

MÉTODOS Y RECURSOS EN LA INSTRUMENTACIÓN CIENTÍFICA ALTERNATIVA ORIENTADA A LA ENSEÑANZA EN CIENCIAS E INGENIERÍA*

AURELIO ARBILDO LÓPEZ

<https://orcid.org/0000-0003-1107-3582>

ERNESTO DANIEL BUENDÍA PLATAS

<https://orcid.org/0000-0001-8265-630X>

Universidad de Lima, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Lima, Perú

EDUARDO H. MONTOYA ROSSI

<https://orcid.org/0000-0002-3792-0228>

Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Química e Ingeniería Química, Lima, Perú

Recibido: 7 de junio del 2021 / Aprobado: 18 de junio del 2021

doi: <https://doi.org/10.26439/ing.ind2022.n.5807>

RESUMEN. Como resultado del desarrollo de instrumentos científicos de bajo costo y buen desempeño, se han realizado algunos arreglos experimentales, aplicación de métodos de medición y herramientas (tanto gráficas como formales) para obtener resultados confiables. Muchos de los ensayos fueron pruebas de concepto que, a pesar de no ser cuantitativos, han sido rescatados por su valor en el entendimiento de algunos fenómenos físicos y químicos, útiles en la enseñanza de ciencias e ingeniería. Se analizan algunos métodos usando dos de los recursos disponibles normalmente en una computadora personal: el micrófono y la cámara web; el primero para pruebas basadas en sonido y la segunda para espectrometría tanto de radiación visible como de fotones Raman. Las técnicas descritas han sido examinadas como apoyo al desarrollo de instrumentos científicos alternativos (ICA).

PALABRAS CLAVE: instrumentos científicos / experimentación científica

* Agradecemos al Instituto de Investigación Científica (IDIC) por financiar algunos de los desarrollos que han servido de insumo en la elaboración de este artículo. Correos electrónicos en orden de aparición: aarbildo@ulima.edu.pe, ebuendia@ulima.edu.pe, emontoyar@unmsm.edu.pe

METHODS AND RESOURCES IN ALTERNATIVE SCIENTIFIC INSTRUMENTATION FOR TEACHING SCIENCES AND ENGINEERING

ABSTRACT. As a result of the development of low cost and high-performance scientific instruments, it has been developed some experimental set ups, measurement methods and tools (numerical and graphic) in order to obtain trustable results. Some of the assays were proof of concept that, in spite of been qualitative, have been rescued taking into account their value in the understanding of physical and chemical phenomena useful for teaching Science and Engineering. Some cases, developed by using two of the resources normally standard in personal computers such as the microphone and web cam, for sound-based tests and visible light as well as Raman spectrometry, are presented. The techniques have been developed in support of the development of Scientific Alternative Instruments (ICA in Spanish).

KEYWORDS: scientific instruments / scientific experimentation

INTRODUCCIÓN

En la instrumentación científica tradicional, se encapsulan todos los elementos del instrumento en equipos de propósito específico, con poca o nula posibilidad de modificación por el usuario. Este concepto ha evolucionado hacia sistemas basados en alguna plataforma programable, como computadoras personales, microcontroladores u otros sistemas de desarrollo de bajo costo usados para construir instrumentos versátiles, conservando la calidad de las mediciones; esto es lo que llamamos *instrumentación científica alternativa*.

Dado que tales plataformas soportan interfases de digitalización de señales de variada resolución, así como por ser capaces de incorporar cámaras fotográficas o de video y otros dispositivos de uso masivo, en los últimos años ha proliferado el desarrollo de instrumentos alternativos orientados a la espectrometría, muy útiles para la enseñanza de ciencias e ingeniería. Estos van desde instrumentos simples fabricados por estudiantes, como los discutidos por Kovarik et al. (2020), hasta otros extremadamente retadores en términos de resolución, sensibilidad y costo, como la espectrometría Raman que ha sido trabajada por varios autores (Dhankhar et al., 2021; Montoya et al., 2015; Emmanuel et al., 2021; Sinhaa & Biswas, 2020; Young & Sung, 2020). Las plataformas más usadas funcionan en computadoras personales y también se emplean microcontroladores Arduino, como en el trabajo de El Hammoui et al. (2018) para la medición de variables características en generación solar fotovoltaica. Por otro lado, Li et al. (2016) hacen una revisión de microbiosensores con énfasis en circuitos CMOS, y algo parecido se puede encontrar en el trabajo de Li et al. (2017) para espectrometría en el infrarrojo cercano con el chip optoelectrónico OPT101. La lista de artículos que abordan el concepto de instrumentación científica alternativa es extensa y actual, por lo que vale la pena rescatar los métodos que se utilizan con más frecuencia en el desarrollo de tal instrumentación desde el punto de vista de la experiencia propia.

Muchos detalles de los ensayos previos, normalmente usados como pruebas de concepto, no se describen en los artículos publicados. Sin embargo, son útiles no solo para los desarrolladores de instrumentos, sino también en el ámbito académico para la formación de competencias estudiantiles, orientados al entendimiento de los fenómenos, así como para entrenamiento de futuros investigadores y como sugerencias para los docentes.

El hecho de que el desarrollo de instrumentación alternativa requiera proponer un instrumento completo obliga a los desarrolladores a crear muchas técnicas y métodos propios que no aparecen en las publicaciones, generalmente por razones de espacio. Por otro lado, en el caso de la instrumentación convencional, ese conocimiento la mayoría de las veces no es publicado por ser útil para limitar la competencia. En ese sentido, en este trabajo se describe una serie de métodos planteados por los autores desde la segunda década de este siglo, que han surgido como parte del desarrollo propio

de instrumentación alternativa y están centrados en el uso de la tarjeta de sonido y la cámara web disponibles en las computadoras empleadas para el instrumento.

MATERIAL Y MÉTODOS

El desarrollo de un instrumento científico alternativo (ICA) como un espectrómetro de radiación visible de radiación Raman, de absorción atómica o cualquier otro en cualquier disciplina del conocimiento puede estar orientado tanto a la construcción del instrumento en sí tanto como a una aplicación específica, quedando el instrumento disponible para otros usos. Desde que un instrumento debe ser preciso y a la vez exacto, se necesitan métodos para garantizar estas características, que cumplan con el requerimiento de buena sensibilidad para mediciones de eventos escasos, como el caso de la emisión de fotones Raman, que ocurren unos pocos por millón.

Conformación del instrumento

El instrumento alternativo está conformado por el arreglo experimental, el *hardware* de digitalización y análisis, y el *software*. El arreglo está compuesto por los elementos de medición y sus accesorios de acople con el proceso experimental que, en el caso de instrumentación basada en la luz, está constituido por lentes y espejos; los elementos de medición primaria requieren generalmente acondicionamiento de señal. El *hardware* típico es una computadora personal o plataformas de desarrollo como Arduino y sus variantes o Raspberry Pi, ambos con una variada oferta de interfases, ya sea para digitalizar o para conversión digital/analógica.

