

Design of a low-cost spectrometer based on Arduino Uno for qualitative and quantitative analysis of liquid samples

Diseño de un espectrómetro de bajo costo basado en Arduino Uno para análisis cualitativo y cuantitativo de muestra líquidas

Autores:

Briones-García, Huber David
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MANABÍ
Maestrante de la Maestría Académica con Trayectoria de Investigación en Física
Ingeniero Eléctrico
Portoviejo – Ecuador
 hbriones7134@utm.edu.ec
 <https://orcid.org/0000-0001-8782-5280>

Rodríguez, Luis Gerardo
Físico, Ph.D. en Ciencias
ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA AGROPECUARIA DE MANABÍ MANUEL FÉLIX LÓPEZ
Docente de Posgrado
Calceta – Ecuador
 lgrodriguez@espam.edu.ec
 <https://orcid.org/0000-0001-7821-7558>

Fechas de recepción: 05-JUL-2025 aceptación: 05-AGO-2025 publicación: 30-SEP-2025



<https://orcid.org/0000-0002-8695-5005>
<http://mqrinvestigiar.com/>



Resumen

El alto costo de los espectrómetros comerciales y la falta de métodos de espectroscopia ultravioleta visible en el Ecuador limitan su acceso en entornos educativos y de monitoreo in situ. Este estudio desarrolló un prototipo de bajo costo para caracterización cualitativa en muestras líquidas, diseñado a partir de componentes comerciales: fuente de luz blanca LED, rejilla de difracción holográfica (1800 ranuras/mm), celdas de cuarzo, fotodiodo S1337-21 y un Arduino Uno. La selección espectral se logró mediante la rotación angular de la fuente ($0.05625^\circ/\text{paso}$), mientras que la absorbancia se calculó aplicando la ley de Beer-Lambert. Se validó con una solución de colorante La Repostera (E129); el prototipo identificó un pico de absorción a 520 nm, coincidiendo con el equipo comercial. Se observaron diferencias significativas en la absorbancia atribuida a limitaciones en el sistema de detección. Se concluye que el equipo propuesto es viable para el análisis cualitativo rápido en la región visible y el monitoreo básico.

Palabras clave: Espectroscopia UV-Vis; Arduino Uno; Ley de Beer-Lambert; Muestras líquidas

Abstract

The high cost of commercial spectrometers and the lack of ultraviolet-visible spectroscopy methods in Ecuador limit their accessibility in educational settings and on-site monitoring. This study developed a low-cost prototype for qualitative characterization in liquid samples, built from commercial components: a white LED light source, a holographic diffraction grating (1800 lines/mm), quartz cuvettes, an S1337-21 photodiode, and Arduino Uno. Spectral selection was achieved through angular rotation of the light source ($0.05625^\circ/\text{step}$), while absorbance was calculated using the Beer-Lambert law. Validation was performed using a La Repostera (E129) dye solution; the prototype identified an absorption peak at 520 nm, matching that of the commercial equipment. Significant differences in absorbance were observed, attributed to limitations in the detection system. It is concluded that the proposed device is suitable for rapid qualitative analysis in the visible region and basic monitoring.

Keywords: UV-Vis Spectroscopy; Arduino Uno; Beer-Lambert Law; Liquid samples



Introducción

La espectroscopia ultravioleta-visible (UV-Vis) es un conjunto de métodos ampliamente utilizados en la investigación científica para el análisis no invasivo en las muestras. El equipo más utilizado en estos casos es el espectrómetro, el cual permite obtener información espectral de los materiales al interactuar con la luz, clave para caracterizar fuentes de luz, moléculas orgánicas e inorgánicas, identificación de materiales. Estos instrumentos han ido mejorando con el transcurrir del tiempo, impulsada por las tecnologías de comunicación como las fibras ópticas y los semiconductores, la miniaturización comenzó a inicios de 1990 permitiendo su aplicación fuera de los laboratorios (Jorge, 2008). A pesar de los avances tecnológicos, la estructura básica de un espectrómetro se mantiene, incluyendo una rendija de entrada, una lente de colimación, un elemento dispersivo (prisma o red de difracción) y una lente de salida que dirige los componentes espectrales hacia un detector electrónico (Pérez, 2012). En este trabajo desarrolla un espectrómetro UV-Vis basado en ley de Beer Lambert para caracterizar sustancias líquidas en la región del ultravioleta cercano y del visible del espectro electromagnético. Esto se hace midiendo la intensidad de la luz, con diferentes longitudes de onda, pasando a través de la muestra y alcanzando un detector conectado vía Arduino a una computadora personal. Con este diseño se obtiene un equipo adaptable y portátil que facilita el análisis de los compuestos.

