

Análisis de la viscoelasticidad de sustancias en la industria alimenticia con ultrasonido y LabVIEW

OCAMPO-MARTÍNEZ, Rafael†*, OLIVO-FLORES, Marco Antonio, SOTELO-MARTÍNEZ, Samuel y ESPINOS-BARRIOS, Norick

Departamento de mecatrónica, Universidad Tecnológica de San Juan del Rio

Recibido 3 de Abril, 2017; Aceptado 8 de Junio, 2017

Resumen

Existen varias propiedades en las sustancias, la viscoelasticidad es una de ellas. La mayoría de las sustancias pueden ser analizadas mediante ultrasonido y abarcan una amplia variedad de aplicaciones dentro de la mecatrónica y la robótica. Las pruebas acústicas no son invasivas y pueden usarse desde sistemas de detección de robots, discriminar superficies, encontrar defectos en piezas fabricadas o distinguir productos buenos y productos defectuosos. El objetivo de esta investigación es mostrar esta última aplicación para distinguir entre dos tipos de productos sin necesidad de abrir los contenedores y con la opción de realizarlo en la línea de producción para aceptar o rechazar el producto. Se utilizan sensores ultrasónicos, así como un generador de funciones a fin de emitir y recibir una señal ultrasónica que será detectada con equipo de medición mediante un osciloscopio y posteriormente es analizada a través de un instrumento virtual desarrollado en LabVIEW. Además, es posible realizar el análisis con el uso de la transformada rápida de Fourier (FFT). Aunque en este trabajo se enfoca para productos de la industria alimenticia por sus características puede tener aplicaciones en muchas otras áreas donde se evalúe de forma no invasiva la calidad de líquidos.

Viscoelasticidad, ultrasonido, LabVIEW

Citación: OCAMPO-MARTÍNEZ, Rafael, OLIVO-FLORES, Marco Antonio, SOTELO-MARTÍNEZ, Samuel y ESPINOS-BARRIOS, Norick. Análisis de la viscoelasticidad de sustancias en la industria alimenticia con ultrasonido y LabVIEW. Revista de Ingeniería Tecnológica 2017. 1-2:1-12

Abstract

There are several properties of substances; the viscoelasticity is one of them. Almost all of substances could be analyzed by ultrasonic, and the applications can be spread on to wide areas like mechatronics and robotics. The acoustics test is not invasive and you can use it in detections systems for robots or you can discriminate surfaces, good or bad quality products or found defects. The goal of this paper is evaluate products and them could be accepted or rejected in production lines. This work uses two sensor one of them send the ultrasonic signal and the other receive the signal target, a function generator creates the signal emitted. After the signal is sensed by the ultrasonic receptor this signal would be acquired and after that will be analyzed by a virtual instrument developed in LabVIEW. The analysis of the signal could be done using FFT tool and LabVIEW software. Although this paper focus in food industry products could be applied in so many enterprises, who need evaluate the quality of their products and this test is not invasive.

Viscoelasticity, ultrasonics, LabVIEW

*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: rocampom@utsjr.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

La viscoelasticidad de las sustancias describe como los materiales tienen tanto propiedades elásticas como viscosas. La respuesta de las ondas ultrasónicas transmitidas a través de los materiales puede ser relacionada con la composición y estructura del material. La señal de alta frecuencia (Ultrasónico 20 kHz a 100 MHz) puede ser usada para realizar evaluaciones no destructivas de productos y aplicarse en el control de calidad de diferentes procesos industriales.

El ultrasonido es un tipo de onda mecánica que puede propagarse dentro de las sustancias y de esta forma relacionarse con la composición de los materiales. El sonido y el ultrasonido pueden ser usados para describir la propagación de una perturbación mecánica con diferentes rangos de frecuencia. Tanto las ondas de sonido como de ultrasonido pueden propagarse en fluidos (Gases y líquidos) como en sólidos.

Cuando una onda ultrasónica pasa a través de un material su velocidad y atenuación pueden ser descritas por:

$$k = \frac{\omega}{c} + i\alpha$$

Donde:

k	=	Número de onda complejo
ω	=	Frecuencia angular
c	=	Velocidad ultrasónica
i	=	Número imaginario
α	=	Coefficiente de atenuación

La atenuación es una reducción de la amplitud de la onda cuando una onda ultrasónica se propaga a través de un medio y esta es causada por la pérdida de energía de la onda entre otras razones.

