

Implementación de un micro espectrómetro para luz visible mediante un microcontrolador STM32

Implementation of a micro spectrometer for visible light using an STM32 microcontroller

Vidal Huichapan Perla María¹, Andrade Lucio José Amparo², Alvarado Méndez Edgar²

¹ Licenciatura en ingeniería en Comunicaciones y Electrónica.

² División de Ingenierías, Campus Irapuato Salamanca, Universidad de Guanajuato.
pm.vidalhuichapan@ugto.mx, andrade@ugto.mx, ealvarad@ugto.mx

Resumen

Este trabajo, presenta el desarrollo de un micro espectrómetro portátil para el análisis de luz visible, orientado a aplicaciones científicas y educativas. Para lograr este propósito, se utilizó el sensor espectral Hamamatsu C12880MA y un microcontrolador STM32. El sensor fue controlado mediante señales digitales (START, CLK y TRG), mientras que su salida analógica (VIDEO) se acondicionó con un divisor resistivo y se digitalizó usando el ADC del microcontrolador. Los resultados obtenidos, permitieron validar el comportamiento espectral del sistema con LEDs de distintos colores, identificando picos de intensidad que coinciden con las longitudes de onda características de cada fuente. En pruebas realizadas con películas de Hibiscus sabdariffa (jamaica), se observaron patrones de absorción consistentes con sus propiedades ópticas no lineales. El prototipo demostró la viabilidad de integrar sensores espectrales compactos con microcontroladores de propósito general, logrando un sistema funcional y accesible y con potencial de uso en entornos científicos y educativos para análisis espectral portátil y de costo reducido comparado con otros sistemas comerciales.

Abstract

This work presents the development of a portable micro-spectrometer for visible light analysis, designed for scientific and educational applications. To achieve this purpose, the Hamamatsu C12880MA spectral sensor and an STM32 microcontroller were used. The sensor was controlled using digital signals (START, CLK, and TRG), while its analog output (VIDEO) was conditioned with a resistive divider and digitized using the microcontroller's ADC. The results obtained validated the spectral behavior of the system using LEDs of different colors, identifying intensity peaks that match the characteristic wavelengths of each light source. Tests conducted with Hibiscus sabdariffa (hibiscus) films revealed absorption patterns consistent with their nonlinear optical properties. The prototype demonstrated the feasibility of integrating compact spectral sensors with general-purpose microcontrollers, resulting in a functional, accessible system with potential for use in scientific and educational settings for portable spectral analysis at a reduced cost compared to other commercial systems.

Palabras clave: Microespectrómetro, espectroscopía, luz visible, Hamamatsu C12880MA, STM32, análisis espectral, absorción óptica, interfaz gráfica.

Introducción

Los recientes avances en la miniaturización de dispositivos para espectroscopia han reducido enormemente sus costes y aumentado su disponibilidad para una amplia gama de usuarios y aplicaciones. La caracterización espectral de fuentes de luz y materiales es una herramienta fundamental en diversas disciplinas científicas y tecnológicas, incluyendo la química, la biología, la física, la ingeniería ambiental y la ciencia de materiales. La espectroscopía en el rango visible permite identificar y analizar la composición óptica de sustancias mediante la medición de la intensidad luminosa como función de la longitud de onda. Una inmensa variedad de objetos, desde muestras biológicas y médicas, pasando por alimentos y productos agrícolas, hasta materiales técnicos e industriales, pueden analizarse con el uso de la espectroscopia. El avance en la miniaturización de los espectrómetros permite un uso más amplio de esta potente técnica en aplicaciones prácticas debido a la reducción de costes y a su accesibilidad [1]. El sensor Hamamatsu C12880MA es un micro espectrómetro de alto rendimiento que opera en el rango visible (340-850 nm) y

ofrece una resolución de 288 píxeles, lo que lo convierte en una opción viable para aplicaciones portátiles de análisis óptico. En la figura 1, se muestra el arreglo completo del hardware electrónico empleado, consistente en una tarjeta STM32 NUCLEO-L476RG, un protoboard para montaje rápido (prototype shield) y el módulo de montaje para el micro espectrómetro C12880MA (Breakout board V2).

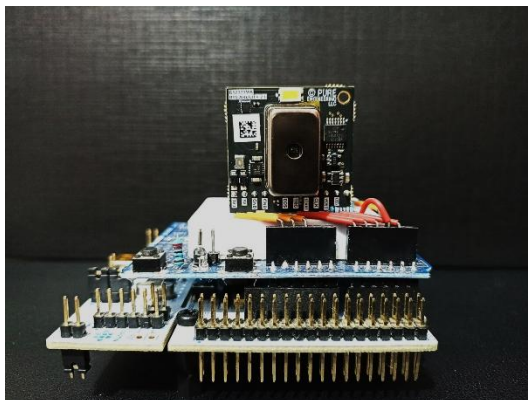


Figura 1. Prototipo del sistema espectral.

