

# Experimentos para ilustrar la frecuencia de resonancia en una microbalanza de cristal de cuarzo con materiales de bajo costo

Julio David Gonzales Balladares 

Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. Perú. [julio.gonzalesb@ciplima.org.pe](mailto:julio.gonzalesb@ciplima.org.pe)

Evelyn Toque-Huamán 

Universidad peruana de ciencias aplicadas. Perú. [pcinetoq@upc.edu.pe](mailto:pcinetoq@upc.edu.pe)

[Recepción: 29 Abril 2023. Revisado: 1 Julio 2023. Aceptado: 30 Julio 2023]

**Resumen:** Este estudio propone tres actividades para una práctica de laboratorio multidisciplinaria con estudiantes universitarios de ciclos avanzados, estas actividades didácticas buscan desarrollar la curiosidad científica mediante la construcción de un equipo analítico. Con este objetivo, los estudiantes ensamblan una microbalanza con frecuencímetros de bajo de costo reemplazando el osciloscopio por smartphones, contadores de frecuencia de bricolaje, y placas de desarrollo Arduino, con el fin educativo de ilustrar las propiedades piezoeléctricas del cristal de cuarzo, y su relación con la frecuencia de resonancia mediante un aprendizaje experimental.

**Palabras clave:** Circuito oscilador; Microbalanza; DIY; QCM; Smartphone; Ciencia.

## Experiments to illustrate the resonance frequency in a quartz crystal microbalance with low cost materials

**Abstract:** This study proposes three activities for a multidisciplinary laboratory practice with university students of advanced cycles, these didactic activities seek to develop scientific curiosity through the construction of an analytical instrument. To this end, students assemble a microbalance with low-cost frequency meters by replacing the oscilloscope with smartphones, DIY frequency counters, and Arduino development boards, for the educational purpose of illustrating the piezoelectric properties of quartz crystal and its relationship with the resonant frequency by experiential learning.

**Keywords:** Oscillator circuit; Microbalance; DIY; QCM; Smartphone; Science.

---

**Para citar este artículo:** Gonzales-Balladares, J. D. y Toque-Huamán, E. (2024). Experimentos para ilustrar la frecuencia de resonancia en una microbalanza de cristal de cuarzo con materiales de bajo costo. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias* 21(2), 2201. doi: 10.25267/Rev\_Eureka\_ensen\_divulg\_cienc.2024.v21.i2.2201

---

## Introducción

El sorprendente avance de la electrónica en el mundo ha permitido a la tecnología estar al alcance de los estudiantes lo que permite en la actualidad desarrollar actividades educativas innovadoras. Dejar a los estudiantes construir sus propios equipos analíticos mejora la experiencia en el aula con un aprendizaje activo. Así mismo ayuda a comprender los principios de física y química inherentes en el funcionamiento de estos equipos (Scheeline, 2010). El aprendizaje experimental (basado en experiencias) es empleado como un estilo educativo que desarrolla en los estudiantes la curiosidad científica, y las habilidades del orden superior (analizar, evaluar, y crear) de la taxonomía de Bloom y Krathwohl (1956).

Las microbalanzas de cristal de cuarzo (QCM) son equipos utilizados en diversas investigaciones relacionadas con análisis: químicos, físicos, farmacéuticos, ambiental, y de

alimentos. Por lo que son equipos necesarios en la educación universitaria para la formación de los futuros investigadores científicos. Las QCM son equipos empleados para medir pequeñas cantidades de masa en fase gaseosa o líquida (Arnau, 2008; Alassi *et al.*, 2017), y utilizan las propiedades piezoeléctricas de los cristales-AT para detectar cambios de masa por superficie en el cristal ( $\Delta m$ ) con respecto a su frecuencia de resonancia ( $\Delta f$ ). Esta relación es expresada en la ecuación de Sauerbrey, y mostrada en la ecuación (1) (Sauerbrey, 1959; Flores-Flores *et al.*, 2010; Kamel *et al.*, 2013).

$$\Delta f = -C_f \Delta m . \quad (1)$$

Donde  $C_f$  es el factor de sensibilidad del cristal y es una constante que depende del espesor y las propiedades intrínsecas del cristal de cuarzo (Rodahl *et al.*, 1995; Flores-Flores *et al.*, 2010). Pero en el caso de muestras en fase líquida la ecuación (1) es válida únicamente en películas infinitesimalmente delgadas poco viscosas con impedancia acústica cercanas a las del cuarzo (Bruckenstein y Shay, 1985), debido a factores como: las propiedades del líquido interfacial, el acoplamiento en el cristal, y la morfología de las películas superficiales (Nomura y Okuhara, 1982; Kanazawa y Gordon II, 1985).

