

CARACTERIZACIÓN DE GELATINAS MEDIANTE SENSORES ULTRASÓNICOS SIN CONTACTO

Anabella S. Giacomozzi¹, Virginia Sánchez Jiménez¹, María Callejo Signes², Jose Benedito¹, Jose V. García-Pérez^{1*}, Jorge Gosálbez²

¹Grupo de Análisis y Simulación de Procesos Agroalimentarios (ASPA), Instituto de Ingeniería de Alimentos FoodUPV, Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, España.

²Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (ITeAM), Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera s/n, 46022, Valencia, España.

RESUMEN

En los últimos años, la industria alimentaria ha incrementado la demanda de técnicas no destructivas y de bajo coste capaces de caracterizar los productos de forma rápida y efectiva, en base a la necesidad de tomar decisiones en tiempo real para mejorar la eficiencia de las operaciones. Estos requisitos se alinean estrechamente con el concepto de Industria 4.0, que enfatiza la integración de tecnologías avanzadas para habilitar sistemas de producción inteligentes y eficientes. Entre las diversas técnicas disponibles, los ultrasonidos de señal han surgido como una técnica efectiva para caracterizar productos alimenticios, ofreciendo las ventajas de la automatización al mismo tiempo que se minimiza el riesgo de contaminación cruzada y se aumenta en gran medida la tasa de inspección. El objetivo de este trabajo es estudiar la viabilidad de la técnica de ultrasonidos sin contacto para caracterizar gelatinas envasadas en moldes de silicona con diferentes contenidos de colágeno (1, 2, 4, 6, 8 y 10 % p/v). Se utilizó un modelo de propagación de múltiples capas, que permitió correlacionar los parámetros ultrasónicos con la concentración de sólidos y propiedades texturales de las gelatinas.

ABSTRACT

In the last years, there has been a growing demand in the food industry for rapid, cost-effective, and non-destructive techniques for automated inspection. This demand arises from the need to make real-time decisions in order to improve operations efficiency. These requirements align closely with the concept of Industry 4.0, which emphasize the integration of advanced technologies to enable intelligent and efficient production systems. Among the various techniques available, air-coupled ultrasound has emerged as an effective method for characterizing food products, offering the advantages of automation while minimizing the risk of cross-contamination and largely increasing inspection rate. The aim of this work is to test the feasibility of air-coupled ultrasound to characterize package jellies in silicone molds with different content of collagen (1, 2, 4, 6, 8, and 10, % w/v). For this purpose, a multi-layer ultrasonic propagation model was used and the identified ultrasonic parameters were satisfactorily correlated with collagen content and textural properties of the jellies.

Palabras Clave— ultrasonidos sin contacto, caracterización no-destructiva, modelización.

1. INTRODUCCIÓN

Los ultrasonidos son ondas mecánicas con frecuencias que superan el límite de la audición humana (>20 kHz) y necesitan un medio sólido, líquido o gaseoso para propagarse [1]. Los ultrasonidos pueden dividirse en dos grupos según su frecuencia e intensidad: de alta intensidad o de potencia: se caracterizan por una baja frecuencia (de 20 a 100 kHz) y alta intensidad (de 10 a 1000 W/cm²), y de baja intensidad o de señal, los cuales se caracterizan por altas frecuencias (de 100 kHz a 1 MHz) y bajas intensidades (<1 W/cm²). Las técnicas de ultrasonidos de baja intensidad han demostrado ser particularmente útiles como herramienta para el control de calidad de procesos industriales debido a su bajo costo, fácil mantenimiento, y alto grado de adaptabilidad a líneas de procesado [2]. El producto modifica la propagación de la señal ultrasónica, y esta modificación proporciona información sobre el mismo. De esta manera, se emplean para la caracterización y control de productos o procesos.

Las técnicas de ultrasonidos han sido utilizadas en diversas aplicaciones relacionadas con alimentos. En particular, la velocidad ultrasónica ha demostrado ser un indicador útil de las propiedades mecánicas y/o texturales de la carne [3, 4,5]. También se han aplicado con éxito ultrasonidos sin contacto para la caracterización de productos cárnicos crudo-curados [6], hamburguesas [7], patatas [8], y aguacate [9]. Por otro lado, se ha utilizado para medir el contenido de sal en piezas de cerdo [10]. La aplicación industrial de estas técnicas basadas en sensores de ultrasonido de aire es adecuada para los objetivos de la Industria 4.0: se puede implementar fácilmente en líneas de producción y es completamente no destructiva y no invasiva, lo que reduce drásticamente el riesgo de contaminación cruzada al permitir el escaneo de datos en tiempo real de las muestras [11].