Para lograr el bajo costo con relación al instrumento convencional equivalente, se recurre a los dispositivos estándares en las computadoras, como tarjetas de sonido o cámaras web, y una serie de accesorios que por su producción y uso masivo ofrecen una excelente relación *precio/performance*. Una tarjeta de sonido típica permite resoluciones temporales menores que 10 microsegundos y resoluciones de 0,015 % en la medición de los valores de señal. Las interfases de audio, asimismo, pueden ser adaptadas para medir otras señales de voltaje con adaptadores de fácil construcción. Adicionalmente, se pueden usar dispositivos conectables a través del puerto USB, cuyo desempeño ha ido aumentando a lo largo de los años. Al igual que la calidad de las mediciones con micrófonos, las mediciones usando cámaras web también son precisas, toda vez que la oferta de dichos dispositivos es muy amplia y competitiva.

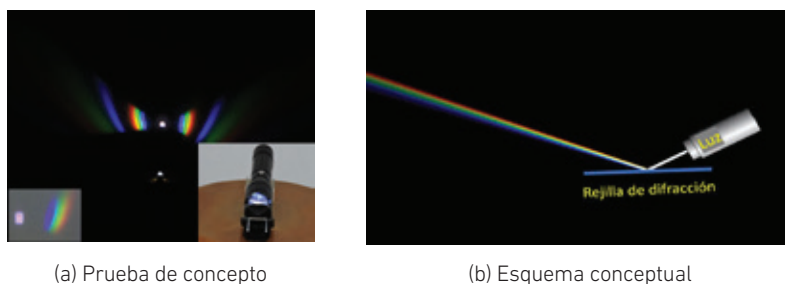
Pruebas de concepto

En las pruebas de concepto, generalmente cualitativas, se hacen ensayos que permiten asegurar que los elementos fundamentales que se van a usar sean, en primera aproximación, útiles en el desarrollo del instrumento. En la figura 1(a), se aprecia un arreglo muy

simple de prueba de concepto de un espectrofotómetro de radiación visible iluminado por diodo emisor de luz (LED), en el cual se ensayaron tanto pedazos de DVD como rejillas de difracción comerciales de muy bajo costo; en la figura 1(b), se muestra el esquema (simulación) del fenómeno. El ensayo permite corroborar los estimados de dimensiones de las partes del espectrofotómetro, de tal manera que se tenga un instrumento pequeño sin pérdida de todo el rango de longitudes de onda en el espectro visible y se puedan hacer ajustes de tiempos de exposición en el dispositivo de captura de imagen.

Figura 1

Prueba de concepto de difracción de luz LED blanca



Las pruebas de concepto requieren también garantizar que el instrumento mismo sea capaz de servir para el propósito previsto, por lo que también debe comprobarse la capacidad de las otras partes funcionales del ICA. Por ejemplo, en el uso del micrófono para hacer pruebas acústicas, es necesario verificar, en los casos más estrictos, que el envío del estímulo tomando en cuenta la respuesta dinámica del emisor, los tiempos de tránsito, el ancho de banda del receptor, la sincronización del *software* y los tiempos de análisis estén acordes con las exigencias del dispositivo o instrumento previsto.

En la figura 2, se detalla el arreglo experimental para ensayos de estímulo/respuesta con sonido. En la figura 2(a), se muestra una panorámica del sistema de emisión de sonido, en el que por el parlante se emitirá un sonido de muy corta duración (< 5 ms) que será reflejado en el techo y captado en el micrófono luego de un trayecto esperado de 8 ms. Según el esquema en la parte inferior, en la figura 2(b), se muestra la ubicación del micrófono a la altura del emisor del parlante.

Figura 2

Arreglo experimental para pruebas con sonido

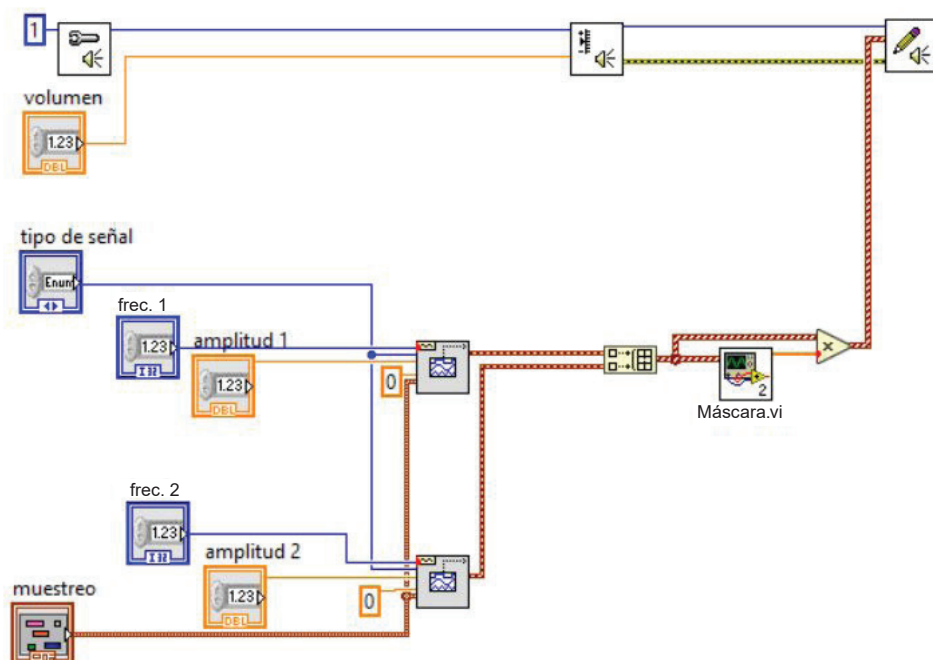


Para tener un patrón reconocible del estímulo en un tiempo menor que 5 ms, es obligatorio usar sonido de frecuencia alta, que desde el punto de vista del *software* y las capacidades de la tarjeta de audio está garantizado; sin embargo, debe considerarse el rango dinámico tanto del parlante como del micrófono. Como el parlante es un dispositivo mecánico, es necesario vencer la inercia del dispositivo, por lo que se debe emitir sonido de muy bajo volumen (amplitud de la onda), subirlo rápidamente, mantenerlo el tiempo deseado y cortarlo bruscamente.

La figura 3 muestra el código fuente en LabVIEW™; en la parte superior del diagrama se inicializa y configura la salida de parlantes al máximo volumen y se pasa a la función que emite el sonido recibiendo de la parte inferior la onda senoidal modulada (punto a punto en máscara.vi), para que la amplitud del estímulo sea tal que el volumen suba, se mantenga y baje bruscamente, tal como se mencionó en el párrafo anterior.