Marco teórico

La espectrometría es una técnica analítica que se utiliza en el ensayo cualitativo y cuantitativo de una sustancia química. Dependiendo de la técnica de ionización empleada, un espectrómetro puede clasificarse en varios tipos, algunos de los cuales incluyen el espectrómetro de emisión óptica (OES), el espectrómetro de rayos X de dispersión de energía (EDX), por fluorescencia de rayos X (XRF), el espectrómetro de plasma de acoplamiento inductivo (ICP) y el espectrómetro de ruptura inducida por láser (LIBS) [2].

El espectrómetro es un aparato capaz de analizar el espectro de frecuencias característico de un movimiento ondulatorio. Se aplica a diferentes instrumentos que operan sobre un amplio campo de longitudes de onda. Un espectrómetro óptico o espectroscopio es un instrumento que sirve para medir las propiedades de la luz en un determinado rango del espectro electromagnético. Existen distintos tipos, los cuales se mencionan a continuación:

- **Espectrómetro de masas:** Es un instrumento analítico que se utiliza para determinar la cantidad y tipo de las masas moleculares, o la relatividad de los isótopos y la composición química de las muestras. Su principio de funcionamiento se basa en medir la relación masa a carga eléctrica y la abundancia de iones en la fase gaseosa. Entre estos se encuentra el espectrómetro de tiempo de vuelo y el espectrómetro magnético.
- **Espectrómetro óptico:** Se emplea para medir las propiedades de la luz en un rango del espectro electromagnético. Generalmente la variable a medir es la intensidad de la luz, sin embargo, también se podría medir el estado de polarización. En óptica, el espectro separa la luz que le llega con respecto a la longitud de onda y registra el espectro en un detector. Entre estos se encuentran los espectrómetros ópticos de absorción y los espectrómetros ópticos de emisión [3].

Un microespectrómetro es un instrumento compacto utilizado para analizar la luz y obtener información sobre la composición y propiedades de una muestra. Se diferencia de los espectrómetros tradicionales por su tamaño reducido, lo que permite su uso en aplicaciones donde el espacio es limitado o se requiere portabilidad.

El microespectrómetro MEMS Hamamatsu C12880MA, el cual se muestra en la figura 2, ya montado sobre la placa *Breakout board V2* de la empresa GroupGets. Este, detecta longitudes de onda de luz (es decir, colores) y sus intensidades. Su respuesta espectral de 340 a 850 nanómetros se encuentra principalmente en el espectro visible, pero se extiende hasta el infrarrojo cercano con una resolución de 15 nm. El sensor de imagen CMOS interno y la óptica están sellados herméticamente para aumentar la resistencia a la humedad. Gracias a su pequeño tamaño, peso ligero y consumo de energía relativamente bajo, puede integrarse en el análisis de compuestos orgánicos y realizar comparaciones de color pasivas básicas (LED, pinturas, etc.) [4]].

Especificaciones del microespectrómetro MEMS Hamamatsu C12880MA (datos del fabricante):

- Respuesta espectral: 340 a 850 nm.
- Resolución: 15 nm.
- Píxeles: 288.
- VCC mínimo: 4.75 V.
- Consumo de energía: 30 mW.
- Embalaje: Sellado herméticamente para alta resistencia a la humedad.
- Tamaño: 20.1 x 12.5 x 10.1 mm.
- Peso: 5g.



Figura 2. Hamamatsu C12880MA.

Además de un chip sensor de imagen CMOS integrado con una rendija óptica mediante tecnología de grabado, esta serie de micro espectrómetros emplea una rejilla de difracción cóncava reflectante formada por nanoimpresión [5]. En la figura 3, se muestra un esquema de la estructura interna de este micro espectrómetro.

► Estructura

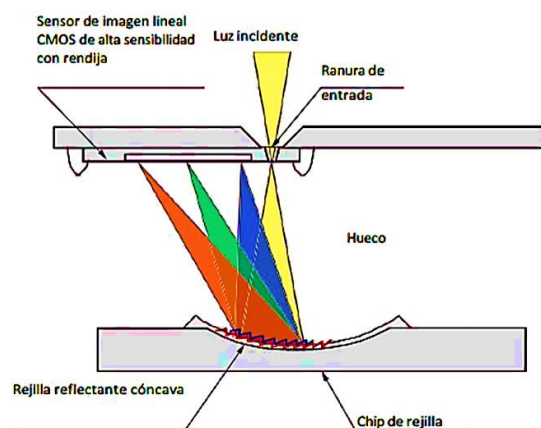


Figura 3. Estructura Hamamatsu C12880MA.