Varios factores afectan la amplitud y la forma de onda de la onda ultrasónica tales como: La dispersión del haz ultrasónico, la absorción de energía, la no linealidad de los materiales, las interfaces donde tiene lugar la transmisión, los defectos del material entre otras. El coeficiente de atenuación α se determina experimentalmente de la variación de la amplitud pico con la distancia de propagación de la onda y puede ser definido en decibelios por metro (dB/m) o en Neperio por metro (Np/m).

Las mediciones con ultrasonido se han hecho desde hace muchos años y pueden ser aplicadas a varias áreas de investigación, una ventaja de uso de esta técnica es que pueden ser utilizadas en la evaluación de pruebas no destructivas de alimentos y además no requieren de contacto directo con los productos.

Los efectos de la viscosidad atenúan la amplitud de la señal cuando esta viaja a través de las sustancias, la frecuencia resulta atenuada también por otros componentes en el medio, la temperatura también tiene un importante efecto en la atenuación ya que esta estrechamente relacionada con la viscosidad de las sustancias. El uso de técnicas con ultrasonido se ha incrementado en la industria alimenticia ya que por los requerimientos sanitarios tienen la ventaja de no entrar en contacto directo con los productos y proporcionan información útil de las propiedades físico-químicas de estos pudiéndose aplicar en el aseguramiento de la calidad de procesos de manufactura industriales.

Otras ventajas de métodos de evaluación con técnicas ultrasónicas son: Medición rápida, exactitud, limpieza y puede ser usado en materiales opacos, no requiere alta potencia.

El ultrasonido es generado mediante un transductor el cual tiene un cristal que al ser excitado por un pequeño pulso eléctrico por el efecto piezoeléctrico tomara la energía eléctrica convirtiéndola en una vibración mecánica que produce una onda que se propaga como un pulso ultrasónico, después la energía transferida propagada dentro del material regresa y es detectada mediante otro elemento piezoeléctrico convirtiéndola una vez más ahora a energía eléctrica.

La señal ultrasónica reflejada puede proporcionar una medición en tiempo real de la densidad y viscosidad de fluidos. La respuesta de la señal puede estar en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia y pueden utilizarse para analizar una mezcla particular de líquidos.

El equipo de medición es importante para evaluar el éxito de este tipo de pruebas, en años recientes la tecnología ha tenido importantes cambios y actualizaciones de manera que ahora los instrumentos actuales incorporan software poderoso y opciones de conectividad que permite comunicarse con diferentes sistemas.

Metodología

La figura 1 muestra un diagrama de bloques de las etapas de adquisición (sensado, medición), operación (análisis), programación y resultados.

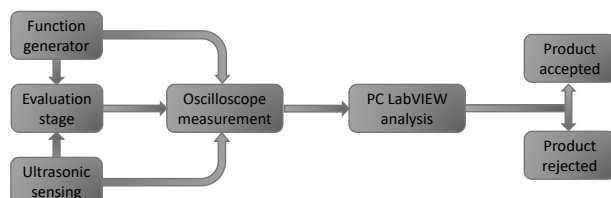


Figura 1 Diagrama a bloques de la metodología

Fuente: Elaboración propia

A. Etapa de adquisición

Esta etapa utiliza un sensor ultrasónico para que con un generador de señales en el rango de 40 000 Hz actúe como emisor dirigiendo una señal hacia el producto contenido en un envase para posteriormente adquirir la señal reflejada por otro sensor ultrasónico fungiendo como receptor, además es necesario sincronizar la captura mediante la entrada auxiliar del osciloscopio Tektronix por lo que se realizó un circuito para activar un pulso que genere una onda de choque al producto al ser evaluado y al mismo tiempo se capture la señal ultrasónica resaltando la respuesta en el momento que la onda de choque es aplicada al producto.