El funcionamiento de una QCM se basa en el efecto piezoeléctrico en el cristal de cuarzo, uno de los fenómenos físicos que han tenido un gran impacto en el campo de la electrónica. Desde el punto de vista de la física es un fenómeno interesante para la investigación de los materiales cristalinos debido que el efecto piezoeléctrico es una propiedad fundamental que tienen los cristales de cuarzo de convertir la energía eléctrica en mecánica y viceversa (Cady, 1946; Flores-Flores *et al.*, 2010).

Las QCM están principalmente conformados por: dos circuitos osciladores, celdas con cristales-AT, fuentes de alimentación, unidades de control, computadoras personales (PC), frecuencímetros (Kamel *et al.*, 2013), osciloscopios, bombas de vacío, y bombas peristálticas.

### **Frecuencímetros alternativos**

Debido a la popularidad y versatilidad de las placas de desarrollo (Arduino, Teensy, y Raspberry) distintos investigadores han optado por remplazar el osciloscopio y usarlas como frecuencímetros en sus QCM. En su estudio Mista *et al.* (2016) adaptó el núcleo del módulo de una OpenQCM para operar con un Arduino Micro, silimar a Wei (2016) que empleo un Arduino Mega, mientras Carvajal-Ahumada *et al.* (2017), y Julian *et al.* (2020) utilizaron placas de Arduino DUE con el objetivo de evaluar las propiedades fisico-químicas en sustancias puras, y mezclas.

Otra opción de frecuencímetro son los smartphones usados principalmente en la comunicación tienen potencial para investigaciones en ensayos fisico-químicos debido a que son portátiles, tienen incorporados múltiples sensores (Li *et al.*, 2016), y cuentan con aplicaciones (APPs) que le permiten medir la frecuencia en un rango 20 Hz a 20 KHz.

Con el avance de la tecnología en los últimos años se pueden adquirir también por internet los contadores de frecuencia de bricolaje o llamados “hazlo tú mismo” (DIY). Estos frecuencímetros pueden remplazar al osciloscopio con fines didácticos, y son creados por profesionales que se involucran en el avance de la ciencia, la tecnología, y la innovación (CTI) basados en los principios de código abierto. Esto es aprovechado por los laboratorios DIY que buscan encontrar soluciones alternativas a los problemas cotidianos, e innovadores a problemas científicos (Meissner *et al.*, 2021). Así Büescher en su proyecto

DL4YHF desarrolló un contador de frecuencia con un circuito integrado programable (PIC) 16F628 que opera en un rango de trabajo de 1 Hz a 50 MHz.

### Circuitos osciladores

Entre los componentes que conforman la QCM se encuentran los circuitos osciladores que generan la resonancia del cristal-AT hasta su frecuencia fundamental. Siendo muy empleados en investigaciones los circuitos integrados (IC) del tipo transistor-transistor lógico (TTL), y del tipo semiconductor de óxido de metal complementario (CMOS) con configuraciones en serie o en paralelo (Pierce-Gate).

El diagrama esquemático del circuito oscilador con configuración en serie mostrado en la figura 1, empleo ICs 7404 de tipo TTL con algunas modificaciones para operar a 6 MHz. Basado en las investigaciones de Bruckenstein y Shay (1985), Kamel *et al.* (2013), Flores-Flores *et al.* (2010) y Wei (2016).