A continuación, se muestra el esquema del sistema utilizado para el análisis espectral (figura 4):

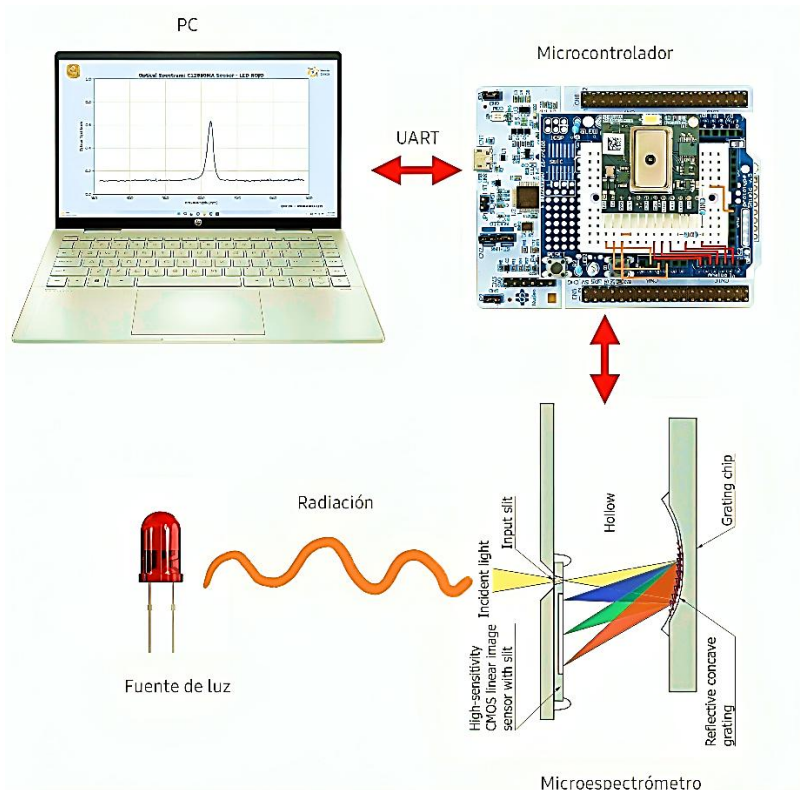


Figura 4. Esquema del sistema de medición espectral.

Materiales y metodología

Materiales

- ◆ Microcontrolador STM32 NUCLEO-L476RG.
- ◆ Sensor espectral Hamamatsu C12880MA.
- ◆ Módulo de montaje para el micro espectrómetro C12880MA (Breakout board V2).
- ◆ Protoboard para montaje rápido (prototype shield).
- ◆ Resistencias.
- ◆ Cable de alimentación USB.
- ◆ Estructura física: Caja de madera color negro y tubo guía impreso en filamento tipo PLA color negro.
- ◆ Led RGB y Leds de colores para pruebas.
- ◆ Películas de Hibiscus sabdariffa (jamaica).
- ◆ Computadora con Python 3.

Metodología

1. **Conexión y montaje del sensor:** Se realizaron las conexiones correspondientes del sensor C12880MA al protoboard haciendo uso de cables de conexión y 2 resistencias de 12 k Ω como divisor de voltaje para protección del microcontrolador. Posteriormente se colocó este protoboard a la tarjeta del microcontrolador STM32 como se muestra en la figura 5.

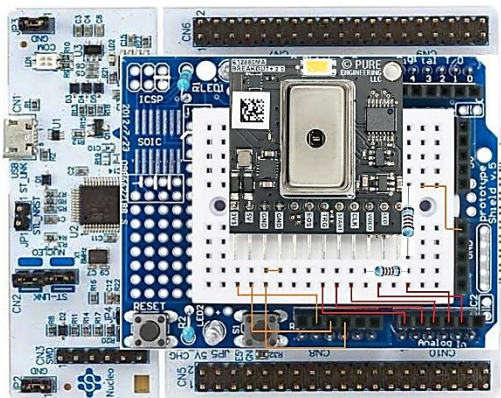


Figura 5. Diagrama de conexiones.

2. **Diseño físico:** Para garantizar un entorno óptico controlado, se fabricó una estructura cerrada con materiales oscuros (madera y PLA negro) para proteger al sensor de luz externa y dirigir la entrada de luz incidente hacia el chip mediante un tubo guía (figura 6).



Figura 6. Estructura física con aislamiento óptico.

3. **Desarrollo del firmware:** Se programó el STM32 para generar señales de control necesarias y sincronizar la adquisición de los 288 píxeles. El firmware también se encargó de enviar los datos vía UART a la computadora empleando las respectivas señales de control (CLK, START, TRG) y de leer los datos del sensor a través del protocolo SPI a la velocidad y temporización exactas que requiere el C12880MA.
4. **Desarrollo del software de análisis:** Se implementó una aplicación en Python para leer los datos espectrales, graficarlos en tiempo real y permitir su análisis. Se incluyó el uso de los coeficientes de calibración del sensor para convertir el índice de canal en longitud de onda.

