



Aplicación de técnicas ultrasónicas sin contacto para la detección no invasiva de cuerpos extraños en hamburguesas

Los autores de este trabajo nos describen avances en el desarrollo y aplicación de la tecnología de ultrasonidos con acoplamiento por aire. Esta serie de desarrollos podría llegar a escalarse para su uso industrial en la detección de cuerpos extraños en hamburguesas tal y como se muestra a continuación.

**Gentil A. Collazos-Escobar¹, José M. Prats-Montalbán²,
Anabella S. Giacomozi¹, José Benedito¹,
Tomás Gómez³, José V. García-Pérez¹**

¹ Grupo de Análisis y Simulación de Procesos Agroalimentarios (ASPA), Instituto Universitario de Ingeniería de Alimentos–FoodUPV, Universitat Politècnica de València, Camí de Vera s/n, Edificio 3F, 46022 Valencia, España

² Grupo de Ingeniería Estadística Multivariante (GIEM), Universitat Politècnica de València (UPV), Camí de Vera s/n, Edificio 7A, 46022 Valencia, España

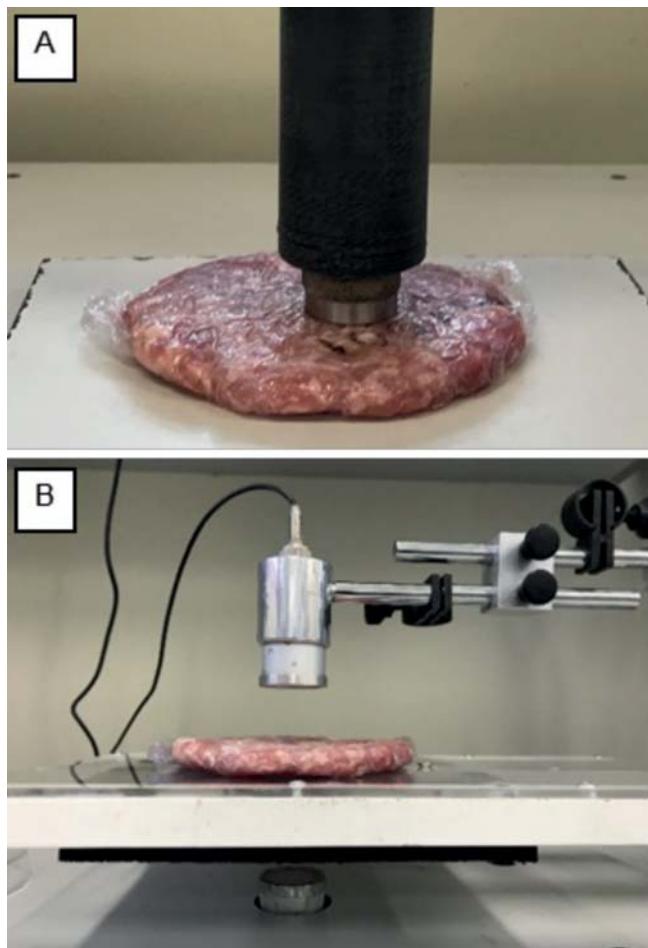
³ Instituto de Tecnologías Físicas y de la Información "Leonardo Torres Quevedo", Consejo Superior de Investigaciones Científicas-CSIC, Serrano 144, 28006 Madrid, España

Introducción

Los cuerpos extraños (FB, de sus siglas en inglés) se consideran contaminantes físicos que pueden aparecer en un alimento debido a incidencias durante la fabricación, almacenamiento o transporte. Este término engloba una amplia variedad de materiales, como metales, vidrio, plásticos, insectos, madera, piedras u otras sustancias indeseadas. Incluso elementos inherentes al propio alimento, como fragmentos de hueso en productos cárnicos o burbujas de gas asociadas a fermentaciones anómalas, pueden clasificarse como FB cuando están vinculados a fallos en el procesado (Djekic *et al.*, 2017). La aparición de estos contaminantes supone un riesgo físico relevante para los consumidores,

FIGURA 1

Medida ultrasónica con contacto entre el sensor y la hamburguesa (A) y sin contacto (B)



además de afectar a la reputación de las empresas, comprometer el cumplimiento normativo y derivar en retiradas de producto con elevados costes económicos (Edwards & Stringer, 2007).

La detección de cuerpos extraños es esencial para garantizar la seguridad alimentaria y mantener los estándares de calidad en la industria. La identificación de contaminantes presentes en la superficie de los alimentos no representa actualmente un gran desafío científico, ya que puede resolverse mediante sistemas automatizados basados en visión artificial y algoritmos de aprendizaje automático, tecnologías ampliamente utilizadas para evaluar parámetros como color, forma o defectos superficiales. Sin embargo, la detección de contaminantes internos continúa siendo un reto relevante, pese al uso industrial de detectores de metales y sistemas

de inspección por rayos X para identificar materiales con densidades muy diferentes a la matriz alimentaria. Contaminantes de baja densidad, como ciertos plásticos, escapan a estas tecnologías, lo que representa una limitación importante para la seguridad y el control de calidad (Li *et al.*, 2015). Ante estas limitaciones, la comunidad científica trabaja activamente en el desarrollo de sistemas alternativos. Tecnologías fotónicas no invasivas, como la espectroscopía de infrarrojo cercano o la imagen hiperespectral, han mostrado resultados prometedores en algunas aplicaciones (Yaqoob *et al.*, 2021). No obstante, su aplicación industrial se ve restringida por factores como el coste, la compleja implementación en línea, la limitada capacidad de penetración y la baja sensibilidad ante cuerpos extraños de baja densidad (Chen *et al.*, 2013).

Entre las tecnologías emergentes, los ultrasonidos destacan como herramienta con alto potencial para la inspección automatizada de alimentos, gracias a su rapidez, precisión y robustez. Cuando una onda ultrasónica se propaga a través de un material y encuentra una discontinuidad, su energía disminuye debido a fenómenos de reflexión, dispersión y absorción. Este principio permite la detección de FB mediante sistemas ultrasónicos (Awad *et al.*, 2012; Mohd Khairi *et al.*, 2018). La reducción de energía de la onda ultrasónica depende principalmente de la geometría del transductor (focalizado o no), del tamaño del FB, y de las diferencias en sus propiedades mecánicas con el alimento.