El objetivo principal de este trabajo consiste en desarrollar algoritmos de procesado de señal que permitan extraer información o parámetros que se correlacionen con la concentración de sólidos en gelatinas para explorar la posibilidad de integrar la técnica de ultrasonidos acoplados por aire en procesos de control de calidad en línea de producción. Para ello, se plantea el desarrollo de algoritmos de procesado de la señal que extraigan parámetros ultrasónicos (amplitud de potencia, velocidad, frecuencia) y los correlacionen con las propiedades de interés de las gelatinas. Dentro de los parámetros ultrasónicos se han identificado parámetros temporales y frecuenciales y, además, se ha implementado un modelo de propagación multicapa.

* Autor de contacto: jogarpe4@tal.upv.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Preparación de gelatinas

Se prepararon muestras de gelatina (gelatina bovina 1% p/v, Sigma-Aldrich) en moldes de silicona de 9.2 cm de diámetro y 1.1 cm de altura. Para correlacionar los parámetros ultrasónicos con el contenido de sólidos en gelatina, se emplearon 6 concentraciones diferentes: (1%, 2%, 4%, 6%, 8%, 10% p/v). Posteriormente, las muestras se dejaron enfriar durante 24 horas a 4°C hasta su análisis.

2.2 Sistema ultrasónico

Las medidas ultrasónicas sin contacto se realizaron utilizando un montaje experimental realizado por el Departamento de Tecnología de Alimentos de la Universidad Politécnica de València (Figura 1).

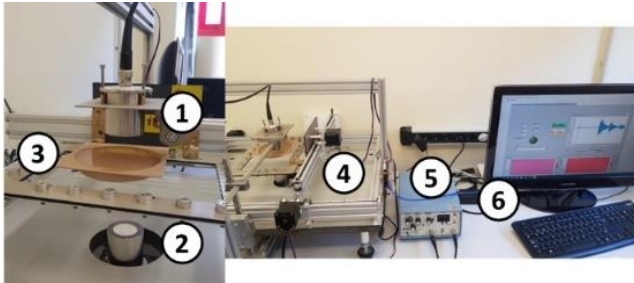


Figura 1. Sistema ultrasónico: montaje experimental. Transductor emisor (1), transductor receptor (2), muestra (3), módulo de barrido XY (4), generador/receptor (5), ordenador (6).

El sistema está compuesto por dos transductores piezoeléctricos (emisor y receptor), un generador-receptor de señal, un osciloscopio digital y un ordenador. Se emplearon transductores piezoeléctricos de 280 kHz (geometría plana) diseñados especialmente para mejorar su acoplamiento con el aire [12], que se situaron enfrentados verticalmente y perfectamente alineados (distancia= 10 cm).

La medida ultrasónica se realizó mediante la técnica de transmisión-recepción. El generador-receptor envía una señal eléctrica de excitación al transductor emisor. Al mismo tiempo, también emite otra señal que llega al osciloscopio (señal del trigger o disparo) para indicar el momento exacto en el que se ha enviado dicha señal eléctrica de excitación. El transductor emisor convierte la señal eléctrica de excitación en una señal ultrasónica. Esta señal ultrasónica viaja a través del aire, atravesando la muestra, hasta que es recibida por el transductor receptor, que ejecuta el proceso opuesto, es decir, la convierte en una señal eléctrica que es enviada de nuevo al generador-receptor para su acondicionamiento y amplificación. Finalmente, la señal es enviada al osciloscopio para su digitalización, que a su vez está conectado a un ordenador para el almacenamiento y análisis de la misma. La configuración de los parámetros del generador-receptor (5077PR, Panametrics, Estados Unidos) y osciloscopio digital (NI 6501, National Instruments, Austin, TX, USA) integrado con una tarjeta digital (PXI/PCI-5112, National Instruments, Austin, TX, USA) para la toma de medidas se muestra en la Tabla 1.

Con el fin de escanear toda la superficie del producto, se empleó un módulo de barrido automático 2D para realizar movimientos del producto con elevada precisión. Se realizaron 3 réplicas para cada concentración de sólidos en la gelatina. En cada replica se midieron 100 puntos distribuyendo las medidas en una matriz de 10x10, espaciados 5 mm. El espesor de la muestra se midió con un calibre digital (192-633 Serie, Mitutoyo, Japón). Antes de proceder a la

medida de las gelatinas, se realizaron diferentes medidas de calibración: se analizaron 4 señales del sistema sin molde ni gelatina (aire, señal de referencia), y 4 señales con molde, pero sin gelatina. Las medidas se realizaron en condiciones ambientales de 28.4°C y 44.9%HR.

Tabla 1. Parámetros de configuración del generador-receptor y del osciloscopio.

