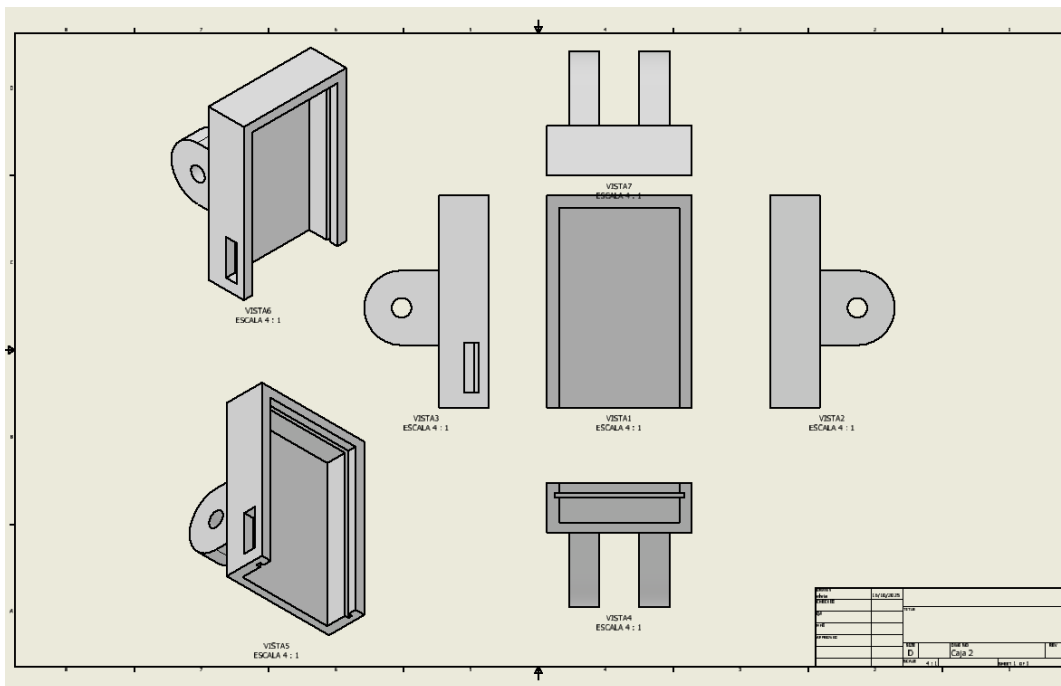


Figura 18. Caja2 donde va el sensor.

#### 4. Nuevas pruebas:

En este apartado se muestra algunas de las nuevas pruebas, para estas nuevas pruebas se modificó el código para que este pueda mandar una frecuencia PWM desde Python, para hacer la lectura de la frecuencia se hizo uso del mismo sensor que se utilizó en las primeras pruebas que se realizaron con el teléfono móvil, pero en este caso las lecturas las obtuvimos des una computadora, en la Figura 19 se ilustra el espectrograma que se genera con luz natural y en la Figura 20 se ilustra un espectrograma con una frecuencia  $\leq 600$  Hz.

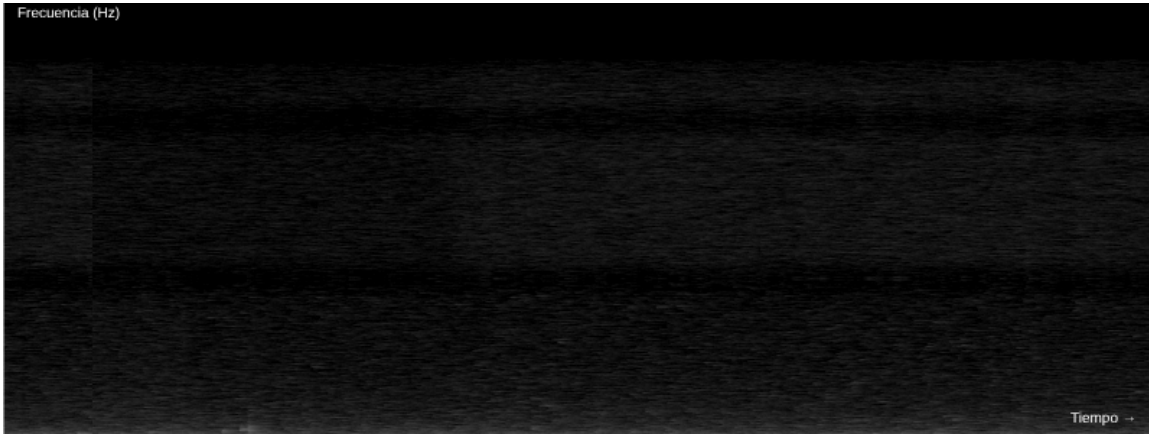


Figura 19. Espectrograma con luz natural.