B. Operación

Los productos a ser analizados se deberán situar frente a un juego de sensores ultrasónicos. A través de un divisor se manda la señal generada tanto al sensor emisor como al canal 2 del osciloscopio y la señal de salida captada por el sensor receptor que corresponde a la onda reflejada se conecta al canal 1 del osciloscopio de manera que se observarán las dos señales para posteriormente capturarlas apoyándose en la sincronización por medio de la entrada auxiliar del osciloscopio al momento de la generación de la onda de choque en el producto.

C. Programación gráfica en LabVIEW

La figura 2 muestra el instrumento virtual que consiste de dos gráficas principales. Estas gráficas corresponden al producto evaluado y muestran las respuestas de las señales en el momento de su captura y cuando se generó la onda de choque. Las respuestas evidencian los distintos productos o en su caso la condición de calidad de un producto bueno contra uno defectuoso.

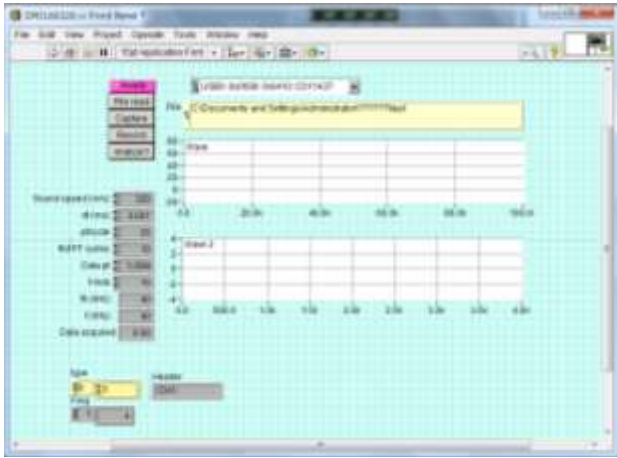


Figura 2 Interface gráfica en LabVIEW

Fuente: Elaboración propia mediante LabVIEW.

La configuración inicial debe ser ajustada de acuerdo a los parámetros de la prueba. En el instrumento virtual los parámetros se ajustan de la siguiente manera: La frecuencia central y de referencia será ajustada a 40 kHz de acuerdo a la frecuencia utilizada por el generador de frecuencias, se adquirirán 10 M de datos.

En el cuadro de recursos VISA se debe configurar la comunicación vía el puerto USB que es el utilizado en el osciloscopio, este se actualizará cuando el osciloscopio este conectado y se encienda. En la parte inferior se encuentra un encabezado con algunos otros parámetros necesarios para la lectura de la información del osciloscopio.

Una vez iniciada la ejecución del instrumento virtual, la programación entrará en un ciclo infinito desplegando el mensaje "Ready" y responderá a los siguientes comandos:

File read: Cuando este comando se ejecute, se habilita usar una ruta a través del cual se habilitarán sub VI's para almacenar las pantallas con la información capturada en algún evento.

Capture: En esta opción la medición previamente adquirida en el osciloscopio se carga en el programa y es desplegada en la gráfica superior del panel frontal del instrumento virtual.

Record: Almacena la información en la ruta especificada, pudiendo grabar diferentes pruebas cuando el usuario lo requiera, con esta opción aún cuando no haya corridas con los productos, se puede recuperar información almacenada de alguna corrida determinada y continuar con la etapa de análisis.

Analyze: En esta opción se ejecuta el análisis de la señal, mediante la programación realizada en el instrumento virtual con LabVIEW se realiza una serie de pasos para medir las señales y determinar las características de las señales asociadas a los dos tipos de productos diferentes y finalmente se despliega la información en la pantalla inferior del panel frontal del instrumento virtual.

Resultados

Esta sección describe los componentes del sistema explicando la integración al proyecto y las relaciones entre ellos, en la parte final muestra los resultados obtenidos en el análisis mediante el software LabVIEW.

A. Sensores

Hay dos transductores acústicos, uno de ellos es usado para producir una onda ultrasónica generada mediante una señal eléctrica y la otra es usada para la detección del eco convirtiendo ahora la señal acústica en la señal eléctrica usada para el análisis. La figura 3 muestra una imagen del transductor acústico empleado.