Generador-Receptor	Osciloscopio digital
Frecuencia de pulso: 100 Hz	Puntos adquiridos: 10000
Voltaje: 200 V	Velocidad de digitalización: 10 Mpuntos/s
Ganancia: 59 dB	Trigger: 10 % Nivel 0.1 V
Frecuencia: 0,25 MHz	Promedio de 128 señales

2.3 Cálculo de los parámetros ultrasónicos temporales

El análisis de las señales en el dominio temporal se basa fundamentalmente en el cálculo del tiempo de vuelo (TOF) y de la velocidad de propagación del ultrasonido en la gelatina a partir de este. La señal capturada refleja la propagación de la onda ultrasónica a través del aire y la muestra. Es evidente que a medida que transcurre el tiempo, la amplitud de la onda disminuye progresivamente. Esta atenuación se debe a la pérdida de energía que ocurre durante su tránsito por los distintos medios presentes en el recorrido (aire, gelatina, molde, aire). Al procesar la señal capturada, es posible detectar el tiempo que tarda la onda ultrasónica en recorrer la distancia entre el emisor y el receptor. La determinación del TOF se realizó siguiendo la metodología del frente de llegada de la onda ultrasónica [13]. A partir del TOF y teniendo en cuenta la configuración del experimental, se puede calcular la velocidad a la cual se propaga el ultrasonido en la gelatina:

$$V_g = \frac{d_{gelatina}}{TOF_m - \frac{d_{transd} - d_{gel} - d_{molde}}{c_{aire}} - \frac{d_{molde}}{c_{molde}} - T_{trigger} - T_{cal}} \quad (1)$$

Donde TOF_m corresponde al tiempo total medido, d_{gel} es el espesor de la gelatina en el molde, d_{molde} es el espesor del molde (1.34 mm), d_{transd} es la separación total entre transductores (140 mm), c_{aire} es la velocidad de propagación en el aire (343 m/s), c_{molde} es la velocidad de propagación en el molde (613.2 m/s), T_{cal} corresponde a un tiempo de calibración o retraso entre la señal eléctrica de trigger y la señal mecánica (25 μs) y $T_{trigger}$ son las premuestras adquiridas antes del disparo (100μs). Así, para estimar el TOF real en la gelatina es necesario compensar el tiempo total medido restando el tiempo que tarda la señal en atravesar las diferentes capas (aire, molde y aire).

2.4 Cálculo de los parámetros ultrasónicos frecuenciales

Una vez procesadas todas las señales, el análisis de las señales ultrasónicas en el dominio frecuencial se realizó mediante la transformación rápida de Fourier (FFT) de las señales temporales. Así, se obtuvo y se representó la densidad espectral de potencia (módulo de FFT) de todas y cada una de las señales.

2.5 Modelo de propagación teórico

El modelo de propagación teórico se planteó teniendo en cuenta la propagación de la onda ultrasónica a través de los distintos medios o capas. La onda se propaga desde el transductor emisor (Transductor 1), atravesando aire (Aire 1), gelatina (material 1), molde (material 2) y llega nuevamente a través de aire (Aire 2) al transductor receptor (Transductor 2) (Figura 2A).

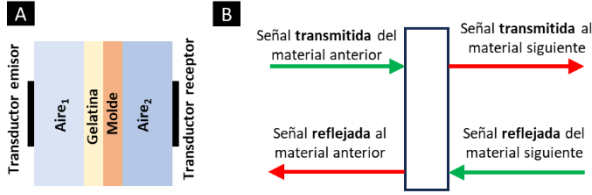


Figura 2. Esquema base del modelo de propagación.

A partir de la señal emitida por el transductor emisor, se puede asumir que la señal sufrirá una atenuación y un retardo temporal al propagarse por cada uno de los materiales. La propagación de la onda vendrá controlada por su correspondiente coeficiente de transmisión (T) y reflexión (R) en cada interfaz. De esta forma, cada material se puede modelar como un cuádrupolo, con dos señales de entrada y dos señales de salida (Figura 2B). La primera señal de entrada corresponde a la señal proveniente del material anterior mientras que la segunda señal de entrada corresponde a la señal reflejada proveniente del material siguiente. Las señales de salida corresponderán a la señal transmitida al material siguiente y la señal enviada al material anterior.