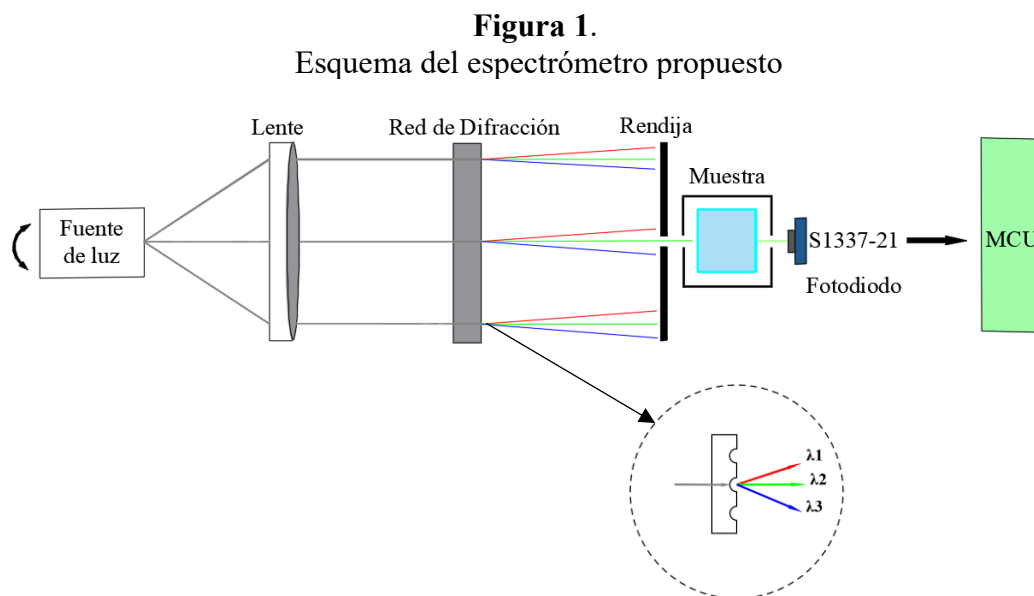
Un espectrómetro es un instrumento diseñado para separar y medir las componentes espectrales de la luz (Urquidi & Ormaechea, 2012), luego mediante métodos analíticos se analizan las características físicas de la muestra, posibilitando su uso en áreas tan variadas como la medicina, la industria, el entorno natural y todo lo relacionado con la ciencia de los materiales (Ormaechea et al., 2017). De acuerdo con el rango espectral en que funcionan los espectrómetros se clasifican en ultravioleta (UV) de (10 - 380 nm), visible (Vis) en el rango de (380-750 nm) y infrarrojo (IR) de (750 nm-1 mm) (Chen, 2024; Coohill & Ghetti, 2012; Maqbool, 2023). En la industria de los dispositivos portátiles, prevalecen modelos como el Optics USB4000 y Thunder Optics M, que destacan por sus funcionalidades versátiles en diversas aplicaciones y alta resolución espectral (GoPhotonics, n.d.; Thunder Optics, n.d.), el precio varía entre 1500 USD y requieren un PC para la adquisición y visualización de datos.



La ley de Beer-Lambert define la relación entre la absorbancia de una solución y su concentración, crucial para el desarrollo de la espectroscopía UV-Vis (Grasse et al., 2016; Toque & Gonzales, 2024). Los espectrómetros de bajo costo, fabricados con materiales económicos, tienen aproximadamente un precio menor de 500 USD (Nandiyanto et al., 2019), y se emplean donde no se requiere una resolución elevada, ya que su costo y conveniencia a menudo superan la necesidad de precisión (Li et al., 2022). En perspectivas a futuro, los espectrómetros tienen la capacidad de transformar áreas como el diagnóstico médico, el seguimiento del ambiente y la revisión de la calidad de los alimentos (McGonigle et al., 2018).