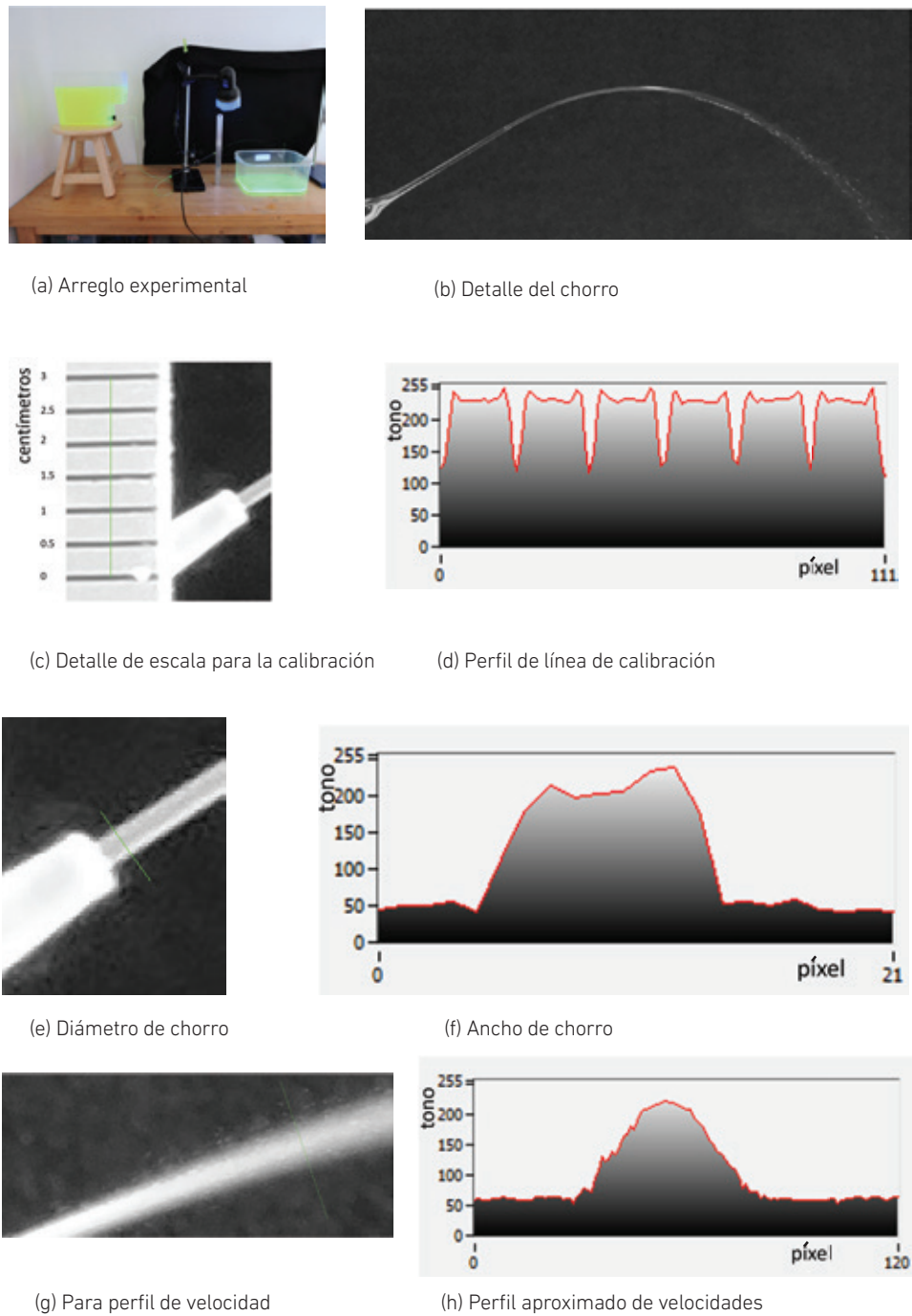
Figura 3

Programa de estímulo/respuesta para la medición de velocidad del sonido



La cámara web es muy útil en experimentos cualitativos o cuantitativos con los que, con la ayuda de herramientas de procesamiento de imágenes, se complementa la enseñanza experimental de fenómenos físicos. En la figura 4, se observa un arreglo experimental muy simple para ver el comportamiento de los fluidos, así como algunos de los métodos usados para sortear dificultades experimentales, como la de cuantificación. La figura 4(a) muestra el arreglo experimental en el que el fluido es impulsado por gravedad; para un mejor contraste, se usa fondo negro, y como el fluido (agua) es transparente, se han utilizado trazas de líquido fluorescente (remojando la punta de un resaltador de textos) y luz violeta para lograr fluorescencia y mejorar el contraste. En la figura 4(b), se aprecia el detalle de chorro y en 4(c) la escala graduada usada a la altura del plano del chorro para la calibración, que se representa en el perfil de línea de 4(d) para tener la cuantificación en centímetros por píxel. Los perfiles de línea se emplean en las imágenes (e) y (f) para medir el ancho inicial del chorro y en (g) y (h) para estimar el perfil aproximado de velocidades.

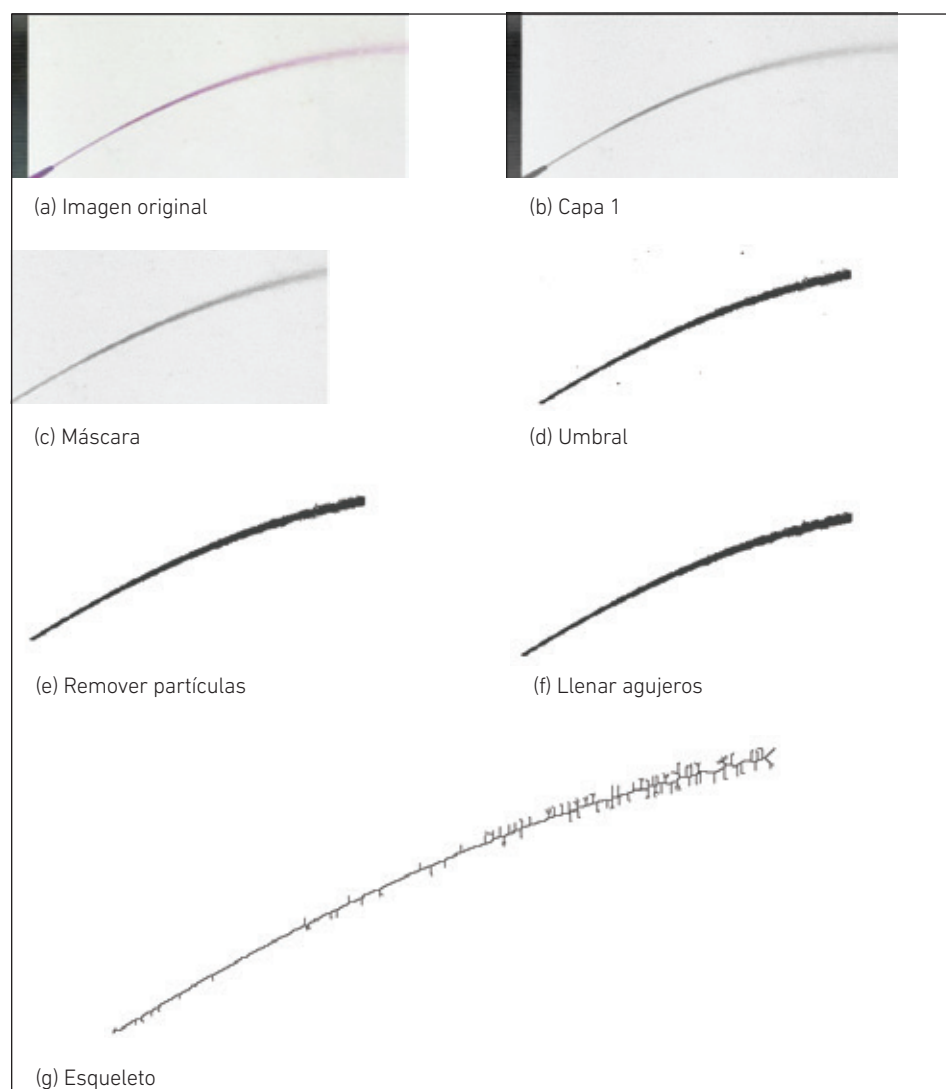
Figura 4
Experimento de dinámica de fluidos