Las técnicas ultrasónicas convencionales, que conllevan contacto directo entre el sensor y el alimento (**figura 1A**), se han utilizado como tecnologías no destructivas para la detección de FB (Mohd Khairi *et al.*, 2015). Entre sus aplicaciones se incluyen la detección de fragmentos de hueso en pechugas de pollo (Correia *et al.*, 2008; Collazos-Escobar *et al.*, 2025), fragmentos de hueso, vidrio, acero y madera en mermeladas y productos lácteos (Hæggström & Luukkala, 2001), defectos internos en quesos (Leemans & Destain, 2009) y fragmentos de vidrio en bebidas embotelladas (Zhao *et al.*, 2003). Su principal limitación a la hora de aplicarse a nivel industrial es la necesidad de que el sensor esté en contacto directo con el producto, incluso en algunos casos es necesario para garantizar una adecuada transmisión acústica, el uso de materiales de acople (agua, aceite, glicerina o gel) y/o la apli-

cación de una cierta presión estática, que podría dañar el producto. Por ello, aunque se consideran métodos no destructivos, su carácter mínimamente invasivo limita su implementación en líneas industriales y restringe su uso principalmente a productos envasados.

En los últimos años, las técnicas ultrasónicas con acoplamiento por aire han surgido como alternativa novedosa a los métodos convencionales (Fariñas *et al.*, 2023). Esta tecnología permite realizar la medida sin contacto, es decir los sensores están separados del alimento, propagándose la onda ultrasónica por el aire lo que proporciona una solución no destructiva y totalmente no invasiva (Cho y Irudayaraj, 2003; Gan *et al.*, 2006; Pallav *et al.*, 2009), tal y como se muestra en la **figura 1B**. Además, el desarrollo de transductores con acoplamiento por aire altamente eficientes posibilita la realización de la medida en entornos industriales dado su robustez, alta sensi-

bilidad y rapidez. Así, esta tecnología se ha utilizado con éxito para la caracterización de propiedades fílicoquímicas, como contenido en grasa o humedad y propiedades texturales en hamburguesas de cerdo (Fariñas *et al.*, 2021) y filetes de vacuno (Fariñas *et al.*, 2023). En estos estudios, las propiedades medias del alimento, como la textura o la composición, se estimaron promediando las medidas obtenidas en diferentes puntos. No obstante, la detección de cuerpos extraños exige un enfoque distinto y más exigente: requiere el escaneo completo del producto y la obtención de imágenes ultrasónicas internas. En este contexto, la presente contribución muestra los recientes avances en el desarrollo y aplicación de técnicas ultrasónicas sin contacto para la detección rápida y no invasiva de cuerpos extraños en hamburguesas a partir del trabajo publicado previamente por los autores de la presente comunicación (Collazos-Escobar *et al.*, 2026).



FABRICANTES DE SOLUCIONES CON FUNCIÓN CONSERVANTE, ANTIOXIDANTE Y TEXTURIZANTE NATURALES Y CLEAN LABEL

INNOVACIÓN VERDE + SOLUCIONES ADAPTATIVAS + ASESORAMIENTO ESPECIALIZADO

FOOD GRADE

»» Conservantes, Antioxidantes y Texturizantes naturales para la industria cárnica ««



VENTAJAS COMPETITIVAS

- ✓ Prolongan frescura de los productos.
- ✓ Inhiben bacterias patógenas y alterantes: Salmonella, E.Coli, Listeria, Clostridium y ácido-lácticas (BAL).
- ✓ Garantizan seguridad alimentaria.
- ✓ Mantienen el color natural de la carne.
- ✓ Mejora significativa de la textura y la mordida.
- ✓ Extensión de vida útil.
- ✓ Basados en extractos de fermentación.
- ✓ Incremento de la retención de agua y jugos.

Sin Nitritos

Sin Sulfitos

Sin Fosfatos

Sin Almidones

Sin Alérgenos



¡Contáctanos y potencia la vida útil de tus alimentos!

✉ info@tres-a.net

📞 +34 968 839 004

📍 Murcia, Spain

The shield for tomorrow's well-being



www.tres-a.com



TABLA 1

Influencia de la presencia de cuerpos extraños (FB) en hamburguesas sobre los parámetros ultrasónicos relacionados con la energía: Integral (INT) y Norma Cuadrática (SNORM)

FB	Tamaño (mm)	SNORM (V ²)	INT (V · µs)
Control	–	25,4 ± 0,2	63,2 ± 0,1 ^{aA}
Metal	10	1,3 ± 0,1	13,7 ± 0,1 ^{bA}
	5	4,3 ± 0,1	19,5 ± 0,2 ^{cA}
Plástico	10 × 10	2,7 ± 0,1	18,0 ± 0,1 ^{dA}
	5 × 5	4,5 ± 0,2	20,1 ± 0,1 ^{eA}

Se muestra el valor medio y la desviación ($n = 27$) para las tres réplicas realizadas en un área de 3 × 3 mm localizada en la posición del cuerpo extraño.

Metodología

Preparación de muestras y cuerpos extraños

Las hamburguesas de carne de vacuno (*burger meat*, 90 g por unidad, Elaborados Cárnicos Medina, España) se adquirieron en una tienda local. Las muestras comerciales seleccionadas para el análisis en laboratorio estaban compuestas, según la etiqueta del fabricante, por carne de vacuno (88 %), agua, fibra vegetal (con guisante), cereal (arroz), sal, aromatizantes, conservante (E-221) (sulfitos), antioxi-

dantes (E-301 y E-331) y colorante (E-120), lo que resultó en una composición promedio (g/100 g) de: grasa 14, carbohidratos 2,9, proteínas 17 y sal 1,7.