Material y métodos

La figura 1 muestra un esquema del espectrómetro diseñado el mismo consta básicamente de tres componentes: una Fuente de luz, una rejilla de difracción y un detector. La luz proveniente de la fuente se colima con una Lente para minimizar su dispersión. Después de pasar la Lente, la luz se descompone en las diferentes longitudes de onda que la forman por medio de una Red de difracción. A la salida de la Red de difracción, se selecciona las longitudes de onda específicas mediante una Rendija de tal manera que solo una longitud de onda pase por la Muestra. Una vez que la longitud de onda seleccionada pasa por la Muestra, su intensidad es medida por el Fotodiodo. La señal detectada es transferida al ordenador.



Bloque óptico

Fuente de luz

Se implementó un diodo emisor de luz (LED) de 1 W junto con una lente para enfocar la radiación luminosa en la pequeña sección de la rejilla de difracción. Esta solución, validada en instrumentación analítica (Bui & Hauser, 2015) y en sistemas asequibles y compactos (Macka et al., 2014), establecen bases para futuros estudios de la región UV.

Rejilla de difracción

La densidad de la rejilla de difracción (ranuras/mm), es fundamental para la eficiencia, una alta densidad mejora la resolución espectral (Voronov et al., 2016), mientras que una baja densidad amplía el rango espectral a costa de una menor eficiencia. Para la región UV-Vis se suelen utilizar 300-2000 ranuras/mm, siendo habitual un mínimo de 1200 ranuras/mm (Tom, 2023). En estas condiciones se eligió una rejilla de difracción holográfica de 1800 ranuras/mm, que optimizan la calidad óptica y precisión (Namioka, 2000).

Celda de cuarzo

Para el manejo de muestras líquidas en la región UV-Vis se adquirieron celdas de cuarzo con un porcentaje de transmisión de 83% en la región UV-IR, estas son transparentes a la radiación UV (Diffey, 2002), para garantizar su durabilidad estas celdas son de alta calidad resistentes a solutos.

Bloque de control

Control de la fuente de luz (LEDs)

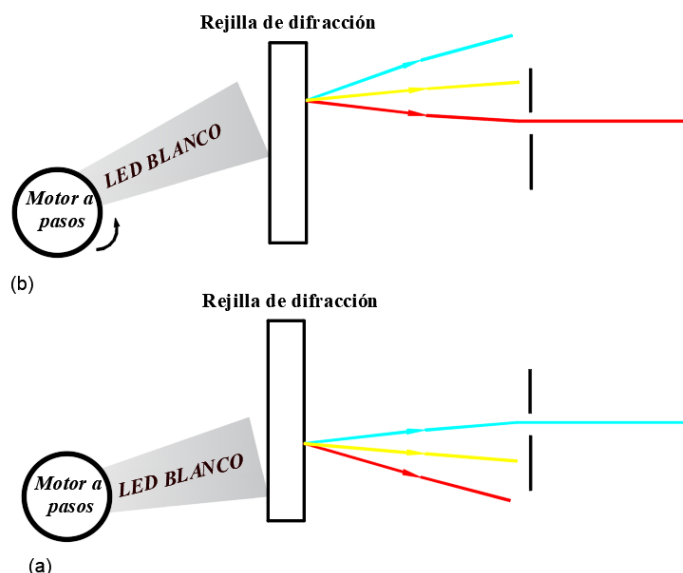
Se utilizó un motor paso a paso híbrido NEMA 17HS4023 capaz de completar un giro en 200 pasos, este proporciona un movimiento preciso, con distancias de actuación comparables a las longitudes de onda de la luz (Stranczl et al., 2012). El motor desplaza la fuente en pasos discretos, alterando el ángulo de incidencia sobre la rejilla de difracción, lo que altera la dirección de dispersión. Esto conlleva a la descomposición del haz en longitudes de onda específicas hacia el detector, como esquematiza la figura 2. El controlador Allegro a4988



simplifica el manejo del motor al lograr micro-pasos de $1/32$ (igual a 0.05625° por paso completado) para barrer las longitudes de onda con precisión.

Figura 2.

