

# Estudio de la viabilidad de un dispositivo no destructivo para la caracterización mediante ultrasonidos de la evolución temporal de las propiedades físicas de la corteza de la naranja

Camarena F., Martínez-Mora J., Espinosa V., Ardid M.

*Departamento de Física Aplicada, Escuela Politécnica Superior de Gandia, Universitat Politècnica de València, Ctra. Nazaret-Oliva s/n, 46730 Grau de Gandia (Spain).Fracafe@fis.upv.es*

**RESUMEN:** El presente estudio amplía los resultados presentados en la anteriormente [3], en la que se demostraba la correlación existente entre las magnitudes ultrasónicas de propagación de la onda en la corteza de la fruta (coeficiente de absorción y velocidad de propagación) y las magnitudes habitualmente medidas en las centrales citrícolas para obtener información acerca de sus condiciones físicas para el correcto almacenamiento en cámaras de frigoríficas (pérdida de masa y presión de rotura). La mejora sustancial respecto al anterior dispositivo de medida estriba en la consecución de un dispositivo no destructivo. A tal efecto se construyeron diversos focalizadores, con el objetivo de amplificar la señal y localizarla en una zona reducida de la corteza, así como para la posterior detección de la señal acústica una vez atravesada la piel. Se describen los estudios para el diseño de los focalizadores, para el correcto acoplamiento de éstos a la piel de la naranja y la dispersión final obtenida con el dispositivo.

**ABSTRACT:** This study expands the results presented in previous editions [3], where it was shown the correlation between the ultrasonic magnitudes (velocity wave propagation and absorption coefficient) in the peel of the fruit and the magnitudes usually measured in orange stores in order to obtain information about the conditions of the fruit (loss of weight and oil glands break stress). The substantial improvement respect to the previous set up rests in the attainment of a non destructive technique. With this aim there were built several transformers, with the objective to amplify the signal and localize it in a small zone of the peel, as well as for the subsequent detection of the acoustic signal once crossed the peel. The design studies of the transformers, the correct way to do the measurements, the effect of the pressure, and the dispersion reached are described.

## 1. INTRODUCCION

La Comunidad Valenciana es una de las mayores productoras de cítricos y hortalizas a nivel mundial. En este contexto, la capacidad para poder almacenar las cosechas en buenas condiciones una vez recolectadas es de gran importancia. Diversas pruebas se utilizan actualmente en las centrales citrícolas con el fin de conocer las condiciones físico-químicas en que se encuentran las frutas [1,2], como son las pruebas de penetrometría, colorimetría, índice de acidez, índice de madurez o las pruebas de emisión de gases. El conocimiento del estado de las muestras permite tomar decisiones sobre los tratamientos que deben seguir cuando son mantenidas en cámaras frigoríficas y realizar predicciones sobre el estado en que se encontrarán una vez alcanzado el lugar de destino para la venta. Uno de los parámetros relevantes a tal efecto es el estado de hidratación de la fruta, íntimamente relacionado con la

turgencia que presentan, y viene siendo medido mediante técnica de penetrometría, basadas en la medida de la presión necesaria para romper la corteza de la fruta o, en el caso de los cítricos, la glándula del aceite. Estas medidas son destructivas y lentas, y suelen ser desestimadas en la mayoría de los casos, aun teniendo en cuenta que el grado de hidratación de la fruta es un factor muy importante, por dar información del aspecto que ésta muestra, al tener lugar a través de la piel.

Sustituir estas medidas destructivas y mecánicas por medidas ultrasónicas no destructivas supone un gran avance para obtener información sobre el estado de la fruta en el momento de la recolección, durante la conservación y en su llegada a los puntos de venta. En un estudio previo [3] se demostró la correlación existente entre los valores de velocidad de propagación y absorción de las ondas de ultrasonidos en la piel de la naranja y su estado de hidratación, evaluado mediante testado clásico de penetrometría. No obstante, se utilizó un método de medida de los parámetros ultrasónicos que era destructivo, con lo que su utilidad era irrelevante hasta que se dispusiese de un método no destructivo. En el presente trabajo se describe el proceso de diseño y construcción de un dispositivo no destructivo de medida de la velocidad y absorción de ondas de ultrasonidos en frutas y hortalizas frescas, y se evalúa la capacidad que éste presenta para realizar medidas fiables capaces de ser correlacionadas con las medidas clásicas.