Las hamburguesas se moldearon manualmente formando una bola, en cuyo centro geométrico se insertó el cuerpo extraño (FB) y se formaron nuevamente utilizando un instrumento doméstico (modelo AHM485, American Metalcraft, Inc., EE. UU.) compuesto por dos placas circulares paralelas de acero inoxidable. De esta forma, se obtuvieron las muestras con FB que presentaron unas dimensiones de 95 ± 2 mm de diámetro y $9,9 \pm 0,1$ mm de espesor. El mismo procedimiento se aplicó a las muestras control para evitar diferencias en la estructura por el formado. Finalmente, las hamburguesas se almacenaron a 4 °C durante 24 h antes de la inspección ultrasónica. La inserción de los FB en el centro geométrico resultó compleja, ya que durante el formado el cuerpo extraño podía desplazarse de su posición central.

Como cuerpos extraños (FB) se utilizaron arandelas metálicas (acero inoxidable 316) con diámetros externos de 5 y 10 mm (diámetros internos de 2,7 y 3,3 mm, respectivamente, y un espesor de 1,6 mm) y piezas de plástico blando (poliuretano termoplástico) de 10 × 10 mm y 5 × 5 mm, con un espesor de 3,1 mm (tabla 1). Ambos tipos de

FIGURA 2

Montaje experimental utilizado para la realización de las medidas ultrasónicas sin contacto y los barridos (x, y) y la obtención de las imágenes ultrasónicas

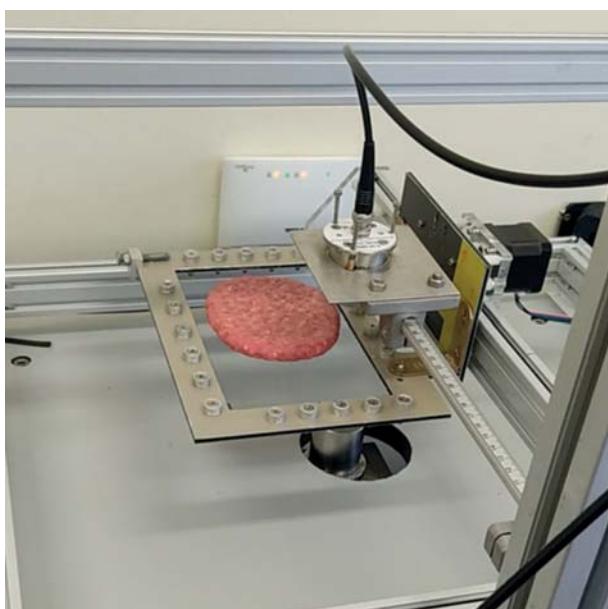
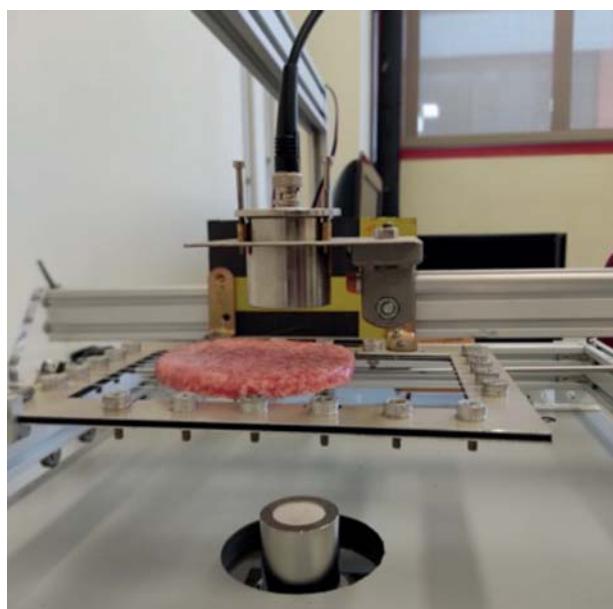
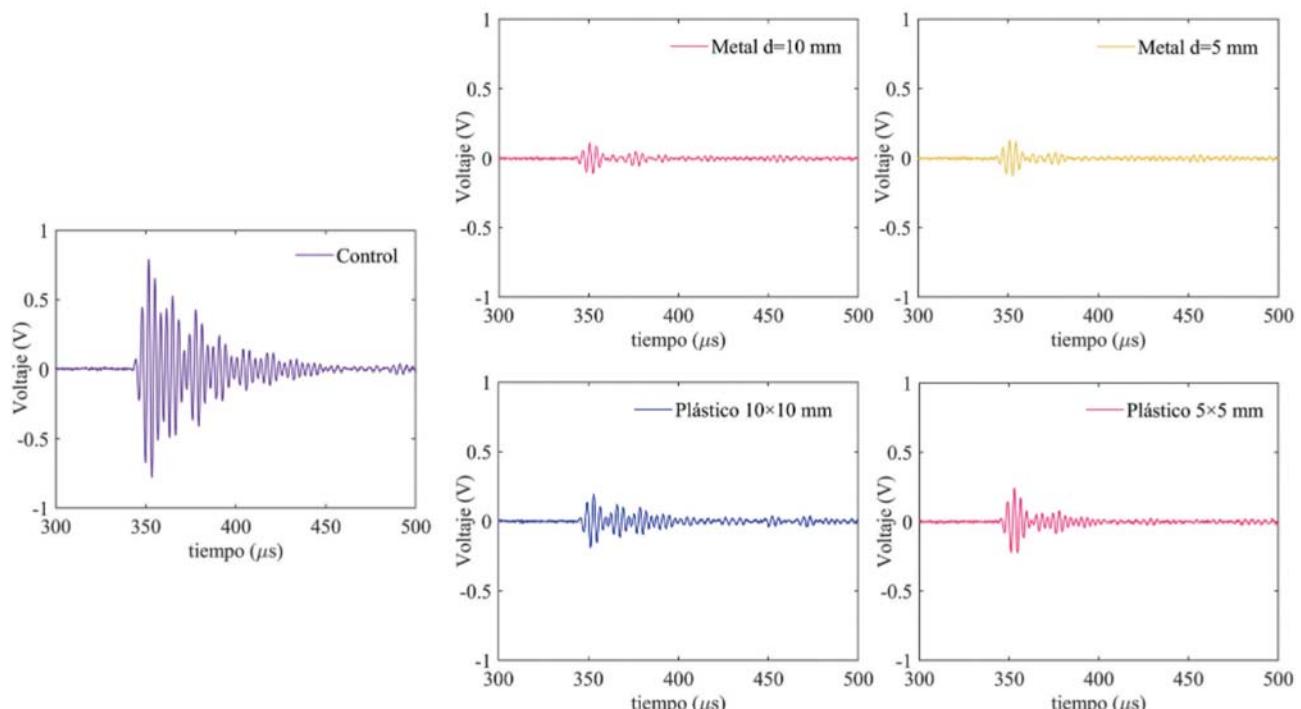


