



Diseño y prueba de un equipo de espectroscopia de resonancia acústica en líquidos y sus potenciales usos

Design and testing of acoustic resonance spectroscopy equipment and its potential uses

Juan Carlos Aranda¹ , Eleicer Ching-Prado^{1*} 

¹ Universidad Tecnológica de Panamá, Facultad de Ciencias y Tecnología, Laboratorio Pierre-Marie Curie, Panamá

juan.aranda1@utp.ac.pa; eleicer.ching@utp.ac.pa

Fecha de recepción: 16 de mayo de 2022; Fecha de aprobación: 22 de junio de 2022.

***Autor de correspondencia:** Eleicer Ching Prado (eleicer.ching@utp.ac.pa)

RESUMEN. Para las industrias es de mucha importancia conocer las características tanto de la materia prima como la de sus productos terminados, por eso es necesario contar con técnicas que les faciliten este análisis en un tiempo rápido, de manera no invasiva y confiable. Por ello, en este trabajo estudiamos la aplicación de un método de espectroscopia acústica sobre muestras líquidas, las cuales se les hace pasar una energía de excitación producidas por un barrido de ondas sonoras que van desde los 20Hz hasta los 20KHz, y luego la respuesta del sistema a dicha excitación es captada y procesada para su posterior análisis. La respuesta se muestra gráficamente en un espectro de resonancia, donde las bandas formadas brindan información sobre las características de la muestra que se está analizando. Para llevar a cabo dicho experimento, se construyó un equipo el cual cuenta con materiales adecuados para la acústica, y diseñado de tal forma que siempre tenga las mismas condiciones en cada prueba que se haga. Se usó un software para evaluar la respuesta acústica del sistema. El equipo se probó con distintas sustancias como agua, Alcohol al 70% y 95% para poder ver diferencias entre sustancias, obteniendo muy buenos resultados y consistencia en los mismos. Se puede ver las diferencias en los corrimientos de las bandas de resonancia entre el agua, el alcohol al 70%, y el alcohol al 95%. Estos resultados nos comprueban que es posible aplicar esta técnica para evaluar las propiedades de alimentos líquidos.

Palabras clave. *Bandas de resonancia, espectro de resonancia, propiedades fisicoquímicas.*

ABSTRACT. In industries it is very important to know the characteristics of both the raw material and the finished products, which is why it is necessary to have techniques that facilitate this analysis in a short time, in a non-invasive and reliable way. For this reason, in this work we study the application of a method of acoustic spectroscopy on liquid samples, which are made to pass an excitation energy produced by a sweep of sound waves ranging from 20Hz to 20KHz, and then the response of the system this excitation is captured and processed for later analysis. The response is displayed graphically in a resonance spectrum, in which information about the characteristics of the sample we are analyzing can be obtained by seeing the resonance bands formed. To carry out this experiment, an equipment was built which has adequate materials for acoustics and designed in such a way that it always has the same conditions in each test that is done. A free software was used to evaluate the response of the system. The equipment was tested with different substances, such as water, 70% and 95% alcohol to be able to see differences between substances, obtaining very good results and consistency in them. You can see the differences in the shifts of the resonance bands between water, 70% alcohol, and 95% alcohol. These results prove that it is possible to apply this technique to evaluate the properties of liquids, and especially those in the food field.

Keywords. *Resonance bands, resonance spectra, physicochemical properties.*

1. Introducción

Las técnicas de análisis no invasivas para materiales vienen desarrollándose desde hace décadas, ya que una técnica no invasiva tiene la ventaja de no destruir la muestra y puede ser utilizada in situ en una línea de

proceso. Con esto en mente, buscamos desarrollar un equipo basado en la técnica de resonancia acústica, el cual utiliza las ondas sonoras para evaluar las características de un material líquido, el cual puede ser

un alimento, un aceite, una sustancia química, entre muchas otras.

Esta técnica se viene utilizando desde los años 80 con diversos trabajos como el de Sinha, que desarrolla la tecnología de espectroscopia de resonancia acústica (ARS, por sus siglas en inglés) para evaluar las características de diversos armamentos utilizados por el ejército de los Estados Unidos, incluyendo aquellos que contengan sustancias peligrosas [1]. Posteriormente, se logra desarrollar un prototipo de equipo ARS portátil para detectar armas nucleares en los campos de batalla.

La técnica ARS se ha aplicado para investigar los cambios de composición de un gas dentro de un cilindro con plutonio [2]. También ha sido aplicado en las investigaciones de materiales, como el estudio de las vibraciones de barras sólidas de aluminio utilizando transductores de tipo magnético [3], [4]. En el campo de la medicina y la industria alimentaria, se han realizado investigaciones con la técnica ARS para productos en forma de cremas y pastas [5]. Igualmente se ha utilizado esta técnica para evaluar un producto mediante el impacto con una placa acoplada con un detector la cual recoge la vibración que se produce al momento de la colisión y evaluar su respuesta [6], [7]. Más recientemente, se han utilizado métodos acústicos para evaluar la textura de alimentos como las frutas, para determinar su estado de maduración [8]. También se realizaron estudios de resonancia acústica para evaluar la ruptura del cascarón de los huevos de gallina, en una línea de proceso, donde se utilizó, en la mayoría de los casos, un impacto para generar la excitación y un micrófono para recolectar la señal [9-14]. Otro estudio importante que se ha realizado es el uso del ARS de banda ancha para analizar la composición de las materias primas en polvo [15].