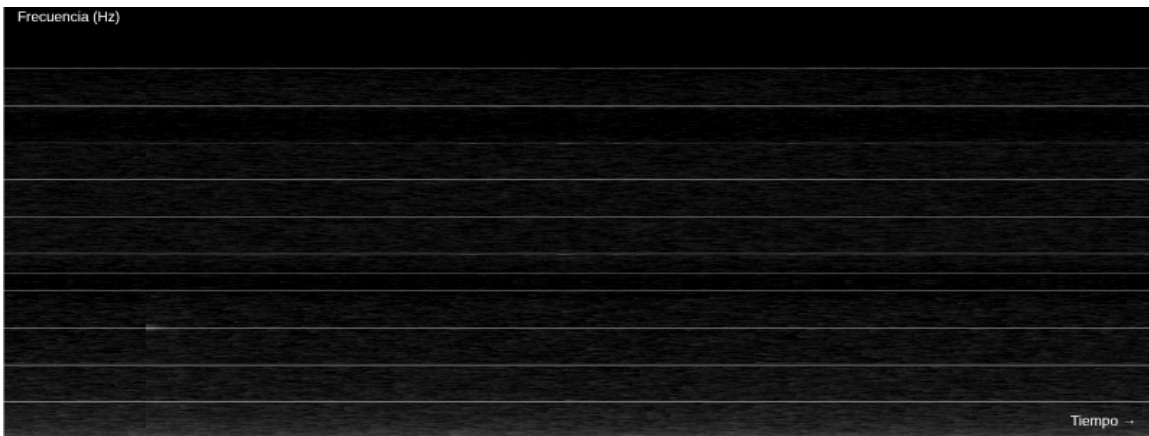


Figura 20. Espectrograma con frecuencia  $\leq 600$  Hz.



## Referencias

- Al Hasnawi, R., & Marghescu, I. (2024). A Survey of Vehicular VLC Methodologies. *Sensors*, <https://doi.org/10.3390/s24020598>.
- Augusto Vieira, M., Galvão, G., Vieira, M., Louro, P., Vestias, M., & Vieira, P. (2024). Enhancing Urban Intersection Efficiency: Visible Light Communication and Learning-Based Control for Traffic Signal Optimization and Vehicle Management. *Symmetry*. <https://doi.org/10.3390/sym16020240>.
- B. ELDEEB, H., M. SAIT, S., & UYSAL, M. (2021). Visible Light Communication for Connected Vehicles: How to Achieve the Omnidirectional Coverage? *IEEE Access*, Digital Object Identifier 10.1109/ACCESS.2021.3099772.
- Bercial, J. (28 de febrero de 2023). *¿Qué es el PWM y para qué sirve?* Geeknetic.es: <https://www.geeknetic.es/PWM/que-es-y-para-que-sirve>
- Delgado, A. (21 de noviembre de 2020). *¿Qué es Raspberry Pi y para qué sirve?* Geeknetic.es: <https://www.geeknetic.es/Raspberry-Pi/que-es-y-para-que-sirve>
- FLEETSTACK.IO, & HACKERS, E. (2025). *Distribución de pines GPIO de Raspberry Pi 4 Modelo B*. Obtenido de Distribución de pines: <https://pinout.ai/raspberry-pi-4-model-b>
- Gomez, A. (03 de mayo de 2020). *BeagleBone Black: PWM*. Hetpro Tutoriales. <https://hetpro-store.com/TUTORIALES/beaglebone-black-pwm/?srsltid=AfmBOooniZKrLLNXDzNvn70NpSjN0BFXL53b06NYjd70mjTvFHvAhrV>
- W, N. V. (20019). *Diseño de sistema de comunicación a través de la luz visible*. Cali - Colombia: repositorio.uniajc.edu.co.