A su vez, el cuádrupolo se puede representar mediante integración de bloques. En primer lugar, la señal de entrada

proveniente del material anterior sufre una atenuación y un retardo temporal al propagarse por el nuevo medio. Esta respuesta en frecuencia, está representada por el bloque $H_M(f)$. Siguiendo el recorrido de la onda ultrasónica, ésta procede a dividirse en dos, una parte se va a transmitir al siguiente medio, mientras la otra va a ser reflejada al material anterior. La proporción de onda que se refleja y que se transmite, viene dada por los coeficientes T y R obtenidos a partir del material actual y el material siguiente. Por otro lado, a la proporción de la onda que propaga al siguiente material se le debe añadir la contribución de la onda reflejada que proviene del material siguiente. De este modo, se obtiene la proporción de la onda que se transmite al siguiente material. De igual modo que sucede con la onda que se propaga del material anterior al actual, el ultrasonido que proviene del material siguiente, al pasar de medio a otro con distinta impedancia acústica, parte de la onda se refleja y parte se transmite atendiendo a los coeficientes T y R. En este caso, los coeficientes vienen dados por el material siguiente y el actual. Finalmente, a la contribución de la onda que se va a transmitir por el medio se le debe añadir la contribución de la onda que no se transmite al medio siguiente y, por lo tanto, se refleja. Al considerar en la suma de estas dos contribuciones el retardo temporal y la atenuación que sufre la onda, H_M , se obtiene la segunda salida del cuádrupolo, es decir, la señal que se refleja al material anterior. Este concepto se replicó para el modelo de propagación planteado. Desarrollando teóricamente este sistema y nombrando como Y_0 , Y_1 , Y_2 los puntos de salida de los cuádrupolos intermedios, e Y como la señal de salida final (Figura 3), es posible plantear el sistema de ecuaciones en forma matricial como $A*B=C$. Este sistema de ecuaciones se implementó en Simulink. A partir de este modelo, e incorporando los diferentes parámetros del sistema, fue posible simular la señal recibida.

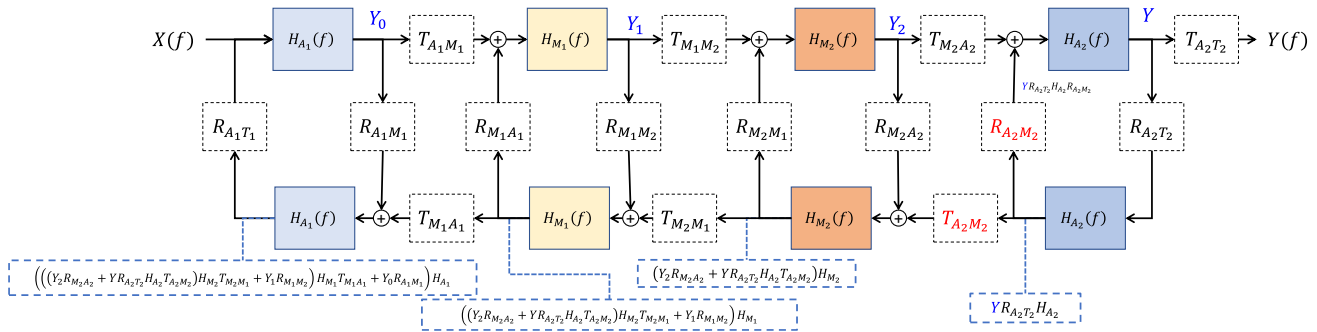


Figura 3. Representación de los cuádrupolos interconectados correspondientes al modelo teórico de propagación.

La impedancia acústica es una propiedad que poseen los medios que se refiere a la oposición que presenta un material al paso de una onda sonora. A partir de la impedancia acústica de cada material se calcularon los respectivos coeficientes de transmisión y recepción. Por otro lado, la densidad y la impedancia de la gelatina se calculó en función de la concentración de sólidos. Se asumió un valor de velocidad en la gelatina igual a 1535 m/s [15]. Respecto a la respuesta frecuencial, se asumió una respuesta frecuencial plana de los materiales con una ganancia lineal de 0.64, por tanto, su respuesta al impulso se modeló como:

$$h_{\text{material}}(t) = G_{\text{material}} \cdot \delta(t - t_{d,\text{material}}) \quad (2)$$

Donde G_{material} considera el factor de ganancia del material y $t_{d,\text{material}}$ el retraso introducido por el material. Idealmente se debería modelar la respuesta frecuencial completa de material. Sin embargo, esta aproximación ofrece buenos resultados a nivel temporal. Su respuesta en frecuencia se calculó como:

$$H_{\text{material}}(f) = G_{\text{material}} \cdot e^{-j2\pi \cdot f \cdot t_{d,\text{material}}} \quad (3)$$

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 4 se muestra la evolución de la velocidad (calculada a partir de la ecuación 1). Al contrario de lo esperado, no se observó una tendencia clara de la misma al aumentar el contenido de sólidos en la gelatina. Esto podría atribuirse a la influencia de la temperatura

en los valores calculados. La velocidad depende en gran medida de la temperatura, y dado que en este trabajo no se consideró para el cálculo, se estima que los resultados obtenidos podrían verse afectados. Por otro lado, el espesor del material también influye de manera significativa en los cálculos de velocidad, por lo que pequeños errores en la medición del mismo podrían causar variaciones significativas en los valores obtenidos.