Adicionales aplicaciones de esta técnica involucran el estudio sobre la caracterización de las sales ya que algunas pueden contener más impurezas que otras y mediante la técnica de ARS de banda ancha se pudieron estudiar sus características [16]. También se ha podido estudiar el sonido que se produce al masticar los alimentos y evaluar si es crujiente [17]. Así como también la determinación de micotoxinas, como la vomitoxina, que se produce en los granos de trigo [18]. De igual forma, en productos agrícolas en los cuáles se evalúan sus propiedades acústicas para determinar sus

características que marquen diferencias [19]. Tal es el caso de frutas como la manzana donde se han realizado pruebas para evaluar su calidad [20].

Las características de las vibraciones acústicas de los productos, pueden ser medidas con métodos acústicos ya que la información interna del mismo puede ser obtenida por la interacción de la onda acústica con la muestra analizada. Los parámetros de la vibración acústica incluyen; la frecuencia natural, velocidad de propagación, impedancia acústica, coeficiente de atenuación entre otros. Las diferencias mecánicas de la estructura interna resultan en diferentes características de las vibraciones acústicas [21]. Si se disolviera una sustancia en polvo en un solvente líquido como el agua, se podrían observar el espectro acústico generado debido a los cambios de frecuencia del sonido que viaje en el medio de la disolución [22].

Las ondas de las vibraciones acústicas incluyen fenómenos de reflexión, dispersión, transmisión y absorción, cuando inciden en un producto o muestra, la manera en que se transmiten depende de las características de estos y están directamente relacionados con sus propiedades mecánicas y estructurales, como señalado anteriormente. En particular, la respuesta de las vibraciones acústicas depende de su módulo de elasticidad, radio de Poisson, masa, forma, y densidad [23], [24].

Las técnicas que utilizan vibraciones acústicas pueden clasificarse en función de los tipos de sensores que puedan ser utilizados para la medición de estas. Existen sensores de contacto los cuáles están tocando la superficie de la muestra, algunos de estos necesitan amplificadores de señal o son de tipo piezoeléctrico. También hay sensores que no necesitan un contacto directo con la muestra para realizar la medición como el vibrómetro de láser Doppler, siendo este último una técnica óptica. Los micrófonos han sido ampliamente utilizados para realizar estos tipos de estudios [25-28].

El fundamento de la técnica se basa en que todo objeto físico, ya sea sólido, hueco o esté lleno de fluidos, tienen muchos modos de vibración, denominados como los modos naturales de resonancia. Ellos son obtenidos en base a la forma del objeto, tamaño y propiedades físicas como el módulo de elasticidad, velocidad del sonido y densidad. Si el objeto es mecánicamente excitado por

frecuencias correspondientes a sus modos de vibración naturales, el efecto de resonancia puede ser observado con pequeñas energías de excitación y producen grandes amplitudes en las vibraciones del objeto. Para objetos llenos de un material, la resonancia natural es modificada por las propiedades físicas del material que llena el objeto. En consecuencia, el espectro de resonancia del objeto más su contenido posee información relevante sobre las propiedades del material contenido en su interior. El espectro de resonancia es obtenido por una continua excitación del objeto mediante un barrido de frecuencias y una medición en su respuesta, dando como resultado una firma acústica del objeto con su contenido. La medición puede ser de contacto directo con transductores, típicamente se emplean barridos entre 3KHz y 30 KHz en un tiempo menor a 60 segundos.[2]

Para desarrollar el experimento se escogió trabajar con una geometría cilíndrica para el vaso porta muestra, ya que la teoría de las vibraciones en las carcasas cilíndricas está muy desarrollada y se presentan diversos modelos matemáticos, los cuales permiten encontrar los modos de resonancia de estos sistemas, ya sea lleno en un material sólido o líquido, y para sistemas completamente vacíos. Para este proyecto se escogió el modelo matemático de Berry y Reissner [29], el cual permite encontrar los modos de resonancia del sistema.

$$(m_s + m_l)4\pi^2 f_{mn} = \frac{D}{a^4} (\lambda_m^2 + n^2)^2 + \frac{Eh}{a^2} \frac{\lambda_m^4}{(\lambda_m^2 + n^2)^2} \quad (1)$$

Siendo;

$$\lambda m = \frac{m\pi a}{L} \quad (2)$$

$$D = \frac{L E h^2}{12(1 - \nu^2)} \quad (3)$$

Donde f_{mn} es la frecuencia calculada, m_s es la masa por unidad de área, m_l es la masa aparente del líquido, h es el espesor de la pared de la carcasa, L es la altura de la carcasa, λ_m es el número de onda axial, D es el coeficiente de rigidez de flexión, E es el módulo de Young, ν es el radio de Poisson, m es el coeficiente por variar asociado con el modo longitudinal, y n es el otro coeficiente por variar asociado con el modo circunferencial de la carcasa.

En el presente proyecto, se construyó un equipo para hacer un barrido de frecuencias sobre una muestra líquida, el cual se encuentra en un contenedor de forma cilíndrica. Al realizar el barrido de sonido en la muestra, la respuesta acústica es detectada por un transductor y enviada a una computadora. Mediante un software para el análisis de sonido se obtiene un espectro de frecuencias, en donde se puede observar los modos de resonancia característicos del sistema, el cual incluye el vaso porta muestra y el líquido que lo contiene. Pudimos observar diferencia entre una misma sustancia, pero con diferentes concentraciones, esto viene siendo muy útil como herramienta de análisis para industrias como la de bebidas, alcoholes, aceites, entre otras.