La parábola predicha por el fenómeno gravitatorio también es posible obtenerla con la aplicación sucesiva de funciones de procesamiento de imágenes, como se observa en la figura 5. Sucesivamente se extrae la componente de intensidad en el modelo HSI de la representación de color, luego se selecciona la región de interés aplicando una máscara y, después, se convierte a binario los tonos de gris con la función umbral; a continuación, se aplica un filtro para eliminar partículas aisladas y llenar agujeros para completar la región del chorro que la función umbral hubiera eliminado artificialmente. Por último, con la función esqueleto, se obtiene la mejor línea de trayectoria que permita hacer el contraste teoría-experimento.

Figura 5

Procesamiento de imágenes para obtener el perfil del chorro

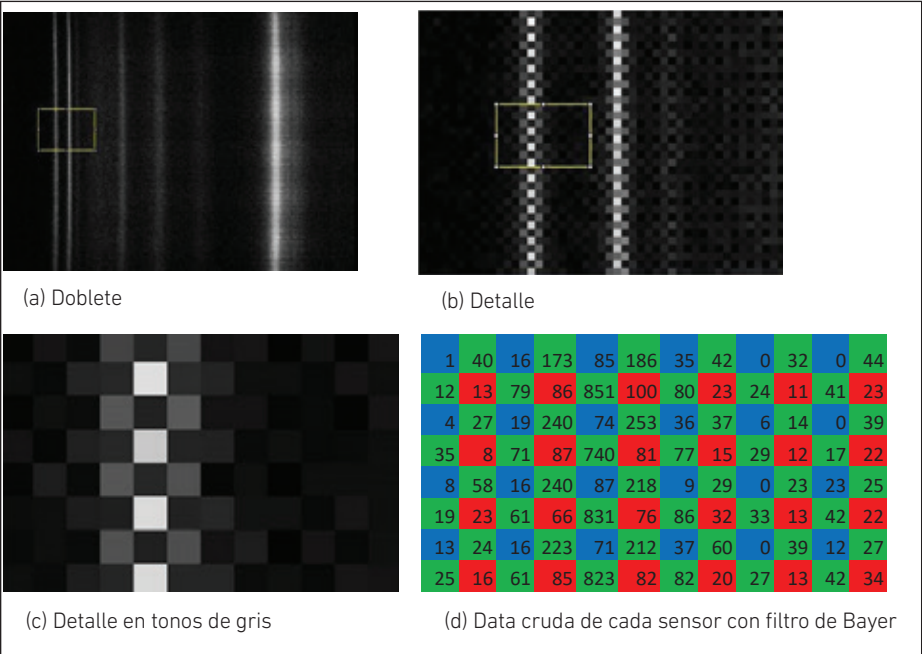


Obtención de data significativa

Al igual que en el uso del micrófono, el de la cámara web requiere de métodos que garanticen mediciones de calidad, particularmente por dos razones fundamentales: (1) las cámaras web están diseñadas para mostrar imágenes agradables a la vista tanto en textura como en color, por lo que hay mucho procesamiento interno que altera la información primaria captada por los sensores de la cámara; y (2) las imágenes estándar son representadas en 8 bits por capa y con corrección gamma incluida; sin embargo, la resolución en la digitalización interna es de mayor precisión, por lo que la información cruda almacenada en los registros internos asociados a la matriz de sensores es mucho más precisa que la entregada en la imagen. El acceso a la información digitalizada que se almacena en los registros internos de la cámara permite usar los datos crudos a 10, 11 o 12 bits de resolución.

En la figura 6, se observa la información, en tonos de gris, correspondiente a los datos crudos (formato RAW) almacenados en la memoria de la cámara para el doblete de la emisión del mercurio, guardado a 10 bits de resolución, en matriz de sensores con filtro de Bayer. El espectro fue captado en un espectrómetro de radiación visible construido bajo el concepto de ICA; en espectrofotometría, el eje X corresponde a la longitud de onda. El acceso a la data original, además de ganar en resolución en la medición, permite aplicar criterios del manejo de la data en función del fenómeno en estudio y de las características del arreglo de sensores y del filtro para garantizar resultados acordes con el objetivo de la medición. Entre las alternativas exploradas, está la de desfazar una columna en la imagen original y sumarla a la misma, dado que las líneas espectrales son verticales; esto mantiene la resolución espacial y es equivalente al promedio corrido de dos en dos de las columnas de la matriz. Otra alternativa es la de sumar los valores de 4 en 4 píxeles y asignar el valor al centroide, reduciendo la imagen a $\frac{1}{4}$ de su tamaño con una aparente mejora en la resolución en términos de longitudes de onda. Los algoritmos de las cámaras, generalmente, suavizan la imagen tomando en cuenta píxeles en vecindades mayores de 4, por lo que alteran artificialmente la resolución de las mediciones.