En este punto, se debe considerar que el factor de conversión de señal a longitud de onda es único para cada dispositivo. Por lo cual, es importante conocer las constantes de calibración del sensor basándonos en su número de serie. La medición de los píxeles se convierte en longitud de onda mediante la Ecuación 1:

$$Wavelength (nm) = A_0 + B_1 * pix + B_2 * pix^2 + B_3 * pix^3 + B_4 * pix^4 + B_5 * pix^5 \quad (1)$$

Estos coeficientes definen una función matemática que mapea el número de píxel (de 0 a 1023) a una longitud de onda en nanómetros (nm). La necesidad de un polinomio de orden superior (en lugar de una simple línea recta $y = mx + b$) se debe precisamente a la no linealidad del sistema óptico. En este caso, los coeficientes referidos son directamente obtenidos de la hoja técnica del dispositivo con número de serie 22K05146 [6]:

NoChannels = 288

A0 = 3.139266492E+02

B1 = 2.703362591E+00

B2 = -1.290759207E-03

B3 = -6.030557855E-06

B4 = 1.474506345E-09

B5 = 1.767287078E-11

Con estos coeficientes se podrá convertir los datos que se generan en el micro espectrómetro en los espectros calibrados mediante el software desarrollado en python 3, asegurando con esto una linealidad ajustada mediante este polinomio de quinto orden. En general, la linealidad observada es muy buena dentro de su rango dinámico útil. De acuerdo con la hoja de datos del micro espectrómetro, la relación señal/ruido (SNR) típica es de 500:1, y el rango dinámico es de aproximadamente 1500:1. Esto significa que la respuesta lineal se mantiene desde el nivel de ruido hasta cerca de la saturación.

5. Se realizaron **pruebas** con distintos LEDs para validar el comportamiento del sistema y pruebas adicionales con películas de jamaica para observar patrones de absorción característicos de algunos compuestos orgánicos.

Durante las mediciones espectrales se utilizó el sistema completo en un entorno controlado, con una estructura diseñada para aislar la luz ambiental y evitar interferencias externas. Sin embargo, debido a la alta sensibilidad del espectrómetro, se observaron saturaciones en la señal incluso con dicha protección. Para mitigar este efecto, fue necesario ajustar la distancia entre la fuente de luz y el tubo guía que dirige la luz al espectrómetro. En el caso del LED RGB, la distancia óptima fue de aproximadamente 2 a 3 cm, mientras que para los LEDs individuales de distintos colores se requirió una separación de 5 a 8 cm, dependiendo de la intensidad y tonalidad emitida por cada fuente. En las figuras incluidas se muestran algunos de los montajes utilizados durante las mediciones, así como las condiciones bajo las cuales se registraron los espectros.

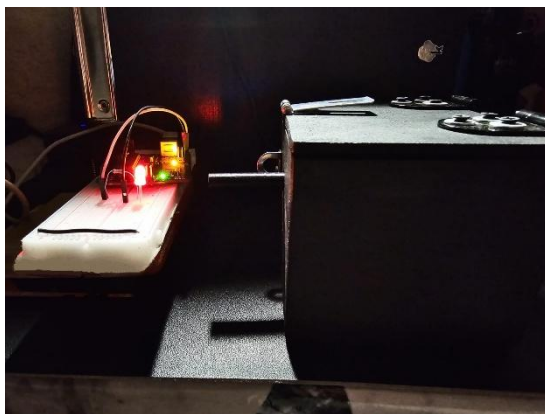


Figura 7. Montaje experimental con caja aislante y fuente LED.

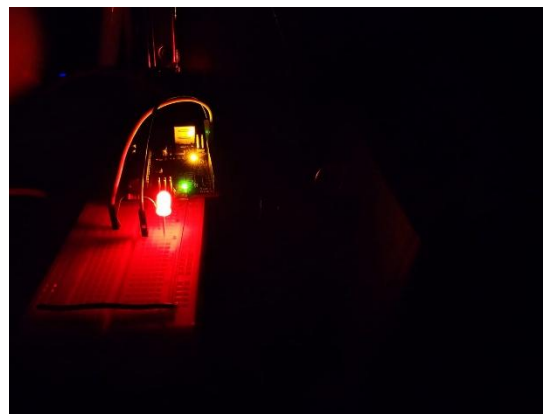


Figura 8. LED encendido durante pruebas en cuarto oscuro.

Resultados y discusión

Los resultados obtenidos mediante del sistema permitieron visualizar el espectro óptico de diversas fuentes de luz y muestras filtradas. Las mediciones se realizaron utilizando un LED RGB controlado por Arduino, haciendo uso de PWM para generar diferentes combinaciones de colores del espectro visible a analizar. Asimismo, se emplearon LEDs monocromáticos para obtener comparativas directas, obteniendo los siguientes resultados:

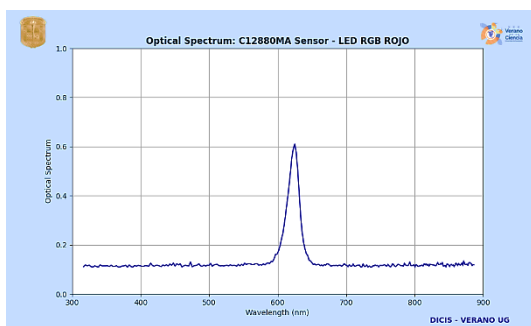


Figura 9. Espectro LED RGB ROJO.