El presente artículo está estructurado de la siguiente manera: La sección 2 describe el diseño y construcción del equipo, la sección 3 describe las pruebas y resultados, la sección 4 incluye análisis y discusión, siendo la sección 5 la conclusión.

2. Materiales y métodos

Para el diseño del equipo se tomaron las siguientes consideraciones: el equipo debe ser de un material liviano para poder transportarse fácilmente por el cual se seleccionó un material conglomerado MUF, pero además debe considerarse un alto grado de aislamiento para que los sonidos provenientes del ambiente no afecten el análisis realizado sobre la muestra, para lograr esto se colocó dentro del equipo una espuma de poliuretano. Se tomó en cuenta la posición y calibración del sensor y la fuente sonora, como el micrófono de tipo condensador y un audífono pequeño de tipo electrodinámico, ya que estos siempre deben estar a un mismo nivel y frente a frente. Además, se tomó en cuenta una estructura fija que sirviera como guía al vaso porta muestra la cual se hizo con teflón, ya que es importante que siempre quede en una misma posición [30], [31].

También se consideró un riel guía para fijar en el lugar indicado al sensor y al emisor con la muestra. Por último, se instalaron elementos de control para el movimiento del riel, este consta de un motor de corriente directa de 12V y un circuito que con 3 interruptores para controlar la dirección del movimiento del riel y la fijación de los sensores en la posición adecuada.

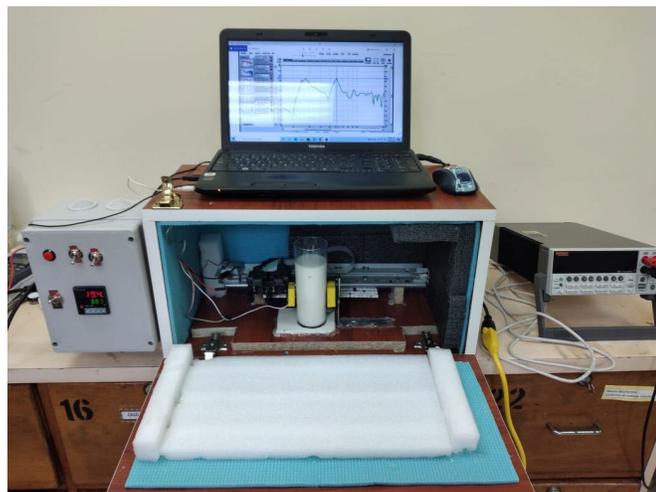


Figura 1. Equipo de resonancia acústico construido.

En la Figura 1 se puede ver el equipo construido con una muestra de leche, donde se observa a la izquierda de la imagen el micrófono de tipo condensador electreto el cual es una variante de micrófono electrostático, además este suele utilizar una lámina de plástico polarizado por lo cual no requiere alimentación. A la derecha se encuentra la fuente emisora, un audífono plano sin aislante de sonido incorporado. El vaso se encuentra centrado y ajustado con el riel en una guía hecha de teflón. Todo esto asegura que en cada medición se tenga las mismas condiciones que garantice la repetibilidad de un evento. Se tiene un sensor de temperatura tipo K, conectado a un controlador de tipo PID que sirve como indicador de temperatura.

El equipo funciona de la siguiente manera: al colocar el vaso con la muestra se procede a fijarlo en una posición determinada, posteriormente se ajustan el emisor y el detector de sonido al vaso mediante el controlador del riel de posición. Finalmente, se cierra la puerta de la cámara y se procede a utilizar el software de análisis, el cual genera un barrido sonido desde una frecuencia que va desde los 20 Hz hasta los 20KHz. El sonido pasa por la muestra y es recogido en el micrófono de tipo condensador el cual está conectado a la computadora a través de un cable Jack 3.5 mm hacia la tarjeta de sonido de esta y recogido por el software para generar el espectro con las bandas de resonancias y los mínimos de la muestra. Es decir, los datos de las vibraciones acústica se recogen en forma de pulsos en función del tiempo y

mediante una transformada de Fourier nos entrega la señal, en decibeles, en función de la frecuencia. Esto nos forma el espectro el cual analizamos.

El Software utilizado fue REW-Room EQ Wizard Room Acoustics versión V5.20.4, el cual es un programa de acuerdo de licencia de usuario final (EULA por sus siglas en inglés) muy usado para realizar análisis acústico en estudios de grabación y salas de eventos, los que requieren algunos parámetros de acústica especiales.

3. Resultados

3.1. Prueba de la acústica de la cámara del equipo

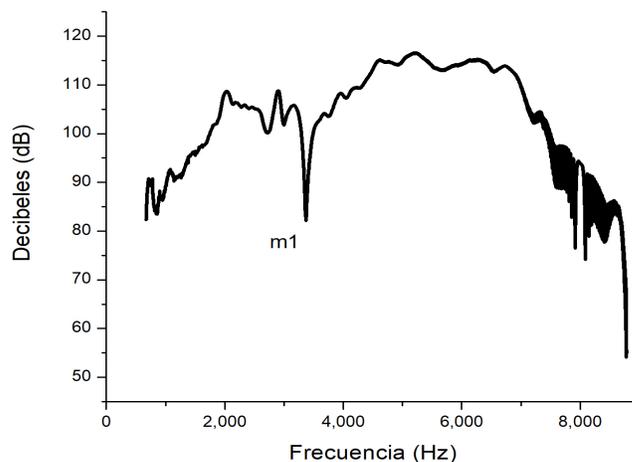


Figura 2. Espectro del equipo acústico sin el vaso.