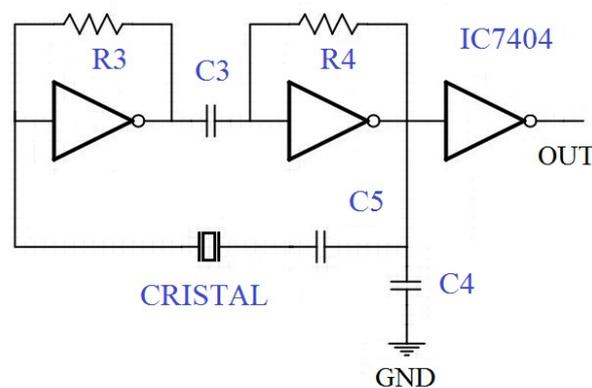


Figura 1. Oscilador de cristal resonante en serie con IC 7404.

El diagrama esquemático del circuito oscilador con configuración en paralelo es mostrado en la figura 2, fue diseñado para operar con un valor de oscilación de 10 MHz usando ICs de tipo CMOS (74LVC1XG04) y de tipo TTL (74HC04 y 74LS04), utilizado en las investigaciones de Mista *et al.* (2016), Wei (2016), y Jayasvasti *et al.* (2017).

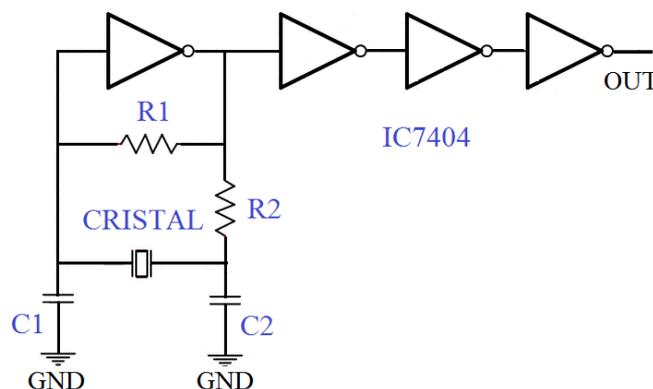
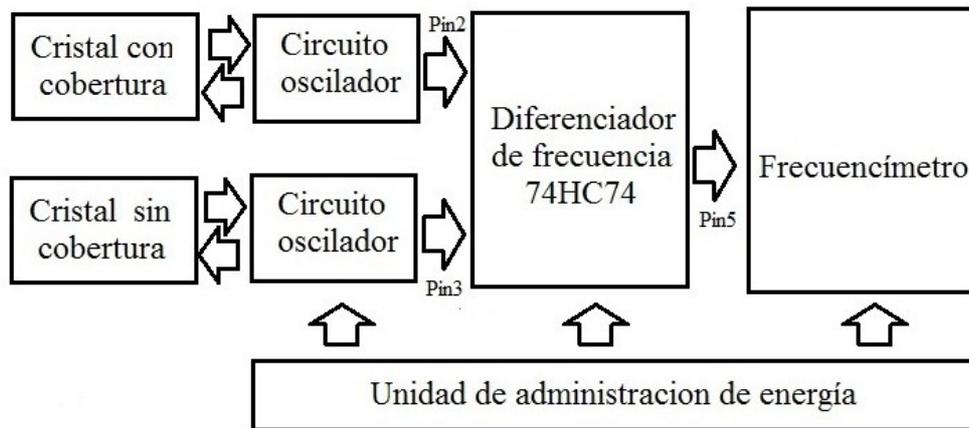


Figura 2. Oscilador de cristal resonante en serie con IC 7404.