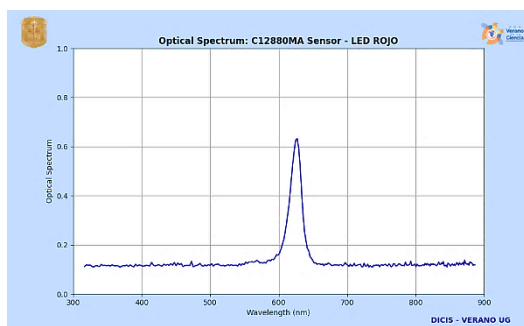


Figura 10. Espectro LED ROJO.

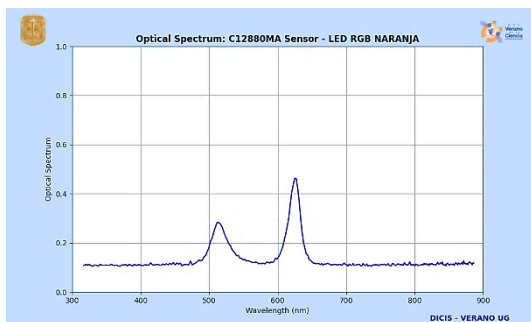


Figura 11. Espectro LED RGB NARANJA.

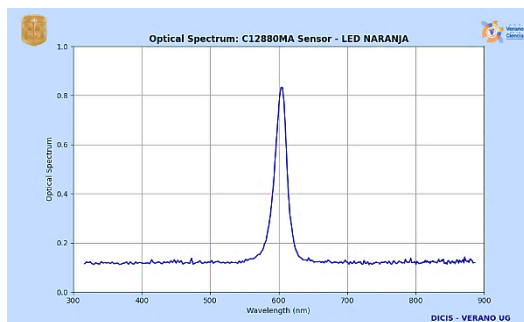


Figura 12. Espectro LED NARANJA.

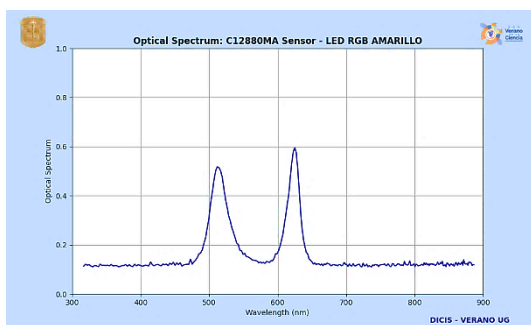


Figura 13. Espectro LED RGB AMARILLO.

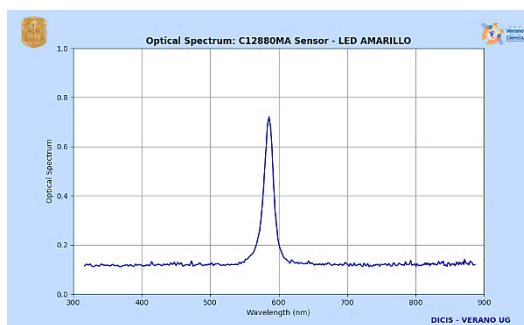


Figura 14. Espectro LED AMARILLO.

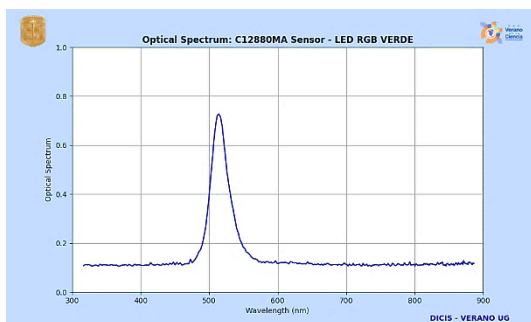


Figura 15. Espectro LED RGB VERDE.

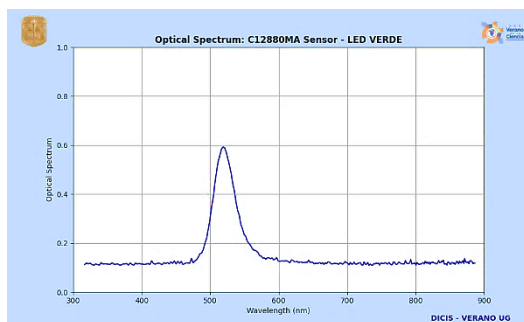


Figura 16. Espectro LED VERDE.

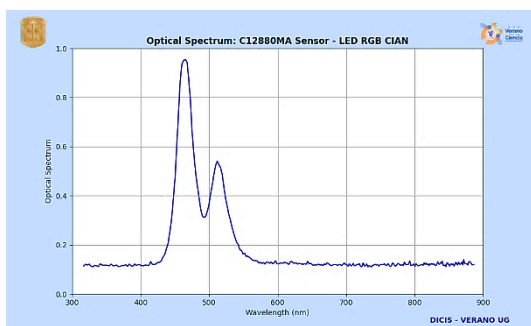


Figura 17. Espectro LED RGB CIAN.