Con la finalidad de evaluar la respuesta acústica de la cámara, se procedió a un barrido de sonido del sistema sin vaso porta muestra. En la Figura 2 se presenta el espectro, el cual nos muestra que solo se refleja un mínimo a una frecuencia promedio de 3,361Hz. Esta prueba se realizó tres veces en diferentes tiempos, mostrando una buena repetibilidad. No se observa en el espectro bandas de resonancia bien definidas.

3.2. Prueba del vaso vacío

Es muy importante conocer el comportamiento acústico del recipiente que contiene la muestra a analizar. Para el caso estudiado, el vaso de vidrio que se escogió es totalmente cilíndrico sin ningún tipo de relieve que pueda afectar los modos normales de vibración que

presenta el mismo. Por lo consiguiente se procedió a realizar la prueba acústica para formar el siguiente espectro característico del vaso.

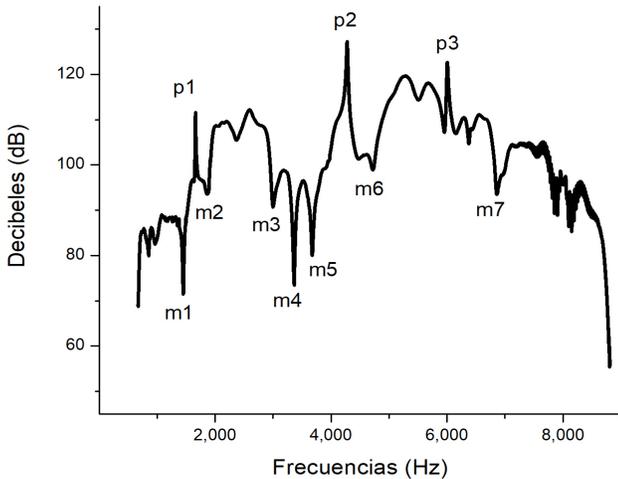


Figura 3. Espectro del vaso de vidrio vacío.

En la Figura 3, podemos observar el espectro acústico del vaso vacío con al menos tres (3) bandas de resonancia bien definidas (p1, p2 y p3) al igual que siete (7) mínimos. La Tabla 1 presenta las frecuencias de resonancias para las tres (3) pruebas realizadas. Una buena repetibilidad es observada para las bandas de resonancia y los mínimos, con una desviación casi inexistente para el vaso de vidrio de 250ml elegido para este experimento.

Tabla 1. Bandas de resonancia del espectro del vaso vacío

	Hz	Hz	Hz
Bandas	p1	p2	p3
Prueba r1	1,664	4,275	6,000
Prueba r2	1,664	4,275	6,000
Prueba r3	1,663	4,275	6,000
Promedio	1,664	4,275	6,000
Desviación	0.71	0	0

3.3. Prueba con el vaso de vidrio lleno de agua

Se realizaron tres pruebas diferentes con un mismo volumen de agua de 200ml medidos con una probeta graduada, con el objetivo de obtener el grado repetibilidad en los espectros. A continuación,

mostramos los resultados obtenidos en el siguiente espectro promedio.

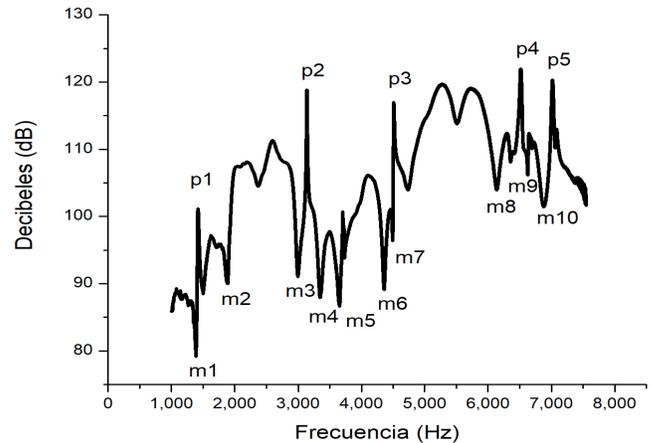


Figura 4. Espectro del vaso de vidrio lleno de agua.

En la figura 4, se muestra espectro acústico el cual tiene cinco (5) bandas de resonancia muy visibles (p1, p2, p3, p4 y p5) y diez (10) mínimos. En la Tabla 2 se pueden ver las frecuencias de resonancia obtenida en los tres (3) eventos con una muy buena repetibilidad y poca desviación, además que se observa que aparecieron dos (2) nuevas bandas de resonancia, p2 situada sobre los 3,135Hz y la banda de p5 situada sobre los 7,017Hz. También cabe resaltar que la banda de resonancia del espectro con el vaso vacío p2, viene siendo la equivalente con la banda p3 en el espectro del vaso lleno de agua, la cual en esta última se encuentra desplazado en aproximadamente 200Hz hacia la derecha.

Tabla 2. Bandas de resonancia del espectro del vaso lleno de agua

	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz
Bandas	p1	p2	P3	p4	p5
Prueba r1	1,416	3,135	4,506	6,511	7,017
Prueba r2	1,420	3,135	4,506	6,511	7,017
Prueba r3	1,416	3,135	4,509	6,511	7,015
Promedio	1,417	3,135	4,507	6,511	7,016
Desviación	2.31	0	2	0	1.15

3.4. Prueba con alcohol al 70% y 95%

Para lograr una mayor confianza en los resultados, se realizaron pruebas con sustancias químicas no viscosas,

entre ellas el alcohol, donde también se quería corroborar el grado de repetibilidad de las bandas de resonancia a tres (3) eventos similares.