Figura 3 Transductor acústico

Fuente: Google imágenes

B. Generador de funciones

El papel del este dispositivo electrónico es generar vibraciones de sonido en el transductor acústico, hay una amplia variedad de tipos y marcas disponibles en el mercado con elevadas prestaciones y sofisticadas funciones. Este generador produce una señal periódica sinusoidal de 40 kHz la cual será la señal de referencia utilizada en el sistema. La figura 4 muestra el generador de funciones utilizado, este equipo puede generar diferentes formas de ondas con una resolución de frecuencia del orden de 1 μ Hz y cuenta con capacidad de modulación AM, FM, Burst, PM y barrido de frecuencias.



Figura 4 Generador de funciones

Fuente: Google imágenes

C. Osciloscopio

El sistema de captura de datos se realizó con un osciloscopio digital marca Tektronix DPO3012 a 100 MHz, frecuencia de muestreo de hasta 2.5 GS/s, 2 canales y puerto USB 2.0 en la parte posterior para comunicación con PC. La figura 5 muestra una imagen del osciloscopio utilizado.



Figura 5 Osciloscopio Tektronix

Fuente: Google imágenes

D. LabVIEW

LabVIEW es una plataforma de programación que permite el diseño de sistemas de prueba de todos tamaños y en muchas áreas y aplicaciones. Ofrece también integración con software propietario incorporando hardware y comunicación de última generación de National Instruments. Cuenta también con herramientas para solucionar problemas de manera rápida y eficiente. La pantalla de inicio del software LabVIEW de National Instrument se muestra en la Figura 6.

LabVIEW es un entorno de programación para el desarrollo de aplicaciones, similar al desarrollo de sistemas comerciales utilizando el lenguaje C o BASIC.

Sin embargo, LabVIEW difiere de estos programas en un aspecto importante: los lenguajes de programación mencionados se basan en líneas de texto para crear el código fuente, mientras que LabVIEW utiliza lenguaje de programación gráfico llamado "código G" para crear informes basados en gráficos de bloques de programas.

Este lenguaje es muy intuitivo y fácil de aprender, también es muy flexible, debido a que permite cambios y actualizaciones de hardware y software.

El sistema está equipado con un compilador gráfico que permite alcanzar alta velocidad. También es posible incorporar aplicaciones escritas en otros lenguajes de programación.



Figura 6 Pantalla de inicio de LabVIEW

Fuente: Software LabVIEW.

Los programas desarrollados por LabVIEW se llaman instrumentos virtuales (VI's por sus siglas en inglés), porque su apariencia y operación imitan un instrumento real. Sin embargo, son análogos a las funciones creadas con lenguajes de programación convencionales.

Los VI's tienen una parte de usuario interactiva y otra parte del código fuente, y aceptan parámetros de otros VI's. Todos los VI's tienen un panel frontal y un diagrama de bloques. Los menús contextuales contienen las opciones utilizadas para crear y modificar los VI's.

A continuación, se enumeran las partes de un Instrumento Virtual y el procedimiento necesario para poder comunicar el sistema de medición con el osciloscopio utilizando el puerto USB y el protocolo asociado:

Panel frontal

Es es la interfaz gráfica con el usuario VI. Esta interfaz incluye entradas del usuario y representa las salidas proporcionadas por el programa. Un panel frontal está formado por una serie de botones, interruptores, potenciómetros, gráficos, etc.

Cada uno puede definirse como un control o un indicador. El primero sirve para introducir parámetros en VI, mientras que los indicadores se utilizan para mostrar los resultados producidos, ya sean datos adquiridos o resultados de cualquier operación, un ejemplo del panel frontal es mostrado en la Figura 7.

Diagrama de bloques

La figura 8 muestra un diagrama de bloques elaborado en LabVIEW el cual puede contener diferentes estructuras de control tales como: Secuencias, casos, lazos iterativos y condicionales, constantes, variables y elementos propios del lenguaje gráfico empleado por el programa, cada uno de estos elementos tiene su correspondencia con el panel frontal elaborado para que juntos conformen el Instrumento Virtual (VI) diseñado. El diagrama de bloques es el código fuente del VI.

En el diagrama de bloques es donde se hace la implementación del VI para controlar o realizar cualquier procesamiento de entradas y salidas que se crearon en el panel frontal. El diagrama de bloques incluye funciones integradas y bibliotecas que incorpora estructuras de LabVIEW. Las funciones y estructuras del "código G" son nodos elementales.