FIGURA 3

**Señales ultrasónicas para las hamburguesas control y con presencia de cuerpo extraño
(tomadas en el punto central donde se observó el mayor efecto del cuerpo extraño)**



FB son materiales frecuentemente utilizados en las líneas de procesado y pueden contaminar potencialmente los productos alimentarios debido a fallos en el equipo u otros incidentes, lo que representa un riesgo significativo para la calidad y la seguridad alimentaria. Se prepararon tres hamburguesas para cada tipo de FB y también para las muestras control.

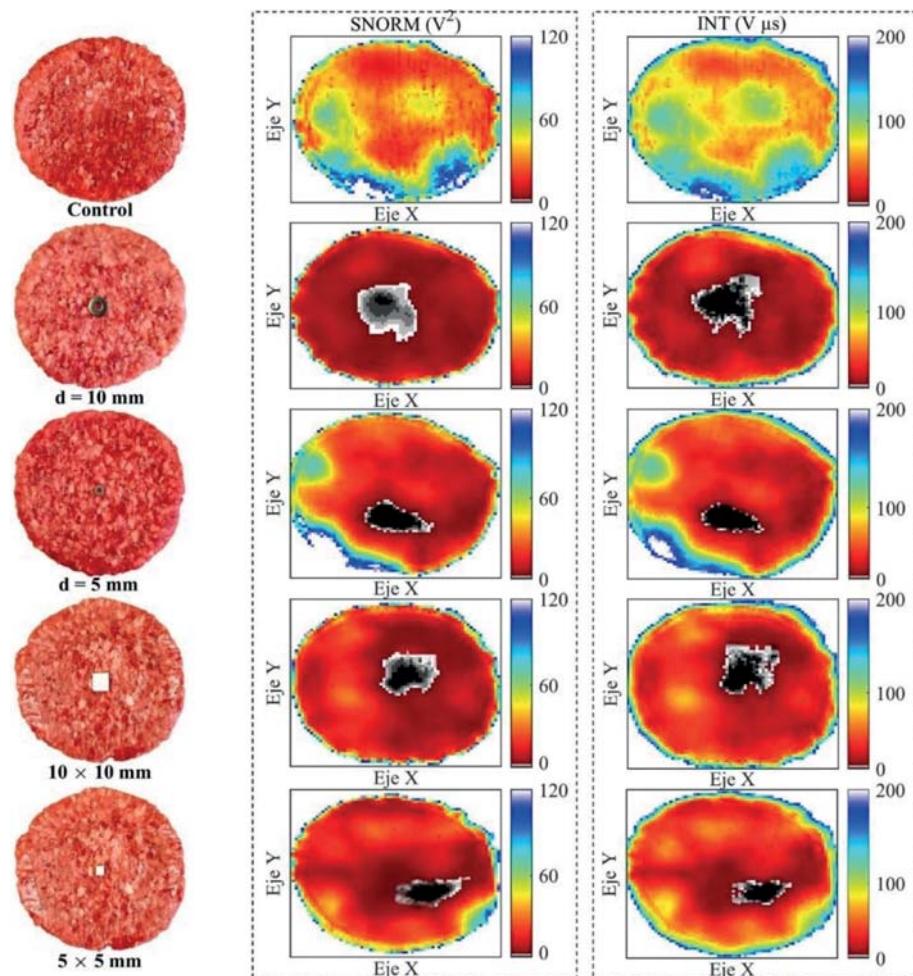
Medidas y parámetros ultrasónicos

El montaje experimental utilizado para las medidas ultrasónicas se muestra en la **figura 2**. Los transductores piezoelectricos no focalizados operaron en modo de transmisión-recepción con una frecuencia central de 0,28 MHz (US-BioMat Lab., ITEFI-CSIC, Madrid, España). Los transductores se alinearon perfectamente entre sí y se colocaron a una distancia de 120 mm. El generador-receptor ultrasónico (modelo 5077 PR, Olympus, Houston, TX, EE. UU.) emite un pulso eléctrico (400 V) ajustado a la frecuencia central de los transductores. La señal recibida por el transductor receptor es digitalizada y almacenada en un ordenador para su posterior análisis (**figura 3**).

Para la medida, la hamburguesa se colocó sobre un portamuestras (**figura 2**) compuesto por un marco metálico y una malla de hilo de pescar (0,2 mm) con separaciones de 5 mm, con el objetivo de proporcionar soporte mecánico, minimizando la interferencia con el haz ultrasónico. El portamuestras se desplaza en las direcciones X e Y mediante un sistema automatizado de posicionamiento 2D. Todos los componentes del sistema fueron gestionados mediante un software desarrollado en LabVIEW® 2020 (National Instruments, Austin, TX, EE. UU.). De este modo, se pudo realizar un barrido de la hamburguesa para la obtención de imágenes ultrasónicas (C-Scans) (**figura 4**). En los barridos, los movimientos en los ejes X e Y se realizaron con un intervalo de 1 mm, analizándose una superficie de 80 × 80 mm, obteniendo 6.400 señales ultrasónicas (cada una de 7.500 puntos).