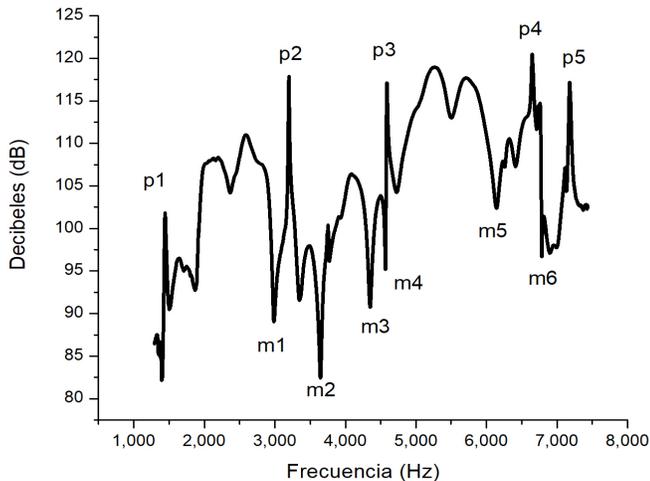


Figura 5. Espectro del alcohol al 70%.

En la figura 5 tenemos el espectro acústico del alcohol al 70%, donde se observa un parecido con el espectro del agua, ya que presenta cinco (5) bandas de resonancia bien marcadas (p1, p2, p3, p4 y p5), pero se diferencia en que solo presenta seis (6) mínimos. En la Tabla 3 se pueden observar como las bandas de resonancia se desplazaron hacia la derecha en casi 150Hz, con respecto al espectro del agua. Además, se observa una buena repetibilidad y una baja desviación.

Tabla 3. Bandas de resonancia del espectro de alcohol al 70%

	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz
Bandas	p1	p2	p3	p4	p5
Prueba r1	1,446	3,197	4,589	6,655	7,184
Prueba r2	1,446	3,197	4,583	6,647	7,176
Prueba r3	1,446	3,197	4,585	6,647	7,176
Promedio	1,446	3,197	4,586	6,650	7,179
Desviación	0	0	3.06	4.62	4.62

Se repitió el mismo procedimiento para alcohol con una concentración distinta, en este caso al 95 %. A continuación, observaremos los resultados de las mencionadas pruebas.

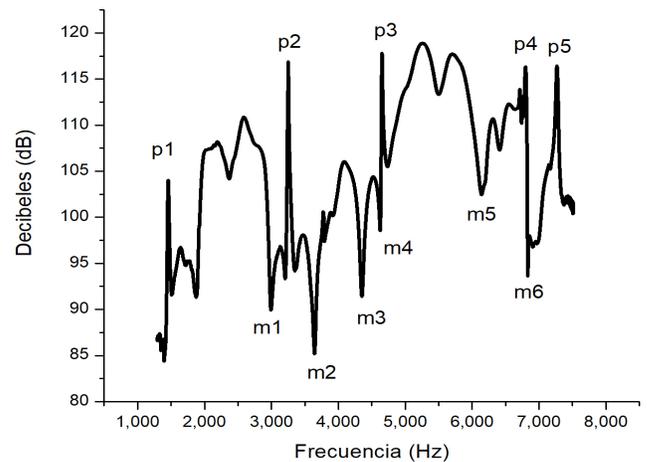


Figura 6. Espectro del alcohol al 95%.

En la figura 6 podemos observar el espectro acústico formado con el alcohol al 95%, este al igual que alcohol al 70% presenta cinco (5) bandas de resonancia bien definidas (p1, p2, p3, p4 y p5), y seis (6) mínimos. En la Tabla 4 se presentan las frecuencias de cada banda de resonancia notando que las mismas se encuentran desplazadas hacia la derecha con respecto a las bandas presentadas con el alcohol al 70%, el desplazamiento es de aproximadamente 100Hz. También podemos decir que se tiene una buena repetibilidad y baja desviación.

Tabla 4. Bandas de resonancia del espectro de alcohol al 95%

	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz
Bandas	p1	p2	p3	p4	p5
Prueba r1	1,458	3,250	4,654	6,798	7,278
Prueba r2	1,458	3,250	4,651	6,798	7,272
Prueba r3	1,455	3,250	4,650	6,790	7,265
Promedio	1,457	3,250	4,651	6,795	7,271
Desviación	1.73	0	2.08	4.62	6.51

3.5. Análisis y discusión de resultados

En todas las pruebas realizadas al equipo, pudimos observar una buena repetibilidad y poca desviación en los resultados. En la prueba de la acústica de la cámara del equipo, esta se realizó para descartar algún tipo de banda de resonancia que pudiera incidir en el espectro de las muestras. En el espectro acústico de la cámara no se observó ninguna banda de resonancia.

