

Espectrómetro Hamamatsu C12880MA

Fabrizio Sotelo Cárdenas

Pontifica Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Chile

Ignacio Sepúlvedada Cepeda

Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Chile

Resumen—El acceso a la espectrometría de alta precisión se ha limitado históricamente por el gran tamaño y el costo de los equipos convencionales, impulsando la necesidad de soluciones portátiles para el análisis portátil. Este trabajo se centra en la implementación y caracterización de un sistema de espectrometría basado en el espectrómetro Hamamatsu C12880MA. Se diseñó y puso en marcha una metodología de adquisición de datos utilizando la plataforma Arduino para el control y la transferencia serial de los 288 píxeles del sensor, logrando una cadencia de muestreo de $\approx 20,5$ Hz. El procesamiento de la señal en Python incluyó la corrección esencial del Offset para aislar la señal lumínica de la componente de ruido. Los resultados validaron la alta reproducibilidad del sistema, cuantificada por un error relativo de 0,14 % bajo condiciones controladas. Adicionalmente, el sistema demostró ser robusto en entornos no controlados (Luz Diurna) al conservar la fidelidad de la firma espectral a pesar de las fluctuaciones de intensidad. Estos hallazgos confirman que el C12880MA ofrece un rendimiento óptimo, posicionándolo como una solución viable y de bajo costo para la integración en dispositivos de medición portátiles.

Palabras Claves—Sensor, Conversor Análogo-Digital , Espectro, difracción óptica.

I. INTRODUCCIÓN

La espectrometría es una técnica analítica fundamental, empleada en áreas tan diversas como el control de calidad, el análisis químico y la medición ambiental. Históricamente, el acceso a mediciones espectrales de alta precisión ha estado limitado por el tamaño y el costo de los dispositivos, ya que los espectrómetros convencionales son equipos voluminosos que requieren que las muestras sean trasladadas a laboratorios especializados para su análisis.

Esta limitación ha impulsado un rápido y creciente interés en el desarrollo de dispositivos portátiles capaces de realizar análisis en tiempo real, eliminando la necesidad de infraestructura de laboratorio y facilitando la monitorización continua.

Hamamatsu Photonics ha logrado un avance significativo con el desarrollo de la serie de mini-espectrómetros ultra compactos. Estos módulos combinan un sistema óptico (que incluye una rejilla de difracción) y un sensor de imagen lineal en un factor de forma reducido y con bajo costo, haciéndolos ideales para su integración en equipos móviles de medición.

El presente trabajo se enfoca en la implementación y caracterización del mini-espectrómetro C12880MA, un dispositivo ultracompacto con un rangopectral de 340 nm a 850 nm, que lo posiciona como una herramienta versátil para el análisis óptico. El objetivo principal de esta investigación es detallar el proceso de adquisición de datos serial y establecer una metodología robusta para el procesamiento de la señal.

Específicamente, se aborda la corrección del ruido oscuro y el offset del circuito, un paso crítico para asegurar la precisión de las mediciones de intensidad.

II. FUNDAMENTOS DEL ESPECTRÓMETRO

A. Diseño Óptico

El Hamamatsu C12880MA es un espectrómetro tipo polícromador compacto desarrollado mediante la integración de la tecnología de sensores de imagen con la tecnología MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems). Este enfoque ha permitido reducir drásticamente el tamaño y el costo del dispositivo manteniendo una funcionalidad espectral robusta. El módulo opera bajo un principio óptico bien definido:

1. Rejilla de Difracción: La luz entrante atraviesa una rendija y es dirigida hacia una rejilla de difracción. La rejilla dispersa la luz en sus longitudes de onda constituyentes.
2. Sensor de Imagen Lineal: La luz dispersada es enfocada por un sistema óptico interno y proyectada directamente sobre un sensor de imagen lineal CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor).
3. Conversión Espectral: El sensor está compuesto por 288 píxeles (o elementos fotosensibles), cada uno de los cuales está calibrado para recibir un rango muy estrecho de longitudes de onda, abarcando colectivamente el rango espectral del dispositivo.