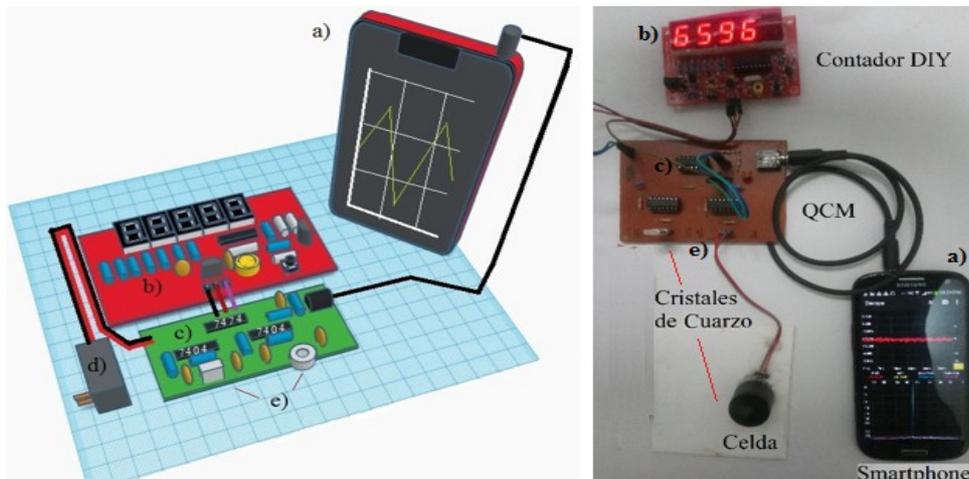
## Diseño de la QCM

La QCM empleada con fines didácticos (figura 3) está conformada por: dos circuitos osciladores, dos cristales resonadores de cuarzo HC49U, un frecuencímetro (contador de frecuencia DIY o Smartphone), una unidad de administración de energía de 5 voltios (V), y un diferenciador de frecuencia IC74HC74 en modo flip-flops dual activado por borde positivo tipo D que recibe la frecuencia de resonancia de los dos circuitos osciladores, y los compara para obtener el valor de  $\Delta f$ . Finalmente una celda cilíndrica de plástico (tapa de tubo de ensayo) de 1 cm de radio por 1 cm de altura que protege al cristal resonador de cuarzo HC49U sin cobertura (figura 4). La QCM se baso en los estudios de Mista *et al.* (2016), Wei (2016), y Jayasvasti *et al.* (2017), y tiene un costo de 38 €.



**Figura 3.** Diagrama de bloques con la configuración de una QCM empleada con fines didácticos.

Para los frecuencímetros se usaron; un contador de frecuencia DIY de marca SainSmart modelo 101-92-132, y dos smartphones. El primero es un smartphone Samsung modelo S3 con el APP Oscilloscope diseñado por Sound-Base Audio, LLC, y el segundo un smartphone Öwn SmartValue con el APP Multímetro/Osciloscopio/Generador Digital diseñado por NECO quien anexo divisores de voltaje para proteger el smartphone conectado a la placa impresa mediante conectores jacks Tip-Ring-Ring-Sleeve (TRRS) de 3.5 mm.



**Figura 4.** (Izq.) Configuración de la QCM. a) smartphone, b) contador de frecuencia DIY, c) dos circuitos osciladores con un diferenciador de frecuencia, d) administración de energía, e) cristales de cuarzo. (Der.) Una QCM ensamblada con materiales de bajo costo.

El último frecuencímetro evaluado fue una placa de desarrollo Arduino UNO conectado a una PC que utiliza un programa en Python para almacenar los valores de  $\Delta f$  por segundo en un archivo del tipo .txt usando un sketch para usar el pín 5 del Arduino Uno como contador de frecuencias mediante la librería FreqCount. Los datos que respaldan los hallazgos de este estudio están disponibles en Mendeley Data. doi: 10.17632/bx9rdxdnk4.1 (<https://data.mendeley.com/datasets/bx9rdxdnk4/1>)

Para el diseño de los dos circuitos osciladores se presentan cuatro opciones con configuraciones en serie y paralelo (figura 1 y figura 2) impresas en cuatro placas usando dos IC de la familia 7404, resistencias y condensadores (ver tabla 1).

**Tabla 1.** Componentes electrónicos usados en los circuitos osciladores

Placa	Circuito Oscilador	IC TTL/CMOS	Cristal (MHz)	Componentes
1	Paralelo	74LVC1XG04	10	$R_1=1\text{ M}\Omega$ ; $R_2=1\text{ k}\Omega$ ; $C_1=22\text{ pF}$ ; $C_2=22\text{ pF}$
2	Paralelo	74HC04	10	$R_1=1\text{ M}\Omega$ ; $R_2=1\text{ k}\Omega$ ; $C_1=22\text{ pF}$ ; $C_2=22\text{ pF}$
3	Paralelo	74LS04	10	$R_1=1\text{ M}\Omega$ ; $R_2=1\text{ k}\Omega$ ; $C_1=22\text{ pF}$ ; $C_2=22\text{ pF}$
4	Serie	74HC04	6	$R_3=R_4=300\ \Omega$ ; $C_3=10\text{ nF}$ ; $C_4=120\text{ pF}$ ; $C_5=22\text{ pF}$