El análisis de la señal ultrasónica se realizó en el dominio temporal y se limitó a la identificación de parámetros relacionados con la energía, como son la amplitud, la integral (INT) y la norma cuadrática (SNORM) (Collazos-Escobar *et al.*, 2026). En las imágenes de la **figura 4**, cada píxel representa el

FIGURA 4

Imágenes ultrasónicas (C-Scan) de los parámetros relacionados con la energía de la señal ultrasónica: Integral (INT) y Norma Cuadrática (SNORM)


parámetro ultrasónico para una coordenada (X,Y). A partir de las imágenes generadas, se obtuvieron los histogramas de las mismas (**figura 5A**), que representan la frecuencia de cada pixel, y los histogramas acumulados, que no es más que la frecuencia acumulada a medida que aumenta la intensidad del pixel. Collazos-Escobar *et al.* (2026) también analizaron la velocidad ultrasónica y pusieron de manifiesto que este parámetro también puede permitir la detección de cuerpos extraños en hamburguesas. Sin embargo, el uso del parámetro velocidad a nivel industrial puede resultar más complejo, ya que requiere de la medida adicional del espesor de la muestra, lo que es especialmente complicado en productos con superficie irregular.

Resultados y discusión

Influencia de la presencia de cuerpos extraños en la señal ultrasónica

La influencia de los cuerpos extraños (FB) en la señal ultrasónica se muestra en la **figura 3** y las diferencias observadas se cuantifican en la **tabla 1**. La **figura 3** refleja cómo la presencia de piezas metálicas y plásticas de diferentes tamaños, localizadas dentro de las hamburguesas, altera las señales ultrasónicas. En todos los casos, la presencia del FB causó una disminución notable en la amplitud de la señal. El FB actúa como una barrera para la propagación de la onda ultrasónica, provocando diferentes fenómenos –reflexión, dispersión y absorción– que causan la reducción de su energía.

En primer lugar, la disminución de la energía está relacionada con la diferencia de impedancia entre la hambur-

guesa y el FB, lo que da lugar a una reflexión parcial de la onda ultrasónica en la interfase entre ambos medios (Pallav *et al.*, 2009; Fariñas *et al.*, 2021). En este sentido, se observó una reducción mayor de amplitud en presencia de metal que en presencia de plástico (**figura 3**), lo cual puede atribuirse a una mayor diferencia de impedancia (Z: metal $22,61 \pm 0,09$ MRayl, plástico $1,05 \pm 0,02$ MRayl, hamburguesa $1,73 \pm 0,05$ MRayl). En segundo lugar, el FB también puede contribuir a una absorción adicional de energía cuando presenta un coeficiente de atenuación mayor que la propia hamburguesa. Finalmente, la presencia del FB conlleva la dispersión de la onda que puede incrementarse de manera sustancial por la presencia de aire alrededor del FB (Fariñas *et al.*, 2021), lo

cual es frecuente dada la diferente naturaleza de ambos materiales.

Los parámetros ultrasónicos relacionados con la energía (SNORM e INT) que se muestran en la **tabla 1** reflejan las diferencias observadas en las señales ultrasónicas de la **figura 3**. Tanto la SNORM como INT se redujeron notablemente con la presencia del FB en comparación con los valores de las hamburguesas control (**tabla 1**). También, se observa que la reducción de SNORM e INT se incrementa con el tamaño del FB.

Así, los porcentajes de reducción medios fueron los siguientes:

- Metal (10 mm): 94,9 % en SNORM y 78,3 % en INT
- Metal (5 mm): 83,1 % en SNORM y 69,1 % en INT
- Plástico (10×10 mm): 89,4 % en SNORM y 71,5 % en INT
- Plástico (5×5 mm): 82,3 % en SNORM y 68,2 % en INT

Los resultados presentados corresponden a la zona de la hamburguesa donde la influencia del FB es máxima. Para ello, se analizó un área de 3 × 3 mm centrada en la posición del contaminante, ya que en esa región el área activa del transductor cubre completamente el FB. Este efecto se muestra en la **figura 6**, donde se observa que, cuando el transductor no cubre por completo el cuerpo extraño, el efecto en la señal ultrasónica disminuiría.

Por tanto, el tamaño tanto del transductor como del FB desempeñan un papel determinante en la detección (**figura 6**). El uso de transductores no focalizados —como los empleados en este estudio, con un área activa amplia (1 pulgada de diámetro, 506 mm²)— puede limitar la identificación de contaminantes muy pequeños. En estos casos, sería necesario emplear transductores focalizados, co-

La variabilidad en la medida ultrasónica de las hamburguesas se debe a la heterogeneidad debida a su composición y propiedades texturales que dependen de la materia prima además de su picado, amasado y formado

náreas activas significativamente menores (1 mm de diámetro, 3 mm²). Por el contrario, el uso de transductores no focalizados, al cubrir un área mayor, facilita la aplicación industrial como se comentará a continuación, en el apartado de implementación industrial.

Imagen ultrasónica

Las imágenes de ultrasonidos sin contacto (C-scans) de hamburguesas se muestran en la **figura 4** tanto para las muestras Control como con FB. Dentro de los límites de las hamburguesas control, la mayoría de los píxeles en las imágenes (**figura 4**) mostraron valores para SNORM e INT que oscilaron entre 19 y 55 V² y 45 a 91 V µs, respectivamente. Estos valores reflejan la variabilidad inherente de la medida ultrasónica en las hamburguesas atribuida a la heterogeneidad de este producto en cuanto a sus propiedades composicionales y texturales, no únicamente dependientes de la materia prima sino también de su procesado, en relación a su picado, amasado y formado. Este aspecto no debe considerarse como una limitación de la técnica ultrasónica sino como una oportuni-



La mejor descortezadora eléctrica del mercado: Geco marca la diferencia. Menos ruido, menos desperdicio y máxima facilidad de uso

www.artisfoodtech.com info@artisfoodtech.com Telf. 972 749 333



FIGURA 5

Histograma (A) e histograma acumulado (B) de la imagen ultrasónica (C-Scan) correspondiente con la integral (INT) de las señales para una hamburguesa control y con plástico (10 x 10 mm) como cuerpo extraño