De esta manera, la intensidad de la señal medida en cada píxel corresponde directamente a la intensidad lumínica a su longitud de onda asignada, permitiendo la adquisición simultánea del espectro completo.

B. Proceso de Digitalización y Corrección de Señal

La señal eléctrica generada por cada píxel del sensor es sometida a un proceso interno de amplificación y digitalización. Esta conversión resulta en un valor que típicamente se mide en Cuentas Analógicas a Digitales

Sin embargo, el valor ADC obtenido no es puramente la señal lumínica, sino la suma de múltiples componentes:

$$ADC_{Total} = Señal_{Luz} + Offset_{Circuito} + Ruido_{Oscuro}$$

Donde el $Ruido_{Oscuro}$ o *Dark Output* corresponde a la señal generada por el propio sensor debido a la acumulación de ruido térmico, incluso en ausencia total de luz.

En el caso del $Offset_{Circuito}$ es necesario una corrección mediante software.

III. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL Y DESARROLLO DEL SISTEMA

La confiabilidad de los datos espectrales depende de una correcta interpretación de la información y una calibración adecuada. En esta sección se describe la configuración y puesta en marcha de nuestro sistema de espectrometría, que convierte el espectrómetro C12880MA en una herramienta de medición funcional. El sistema se basa en la recolección de datos mediante la plataforma Arduino para controlar y leer los 288 sensores internos del módulo. Los valores de intensidad son transmitidos al computador a través de comunicación serial. Finalmente, se analizan los datos en Python, el cual recibe esta información, que mediante procesos de calibración genera la visualización y el registro documental del espectro.

A. Adquisición de Datos y Tiempo de Muestreo

La lectura de datos comienza con el Arduino, que actúa como circuito driver, controlando la temporización del C12880MA. Para capturar un espectro completo, el Arduino ejecuta una secuencia que primero establece el tiempo de integración (T_s), durante el cual los 288 píxeles acumulan luz. Posteriormente, el Arduino escanea y lee secuencialmente la señal de cada uno de los 288 píxeles utilizando la función `analogRead()`.

El tiempo de captura de cada espectro (T_c) en este sistema es de aproximadamente 48,8 milisegundos (48,8 ms). Este tiempo está limitado principalmente por la velocidad de lectura del convertidor ADC del Arduino y la latencia del proceso de transmisión de la cadena de datos a través del puerto serial a 115200 baudios.

Esta cadencia resulta en una capacidad de adquisición de aproximadamente 20,5 espectros por segundo (20,5 Hz). Aunque esta tasa de adquisición se considera lenta en comparación con soluciones comerciales de alta velocidad que utilizan interfaces USB 2,0 y 16 bits, es más que suficiente para los objetivos de este informe, que se centran en la caracterización estática y la validación de la estabilidad espectral.

B. Proceso de Digitalización y Corrección de Señal

Para obtener mediciones precisas, es indispensable aplicar una corrección mediante software. La metodología implementada en este trabajo utiliza la sustracción de un valor de offset constante (OFFSET = 127) a la intensidad bruta, asegurando que la intensidad corregida se mantenga siempre en o por encima de cero, lo que garantiza que solo la señal óptica sea representada en el espectro.

C. Diseño Experimental

Para validar la reproducibilidad y versatilidad del mini-espectrómetro C12880MA, se realizaron dos series de experimentos. El primer experimento consistió en adquirir múltiples espectros de una fuente de Láser Verde, la cual proporciona una señal monocromática de alta intensidad y estabilidad. Estas mediciones se realizaron en un ambiente controlado (caja de zapatos) para evaluar la precisión intrínseca y la estabilidad del sensor. El segundo experimento expuso el sensor

a Luz Diurna, una fuente de banda ancha, sin un ambiente óptico controlado. Este escenario fue diseñado para simular una medición de campo, permitiendo evaluar la robustez del sistema ante fluctuaciones de la fuente y la influencia de factores externos. Los resultados de ambos conjuntos de datos fueron posteriormente analizados mediante la superposición de espectros.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Esta sección presenta el análisis de los espectros adquiridos para evaluar el desempeño del espectrómetro C12880MA, enfocándose en su reproducibilidad y versatilidad ante diversas condiciones de luz. El objetivo es validar que el rendimiento del dispositivo es óptimo considerando su tamaño compacto y su bajo costo.