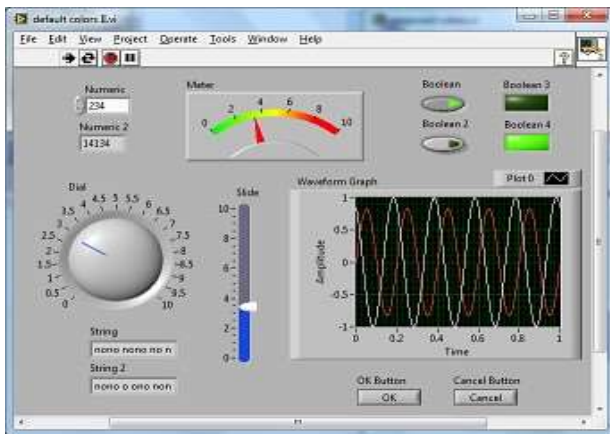


Figura 7 Panel frontal de un VI

Fuente: Software LabVIEW.

Los controles e indicadores que se colocaron previamente en el panel frontal están incorporados en el diagrama de bloques a través de las terminales. El diagrama de bloques se construye conectando varios objetos juntos, como si fuera un circuito. Los cables conectan las terminales de entrada y salida con los objetos correspondientes y a través de ellos fluyen los datos.

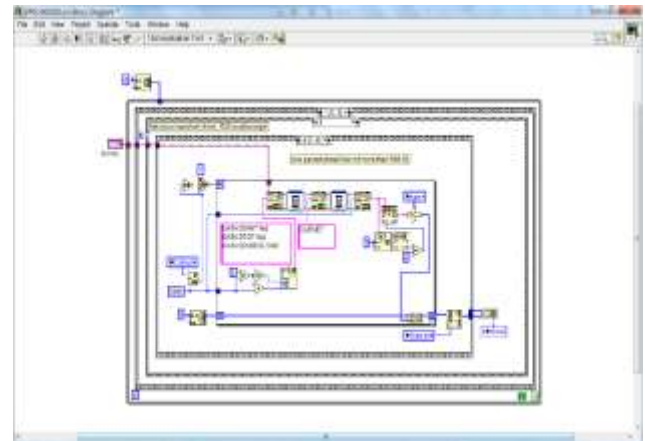


Figura 8 Diagrama de bloques de un VI

Fuente: Elaboración propia mediante LabVIEW

Comunicación VISA

VISA significa Virtual Instrument Software Architecture, fue la comunicación utilizada para la adquisición de señales a través de la plataforma LabVIEW. La figura 9 muestra la estructura funcional de VISA.

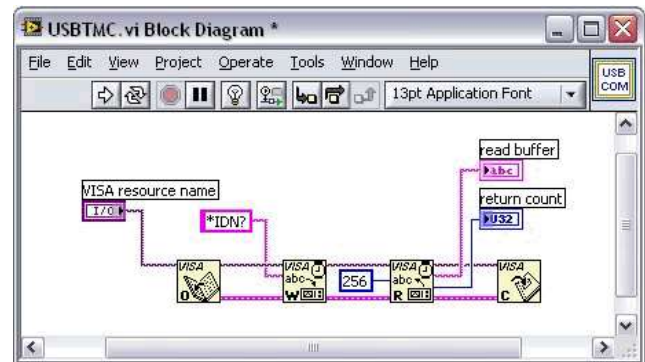


Figura 9 Estructura de comunicación VISA

Fuente: Software LabVIEW

VISA es un estándar desarrollado para configurar, programar y conectar interfaces tales como sistemas de instrumentación GPIB, VXI, PXI, Serial, Ethernet y USB como se muestra en la figura 10.



Figura 10 Comunicación VISA

Fuente: Google imágenes

VISA proporciona la interfaz de programación entre las herramientas de hardware y entornos como: LabVIEW, LabWindows/CVI y Measurement Studio para Microsoft Visual Studio.

NI-VISA es un software propietario de National Instruments, que ha sido desarrollado para implementar el estándar VISA I/O, que incluye bibliotecas de software, utilidades y programas de configuración a través de otros programas como National Instruments VISA Interactive Control y Measurement and Automation Explorer entre otros. Se ha desarrollado equipo de comunicación y medición de laboratorio, los cuales son reconocidos por los principales fabricantes de normas de instrumentos, la comunicación por puerto USB es actualmente uno de los estándares más aceptados.