El esquema de selección espectral implica la rotación angular de la fuente de luz (a) antes y (b) después del ajuste.



Detector

Los fotodiodos se basan en el efecto fotoeléctrico para hacer la conversión de la radiación electromagnética en una corriente eléctrica (Castro, 2024). El S1337-21 es un fotodiodo de silicio, su respuesta espectral va desde 190 a 1100 nm. El circuito del sensor consta de un amplificador en condición buffer, y un filtro pasa bajo que elimina el ruido de alta frecuencia, estabilizando la señal de voltaje antes de ser enviada al ADS1115, este conversor detecta mínimas variaciones de voltaje generadas por pequeños cambios en la intensidad de la luz.

Microcontrolador

El Arduino Uno procesa los datos mediante una comunicación Universal Serie Bus (USB) con LabView, garantizando una adquisición en tiempo real y una gran facilidad de uso (Jidin et al., 2016). La figura 3 muestra el diagrama de flujo del algoritmo utilizado para codificar el Arduino Uno.

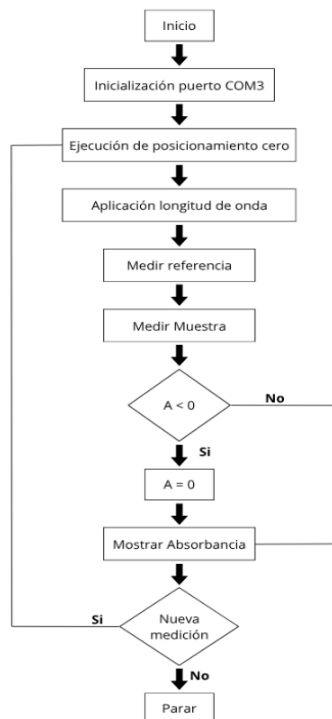
EL software calculó los valores de absorbancia (A) para el usuario; estos valores se obtienen según la siguiente ecuación:



$$A = \log_{10} \left(\frac{I_o}{I} \right) = \log_{10} \left(\frac{V_{referencia}}{V_{sustancia}} \right) \quad (1)$$

Figura 3.

Diagrama de Flujo del código para el microcontrolador



Resultados

Todos los elementos fueron ubicados dentro de una caja diseñada en Medium Density Fiberboard (MDF) de $20 \times 25 \times 11$ cm de dimensión, pintada de negro mate para minimizar la reflectancia interna (Poh et al., 2021), los soportes internos se diseñaron en 3D y fijados mecánicamente, la fuente de luz rota en posiciones entre 20° y 28° seleccionando las longitudes de onda mediante variación angular, la figura 4 detalla la arquitectura del espectrómetro con todos sus componentes.

Figura 4.

Vista superior del espectrómetro



Calibración

Se calibró utilizando como patrón el espectro de absorción de una de las soluciones, seleccionando 8 longitudes de onda (370, 400, 480, 520, 580, 600, 650 y 700 nm) basadas en mediciones con el espectrofotómetro HACH-DR390, el barrido está optimizado para cálculos de absorbancia en el espectro visible, las mediciones se repitieron tres veces para garantizar la reproducibilidad de los datos colectados