1) *Análisis del Espectro Monocromático (Láser Verde):* El primer experimento, realizado con un láser verde bajo condiciones controladas, demostró la precisión inherente del sistema. Al superponer nueve mediciones consecutivas (Figura 1). Se observó que las líneas coincidieron casi perfectamente, con una dispersión mínima. Este resultado es una validación directa de la estabilidad del sensor.

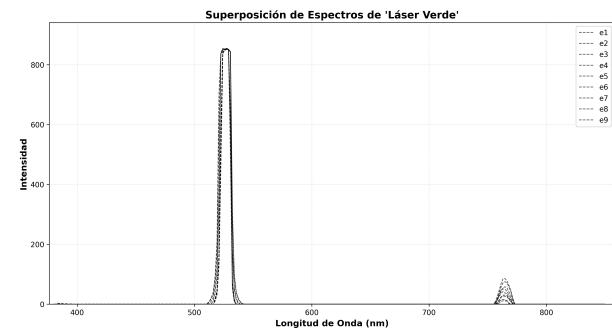


Figura 1. Superposición de Espectros usando Láser Verde

Esta alta repetibilidad fue cuantificada mediante el análisis estadístico, el cual arrojó un Error Relativo (Coeficiente de Variación) excepcionalmente bajo, de solo 0,14 % en el peak de intensidad máxima (Figura 2). Este error bajo cero confirma que, en un ambiente estable, el sistema ofrece mediciones de alta fidelidad.

2) *Espectro de Banda Ancha (Luz Diurna):* El segundo experimento expuso el sensor a la Luz Diurna (Figura 3), simulando un escenario de medición in situ sin control ambiental. La gráfica de superposición presentó un espectro continuo con una forma ondulada, característica de fuentes de banda ancha.

En este caso, se observó una dispersión discernible en la amplitud de las trazas superpuestas. Esta variación no se atribuye a un fallo del sensor, sino a factores externos inevitables, como las fluctuaciones naturales en la intensidad de la luz ambiental o el ruido óptico externo.

A pesar de la dispersión de amplitud en las mediciones de luz diurna, la firma espectral se mantuvo fiel y constante en todos los espectros. Este hallazgo es fundamental pues demuestra que, aunque la cantidad de luz capturada pueda