Conexión USB

La conexión USB a través de VISA es independiente de la plataforma, el bus y el entorno, haciéndolo independiente si un programa se crea en una máquina que utiliza el sistema operativo Windows o Mac OS X, ya que la interfaz de programación de aplicaciones (API) es la misma. El bus USB es un bus de comunicación basado en mensajes, que significa que una PC y un dispositivo USB se comunican enviando comandos y datos a través del bus como texto o datos binarios. Cada dispositivo USB tiene su propio conjunto de comandos, dichos comandos son enviados a un instrumento a través de funciones de lectura y escritura NI-VISA, se necesita información del fabricante para obtener una lista de comandos del instrumento.

Desde la versión de software 3.0 de NI-VISA se pueden utilizar dos tipos de recursos: INTR USB y USB RAW.

Los dispositivos USB que cumplen con el protocolo USB Test y Measurement Class (USBTMC) utilizan la clase de recursos USB INSTR. Además, tales dispositivos no necesitan ninguna configuración adicional para comunicar el software.

Todos los demás instrumentos que no cumplen con la especificación USBTMC son USB RAW. En el presente reporte se utilizó un osciloscopio Tektronix del tipo USBTMC por lo que sólo se presenta el procedimiento relacionado a este tipo de instrumento, omitiéndose el de tipo USB RAW, cabe mencionar que la configuración de éste último puede ser más complicada dependiendo del tipo de protocolo utilizado por el fabricante del instrumento, por lo que puede ser necesario investigar con el proveedor para obtener detalles del protocolo de comunicación utilizado por el dispositivo.

Procedimiento de conexión USB Instrumentos de clase INSTR

Estos dispositivos utilizan un estilo de comunicación 488.2 existen en librería, funciones simples que se puede utilizar como: VISA Open (Inicio), VISA Close (Terminar), VISA Read (Leer) y VISA Write (Escribir) de la misma manera como si estuviera comunicando con instrumentos GPIB.

La Figura 9 corresponde a un instrumento virtual (VI) de LabVIEW que muestra las funciones de comunicación vía USBTMC. La comunicación comienza identificando el nombre del dispositivo USB entonces se abre la sesión de VISA, en el ejemplo de la figura, el comando * IDN nos dará la identificación del dispositivo que se utiliza, la última función VISA Close se utiliza para terminar la comunicación.

Evaluación de productos

El sistema se desarrolló para evaluar las características de la viscoelasticidad de dos productos, uno de ellos corresponde a crema de maíz o producto A y el otro a crema de cebolla o producto B, la etapa inicial abarca sólo dos tipos de sustancias para que el sistema pueda diferenciar entre ellos, una etapa posterior puede ser la evaluación de una sola variable y su impacto en solo un producto con características más específicas, que podrían ser: ¿Cuánto alcohol existe en un licor? o ¿Cuánta cantidad de agua hay en la leche? entre otros correlacionando la prueba a evaluar la calidad del producto en cuestión.

En la etapa de evaluación los diferentes productos se encuentran en recipientes similares en cuanto al tamaño y el material, por lo que la única diferencia es la composición de la sustancia debido a que uno de ellos es más viscoso que el otro.

Las condiciones de la prueba, tales como: temperatura, golpe de onda de choque, etc. deben ser similares para obtener mejores resultados en las mediciones y el análisis de las señales.

Aunque ha habido muchas pruebas en la evaluación de productos, por razones de espacio para este artículo sólo se muestran dos figuras con las respuestas típicas para cada producto analizado.

Gráficas del producto A

Las figuras 11 y 12 muestran el comportamiento típico en el producto A.

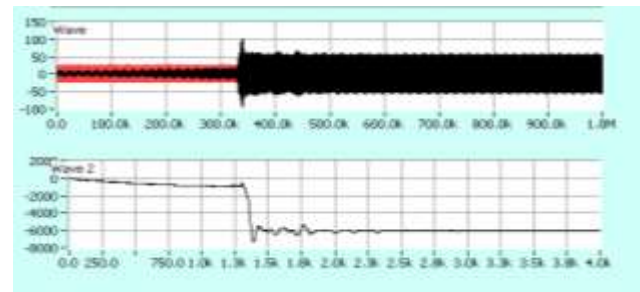


Figura 11 Respuesta uno del producto A

Fuente: Elaboración propia mediante LabVIEW.