En la prueba del vaso vacío se observan tres (3) bandas de resonancia bien definidas entre la región de los 1,800Hz y 6,000Hz, los cuales serán modificados por las muestras que contenga el vaso. Cuando se agregó los 200ml de agua a este, el espectro acústico formado mostró cinco (5) bandas de resonancia, con la aparición de dos (2) nuevas bandas de resonancia. Con relación a las bandas mostradas en el espectro del vaso vacío, se pudo notar que la banda p1 se desplazó hacia la izquierda en casi 200Hz. La banda p2 perteneciente al vaso vacío se relaciona con la banda p3 del vaso lleno de agua y la misma presentó un corrimiento de más de 200Hz y la banda p3 también perteneciente al espectro del vaso vacío se corrió en aproximadamente 500Hz hacia la derecha. Esto obviamente se debe al efecto del agua contenida en el vaso que modifica los modos de resonancia del vaso cilíndrico.

Cuando se realizaron las pruebas con el alcohol al 70% y 95% se pudo notar que presentaban la misma cantidad de bandas de resonancia que el espectro del agua, pero que diferían en la cantidad de mínimos. Además, que las bandas de resonancia en los alcoholes estaban más corridas hacia la derecha que las del agua.

3.6. Diferencias entre espectro de alcohol al 70% y 95%

Para evaluar la confiabilidad del equipo, se realizaron pruebas para determinar las diferencias entre estas sustancias.

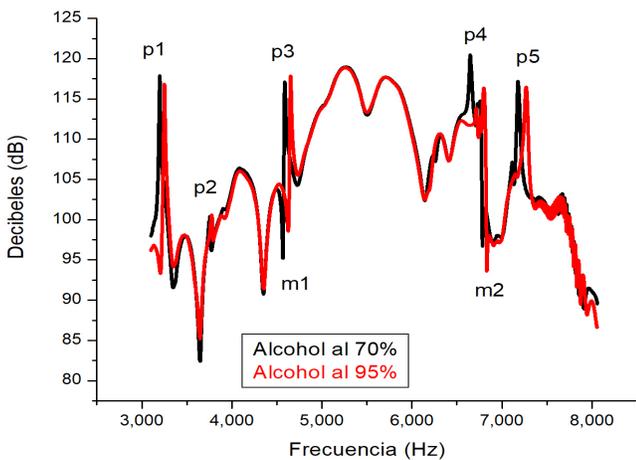


Figura 7. Espectro que muestra diferencias entre alcohol al 70 y 95 %.

En la figura 7 se observa los espectros acústicos, en los cuales se nota la diferencia entre los dos tipos de alcoholes, se puede ver un mayor desplazamiento en la banda p4 con respecto a las otras bandas de resonancia. En las bandas p1 y p3 hay un leve corrimiento hacia la derecha. También hay un corrimiento en los mínimos m1 y m2.

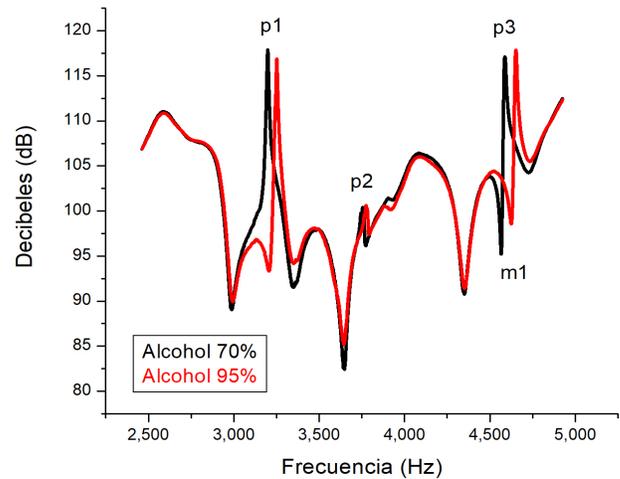


Figura 8. Espectro que muestra diferencias entre alcohol al 70% y 95 % en la región de baja frecuencia.

Como podemos visualizar en la figura 8, se pueden notar de manera ampliada los desplazamientos de las bandas de resonancia p1, p2, p3 y el mínimo m1.

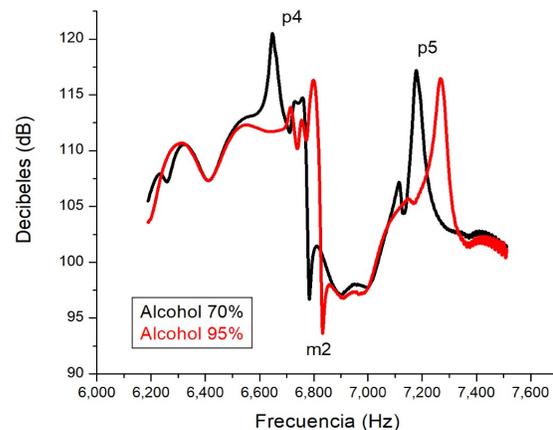


Figura 9. Espectro que muestra diferencias entre alcohol al 70% y 95 % en la región de alta frecuencia.

Como podemos observar en la figura a se pueden notar de manera ampliada los desplazamientos de las bandas de resonancia p4, p5 y el mínimo m2.

Cuando comparamos el alcohol de 70% y 95% se observa una diferencia muy definida entre los dos (2) espectros, notando un desplazamiento hacia la derecha más marcado en las bandas de resonancia de alta frecuencia p4 y p5. Como se mencionó anteriormente, en la banda de resonancia p4 es en donde se observa la mayor diferencia, de aproximadamente 145Hz. En la banda de resonancia p5 la diferencia es de 95Hz. Cabe señalar, además, que poder utilizar esta herramienta en el control de calidad del alcohol es importante en este tiempo donde hay un uso masivo debido al COVID-19.