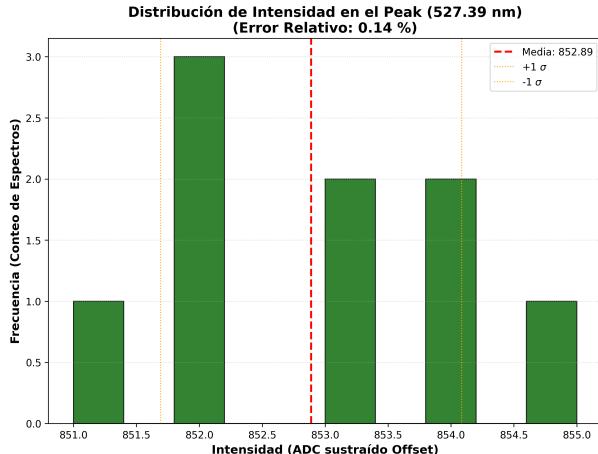


Figura 2. Histograma sobre error relativo

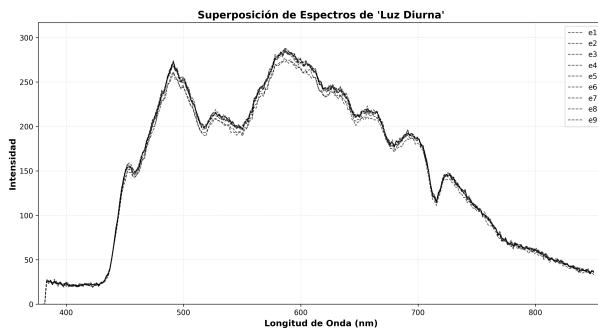


Figura 3. Superposición de Espectros usando Luz Diurna

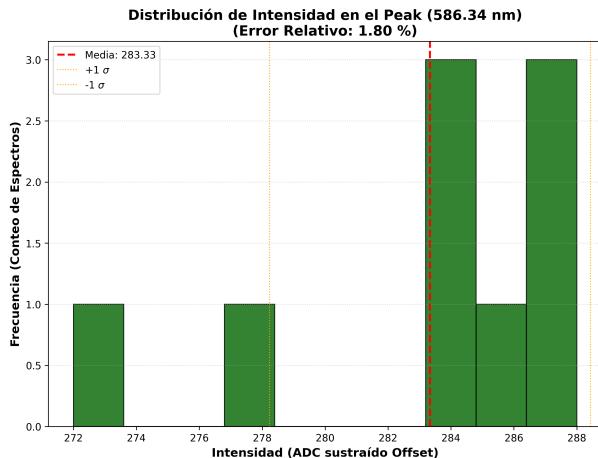


Figura 4. Histograma sobre error relativo

variar por el entorno, la información cualitativa sobre la composición espectral se conserva.

V. CONCLUSIÓN

El objetivo central de esta investigación, enfocado en la implementación y caracterización del especlómetro Hamamatsu C12880MA, fue plenamente alcanzado. Se logró establecer

una metodología de adquisición de datos mediante la interconexión con la plataforma Arduino, complementada por un script de procesamiento en Python que incluye la corrección esencial del Offset y perturbaciones externas.

Los resultados experimentales validaron la alta estabilidad y reproducibilidad del sistema, especialmente bajo condiciones controladas, donde el análisis estadístico del Láser Verde arrojó un insignificante error relativo de solo 0,14% en el peak de emisión. Este valor confirma la efectividad de la corrección del offset y la fiabilidad del sensor para fuentes estables. La capacidad de adquisición del sistema, aunque limitada a $\approx 20,5$ espectros por segundo por las restricciones del ADC de Arduino, es más que suficiente para los objetivos de caracterización estática.

Además, el sistema demostró ser robusto y versátil en entornos no controlados, como se evidenció en la medición de la luz diurna. A pesar de la dispersión de amplitud causada por las fluctuaciones ambientales y un error relativo de 1,80%, la consistencia espectral se conservó fielmente en todos los experimentos. Esta fidelidad indica que el C12880MA es apto para capturar la información cualitativa de las fuentes, incluso en escenarios ruidosos. En resumen, el bajo error intrínseco y la robustez de la adquisición espectral confirman que el C12880MA es una solución de especlometría óptima y de bajo costo, ideal para su integración en dispositivos de medición portátiles y análisis in situ.

REFERENCIAS

- [1] Sinanović, N. et al. (2025). High Resolution Short Response Time Fiber-Optic Temperature Sensor. IEEE Sensors Journal, 25(3), 4655–4661.
- [2] HAMAMATSU PHOTONICS K.K. (2016). Mini-spectrometers Technical Information. Cat. No. KACC9003E05.
- [3] Razeghi, M., & Rogalski, A. (2009). Semiconductor Infrared Detectors. En: *Optoelectronic Devices*. Springer, Boston, MA.
- [4] Hamamatsu Photonics K.K. *Mini-spectrometers C12880MA Datasheet*.
- [5] O'Haver, T. (2013). *Numerical Analysis of Spectroscopic Data*.
- [6] MATLAB and Simulink. *Hamamatsu Mini Spectrometer Library*.