Figura 6
Detalles del doblete del mercurio y valores almacenados en el registro de la cámara

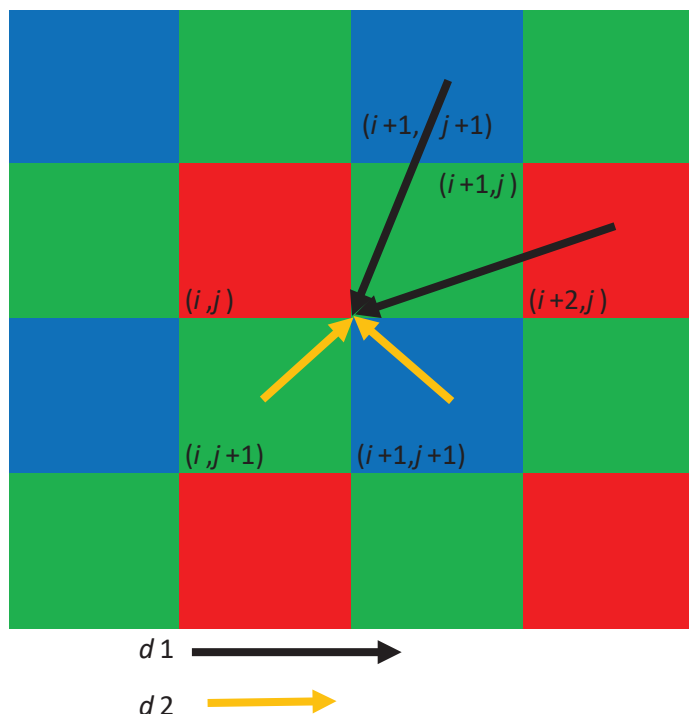


Métodos en la medición y procesamiento de datos

Con cierta frecuencia es necesario linealizar el eje X, ya sea para corregir distorsiones ópticas o para comparar espectros obtenidos en condiciones experimentales no estandarizadas, o con dos o más instrumentos no lineales diferentes. En estos casos, es conveniente redistribuir los valores almacenados en los sensores para conservar el número de fotones captados que, de otra forma, podría, artificialmente, alterar las áreas de los picos en ciertas longitudes de onda respecto a otras. Desde que el objetivo es corregir las distorsiones de manera no uniforme o no lineal en el espacio de la imagen y al mismo tiempo conservar el número de fotones detectados, se requiere redistribuir los valores medidos en un espacio diferente dentro de la imagen, para lo cual se ha utilizado un criterio de redistribución lineal solo en la vecindad del centroide del nuevo píxel. Para ello, se aplica un criterio de pesos en función de la distancia al nuevo valor. En la figura 7, se muestra el esquema de contribuciones de los vecinos a un píxel a color centrado en el punto de confluencia de las flechas.

Figura 7

Redistribución de valores con el criterio de las distancias



El esquema de redistribución se hace de manera inversamente proporcional a la distancia generando los siguientes valores:

$$G(m, n) = 0,5 * (s(i, j + 1) + s(i + 1, j))$$

$$R(m, n) = w1 * s(i, j) + w2 * s(i + 2, j), \text{ y}$$

$$B(m, n) = w2 * s(i + 1, j - 1) + w1 * s(i + 1, j + 1)$$

Donde s es el valor almacenado en una posición determinada (i, j) y R, G y B son los nuevos valores del contenido de rojo, verde y azul para una nueva ubicación (m, n) con $w1 = 0,690983$ y $w2 = 0,309017$.

Un barrido punto a punto de una imagen con este esquema genera una imagen RGB en la que se redistribuye mejor la distancia relativa de los sensores respecto al centro del filtro de Bayer. Modificaciones sencillas de las fórmulas permiten también hacer un barrido sensor a sensor para obtener una imagen de más resolución suavizada.

En espectrometría, los espectros generalmente son verticales, por lo que la redistribución se hace solo en la horizontal cuando se requiere redistribuir no linealmente los píxeles. Con esta metodología es posible también hacer transformaciones lineales para expandir o comprimir el ancho del espectro o no lineales para linealizar espectros. Esta metodología es una alternativa al método de desfase.

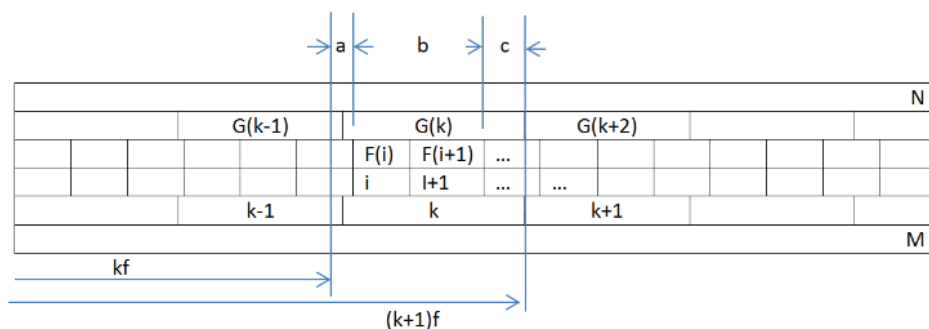
Para comprimir un espectro en un menor número de valores en la abscisa, se ha desarrollado el algoritmo siguiente:

$$G(k) = aF(i-1) + \sum_{j=i}^{i+b-1} F(j) + cF(i+b)$$

Donde $G(k)$ es el nuevo espectro obtenido a partir del espectro $F(j)$ redistribuyendo según el esquema de la figura 8.

Figura 8

Esquema de redistribución horizontal



Donde k es el índice del k -ésimo elemento del nuevo espectro, que se corresponde con el i -ésimo elemento del espectro original; b es el número de elementos enteros del espectro original que se incluirá en $G(k)$.

$i = \text{round}(k * f) + 1$, $\text{round}(k*f)$ es el valor truncado del producto de k por f (kf en la figura)

$b = \text{round}(k * f + 1) - i$,

$f = \frac{\text{tamaño original}}{\text{nuevo tamaño}}$, relación de tamaños

Para $b = 0$, la sumatoria es nula

Esta metodología puede ser usada tanto para escalar espectros como para generar filtros de correlación aplicables a espectros cuya resolución no es uniforme a lo largo de la abscisa.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Experimentos muy simples de pruebas de concepto como el mostrado en la figura 1(a), cuando se sustentan con la teoría del fenómeno en estudio, permiten enseñar conceptos como los órdenes de difracción observables (en este caso: $-2, -1, 0, 1, 2$) y ver incluso los detalles del emisor de luz en el orden cero (véase el inserto inferior izquierdo de la figura 1a), tomado con iluminación tenue y menor tiempo de exposición.

Experimentos con micrófono

La prueba de concepto mostrada en la figura 2 —necesaria para garantizar que es posible medir con precisión diferencias de tiempo muy precisas y que los estímulos de muy corta duración con el parlante son factibles— permite hacer mediciones de la velocidad del sonido.