Los resultados obtenidos repitiendo las pruebas bajo las mismas condiciones para cada sustancia evaluada muestra una muy buena repetibilidad con muy pocas variaciones de estas, lo cual es muy importante ya que le da confianza al equipo construido. Todo esto nos conduce a deducir que con otros tipos de sustancia también se podrían ver diferencias significativas, teniendo un potencial de aplicación como técnica analítica al momento de evaluar la característica de una sustancia.

4. Conclusiones

En el presenta trabajo se ha mostrado que el equipo de resonancia acústica construido muestra muy buena repetibilidad y se pueden ver diferencias entre sustancias líquidas, ya sean distintas o parecidas con diferentes concentraciones, lo cual puede ser muy útil para análisis in situ en una línea de proceso de una planta, ya sea de alimentos o de productos químicos.

En las futuras investigaciones a realizar sobre este proyecto, se harán pruebas sobre el deterioro en alimentos líquidos para evaluar si el equipo es capaz de detectar diferencias marcadas y poder utilizarlo como una herramienta en el control de calidad de los alimentos. Además, se utilizará el modelo de Berry y Reissner para predecir teóricamente las frecuencias de resonancias y compararlas con las obtenidas experimentalmente. En adición al deterioro, se podrá evaluar con este equipo las diferencias en las concentraciones de sólidos totales de diversos alimentos líquidos, como son los jugos, jarabes o salmueras para encurtidos.

Se desea construir un equipo que puede ser muy útil para diversos tipos de industrias.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Tecnológica de Panamá y a la Facultad de Ciencias y Tecnología por brindar todo el apoyo durante todo el proceso de investigación y elaboración de este artículo. También quiero agradecer a todo el equipo del laboratorio Pierre-Marie Curie por sus consejos durante diversas etapas de la investigación.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaramos que no tenemos ningún tipo de conflicto de interés con el proyecto presentado en este documento.

CONTRIBUCIÓN Y APROBACIÓN DE LOS AUTORES

J. Aranda contribuyó con la construcción del equipo, la fase experimental y la escritura del artículo científico. E. Ching contribuyó con el desarrollo del experimento, fundamento de los conceptos, la metodología y revisión del artículo.

Todos los autores afirmamos que se leyó y aprobó la versión final de este artículo.

REFERENCIAS

- [1] D. Sinha "Acoustic Resonance Spectroscopy (ARS)", Manual de operaciones, Laboratorio los Álamos, Estados Unidos, julio 1996.
- [2] D. Veirs, J P. Baiardo, CR. Heiple, GM. Rosenblatt "Acoustic Resonance Spectroscopy (ARS) Shows Promise for Measuring Gas Composition and Pressure in Sealed Storage Containers", Materials Sciences Division, Lawrence Berkeley National Laboratory. los Álamos National Laboratory, Estados Unidos, 1996.
- [3] J. A Franco-Villafa, E. Flores-Olmedo, G. Báez, O. Gandarilla-Carrillo and R. A. Méndez-Sánchez "Acoustic resonance spectroscopy for the advanced undergraduate laboratory", "Physics Education"rev., Vol. 2012, doi: 10.1088/0143-0807/33/6/1761
- [4] C. Espinoza, R. Espinoza, F. Lund, N. Mujica "Uso de Espectroscopía de Resonancia Ultrasónica No Lineal como herramienta para la caracterización de densidad de dislocaciones en la materia" en XIX Simposio Chileno de Física, Santiago, Chile, 2008, doi: 10.13140/RG.2.2.30179.50722