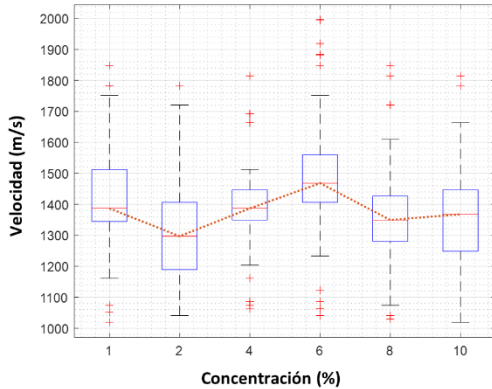


Figura 4. Velocidad ultrasónica en gelatina con diferente concentración de sólidos.

Al analizar el espectro de frecuencias, se identificó la presencia de 4 picos distintivos claramente identificables, correspondientes a la frecuencia de resonancia de la gelatina. Estos valores son

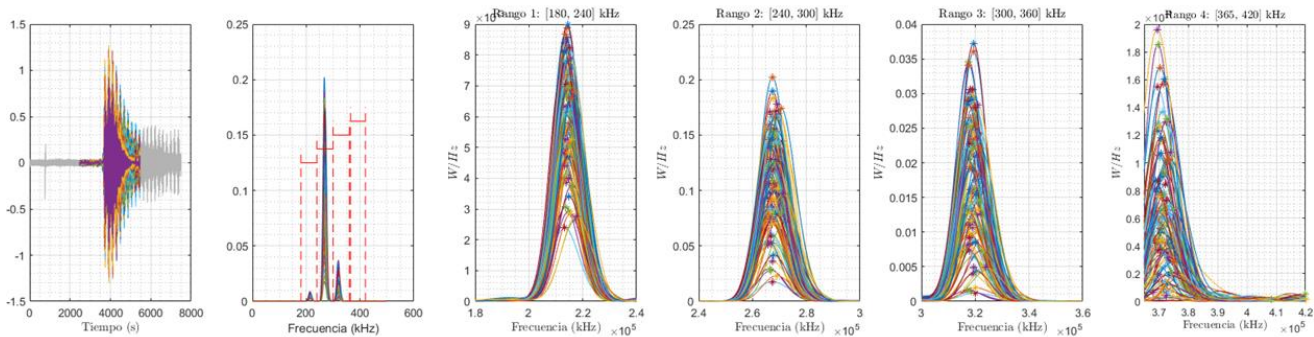


Figura 51. Señal temporal, espectro y bandas de búsquedas para muestras de gelatina al 1%.

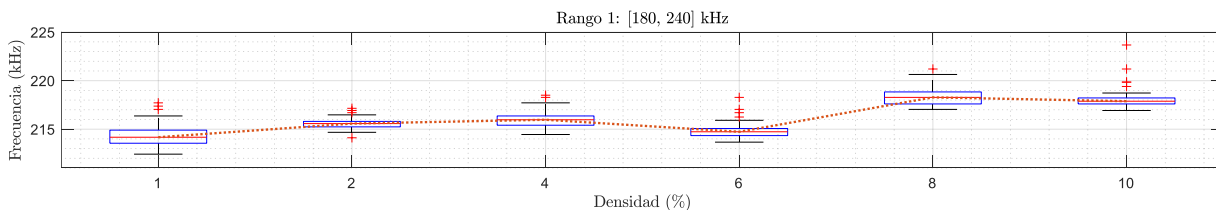


Figura 62. Frecuencias de resonancia en el rango de 180-240 kHz en gelatina con diferente concentración de sólidos.

3.1 Modelo de propagación

En el modelo de propagación, la respuesta en frecuencia de los diferentes materiales $H_M(f)$ se implementó en el dominio temporal como una función delta, $h_M(t) = K\delta(t-t_d)$, donde t_d representa el retardo experimentado por la señal al propagarse a través de cada

diferentes a la frecuencia de resonancia propia del transductor. Así, para cada señal registrada, se obtuvieron 4 frecuencias de resonancia junto con sus correspondientes amplitudes. De esta manera, se generó una matriz de 400 valores de frecuencia y amplitud para cada concentración evaluada (4 valores por cada una de las 100 señales). A continuación, se calcularon los valores promedio de amplitud de pico y frecuencia para cada concentración a partir de los datos recopilados previamente. A modo ilustrativo, en la Figura 5 se representan las señales junto con el segmento temporal seleccionado para realizar el análisis frecuencial, el espectro y las bandas frecuenciales para la búsqueda de los valores máximos, para la concentración de 1%.