La distancia D recorrida por el sonido en el tiempo de vuelo es:

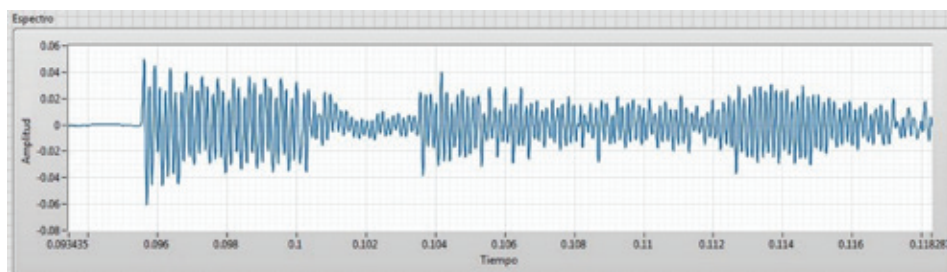
$$D = (h^2 + L^2)^{1/2} + (h - L)$$

Donde h es la altura neta desde el parlante hasta la superficie reflectora, y L la distancia entre el parlante y el micrófono.

En la figura 9, se presenta el registro del estímulo (sonido emitido por el parlante) micrófono, en el que se observa claramente la estructura del estímulo, entre los 96 y 100 ms aproximadamente; y, luego de unos pocos milisegundos, el retorno del frente de onda al micrófono.

Figura 9

Estímulo/respuesta con escala de tiempo en segundos



En la tabla 1 se muestran los datos y la muy buena precisión de la medición que permite calcular un valor de la velocidad del sonido de $340,7 \pm 0,2$ m/s, a una temperatura de 18 °C.

Tabla 1

Mediciones de tiempo de vuelo

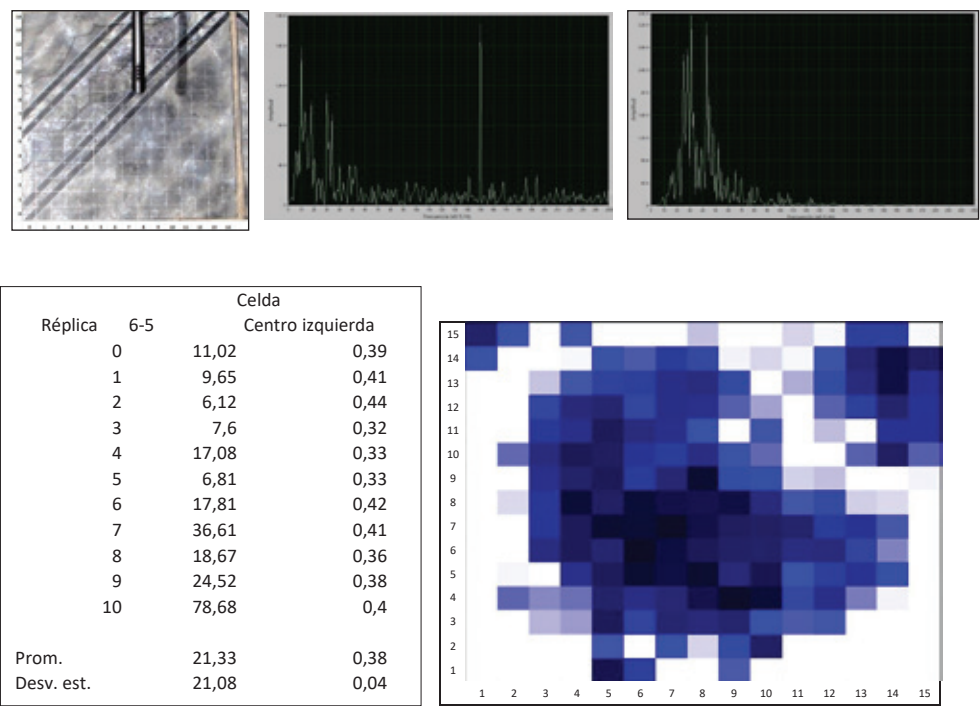
Medición	Inicio (s)	Retorno (s)	Dt (s)
1	0,116264	0,108344	0,007920
2	0,094549	0,086585	0,007964
3	0,121101	0,11313	0,007971
4	0,114619	0,106643	0,007976
5	0,102901	0,094928	0,007973
6	0,121027	0,113064	0,007963
7	0,116823	0,108842	0,007981
8	0,111826	0,103854	0,007972
9	0,120087	0,112114	0,007973
10	0,104977	0,097012	0,007965
Resultados	Promedio		0,007966
	Desviación estándar		1,70E-05

Los tiempos iniciales y finales fueron encontrados por simple inspección visual de los frentes de onda del estímulo y la respuesta; sin embargo, también es posible utilizar metodologías matemáticas de correlación para tomar en cuenta el desfase de toda la estructura del estímulo respecto a la respuesta.

En la figura 10, se muestran algunas imágenes de pruebas de concepto para determinar la factibilidad de usar un robot en el control de calidad del montaje de cerámicas en pisos. En la figura 10(a), se observa la cerámica, que ha sido marcada en un reticulado de puntos de estímulo (golpe con un martillo muy pequeño) que será sondeado con un micrófono de bajo costo. En 10(b) y 10(c), se presentan los espectros de frecuencia en zona sólida y hueca respectivamente, y en 10(d), las áreas bajo la curva en las zonas de alta y baja frecuencia, respectivamente. En 10(e), se aprecia, en escala de grises, la gráfica de relación de áreas sólido/hueco que permite identificar la zona hueca correspondiente a un agujero de desagüe, cuya existencia ya era conocida.