## Procedimiento experimental

En la enseñanza universitaria entender el funcionamiento de los equipos acerca a los estudiantes a la comprensión de fenómenos físicos, químicos y eléctricos. Por ello las prácticas propuestas como recursos didácticos deben adaptarse a diferentes niveles educativos (Tomas-Serrano, 2021). Para estudiantes de cursos multidisciplinarios de ciclos avanzados este estudio propone una práctica de laboratorio organizada en equipos de cuatro estudiantes. La clase inicia con una pregunta generadora dada por el docente ¿Cómo medimos pequeñas cantidades de masa? o ¿Cómo funciona una microbalanza? y continúa con el desarrollo de una de las tres actividades propuestas según el nivel de conocimientos en física, química y electrónica. Luego, los estudiantes son evaluados en tres habilidades: analizar la información teórica, evaluar los resultados entre grupos, y crear sus propios equipos analíticos. Finalmente, los estudiantes realizaran una breve exposición mostrando el funcionamiento de sus QCM, y sus hallazgos en un informe.

### 1ª Actividad: Evaluación de los circuitos osciladores

Los estudiantes en trabajo colaborativo ensamblan una QCM (ver figura 3) con uno de los cuatro circuitos osciladores presentados en la tabla 1. Se enciende la QCM sin colocar muestra en el cristal HC49U sin cobertura. Posteriormente con ayuda de un frecuencímetro de bajo costo se registran en una hoja de cálculo 180 lecturas de  $\Delta f$ . Luego los estudiantes calculan la desviación standard (SD) de  $\Delta f$ , y exponen sus hallazgos. Finalmente el profesor de manera gráfica compara la estabilidad entre las QCM, y realiza un debate entre los estudiantes ¿Cuál QCM presenta los valores de  $\Delta f$ , más estables? ¿Por qué? La figura 5 muestra los valores de  $\Delta f$  obtenidos en un ensayo.

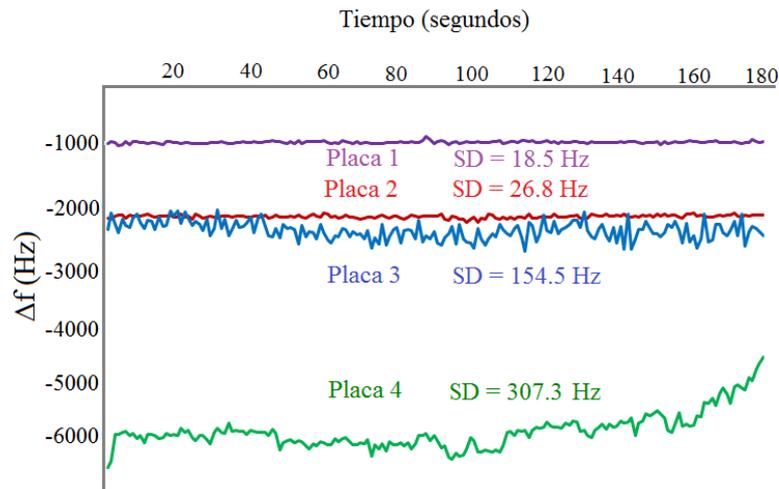


Figura 5. Estabilidad en cuatro distintos circuitos osciladores usando una placa de desarrollo Arduino.

## 2ª Actividad: Evaluación de frecuencímetros

Los estudiantes en trabajo colaborativo ensamblan una QCM (ver figura 4) usando los circuitos osciladores de la placa 2 (ver tabla 1). Posteriormente el docente asigna a cada grupo un frecuencímetro de bajo costo (smartphone, contador DIY, placa de desarrollo Arduino). El experimento inicia cuando un integrante del grupo coloca 5  $\mu\text{L}$  de una muestra que contiene 20 ppm de glicerina en el cristal de cuarzo HC49U sin cobertura, mientras otro estudiante graba en un minuto de video el frecuencímetro, y registra 60 lecturas de  $\Delta f$  en una plantilla de cálculo. Esta actividad tiene como objetivo que los estudiantes analicen y comparen los resultados obtenidos de  $\Delta f$  para posteriormente debatir sobre el desempeño de los frecuencímetros. Para ello deben aplicar la prueba ANOVA al 95 % y la prueba de agrupación de FISHER. Esto permite al docente desarrollar en los estudiantes las habilidades de análisis, evaluación de datos, y reforzar conceptos de estadística aplicada a en ensayos.