Si se analiza la frecuencia de resonancia obtenida para cada concentración (Figura 6), se observa en general un incremento de la misma con el contenido de sólidos, a excepción de lo observado en el caso de la concentración de 6%. Este comportamiento es similar en los diferentes rangos de frecuencias (a modo de ejemplo, se muestra el comportamiento en el rango 180-240 kHz. Este resultado se corresponde con lo esperado, ya que al aumentar el contenido de sólidos se incrementa la rigidez del material y, por lo tanto, su frecuencia de resonancia es mayor. Además, se puede observar baja variabilidad entre las medidas correspondientes a una misma concentración, a diferencia de lo que se observa en la Figura 4 para la velocidad.

medio, y K es el factor de amplitud que modela la atenuación causada por cada material (0.64). La posición de la delta indica el tiempo que retarda cada material. Mediante la expresión $t = d/v$ resulta sencillo calcular esta posición puesto que d y v son valores conocidos correspondientes al espesor de cada material y la velocidad de propagación de cada uno de ellos, respectivamente. En

la Figura 7 se muestra el modelo de ajuste paramétrico planteado, el cual consiste en el modelo de propagación descrito anteriormente, donde se utiliza una señal de excitación de entrada y se obtiene una señal de salida. El objetivo es que la señal de salida sea lo más cercana posible a la señal de referencia (o señal medida). Para lograr esto, se compara la señal de salida con la señal de referencia (señal experimental) y se trata de minimizar una función de coste, calculada a partir del error entre el espectro de la señal modelada y la señal medida.

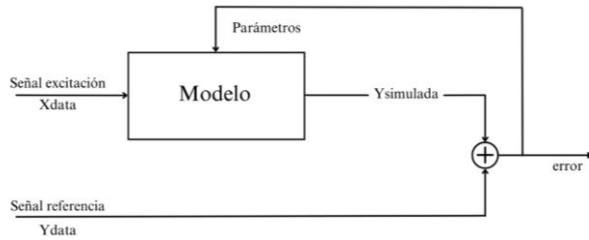


Figura 73. Esquema de ajuste paramétrico

Se ha seleccionado el dominio frecuencial debido a que en el dominio temporal existe una fuerte dependencia a los cambios de

fase. Es decir, el dominio frecuencial resulta más robusto que el dominio temporal para el cálculo de los parámetros ultrasónicos. Se utilizó la función “lscurvefit” de Matlab, la cual encuentra los parámetros que mejor ajustan la función simulada “Y simulada” a la señal de referencia “Ydata” basándose en la señal de entrada.

Los coeficientes de entrada del modelo de propagación son las velocidades de los materiales v_{aire} , $v_{gelatina}$ y v_{molde} , y sus coeficientes de atenuación correspondientes: A_{aire} , $A_{gelatina}$ y A_{molde} . De estos seis parámetros, el sistema sólo ajusta la velocidad de la gelatina y el factor de amplitud que modela la atenuación causada por ésta, mientras que los parámetros del molde y el aire se mantienen constantes.

Dicho modelo, además de considerar la respuesta en frecuencia de cada material, tiene en cuenta los coeficientes de transmisión y recepción de la interfase de cada uno de ellos. Asumiendo las velocidades de la gelatina, es posible obtener la impedancia acústica de cada material y, en función de ésta, calcular los coeficientes de transmisión y reflexión, respectivamente, para considerarlos en el modelo del ajuste paramétrico. En la Figura 8 se muestra la representación del espectro real en comparación con el espectro obtenido por el modelo paramétrico (señal simulada).