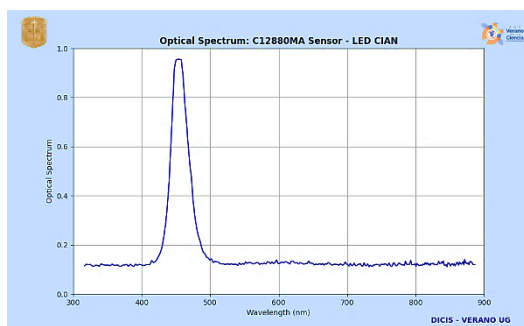


Figura 18. Espectro LED CIAN.

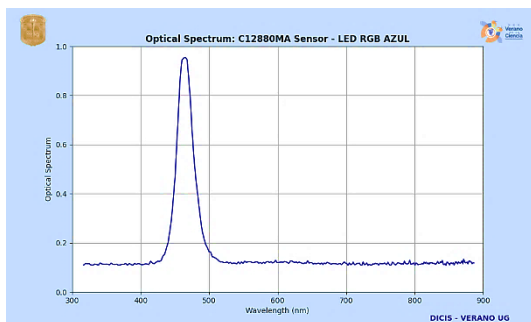


Figura 19. Espectro LED RGB AZUL.

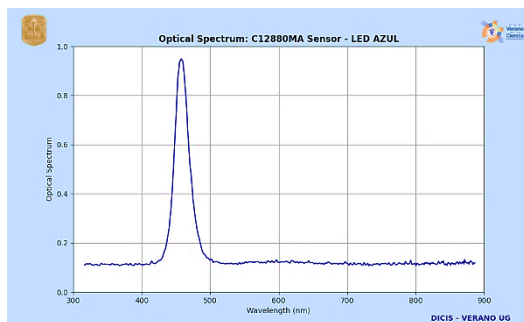


Figura 20. Espectro LED AZUL.

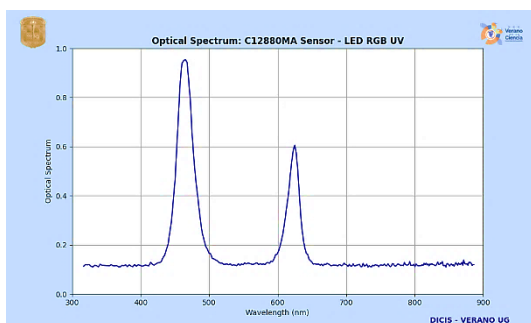


Figura 21. Espectro LED RGB UV.

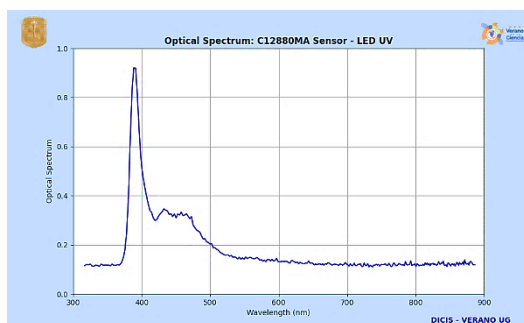


Figura 22. Espectro LED UV.

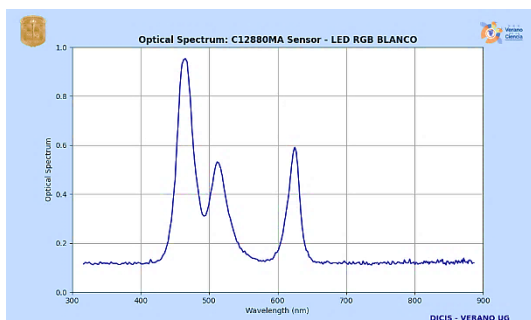


Figura 23. Espectro LED RGB BLANCO.

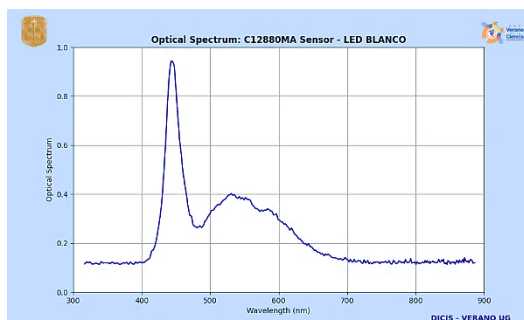


Figura 24. Espectro LED BLANCO.

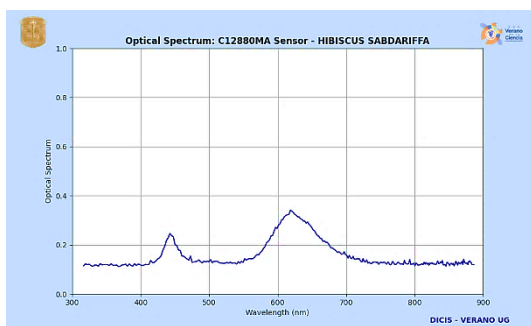


Figura 25. Espectro HIBISCUS SABDARIFFA (grosor delgado).