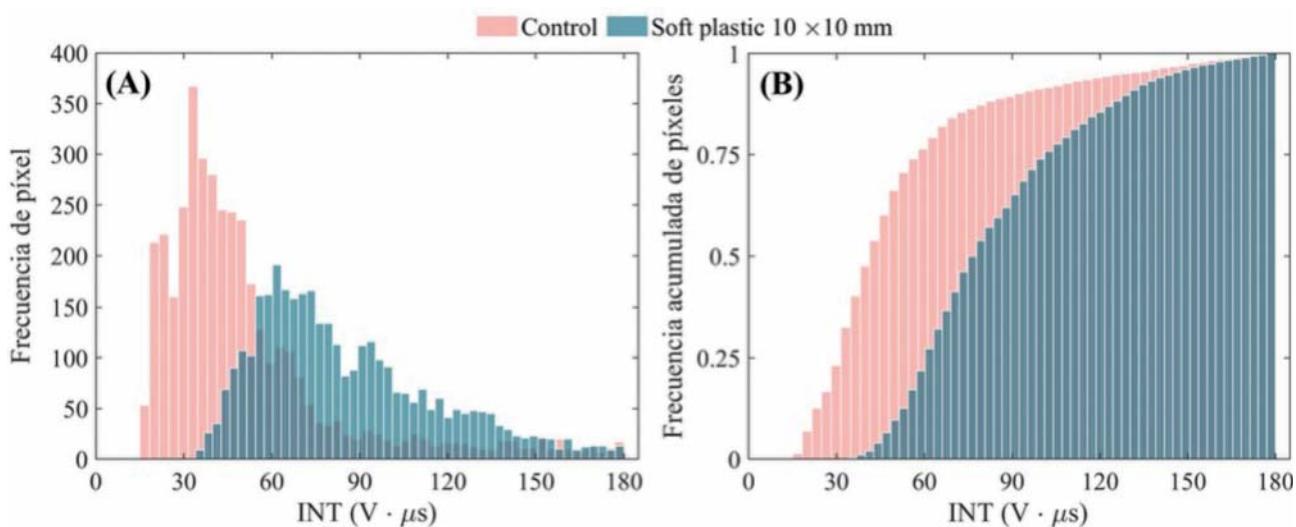
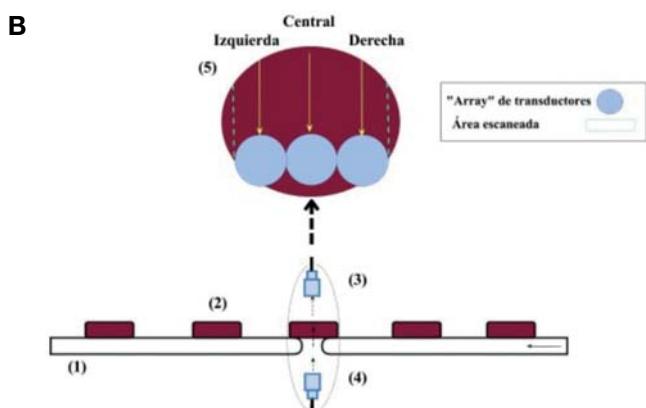
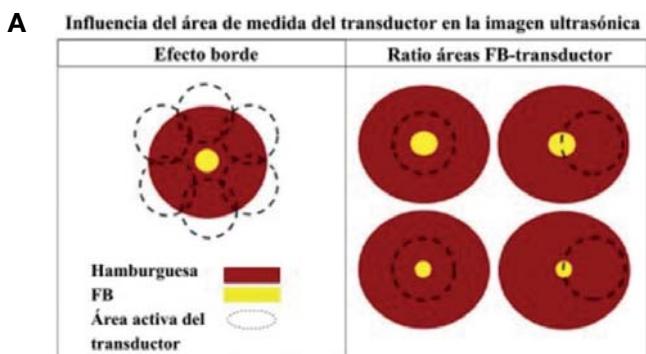


FIGURA 6

Influencia del área de medida del transductor en la imagen ultrasónica (A) y ejemplo de implementación en línea a nivel industrial (B)



1.- Cinta transportadora, 2.- Hamburguesa, 3 - 4.- Array de transductores ultrasónicos emisor y receptor, 5.- Área escaneada por un array de 3 elementos.

dad ya que muestra el potencial de esta tecnología también para determinar parámetros fisicoquímicos relacionados con la composición y textura del producto.

A pesar de la variabilidad en las imágenes ultrasónicas para las hamburguesas control, la presencia de FB provocó una reducción significativa en los valores de píxel para SNORM e INT en toda la imagen (**figura 4**) dado que el FB afecta a muchos de los puntos de medida dado la elevada área activa de los transductores utilizados (**figura 6**). Así, en todas las hamburguesas con FB se observa que el área de la gama de los colores rojos, que corresponde a píxeles con baja intensidad de señal, es mucho mayor que en las hamburguesas control (**figura 4**). Como era de esperar, las diferencias de color respecto a las hamburguesas control fueron menores para las muestras con FB de 5 mm en comparación con las de 10 mm.

La localización del FB en la imagen se corresponde con los valores de píxeles muy bajos asociada a los colores negros-blancos (**figura 4**). Así, se observa que la presencia del FB se identifica perfectamente, pero la imagen aparece distorsionada y difuminada mostrando un área mucho mayor que la del FB. Este fenómeno, ya comentado, se debe a que el área activa de los transductores ultrasónicos es mucho mayor que el tamaño del FB. Como consecuencia, el área con la máxima

afección en términos de propagación ultrasónica se extiende más allá de los límites del cuerpo extraño. El uso de transductores focalizados podría mejorar la diferenciación del FB y reducir el límite de detección asociado a su tamaño.

Collazos-Escobar *et al.* (2026) compararon las imágenes ultrasónicas de las hamburguesas con las de gelatinas envasadas y evidenciaron que la ubicación del FB estaba más claramente definida en las gelatinas. Este hecho se atribuye a la naturaleza más homogénea de las gelatinas en comparación con la estructura heterogénea de las hamburguesas. La mayor heterogeneidad de las hamburguesas provoca un aumento en la dispersión de las ondas ultrasónicas, lo que contribuye significativamente a los artefactos que provocan la dispersión de la imagen.