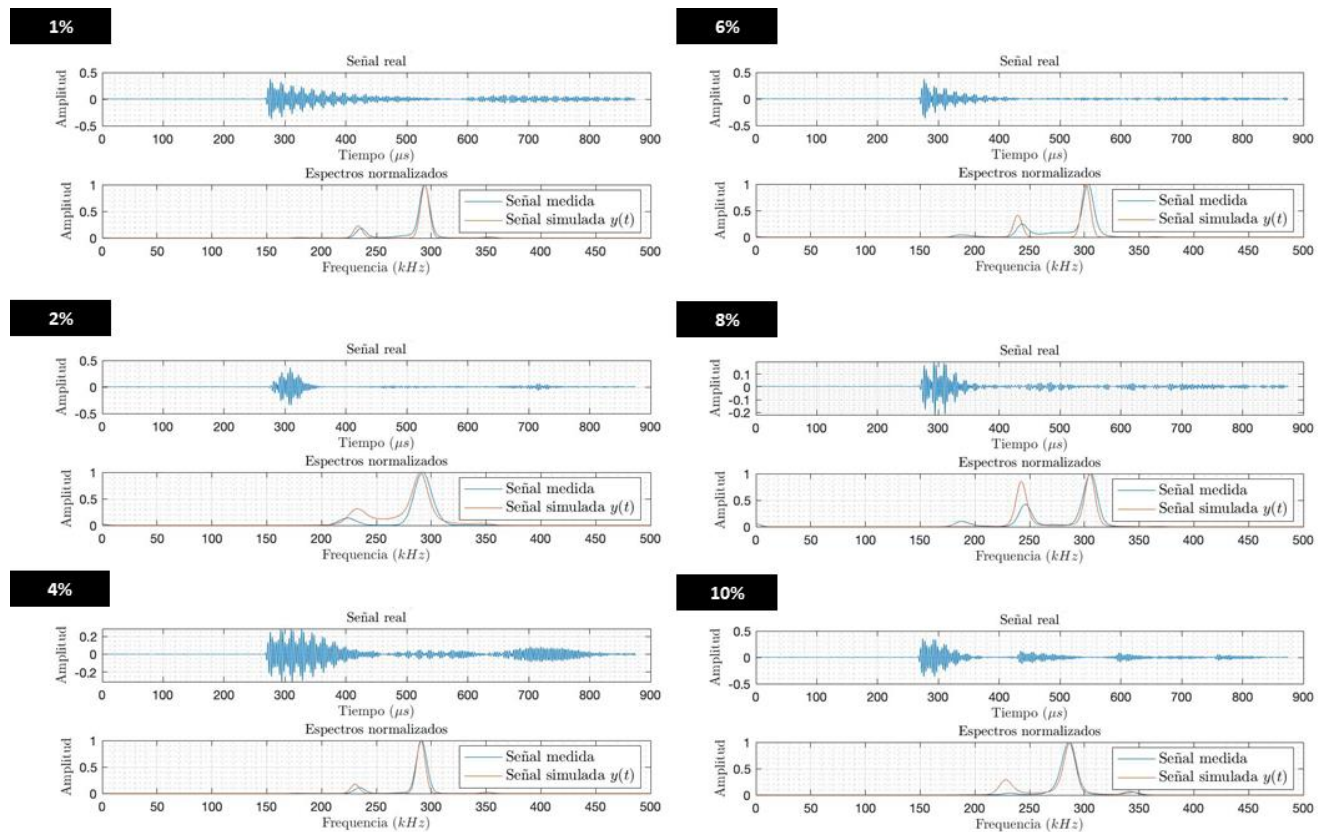


Figura 84. Espectro de frecuencias: medido vs. simulado.

En la Figura 9 se muestran los valores de velocidad obtenidos mediante el modelo paramétrico. Se observa una tendencia de incremento de la velocidad conforme aumenta el contenido de sólidos, tendiendo a estabilizarse a partir de la concentración de 8%.

Cabe destacar que las variaciones obtenidas en el espectro frecuencial son menores que las correspondientes al dominio temporal. La posibilidad de procesar el dominio espectral favorece la robustez en la estimación de los parámetros ultrasónicos ya que

permite analizar la totalidad de la señal ultrasónica, en lugar de trabajar sólo con una porción de la misma, como es el caso del análisis del dominio temporal y, además, evita la incertidumbre asociada a la estimación del espesor.

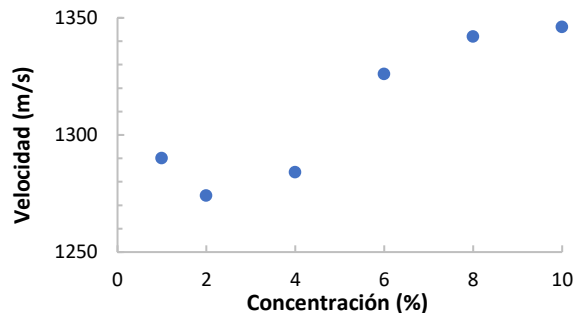


Figura 9. Velocidad ultrasónica en la gelatina para las diferentes concentraciones de sólidos: valores simulados por el modelo de propagación.

En la Figura 10 se muestra la variación de la dureza de las muestras de gelatina al modificar la concentración de sólidos en la misma.

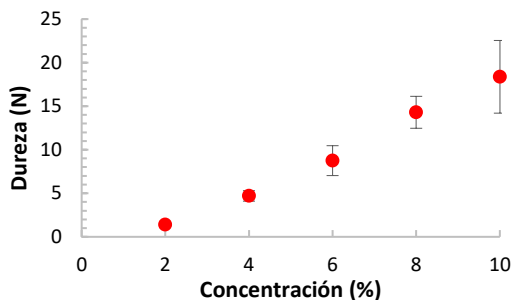


Figura 10. Velocidad ultrasónica en la gelatina para las diferentes concentraciones de sólidos: valores simulados por el modelo de propagación