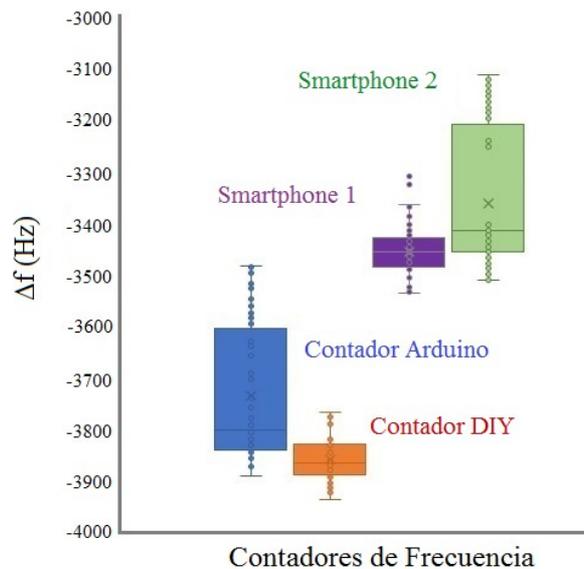


Figura 6. Comparación entre los valores de variación de frecuencia ( $\Delta f$ ) obtenidos en una muestra de 20 ppm de glicerina usando frecuencímetros de bajo costo.

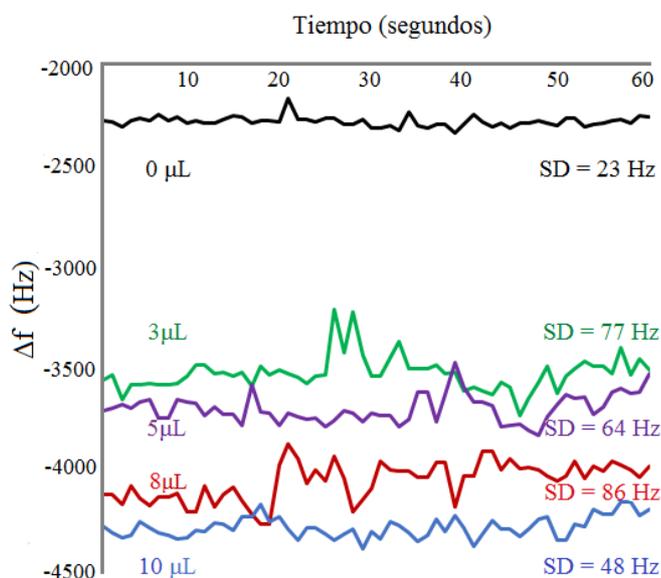
Los resultados obtenidos en el ensayo (figura 6 y tabla 2) demuestran que los frecuencímetros pueden emplearse con fines didácticos, porque son capaces de medir la frecuencia de resonancia en una QCM. Las pruebas estadísticas ANOVA ( $p < 0.05$ ) y agrupación de FISHER demuestran que hay diferencias en el funcionamiento entre los frecuencímetros.

**Tabla 2.** Comparación de la variación de frecuencia ( $\Delta f$ ) entre el contador con Arduino, el contador DIY y los smartphones en una muestra de 5  $\mu\text{L}$  con 20 ppm de glicerina. \*Media ( $n = 60$ )

Frecuencímetro	$\Delta f^*$ (Hertz)	SD (Hertz)	Grupo de Fisher
Contador con Arduino	-3733.58	128.62	A
Contador DIY	-3857.62	41.12	B
Smartphone 1	-3454.20	48.43	C
Smartphone2	-3361.30	132.80	D