Para realizar el análisis de imágenes, los resultados de los histogramas son especialmente relevantes, ya que permiten identificar distribuciones de píxeles anómalas (**figura 5A**). Así, los histogramas de las hamburguesas permiten claramente diferenciar entre las muestras Control y con FB, donde la presencia del FB indujo una distribución sesgada hacia la izquierda y un aumento en la cola. Además, los histogramas acumulados de píxeles diferenciaron eficazmente las muestras de Control de las que contenían FB, como lo indica la mayor frecuencia de valores bajos de INT (**figura 5**). La cuantificación de otros parámetros de los histogramas, como su asimetría y el área bajo la curva en los acumulados, contribuye a discriminar con elevada presión la presencia

de FB en las hamburguesas (Collazos-Escobar *et al.*, 2026). El uso de técnicas de análisis masivo de datos e inteligencia artificial puede ser útil en aquellos casos donde la identificación no sea tan evidente como en este ejemplo de aplicación en hamburguesas y también para aplicaciones industriales como se detallará a continuación.

Potencial aplicación industrial

Los resultados mostrados ponen de manifiesto la capacidad de los transductores ultrasónicos con acoplamiento por aire para la detección de cuerpos



FOSS
MeatMaster™ Flex
el analizador por Rayos-X móvil

NUEVO

ANALYTICS BEYOND MEASURE

Aumenta el Beneficio de tu producción cárnica gracias al ajuste del contenido de grasa a tiempo real.

Garantiza la Seguridad alimentaria desde el comienzo con una rápida detección de Objetos Extraños.

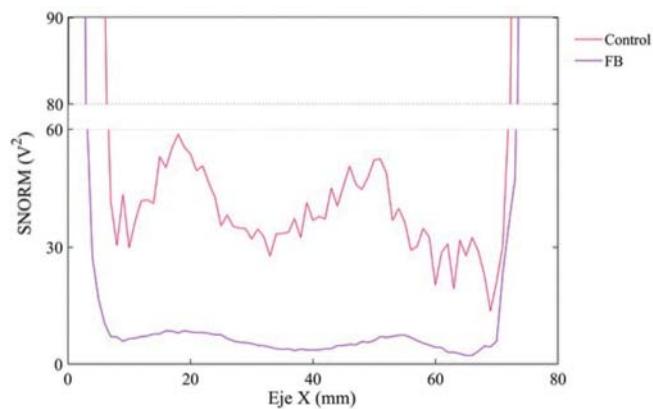
¿Estás preparado para la nueva generación de Rayos-X?

FOSS +34 934 949 940 infofoss@foss.es



FIGURA 7

Variación de la norma cuadrática (SNORM) de la señal ultrasónica en un barrido longitudinal (B-Scan) a lo largo de la dirección radial para una hamburguesa control y con cuerpo extraño plástico (FB, 5 x 5 mm)



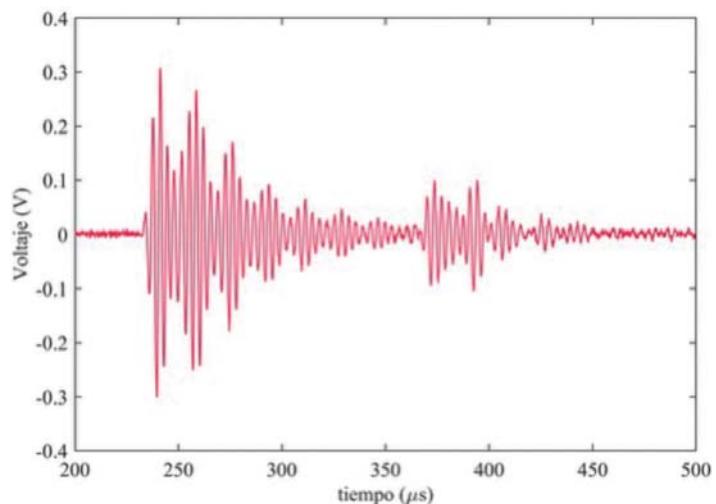
extraños en laboratorio. Sin embargo, esta tecnología demuestra su mayor potencial a nivel industrial, gracias a su robustez, precisión y velocidad, permitiendo analizar en tiempo real el 100 % de la producción. Así, en la **figura 6B** se muestra un ejemplo de un posible diseño para la implementación de esta tecnología a nivel industrial. En esta configuración, un módulo ultrasónico (3-4 **figura 6B**) se integraría entre dos cintas transportadoras adyacentes diseñadas para el transporte de las hamburguesas en fábrica. Los módulos ultrasónicos se situarían en

el espacio entre estas dos cintas, lo que permite que la onda atraviese el producto sin obstrucciones y alcance el transductor receptor. El área efectiva de los transductores debe cubrir la mayor parte de la superficie del producto; por ello, puede emplearse un *array* (matricial o vectorial) de sensores de ultrasonidos para escanear toda la superficie, como se ilustra en la **figura 6B** con un *array* de 3 elementos. La configuración lineal de transductores (**figura 6B**) es una opción viable, aunque podrían implementarse también configuraciones espaciales alternativas. Además, aunque incrementar el número de elementos del *array* aumentaría el área cubierta, es esencial optimizar su cantidad, considerando su impacto sobre la precisión de la medida, el coste y la complejidad del equipo.

El ejemplo de aplicación industrial propuesto permitiría obtener la variación de los parámetros ultrasónicos en una determinada dirección, ya que el sistema ultrasónico permanecería estático y el movimiento de la hamburguesa en la cinta conllevaría su inspección obteniéndose barridos longitudinales (B-Scan) coincidentes con la dirección radial y otros desplazados paralelamente a izquierda y derecha, tal y como se muestra en la **figura 6B**. Para simular esta aplicación se pueden utilizar las imágenes ultrasónicas (C-scans) antes mostrados (**figura 4**). Así, la **figura 7** muestra la variación de la energía de la señal a lo largo de la dirección radial de la hamburguesa comparando el perfil de

FIGURA 8

Señal ultrasónica medida en una hamburguesa envasada en formato tipo skin



una hamburguesa control y con FB (plástico 5 x 5 mm). Se observa que, una vez superado el efecto borde, los valores de la norma cuadrática en la hamburguesa control oscilan alrededor de 30 V² mientras que en presencia del cuerpo extraño los valores son inferiores a 10 V². De esta forma, con el array de 3 elementos propuesto en la **figura 6B**, se obtendrían tres perfiles coincidentes con 3 zonas en la hamburguesa: central, izquierda y derecha.