4. CONCLUSIONES

- La frecuencia de resonancia se incrementó al aumentar la concentración de sólidos en la gelatina. Esto indica una relación directa entre la concentración de sólidos y la respuesta acústica de las muestras, debido a un incremento de la rigidez del medio (evidenciado por el incremento observado en la dureza).
- El análisis de los parámetros ultrasónicos en el dominio temporal resultó complejo debido a la gran influencia de la medida del espesor en los cálculos. La estimación del espesor conlleva gran incertidumbre debido al error experimental asociado con su medida en productos de espesor irregular.
- El procesado de los datos en el dominio espectral permitió mejorar el análisis de la señal ultrasónica, calculando la velocidad sin necesidad de estimar el espesor de la muestra.
- El modelo empleado demostró ser eficaz y robusto para ajustar la respuesta espectral. La predicción del espectro a partir del modelo paramétrico propuesto podría ser una herramienta eficaz para evaluar y cuantificar de forma robusta cómo cambian los parámetros ultrasónicos de la gelatina al modificar la concentración de sólidos.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento provisto por el proyecto ULTRADIGITAL (AGROALNEXT/2022/045), el cual forma parte del programa AGROALNEXT, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación con fondos europeos NextGenerationEU (PRTR-C17.11), así como por la Generalitat Valenciana.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Mulet, A., Benedito, J., Bon, J., & Sanjuan, N. (1999). Low intensity ultrasonics in food technology/Revisión: Ultrasonidos de baja intensidad en tecnología de alimentos. *Food Science and Technology International*, 5(4), 285-297.
- [2] Scanlon, M.G. (2004). Low-intensity ultrasound for food research and the food industry. *Food Research International*, 37(6), 535-536.
- [3] Corona, E., García-Pérez, J. V., Mulet, A., & Benedito, J. (2013). Ultrasonic assessment of textural changes in vacuum packaged sliced Iberian ham induced by high pressure treatment or cold storage. *Meat science*, 95(2), 389-395.
- [4] Llull, P., Simal, S., Femenia, A., Benedito, J., & Rosselló, C. (2002). The use of ultrasound velocity measurement to evaluate the textural properties of sobrassada from Mallorca. *Journal of Food Engineering*, 52(4), 323-330.
- [5] Nowak, K. W., Markowski, M., & Daszkiewicz, T. (2015). Ultrasonic determination of mechanical properties of meat products. *Journal of Food Engineering*, 147, 49-55.
- [6] Corona, E., Garcia-Perez, J. V., Alvarez-Arenas, T. E. G., Watson, N., Povey, M. J., & Benedito, J. (2013). Advances in the ultrasound characterization of dry-cured meat products. *Journal of Food Engineering*, 119(3), 464-470.
- [7] Fariñas, L., Contreras, M., Sanchez-Jimenez, V., Benedito, J., & Garcia-Perez, J. V. (2021). Use of air-coupled ultrasound for the non-invasive characterization of the textural properties of pork burger patties. *Journal of Food Engineering*, 297, 110481.
- [8] Sanchez-Jimenez, V., Collazos-Escobar, G. A., González-Mohino, A., Alvarez-Arenas, T. E. G., Benedito, J., & Garcia-Perez, J. V. (2023). Non-invasive monitoring of potato drying by means of air-coupled ultrasound. *Food Control*, 148, 109653.
- [9] Farinas, L., Sanchez-Torres, E. A., Sanchez-Jimenez, V., Diaz, R., Benedito, J., & Garcia-Perez, J. V. (2021). Assessment of avocado textural changes during ripening by using contactless air-coupled ultrasound. *Journal of Food Engineering*, 289, 110266.
- [10] de Prados, M., Garcia-Perez, J. V., & Benedito, J. (2017). Non-invasive ultrasonic technology for continuous monitoring of pork loin and ham dry salting. *Meat science*, 128, 8-14.
- [11] Charoux, C. M., Ojha, K. S., O'Donnell, C. P., Cardoni, A., & Tiwari, B. K. (2017). Applications of airborne ultrasonic technology in the food industry. *Journal of Food Engineering*, 208, 28-36.
- [12] Alvarez-Arenas, T. E. G. (2004). Acoustic impedance matching of piezoelectric. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 51(5), 624-633.
- [13] Garcia-Perez, J. V., De Prados, M., Martinez, G., Alvarez-Arenas, T. G., & Benedito, J. (2019). Ultrasonic online monitoring of the ham salting process. Methods for signal analysis: Time of flight calculation. *Journal of food engineering*, 263, 87-95.
- [14] Gosálbez, J., Wright, W. M. D., Jiang, W., Carrión, A., Genovés, V., & Bosch, I. (2018). Airborne non-contact and contact broadband ultrasounds for frequency attenuation profile estimation of cementitious materials. *Ultrasonics*, 88, 148-156.
- [15] Ortí Anglés, C. (2012). Caracterización de Phantoms por ultrasonidos. Universitat Politècnica de València. <http://hdl.handle.net/10251/17787>