### 3ª Actividad: Desempeño de una QCM

Los estudiantes en trabajo colaborativo ensamblan una QCM (ver figura 4) usando los circuitos osciladores de la placa 2 (ver tabla 1). El experimento inicia cuando un integrante del grupo enciende la QCM sin colocar muestras en el cristal resonador, mientras otro estudiante graba en un minuto de video el frecuencímetro, otro estudiante registra 60 lecturas de  $\Delta f$  en una plantilla de cálculo. Posteriormente se repetirá esta acción cuatro veces colocando muestras de agua pura a (3, 5, 8, 10  $\mu\text{L}$ ) previa limpieza del cristal con un hisopo impregnado con propan-2-ol (alcohol isopropílico) antes de cada ensayo. Finalmente los estudiantes expondrán sus resultados y mostraran una gráfica el desempeño de su QCM al medir  $\Delta f$  a distintos volúmenes. La figura 7 muestra los valores de  $\Delta f$  obtenidos en un ensayo.



**Figura 7.** Comparación entre la variación de frecuencia ( $\Delta f$ ) a volúmenes de 3, 5, 8, y 10  $\mu\text{L}$  con el contador frecuencia DIY.

Para obtener la relación entre  $\Delta m$  y  $\Delta f$  (tabla 3) se debe considerar la densidad del agua  $1 \text{ g mL}^{-1}$ , y la superficie del cristal  $1 \text{ cm}^2$ , tener presente que las muestras no formaron películas infinitesimalmente delgadas en el cristal, y también que este ensayo se ha

realizado en condiciones ambientales. Por lo que es necesario restar el primer valor de  $\Delta f = -2280.21$  Hz a las muestras de (3, 5, 8, 10  $\mu\text{L}$ ). La QCM con materiales de bajo costo presenta limitaciones por lo que se presenta en este estudio solo con fines didácticos. Por este motivo para que los estudiantes puedan evaluar sus resultados obtenidos se sugiere aplicar el modelo de regresión a los datos obtenidos y comparar el valor de sus pendientes. Así en este ensayo se obtuvo la ecuación de una recta con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.9868, una pendiente de  $100.44 \text{ Hz mg}^{-1}$ , y un intercepto de  $-812.63 \text{ Hz}$  con los datos de la tabla 3.

**Tabla 3.** Relación entre  $\Delta m$  y  $\Delta f$  obtenidos por la QCM con un contador de frecuencia DIY.

$\Delta m$ (mg $\text{cm}^{-2}$ )	$\Delta f$ (Hz)
3	-1131.31
5	-1290.16
8	-1616.96
10	-1823.46

Estas actividades tienen como objetivo de aprendizaje que los estudiantes analicen y comparen los resultados obtenidos de  $\Delta f$  para posteriormente debatir sobre el desempeño de sus QCM. Al finalizar el profesor brinda la retroalimentación en los estudiantes y refuerza en las habilidades (analizar, evaluar, y crear) de la taxonomía de Bloom y Krathwohl (1956).

## Conclusión

El diseño de una QCM de fácil construcción con componentes de bajo costo presentada en este artículo beneficia a los estudiantes que se encuentran actualmente formándose en distintas instituciones educativas universitarias. Contribuye con tres novedosas actividades de laboratorio que permiten el aprendizaje experimental, incentivan a la curiosidad científica, y permiten desarrollar las habilidades de orden superior de la taxonomía de Bloom y Krathwohl.

## Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado y financiado por Dirección de Investigación de la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (A-032-2021-2).

## Referencias

- Arnau, A. (2008). A Review of interface electronic systems for AT-cut quartz crystal microbalance applications in liquids. *Sensors* 8(1), 370-411. <https://doi.org/10.3390/s8010370>
- Alassi, A., Benammar, M., Brett, D. (2017). Quartz crystal microbalance electronic interfacing systems: A review, *Sensors*. *Sensor* 17(12), 2799. <https://doi.org/10.3390/s17122799>
- Bloom, B., Krathwohl, D. (1956). *Taxonomy of educational objectives: The classification of educational goals. Handbook I: Cognitive domain*. Nueva York, USA: Longmans, Green.