El gráfico superior de las figuras muestra las señales de referencia y de respuesta de los sensores ultrasónicos, así como la perturbación generada por la onda de choque, por ejemplo, para evaluar las características de viscoelasticidad del producto A. En la parte inferior de las figuras se muestra la respuesta del producto evaluado, una vez completado el análisis de las señales capturadas.

Las figuras 11 y 12 muestran la respuesta de evaluación del producto A y tienen un rendimiento similar en ambos gráficos.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la etapa experimental se puede observar que la amplitud de las señales capturadas y analizadas tienen resultados similares y consistentes por el tipo de producto analizado. Cuando se genera la onda de choque, el producto presenta una perturbación que interactúa con las señales de los transductores, mientras que la perturbación no está presente, la señal se mantiene sin desplazamiento.

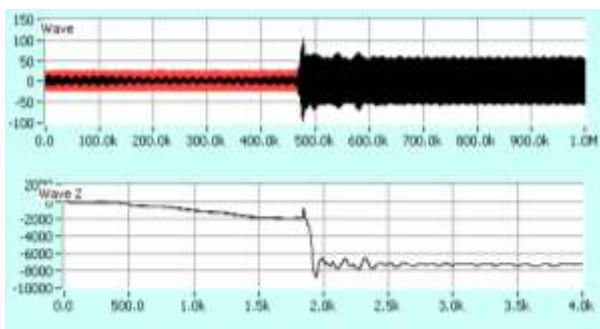


Figura 12 Respuesta dos del producto A

Fuente: Elaboración propia mediante LabVIEW.

Gráficas del producto B

La figura 13 y 14 muestran la respuesta típica en el producto B.

En las Figuras 13 y 14 los resultados obtenidos en ensayos con el producto B tienen una respuesta similar en las dos figuras que corresponden a la evaluación de la viscoelasticidad del producto B.

Sólo se presentan dos gráficos representativos de las pruebas realizadas con cada una de las cremas.

Es importante tener en cuenta las diferentes variables que afectan a la medición, tales como la temperatura ambiente y la humedad, la fuerza y la velocidad de la onda de choque también la ubicación de los sensores que deben estar en la posición central del contenedor para tener una medición que sólo corresponda a las características del producto evaluado.

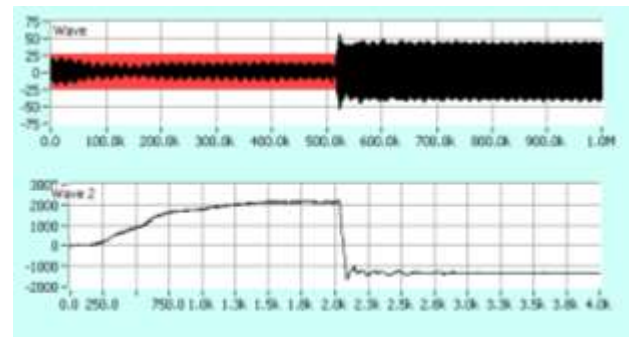


Figura 13 Respuesta uno del producto B

Fuente: Elaboración propia mediante LabVIEW.

Las respuestas presentadas en los gráficos tienen una variación en la amplitud y los gráficos analizados muestran una diferencia entre los productos evaluados, el análisis a través de la FFT con labVIEW también podría evaluar la diferencia cuando los productos se someten a una perturbación que se genera con la onda de choque.

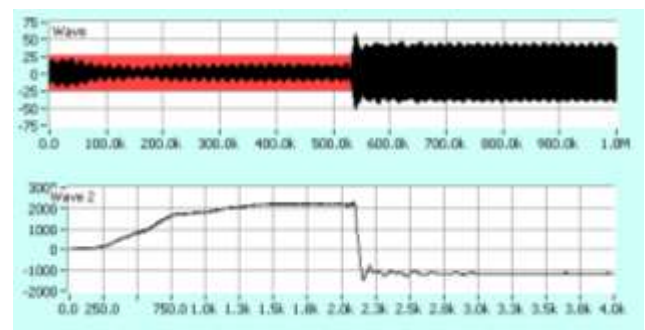


Figura 14 Respuesta dos del producto B

Fuente: Elaboración propia mediante LabVIEW.