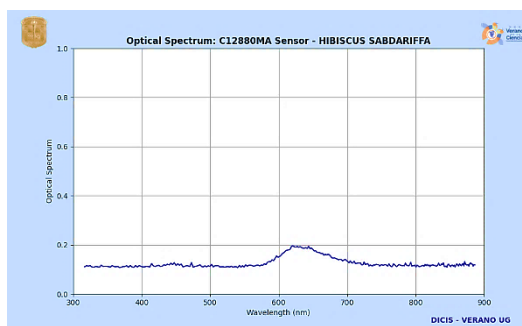


Figura 26. Espectro HIBISCUS SABDARIFFA (mayor grosor).

Como podemos observar, el LED RGB mostró un comportamiento adecuado al generar mezclas de tonos como amarillo, cian, violeta y blanco. El microespectrómetro fue capaz de captar la presencia de estos colores, evidenciada por la aparición de múltiples picos que corresponden a las longitudes de onda emitidas por las combinaciones de los tres LEDs base. En contraste, los LEDs monocromáticos produjeron un solo pico claramente definido, correspondiente al color emitido, confirmando que el sistema es capaz de identificar eficazmente fuentes de luz en el rango visible.

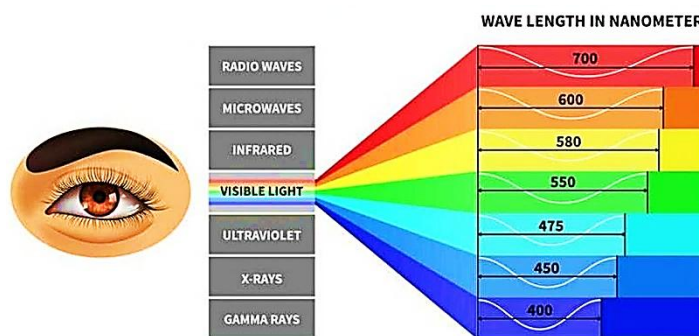


Figura 27. Longitudes de onda del espectro visible.

Posteriormente se realizaron pruebas utilizando películas delgadas de extracto de Hibiscus Sabdariffa (jamaica) como filtros ópticos, haciendo uso de un LED blanco como fuente emisora. La Figura 25 muestra un espectro atenuado, donde se observa una reducción de la intensidad en el intervalo de 450 a 650 nm aproximadamente, lo cual es indicativo de absorción selectiva por parte de la muestra. Este comportamiento se atribuye a la presencia de antocianinas y flavonoides, compuestos fenólicos ampliamente reconocidos por su actividad óptica en el rango visible.

Cuando se aumentó la densidad del filtro superponiendo varias capas de la película, el espectro se atenuó casi por completo como se muestra en la Figura 26 evidenciando un mayor efecto de filtrado. Esta absorción intensiva valida la sensibilidad del sistema y su capacidad para detectar variaciones en la transmitancia óptica de medios absorbentes.

Estos resultados validan que el sistema de adquisición es funcional y que el sensor C12880MA es capaz de caracterizar diferencias espectrales con buena resolución. Además, se confirma que la jamaica puede ser utilizada como un medio de prueba para estudios ópticos, dada su capacidad de absorción en el espectro visible.

Conclusiones

El proyecto demostró que es posible implementar un microespectrómetro funcional, de costo reducido y con componentes accesibles, capaz de adquirir y analizar espectros de luz visible en tiempo real. La combinación del sensor Hamamatsu C12880MA con el microcontrolador STM32 permitió obtener mediciones espectrales confiables, y la infraestructura física desarrollada fue eficaz para minimizar interferencias lumínicas externas, mejorando la calidad de los datos. Las pruebas experimentales, tanto con LEDs como con materiales orgánicos, este caso, las películas de Hibiscus sabdariffa (jamaica), validaron el funcionamiento del sistema y su potencial para distintas aplicaciones.

Para efectos de comparación entre el sistema desarrollado y uno comercial, consideramos el espectrómetro Ocean Insight Flame® de la compañía Ocean Optics [7]:

El micro espectrómetro Hamamatsu C12880MA: Es un módulo OEM (Original Equipment Manufacturer). Es un componente fundamentalmente diminuto diseñado para ser integrado en productos de mayor volumen, como dispositivos portátiles, equipos médicos o sistemas de control industrial. Su fortaleza es el tamaño, el bajo consumo y el costo por unidad en grandes volúmenes.

El Ocean Insight Flame: Es un espectrómetro compacto. Aunque es pequeño, es un instrumento completo y listo para usar, diseñado para laboratorios, I+D, prototipado rápido y sistemas de integración de bajo a mediano volumen. Su fortaleza es la flexibilidad de configuración, el ecosistema de software y accesorios, y la facilidad de uso.