- Bruckenstein, S., Shay, M. (1985). Experimental aspects of use of the quartz crystal microbalance in solution. *Electrochimica Acta* 30(10), 1295-1300, [https://doi.org/10.1016/0013-4686\(85\)85005-2](https://doi.org/10.1016/0013-4686(85)85005-2)
- Cady, W. G. (1946). *Piezoelectricity: An introduction to the theory and applications of electromechanical phenomena in crystals*. McGraw-Hill, New York.
- Carvajal-Ahumada, L. A., Serrano, J. J., Pazos, J. E., García, M. A., Herrera, O. L. (2017). Diseño y evaluación de un micro viscosímetro de bajo costo utilizando un resonador de cristal de cuarzo y Arduino. *Orinoquia* 21(1), 45-55, <https://doi.org/10.22579/20112629.430>
- Flores-Flores, E., Flores-Mena, J. E., Castillo, M. M. M., Arias, E. M. G., Mendoza-Álvarez, M. E., Alcántara-Iniesta, S. (2010). Construcción y caracterización eléctrica de una microbalanza con Bi<sub>4</sub>Ti<sub>3</sub>O<sub>11</sub>. *Superficies y vacío* 23(S), 153-160, <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94248264031>
- Jayasvasti, S., Isarakorn, D., Nundrakwang, S. (2017). Comparative study of QCM analyzers based on pierce oscillator and electromechanical impedance techniques. *IEEE Conferences*, 1, <https://ieeexplore.ieee.org/document/7859608>
- Julian, T., Hidayat, N., Rianjanu, A., Dharmawan, A. B., Wasisto, H. S., Triyana, K. (2020). Intelligent mobile electronic nose system comprising a hybrid polymer-functionalized quartz crystal microbalance sensor array. *ACS Omega* 5(45), 29492-29503, <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c04433>
- Kamel, M. M., El-Nimr, M. K., Assar, S. T., Atlam, A. S. (2013). Design of a simple low-cost quartz crystal microbalance system. *Instrumentation Science & Technology* 41(5), 473-489, <https://doi.org/10.1080/10739149.2013.792096>
- Kanazawa, K. K., Gordon II, J. G. (1985). The oscillation frequency of a quartz resonator in contact with liquid. *Analytica Chimica Acta* 175, 99-105, [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(00\)82721-X](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(00)82721-X)
- Li, F., Bao, Y., Wang, D., Wang, W., Niu, L. (2016). Smartphones for sensing. *Science Bulletin* 61(3), 190-201, <https://doi.org/10.1007/s11434-015-0954-1>
- Meissner, D., Sarpong, D., Ofosu, G., Botchie, D. (2021). The rise of do-it-yourself (DiY) laboratories: Implications for science, technology, and innovation (STI) policy. *Technological Forecasting and Social Change* 165, <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120589>
- Mista, C., Zalazar, M., Pealva, A., Martina, M., Reta, J. M. (2016). Open source quartz crystal microbalance with dissipation monitoring. *Journal of Physics: Conference Series* 705, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/705/1/012008>
- Nomura, T., Okuhara, M. (1982). Frequency shifts of piezoelectric quartz crystals immersed in organic liquids. *Analytica Chimica Acta* 142, 281-284, [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(01\)95290-0](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(01)95290-0)
- Rodahl, M., Höök, F., Krozer, A., Brzezinski, P., Kasemo, B. (1995). Quartz crystal microbalance setup for frequency and Q-factor measurements in gaseous and liquid environments, *Review of Scientific Instruments* 66, 3924, <https://doi.org/10.1063/1.1145396>

- Scheeline, A. (2010). Teaching, learning, and using spectroscopy with commercial, off the shelf technology. *Applied Spectroscopy* 64(9), 256A-268A. <https://doi.org/10.1366/000370210792434378>
- Sauerbrey, G. (1959). Uso de cristales oscilantes para pesaje de capas delgadas y para micropesaje. *Zeitschrift für Physik* 155, 206-222. <https://doi.org/10.1007/BF01337937>
- Tomas-Serrano, A. (2021). Un experimento para ilustrar el primer principio de la termodinámica en bachillerato: creación de una nube de alcohol dentro de una botella. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias* 18(3), 3401, [https://doi.org/10.25267/Rev\\_Eureka\\_ensen\\_divulg\\_cienc.2021.v18.i3.3401](https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2021.v18.i3.3401)
- Wei, D. (2016). Tesis Master: Low-cost quartz crystal microbalance system platform designed for chemical nanoparticle, Kentucky, Western Kentucky University. <https://digitalcommons.wku.edu/theses/1635/>