El efecto borde surge como consecuencia del desajuste entre el área de la hamburguesa y el área activa del transductor (**figura 6A**), lo que hace que parte de la energía ultrasónica se propague por el aire y altere las medidas basadas en energía. En consecuencia, los valores de SNORM (**figura 7**) se elevan en los bordes del producto (zona muerta) y disminuyen a medida que mejora la superposición entre el área activa del transductor y la porción de la hamburguesa escaneada (**figura 6A**). La presencia de esta zona muerta puede dificultar la detección de FB cercanos a estos bordes y abordar su impacto será importante en futuros estudios. Una posible estrategia para mitigar los desafíos de detección en las regiones de borde consiste en cubrir el límite exterior con un material que atenué la saturación de la señal ultrasónica cuando el emisor y el receptor están alineados y la superficie del alimento no cubre completamente el área efectiva del transductor. Otra

estrategia sencilla pero efectiva consiste en aplicar una ventana (*gate*) a la señal recibida para descartar el componente transmitido por el aire. Esta estrategia es viable en hamburguesas, ya que la velocidad ultrasónica es mucho mayor que en el aire mitigando eficazmente los efectos de borde.

El momento más idóneo para la realización de la medida ultrasónica en la línea de proceso es tras el formado de la hamburguesa y previamente a su envasado. Aunque, para algunos envases como el tipo *skin*, la medida también podría realizarse en la hamburguesa envasada (**figura 8**) como método de control de calidad final previo a la expedición de los lotes. La elevada eficiencia de los transductores con acoplamiento por aire permite propagar la onda ultrasónica por el film plástico, la hamburguesa y el cartón con el suficiente nivel de energía para su correcto análisis (**figura 8**). El uso del sistema ultrasónico no debe restringirse a la detección de FB ya que también puede aportar información útil de la composición y propiedades texturales de la hamburguesa como la firmeza, dependientes de la materia prima y también del tipo procesado. De manera que también puede ser útil para identificar problemas en la maquinaria utilizada para el formado de las hamburguesas.

Este estudio representa un primer paso hacia el desarrollo de un sistema preciso y robusto para detectar FB internos



CONTROL TOTAL. CERO RIESGOS

Certificamos tus equipos para:



+34 91 128 39 03

info@lomatecsoluciones.com

en hamburguesas mediante el uso de transductores ultrasónicos con acoplamiento por aire de alta eficiencia que permiten realizar una medida no destructiva y no invasiva en entornos industriales. Las investigaciones futuras deberían examinar la detección de FB localizados cerca de los bordes del producto alimentario, así como establecer los límites de detección de esta tecnología para FB de menor dimensión de los empleados en el presente estudio y de distintos materiales, como restos de plásticos, vidrio, piedras o contaminantes biológicos, que puedan introducirse durante el proceso de fabricación. Asimismo, es esencial analizar un conjunto de muestras más amplio para desarrollar un marco estadístico robusto que respalde la detección en tiempo real de FB y una monitorización integral de la calidad a lo largo de todo el proceso de producción.

La tecnología de ultrasonidos con acoplamiento por aire podría escalarse para su uso industrial para la detección de cuerpos extraños en hamburguesas

Conclusiones

La presencia de cuerpos extraños en las hamburguesas provocó modificaciones de las ondas ultrasónicas, dando lugar a una disminución de los parámetros ultrasónicos relacionados con la energía. La interacción entre la onda ultrasónica y el cuerpo extraño causa una pérdida de energía que depende en gran medida del material del cuerpo extraño y su tamaño. Las piezas metálicas produjeron mayor atenuación en las señales ultrasónicas en comparación con las piezas plásticas. Además, los cuerpos extraños más grandes provocaron una mayor caída de la energía de la señal ultrasónica. Las imágenes acústicas (C-Scans) generadas a partir de los parámetros relacionados con la energía permitieron identificar la presencia de cuerpos extraños de forma muy evidente. El análisis de dichas imágenes a partir de sus histogramas permite identificar patrones anómalos en las ham-

burguesas con cuerpos extraños permitiendo su discriminación de las hamburguesas control.

La tecnología de ultrasonidos con acoplamiento por aire podría escalarse para su uso industrial mediante el empleo de una matriz de transductores que cubra toda la superficie del producto mientras éste se desplaza por una cinta transportadora. El uso de transductores no focalizados minimiza el número de transductores necesarios, reduciendo así los costes y la complejidad del sistema. Sin embargo, este enfoque disminuye la resolución espacial, complica la determinación del tamaño del cuerpo extraño y es más susceptible al efecto de borde. Dependiendo de los requisitos específicos de cada aplicación, distintas soluciones pueden resultar más adecuadas, equilibrando resolución, coste y robustez frente a los efectos de borde. Futuros estudios deberían investigar los límites de detección según la naturaleza del cuerpo extraño y la configuración específica de la matriz ultrasónica, incluidos factores como la geometría, el número de elementos y la frecuencia de operación. El desarrollo completo de la tecnología de ultrasonidos con acoplamiento por aire requerirá la colaboración con empresas fabricantes de equipos para el desarrollo de prototipos industriales que permitan monitorizar en tiempo real el 100 % de la producción.

Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación del proyecto ULTRADIGITAL (AGROALNEXT/2022/045), el cual forma parte del programa AGROALNEXT, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación con fondos europeos NextGenerationEU (PR-TR-C17.I1), así como por la Generalitat Valenciana. Gentil A. Collazos-Escobar agradece la financiación recibida por su contrato predoctoral (PRE2020-092255) dentro del Subprograma Estatal de Formación del Programa Estatal de Promoción del Talento y su Empleabilidad en I+D+i, en el marco del Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación 2017-2020, con fondos FEDER.

Bibliografía

Si desea descargar la bibliografía íntegra de este artículo puede hacerlo en la siguiente dirección web: www.eurocarne.com/documentos/bibl34204.pdf. 