- [5] J. medendorp, R. Buice, R. Lodder, "Acoustic-resonance spectrometry as a process analytical technology for the quantification of active pharmaceutical ingredient in semi-solids", "AAPS PharmSciTech" Rev., Vol. 2006-Septe, doi: 10.1208/pt070359
- [6] Hany. S. El-Mesery, H Mao "Application of Non-destructive Technologies for agricultural and food products Quality inspection", "Sensors (Basel)", Rev., vol. 2019-Feb, doi: 10.3390/s19040846.
- [7] W. Zhang, A. Wang, Z. Lv, Z. Gao "Nondestructive measurement of kiwifruit firmness, soluble solid content (SSC), titratable acidity (TA), and sensory quality by vibration spectrum", "Food Science and nutrition" rev. Vol. 2020, doi:10.1002/fsn3.1390
- [8] W. Zhang, LV. Zhenzhen, S. Xiong "Nondestructive quality evaluation of agro-products using acoustic vibration methods-A review", "Critical reviews in food Science and nutrition", Rev., vol.2018, doi:10.1080/10408398.2017.1324830. "
- [9] Li Sun, Xia-Kun Bi, Hao Lin, Jie-wen Zhao, Jian-rong Cai "On-Line detection of eggshell crack based on acoustic resonance analysis", "Journal of food Engineering Rev., vol. 2012 doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.11.001>
- [10] De Ketelaere, B., Howarth, M. S., Crezee, L., Lammertyn, J., Viaene, K., Bulens, I., & De Baerdemaeker, J. (2006). Postharvest firmness changes as measured by acoustic and low-mass impact devices: a comparison of techniques. *Postharvest Biology and Technology*, 41(3), 275-284.
- [11] Deng, X., Wang, Q., Chen, H., & Xie, H. (2010). Eggshell crack detection using a wavelet-based support vector machine. *Computers and electronics in agriculture*, 70(1), 135-143.
- [12] Lin, H., Zhao, J. W., Chen, Q. S., Cai, J. R., & Zhou, P. (2009). Eggshell crack detection based on acoustic response and support vector data description algorithm. *European food research and technology*, 230(1), 95-100.
- [13] Deng, X., Wang, Q., Chen, H., & Xie, H. (2010). Eggshell crack detection using a wavelet-based support vector machine. *Computers and electronics in agriculture*, 70(1), 135-143.
- [14] Wang, H., Mao, J., Zhang, J., Jiang, H., & Wang, J. (2016). Acoustic feature extraction and optimization of crack detection for eggshell. *Journal of food engineering*, 171, 240-247.
- [15] Pedram Shoa, Seyed Ahmad Mireei, Abbas Hemmat, Sara W. Erasmus, Saskia M. Van Ruth "Broadband Acoustic Resonance dissolution spectroscopy as rapid tool for the compositional analysis of food powders: A case study of edible salts", "Food Chemistry" Rev., vol. 2021 doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129287>
- [16] Van Ruth, S., Dekker, P., Brouwer, E., Rozijn, M., Erasmus, S., & Fitzpatrick, D. "The sound of salts by broadband acoustic resonance dissolution spectroscopy" "Food Research International", 116, 1047-1058. Rev., vol. 2019 doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.09.044>
- [17] Tunick, M. H., Onwulata, C. I., Thomas, A. E., Phillips, J. G., Mukhopadhyay, S., Sheen, S., ... & Cooke, P. H. "Critical evaluation of crispy and crunchy textures", A review. "International Journal of Food Properties" Rev., vol. 2013 doi: 10.1080/10942912.2011.573116
- [18] Juodeikienė, G., Kunigėlis, V., Vidmantienė, D., & de Koe, W. J "Acoustic screening method for the determination of deoxynivalenol (DON) in wheat", "Veterinarija ir zootechnika, Lietuvos veterinarijos akademija". Rev., vol. 2004, ISSN, 1392-2130.
- [19] Zhang, W., Lv, Z., & Xiong, S. "Nondestructive quality evaluation of agro-products using acoustic vibration methods", "Critical reviews in food science and nutrition", Review , Rev., vol. 2018 doi: 10.1080/10408398.2017.1324830
- [20] Rao, X., Ying, Y., Lv, F., & Jin, B. "Development of a fruit quality inspecting system based on acoustic properties". "T. CSAM", 2, 69-71. Rev., vol. 2003. Record number: 20033046068
- [21] Sun, T., Huang, K., Xu, H., & Ying, Y. "Research advances in nondestructive determination of internal quality in watermelon/melon", "Journal of Food Engineering", A review, Rev., vol . 2010. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.05.019>
- [22] Fitzpatrick, D., Evans-Hurson, R., Krüse, J., Vos, B., McSweeney, S., Casaubieilh, P., & O'Gorman, É "The relationship between dissolution, gas oversaturation and outgassing of solutions determined by Broadband Acoustic Resonance Dissolution Spectroscopy (BARDS)". "Analyst", Rev., vol.2013 138(17), 5005-5010. <https://doi.org/10.1039/C3AN36838F>
- [23] García-Ramos, F. J., Valero, C., Homer, I., Ortiz-Cañavate, J., & Ruiz-Altisent, M. "Non-destructive fruit firmness sensors: a review", "Spanish Journal of Agricultural Research", Rev. vol. 2005 3(1), 61-73. doi:10.5424/sjar/2005031-125
- [24] Zhang, W., Cui, D., Liu, Z., & Ying, Y. "Analysis of pear dynamic characteristics based on harmonic response", "Transactions of the ASABE", Rev., vol. 2016 doi: 10.13031/trans.59.11845
- [25] Chen, P., Sun, Z., & Huarng, L "Factors affecting acoustic responses of apples", "Transactions of the ASAE", Rev. vol. 1992. doi: 10.13031/2013.28815
- [26] Zude, M., Herold, B., Roger, J. M., Bellon-Maurel, V., & Landahl, S. (2006). Non-destructive tests on the prediction of apple fruit flesh firmness and soluble solids content on tree and in shelf life. *Journal of Food Engineering*, 77(2), 254-260.
- [27] Valente, M., Leardi, R., Self, G., Luciano, G., & Pain, J. P. (2009). Multivariate calibration of mango firmness using

- vis/NIR spectroscopy and acoustic impulse method. *Journal of Food Engineering*, 94(1), 7-13.
- [28] Mendoza, F., Lu, R., & Cen, H. (2012). Comparison and fusion of four nondestructive sensors for predicting apple fruit firmness and soluble solids content. *Postharvest Biology and Technology*, 73, 89-98.
- [29] H. Norman Abramson, Daniel D. Kana, Ulric S. Lindholm "Breathing vibrations of a circular cylindrical shell containing an internal liquid", "Southwest Research institute", reporte técnico preparado para "The National Aeronautics and Space administration", Washington D.C. ad: ADB186288.
- [30] Lin, Kevin Yi-Wei, "Nondestructive Evaluation of Solid Cargo Inside Cylindrical Containers By using Linear and Nonlinear Acoustic Resonance Spectroscopy", "Electronic Theses and Dissertations", Rev., vol. 2020, 1822, <https://egrove.olemiss.edu/etd/1822>.
- [31] C. Ding, Z. Feng, D. Wang, Di Cui, W. Li "Acoustic vibration technology: Toward a promising fruit quality detection method", "Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety", Rev., vol. 2021-Mar, doi: 10.1111/1541-4337.12722