Este tipo de resultados están orientados a una aplicación industrial en una línea de proceso que podría ser para el aseguramiento de calidad en una empresa donde la mayor parte de las pruebas se realizan con sólo dos categorías de productos: aceptados o rechazados.

Conclusiones

Aunque el análisis de alimentos con ultrasonido se ha utilizado durante mucho tiempo, nuevas herramientas de software acompañadas de nuevas generaciones de tecnología, dispositivos e instrumentos permiten dar una nueva proyección al trabajo de investigación realizado hasta ahora, incorporando las ventajas de las innovaciones, los recursos de los equipos informáticos modernos y de software.

En la etapa de evaluación se realizarán pruebas con diferentes tipos de sustancias, sin embargo se reportan solo dos tipos de productos: Producto A que corresponde a crema de maíz y producto B correspondiente a crema de cebolla, en ambos productos se observó repetibilidad en las mediciones y en los diferentes productos una amplitud y amortiguación diferente debido a la diferencia en su composición química.

Una etapa siguiente del desarrollo del sistema podría ser la evaluación cuantitativa de la respuesta de las señales utilizando un análisis de la respuesta en frecuencia que puede ser aplicado a uno o varios productos.

Este tipo de análisis abarcan un rango amplio de aplicaciones dependiendo de la naturaleza del proceso y puede adecuarse a las necesidades de la industria regional y/o evaluación de la calidad de los productos mediante la inspección en línea.

Referencias

- Aboonajmi, M., & Faridi, H. (2016). Nondestructive quality assessment of Agro-food products. In Iranian International NDT Conference. Tehran (pp. 1-9).
- Beranek, L. L., Beranek, L. L., Beranek, L. L., & Beranek, L. L. (1988). *Acoustical measurements* (p. 781). Melville, NY: Acoustical Society of America.
- Costley, R. D., Boudreaux, G., Balasubramaniam, K., & Simpson, J. A. (1999). Waveguide sensor for liquid and slurry properties. In *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation* (pp. 1171-1176). Springer US.
- Chivers, R. C., Russell, H., & Anson, L. W. (1995). Ultrasonic studies of preserved peaches. *Ultrasonics*, 33(1), 75-77.
- Davis, J. L. (2000). *Mathematics of wave propagation*. Princeton University Press.
- Dutta, A. K., & Samal, K. (1958). Propagation of Ultrasonic Waves in Liquids. *Nature*, 181(4608), 563-563.
- Greenwood, M. S., Skorpik, J. R., Bamberger, J. A., & Harris, R. V. (1999). On-line ultrasonic density sensor for process control of liquids and slurries. *Ultrasonics*, 37(2), 159-171.
- Gunasekaran, S. (2000). *Nondestructive food evaluation: Techniques to analyze properties and quality*. CRC Press.
- Ihara, I. (2008). Ultrasonic sensing: fundamentals and its applications to nondestructive evaluation. *Sensors*, 287-305.

Kim, J. O., & Bau, H. H. (1989). Instrument for simultaneous measurement of density and viscosity. *Review of scientific instruments*, 60(6), 1111-1115.

McClements, D. J. (1995). Advances in the application of ultrasound in food analysis and processing. *Trends in Food Science & Technology*, 6(9), 293-299.

Metwally, K., Lefevre, E., Baron, C., Zheng, R., Pithioux, M., & Lasaygues, P. (2016). Measuring mass density and ultrasonic wave velocity: A wavelet-based method applied in ultrasonic reflection mode. *Ultrasonics*, 65, 10-17.

Suryanarayana, C. V. (1992). Propagation of ultrasonic waves in liquids: a new model. *Ultrasonics*, 30(2), 104-106.

Vogt, T. K., Lowe, J. S., & Cawley, P. (2004). Measurement of the material properties of viscous liquids using ultrasonic guided waves. *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, 51(6), 737-747.

Wrobel, B. M. (2012). Ultrasonic measurement and characterization of liquid-particle flow.