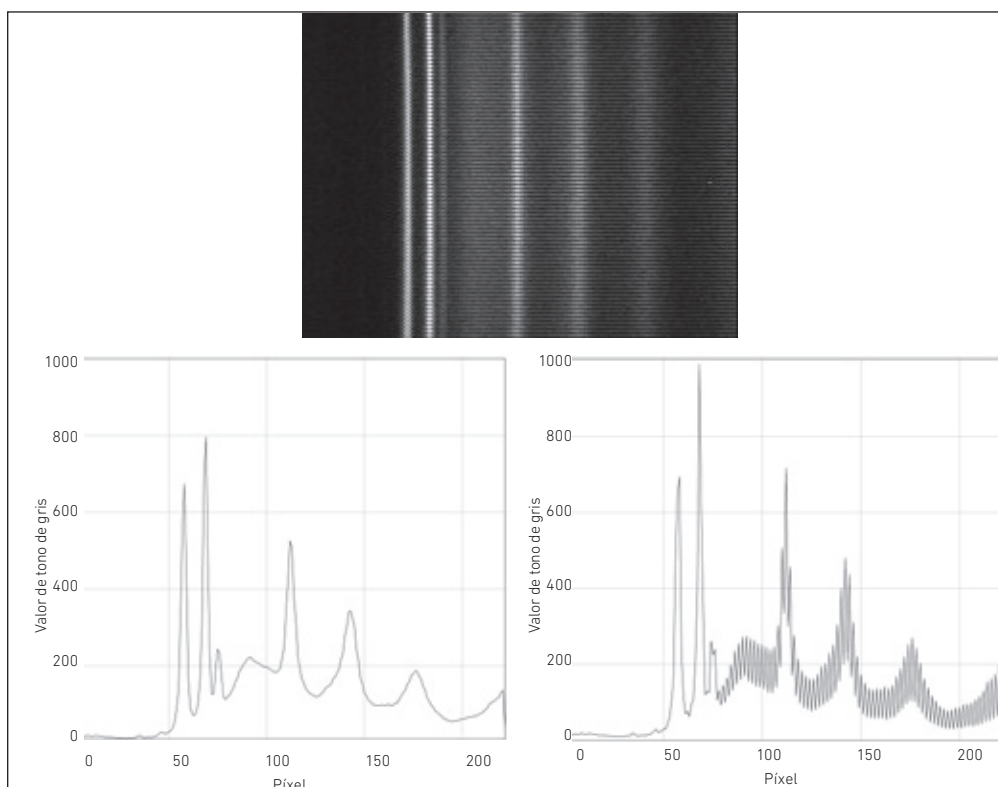
Figura 10

Uso de un micrófono para detectar espacios huecos debajo de cerámicas



Experimentos con cámaras fotográficas o de video

En el punto “Obtención de data significativa”, se mostró la necesidad de usar la data cruda para el análisis de la información obtenida desde los espectros de descomposición de la luz en espectrofotómetros de muy bajo costo. La figura 11 muestra el resultado de una de las técnicas mencionadas en dicho apartado, que consiste en sumar y promediar la imagen original con la misma imagen desfasada en un píxel en las columnas. En la primera fila, está la imagen a tratar; en la figura 11(a), se observa el espectro de la imagen tal cual, donde las imperfecciones se deben a la naturaleza misma del filtro de Bayer que en una vertical tiene solo sensores rojo-verde y en la siguiente solo verde-azul. Al sumar y promediar con la imagen desfasada se obtiene el espectro mostrado en 11(b). Es un método muy simple que conserva la resolución intrínseca de la cámara tomando en cuenta solo el píxel real que pretende el filtro de Bayer.

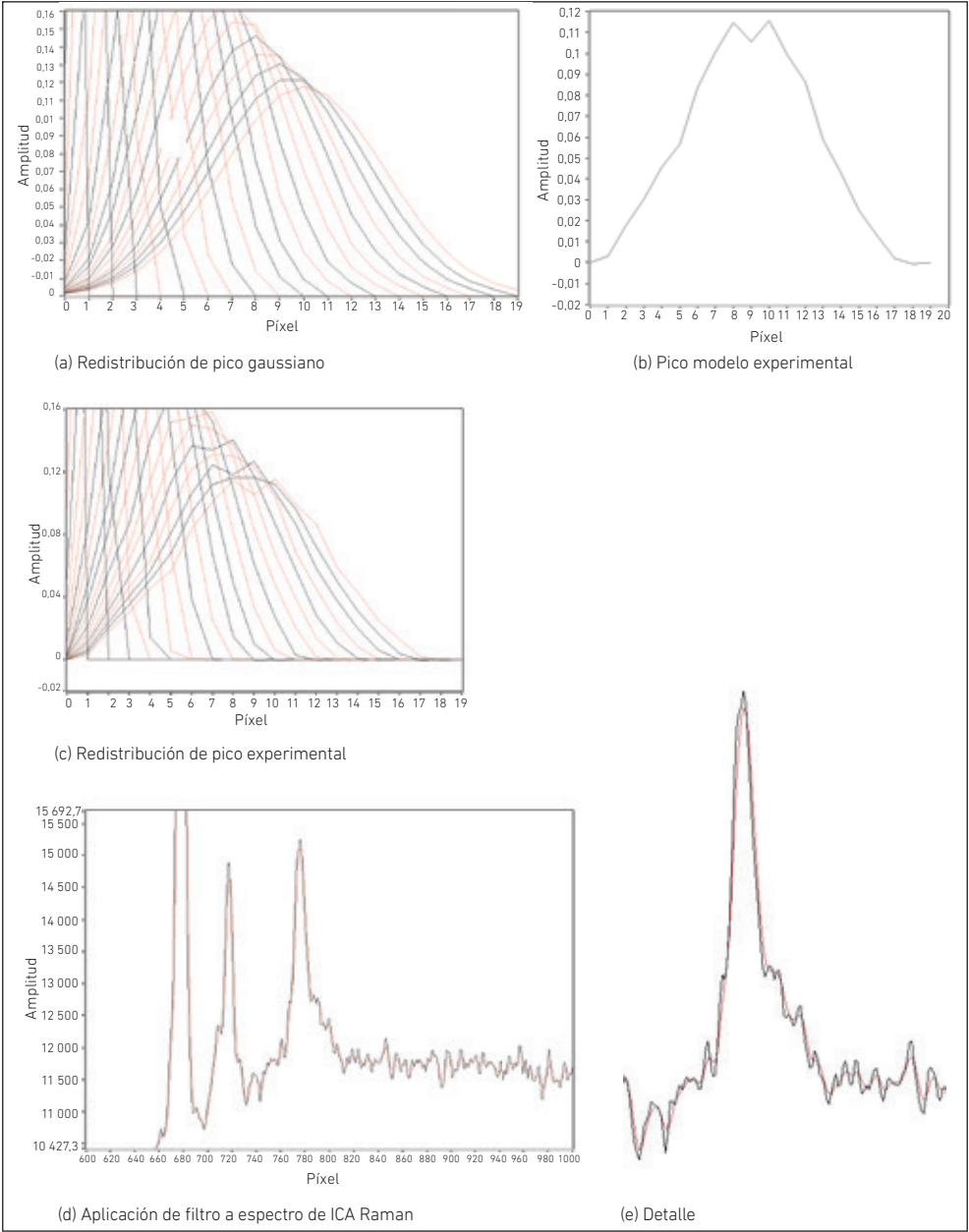
Figura 11*Tratamiento de información cruda por desfase de una columna de píxeles*

El método de redistribución de valores definido en el apartado “Métodos en la medición y procesamiento de datos” tiene muchas aplicaciones. Una de ellas es la renormalización de espectros, ya sea con transformaciones lineales o no lineales, así como el uso de filtros de correlación de resolución variable contruidos, en los que se requiera usar modelo de picos obtenido en experimentos en vez de usar picos modelados matemáticamente, que no siempre reflejan la realidad.

En la figura 12(a), se muestra el resultado de aplicar el método de redistribución sobre un pico modelo gaussiano; en 12(b), un pico obtenido en un experimento y los correspondientes picos de resolución variable en 12(c), para ser usados como filtro de correlación, así como su aplicación en una región de un espectro, tal como aparecen en 12(d) y los detalles en 12(e).