Para resumir algunas características importantes de cada uno, se presenta la siguiente tabla comparativa:

Característica	Hamamatsu C12880MA	Ocean Insight Flame
Filosofía	Módulo OEM de integración	Espectrómetro compacto de instrumentación
Dimensiones	20.1 x 12.5 x 10.0 mm (tamaño de una moneda)	89.1 x 63.3 x 34.4 mm (tamaño de una baraja de cartas)
Detector	CMOS lineal de 1024 píxeles	CCD lineal de 2048 o 3648 píxeles
Rango espectral	340 - 850 nm (fijo)	190 - 1100 nm (depende de la configuración de la red de difracción)
Resolución (FWHM)	~12 nm (típico)	0.1 - 4.0 nm (configurable por la rendija y la red)
Interfaz	I ² C / SPI (requiere un microcontrolador)	USB (plug-and-play)
Software	Se proporcionan controladores. El usuario debe desarrollar el software.	Ecosistema completo (OceanView, SpectraSuite) y SDK.
Costo (unidad)	~\$100 - \$300 USD (depende del volumen y distribuidor)	~\$1,800 - \$3,500 USD (depende de la configuración)
Público Objetivo	Ingenieros OEM, diseñadores de productos	Científicos, investigadores, ingenieros de I+D

En cuanto al costo de la tarjeta STM32 empleada, se puede adquirir en el sitio DigiKey México por \$280 M.N. El protoboard para montaje tiene un costo de \$50.00 M.N. en AliExpress y el módulo de montaje para el micro espectrómetro (Breakout Board V2) cuesta \$64.99 USD (~\$1,170.00 M.N.). Considerando, lo anterior, el costo total del hardware electrónico es de aproximadamente: \$ 6,000.00 M.N.

Entre las mejoras propuestas para futuras versiones del prototipo se encuentran:

- Desarrollo e integración de un atenuador óptico variable, que permita controlar electrónicamente la cantidad de luz que incide sobre el sensor, facilitando el análisis de muestras con diferentes niveles de transmitancia o reflectancia, evitando la saturación del sensor y aumentando la dinámica del sistema.
- Incorporación de un fotodiodo de referencia, que permitiría compensar variaciones en la intensidad de la fuente de luz y mejorar la estabilidad de las mediciones.
- Automatización del proceso de calibración, incluyendo rutinas para identificación de picos de referencia, normalización espectral y corrección de línea base.
- Mejoras en la óptica del sistema, como el uso de lentes colimadoras, filtros ópticos y difusores, para optimizar la resolución espectral y la eficiencia de acoplamiento de luz.

- Uso de fuentes de luz controladas electrónicamente con espectro continuo y estable, como LEDs blancos calibrados o lámparas halógenas miniatura.
- Desarrollo de una versión portátil con comunicación inalámbrica (WiFi o Bluetooth) y pantalla embebida, que permita llevar el análisis espectral a campo sin requerir una PC externa.
- Integración de sensores ambientales complementarios, como temperatura y humedad, para estudios de absorción dependiente del entorno, especialmente en muestras orgánicas o biológicas.

Este trabajo sienta las bases para futuros desarrollos en espectroscopía compacta y abre el camino hacia sistemas portátiles de análisis espectral accesibles para instituciones educativas, algunos laboratorios o monitoreo ambiental en campo. Su diseño modular permite extender sus capacidades hacia aplicaciones más complejas como la detección de contaminantes, caracterización de pigmentos naturales o estudios ópticos en tiempo real.

Agradecimientos

La realización de este proyecto fue posible gracias al apoyo de diversas instancias y personas. Se agradece a la Dirección de Apoyo a la Investigación y al Posgrado de la Universidad de Guanajuato, así como a la División de Ingenierías del Campus Irapuato-Salamanca, por facilitar los recursos técnicos y la infraestructura necesaria para el desarrollo del trabajo de investigación. De manera especial, se reconoce y agradece la guía, disposición y acompañamiento del Dr. Andrade Lucio José Amparo y del Dr. Alvarado Méndez Edgar, cuyo respaldo académico fue fundamental durante el proceso de investigación.

Referencias

- [1] Patryk Sokolowski. (2021). Design and implementation of the driver system for a Hamamatsu C12880MA microspectrometer. *Photonics Letters of Poland*, 13(2), 34-36.
<http://dx.doi.org/10.4302/plp.v13i2.1103>
- [2] Vazquez, J. (2020). Espectrometría; mecanismo, tipos y usos.
<https://espectrometria.com.mx/espectrometria-mecanismo-tipos-y-usos/>
- [3] Wikipedia. (2025). Espectrómetro. https://es.wikipedia.org/wiki/Espectr%C3%B3metro#cite_note-1
- [4] GroupGets. (2017). Hamamatsu C12880MA MEMS u-Spectrometer.
<https://groupgets.com/products/hamamatsu-c12880ma-mems-u-spectrometer>
- [5] HAMAMATSU. (2025). Mini-spectrometers. Micro series. Mini-spectrometers C12880MA, C16767MA
- [6] Hamamatsu photonics K.K. (2023). FINAL INSPECTION SHEET. Cal-Data-66.pdf
- [7] Ocean Optics. (2015). Flame Miniature Spectrometer, User Manual.
<https://www.oceanoptics.com/wp-content/uploads/2024/12/Flame-User-Manual.pdf>