Discusión

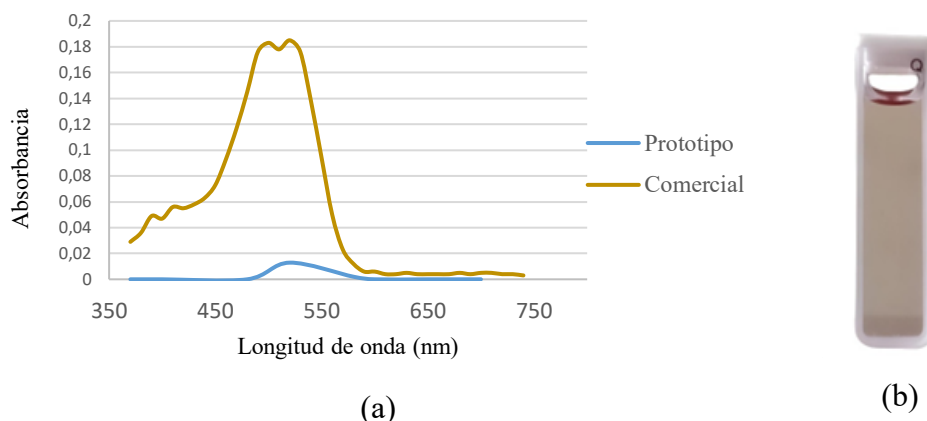
Prueba preliminar en colorante

El prototipo se validó empleando una solución acuosa del colorante alimenticio La Repostera (Rojo No.40/E129), con una concentración de 10 ppm; el resultado del experimento se comparó con el espectrofotómetro comercial, aplicando la misma prueba. La figura 5 se muestran los resultados obtenidos de las mediciones realizadas con el espectrómetro diseñado comparado con uno comercial evaluado para diferentes longitudes de onda. A pesar de que se observa una variación significativa a nivel de sensibilidad, el espectrómetro diseñado detecta el pico de máxima absorción de la muestra, 520 nm coincidiendo exactamente con el valor proporcionado por el equipo comercial, validando su aceptable precisión en la medición de la longitud de onda. A pesar de que el resultado sugiere mejorar la sensibilidad de la detección del instrumento desarrollado, la precisión en la medición de la longitud de onda es aceptable considerando el material utilizado en el diseño de este.



Figura 5.

(a) Comparación del espectro de absorción y (b) muestra acuosa del colorante



Conclusión

Se reportó el diseño y construcción de un espectrómetro basado en Arduino Uno y conectado en tiempo real a un computador personal. El equipo diseñado es robusto, de fácil implementación y uso, permitiendo realizar mediciones cualitativas y cuantitativas de absorción en muestras líquidas. Igualmente, fomenta la construcción de instrumentación científicos basados en plataformas de código abierto y materiales de fácil obtención. Los esfuerzos futuros se centrarán en el análisis cualitativo, en mejoras en la arquitectura óptica y electrónica, ampliando su análisis en la región ultravioleta del espectro electromagnético.

Referencias bibliográficas

- Bui, D. A., & Hauser, P. C. (2015). Analytical devices based on light-emitting diodes – a review of the state-of-the-art. *Analytica Chimica Acta*, 853(1), 46–58. <https://doi.org/10.1016/J.ACA.2014.09.044>
- Castro, R. (2024). *Plataforma óptica experimental TOSA ROSA* [Maestría en Diseño Electrónico]. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente.
- Chen, Z. (2024). Application of UV-vis spectroscopy in the detection and analysis of substances. *Transactions on Materials, Biotechnology and Life Science*, 3.
- Coohill, T., & Ghetti, F. (2012). Action Spectroscopy: Ultraviolet Radiation. In A. Griesbeck, M. Oelgemöller, & F. Ghetti (Eds.), *CRC Handbook of Organic*

Photochemistry and Photobiology (3rd ed., Vol. 2, pp. 1093–1103). CRC Press.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9780429100253>