Figura 12

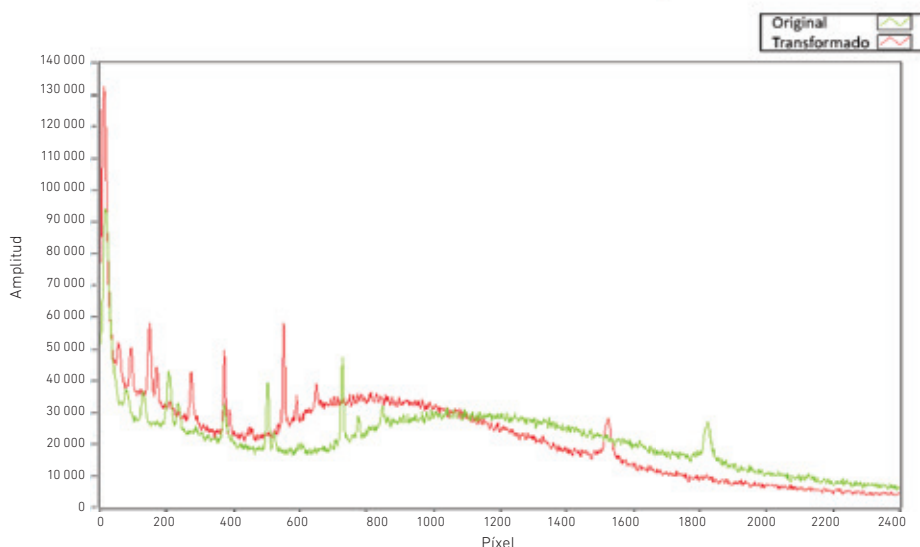
Redistribución de un pico filtro modelo de 20 píxeles a resoluciones de menor ancho de pico a media altura



En la figura 13, se presenta la aplicación de la redistribución con propósitos de linealización. En este caso, se usa una curva de calibración no lineal de la posición del píxel en función de la longitud de onda y se redistribuye para forzar que la relación posición vs. longitud de onda sea lineal.

Figura 13

Linealización de espectro Raman



El espectro original (en verde) ha sido redistribuido de tal manera que la coincidencia entre las longitudes de onda inicial y final sean las mismas, y que el ancho de cada canal tenga un valor en longitud de onda constante (espectro lineal).

Como complemento de los métodos mostrados líneas arriba, también se ha ensayado la fusión de espectros como alternativa a las variaciones de resolución, cuando se focaliza alternando en longitudes de onda bajas, medias y altas para reconstruir un espectro uniformemente focalizado en las tres regiones. Como prueba de concepto, se utilizó un espectrofotómetro de radiación visible y se aplicaron funciones triangulares para migrar progresivamente del primer al segundo espectro y del segundo al tercero. En la prueba de concepto, se sumaron los tres espectros resultantes para recuperar el original.

CONCLUSIONES

En el desarrollo de instrumentos virtuales, se requiere afinar cada aspecto del conjunto, desde el arreglo físico de los componentes hasta las rutinas de cálculo y análisis, así

como la presentación de resultados. El desarrollo de pruebas de concepto, desde el fenómeno mismo, así como las partes físicas en presencia del fenómeno, requiere ser optimizado parte por parte, además de su acople entre partes físicas y con la componente lógica. Como parte de la experiencia en el desarrollo de varios instrumentos alternativos, se muestra que un instrumento hecho en casa es capaz de competir en calidad de mediciones con instrumentos comerciales a costos mucho menores, incluso en órdenes de magnitud, y superarlos en prestaciones con la aplicación de rutinas de *software* que van desde las operaciones básicas hasta la aplicación de funciones matemáticas más elaboradas, como funciones especiales y transformadas de Fourier tanto para el espacio como el tiempo, en simultáneo de tiempo/espacio y frecuencia.

A diferencia de los instrumentos comerciales que funcionan como cajas negras, el desarrollo de los instrumentos y los métodos aplicados tienen mucho valor en la formación de los estudiantes de ciencias e ingeniería, porque en ese proceso se afina cada una de las etapas de la cadena correspondientes a las mediciones de precisión. Por eso, concluimos que son de vital importancia en la formación de futuros investigadores científicos, tanto desde el punto de vista cualitativo como cuantitativo, y pueden ser aplicados tempranamente en el pregrado. Asimismo, son valiosos como posibles semillas de emprendimientos comerciales.

REFERENCIAS

- Dhankhar, D., Nagpal, A., & Rentzepis, P. M. (2021). Cell-phone camera Raman spectrometer. *Review of Scientific Instruments*, 92(5), 1-8. <https://doi.org/10.1063/5.0046281>
- El Hammoumi, A., Motahhir, S., Chalh, A., El Ghzizal, A., & Derouich, A. (2018). Low-cost virtual instrumentation of PV panel characteristics using Excel and Arduino in comparison with traditional instrumentation. *Renewables: Wind, Water, and Solar*, 5(1), 1-16. <https://doi.org/10.1186/s40807-018-0049-0>
- Kovarik, M. L., Clapis, J. R., & Romano-Pringle, K. A. (2020). Review of student-built spectroscopy instrumentation projects. *Journal of Chemical Education*, 97(8), 2185-2195. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.0c00404>
- Li, H., Liu, X., Li, L., Mu, X., Genov, R., & Mason, A. (2016). CMOS electrochemical instrumentation for biosensor microsystems: a review. *Sensors*, 17(12), 74. <http://dx.doi.org/10.3390/s17010074>
- Li, T., Zhong, F., Pan, B., Li, Z., Huang, C., & Deng, Z. (2017). A brief review of OPT101 sensor application in near-infrared spectroscopy instrumentation for intensive care unit clinics. *Sensors*, 17(8), 1701. <http://dx.doi.org/10.3390/s17081701>

- Montoya, E. H., Arbildo, A., & Baltuano, O. (2015). A homemade cost effective Raman spectrometer with high performance. *Journal of Laboratory Chemical Education*, 3(4), 67-75. <http://article.sapub.org/10.5923.j.jlce.20150304.02.html>
- Emmanuel, N., Nair, R. B., Abraham, B., & Yoosaf, K. (2021). Fabricating a low-cost Raman spectrometer to introduce students to spectroscopy basics and applied instrument design. *Journal of Chemical Education*, 98(6), 2109-2116. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.jchemed.0c01028>
- Sinhaa, R. K., & Biswas, P. (2020). Structural elucidation of Levofloxacin and Ciprofloxacin using density functional theory and Raman spectroscopy with inexpensive lab-built setup [Resumen]. *Journal of Molecular Structure*, 1222, 128946 <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2020.128946>
- Young, C. C., & Sung, I. A. (2020). Fabricating a Raman spectrometer using an optical pickup unit and pulsed power. *Scientific Reports*, 10, 11692. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68650-7>