- Diffey, B. L. (2002). Sources and measurement of ultraviolet radiation. *Methods*, 28(1), 4–13. [https://doi.org/10.1016/S1046-2023\(02\)00204-9](https://doi.org/10.1016/S1046-2023(02)00204-9)
- GoPhotonics. (n.d.). *Hoja de datos del modelo Ocean Optics USB4000-UV-VIS*. Retrieved February 24, 2025, from <https://www.gophotonics.com/products/spectrometers/ocean-optics-inc/44-543-usb4000-uv-vis>
- Grasse, E. K., Torcasio, M. H., & Smith, A. W. (2016). Teaching UV–Vis Spectroscopy with a 3D-Printable Smartphone Spectrophotometer. *Journal of Chemical Education*, 93(1), 146–151. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.5b00654>
- Jidin, A. Z., Mohd Yusof, N., & Sutikno, T. (2016). Arduino Based Paperless Queue Management System. *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 14(3), 839. <https://doi.org/10.12928/telkomnika.v14i3.3114>
- Jorge, M. (2008). *Miniaturization pushes spectrometers forward*. <https://optics.org/article/35862>
- Li, A., Yao, C., Xia, J., Wang, H., Cheng, Q., Penty, R., Fainman, Y., & Pan, S. (2022). Advances in cost-effective integrated spectrometers. *Light: Science & Applications* 2022 11:1, 11(1), 1–18. <https://doi.org/10.1038/s41377-022-00853-1>
- Macka, M., Piasecki, T., & Dasgupta, P. K. (2014). Light-emitting diodes for analytical chemistry. *Annual Review of Analytical Chemistry*, 7(Volume 7, 2014), 183–207. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV-ANCHEM-071213-020059/1>
- Maqbool, M. (2023). Infrared Radiation: Benefits, Hazards, and Protections. In *An Introduction to Non-Ionizing Radiation* (pp. 203–241). BENTHAM SCIENCE PUBLISHERS. <https://doi.org/10.2174/9789815136890123010011>
- McGonigle, A. J. S., Wilkes, T. C., Pering, T. D., Willmott, J. R., Cook, J. M., Mims, F. M., & Parisi, A. V. (2018). Smartphone Spectrometers. *Sensors* 2018, Vol. 18, Page 223, 18(1), 223. <https://doi.org/10.3390/S18010223>
- Namioka, T. (2000). Diffraction Gratings. In *Vacuum Ultraviolet Spectroscopy* (pp. 347–377). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-012617560-8/50018-9>
- Nandiyanto, A., Ragadhita, R., Abdullah, A., Triawan, F., Sunnardianto, G., & Aziz, H. (2019). Techno-economic feasibility study of low-cost and portable home-made spectrophotometer for analyzing solution concentration. *Journal of Engineering Science and Technology*, 14(2), 599–609.



- Ormaechea, O., Villazón, A., & Escalera, R. (2017). A spectrometer based on smartphones and a low-cost kit for transmittance and absorbance measurements in real-time. *Optica Pura y Aplicada*, 50(3), 239–249. <https://doi.org/10.7149/OPA.50.3.49053>
- Pérez, J. (2012). *Diseño y Construcción de un Espectrómetro Óptico por USB*.
- Poh, J.-J., Wu, W.-L., Goh, N. W.-J., Tan, S. M.-X., & Gan, S. K.-E. (2021). Spectrophotometer on-the-go: The development of a 2-in-1 UV–Vis portable Arduino-based spectrophotometer. *Sensors and Actuators A: Physical*, 325, 112698. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112698>
- Stranczl, M., Sarajlic, E., Fujita, H., Gijs, M. A. M., & Yamahata, C. (2012). High-Angular-Range Electrostatic Rotary Stepper Micromotors Fabricated With SOI Technology. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 21(3), 605–620. <https://doi.org/10.1109/JMEMS.2012.2189367>
- Thunder Optics. (n.d.). *Kit de espectroscopia M*. Retrieved June 22, 2025, from <https://thunderoptics.fr/product/m-spectroscopy-kit/>
- Tom, J. (2023, December 18). *UV-Vis Spectroscopy: Principle, Strengths and Limitations and Applications*. <https://www.technologynetworks.com/analysis/articles/uv-vis-spectroscopy-principle-strengths-and-limitations-and-applications-349865>
- Toque, E., & Gonzales, J. (2024). A simple low-cost UV light photometer for experimental teaching of the Beer-Lambert law. *Revista Eureka Sobre Enseñanza y Divulgación de Las Ciencias*, 21(3), 340101–340108. https://doi.org/10.25267/REV_EUREKA_ENSEN_DIVULG_CIENC.2024.V21.I3.3401
- Urquidi, O., & Ormaechea, O. (2012). Desarrollo de un espectrómetro de difracción para aplicaciones LIBS. *INVESTIGACION & DESARROLLO*, 12(1), 39–47. <https://doi.org/10.23881/idupbo.012.1-4i>
- Voronov, D. L., Warwick, T., Gullikson, E. M., Salmassi, F., & Padmore, H. A. (2016). Innovative diffraction gratings for high-resolution resonant inelastic soft x-ray scattering spectroscopy. *AIP Conference Proceedings*, 1741(1), 040015-1-040015-5. <https://doi.org/10.1063/1.4952887/821516>

Conflicto de intereses:

Los autores declaran que no existe conflicto de interés posible.

Financiamiento:

No existió asistencia financiera de partes externas al presente artículo.

Nota:

El artículo no es producto de una publicación anterior.