## 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

Las ondas de ultrasonidos se propagan por medios materiales a una velocidad que depende fundamentalmente de la elasticidad y de la densidad que presenta el medio, con lo que cualquier cambio en alguna de estas propiedades afectará a la velocidad de propagación de las mismas. De la misma forma, el grado de atenuación de la onda al propagarse por un determinado medio depende de los diferentes mecanismos de absorción que presenta y de su capacidad para dispersar el haz en diferentes direcciones. En el caso particular de los vegetales, por estar compuestos fundamentalmente por una serie de tejidos con una alta concentración en agua, los parámetros ultrasónicos dependerán fuertemente de la cantidad de agua que presenta la muestra, es decir, de su grado de hidratación. Esta dependencia se demostró en [3], concluyendo que la velocidad de propagación de los ultrasonidos en la piel de una fruta disminuía con el tiempo debido a que la pérdida de agua aumentaba la proporción de espacios aéreos intercelulares y a que la piel perdía elasticidad. A su vez, esta pérdida de agua implica una pérdida de homogeneidad en el medio por el que se propaga la onda, dispersándose en mayor medida y consecuentemente aumentando su coeficiente de atenuación con el tiempo.

Dada la elevada dificultad de propagar ultrasonidos en medios materiales por su elevado coeficiente de atenuación, un procedimiento adecuado para la correcta medida de la velocidad y la atenuación de las ondas requiere trabajar en modo emisión-recepción, a frecuencias relativamente bajas dentro del rango de los ultrasonidos y con niveles de potencia suficientemente altos como para detectar señales bastante estables. El fundamento de las medidas puede encontrarse en cualquier texto habitual de ultrasonidos [4].

### 3. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Los instrumentos utilizados para realizar las medidas han sido:

- Un generador de funciones Agila
- Un amplificador de potencia ENI 240L.
- Dos transductores piezoeléctricos de 50 kHz.
- Un osciloscopio.
- Dos focalizadores.
- Una estructura mecánica que permita variar la presión de los focalizadores sobre la muestra.

Respecto al anterior dispositivo se han incorporado los focalizadores y los transductores de 50 kHz. La figura 1 muestra la disposición de los diferentes elementos para la realización de las medidas ultrasónicas:

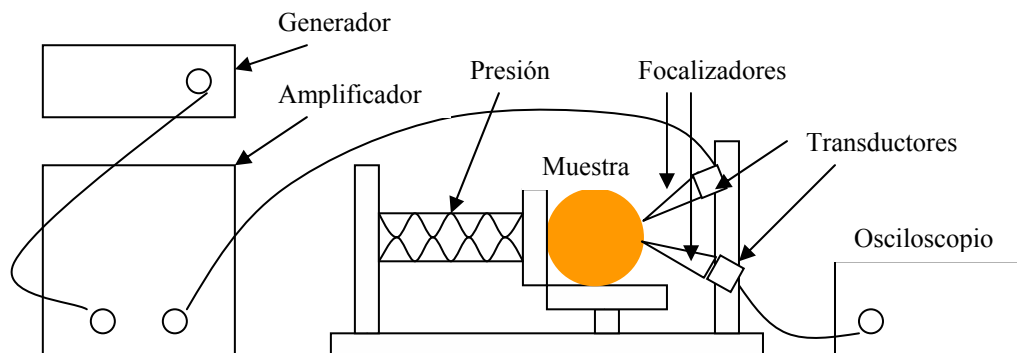


Figura 1 – *Dispositivo experimental de medida*

#### 3.1 Focalizadores

Un focalizador es una línea de transmisión acústica no homogénea, es decir una barra de un determinado material cuya sección es variable y a lo largo de la cual el cociente entre fuerza y velocidad de vibración varía [4]. Su longitud se escoge en media longitud de onda o bien un múltiplo entero de ésta, de forma que resuene a la frecuencia de resonancia del transductor.

La función de los focalizadores en nuestro dispositivo es concentrar la energía ultrasónica en una pequeña superficie de la corteza. Se diseñaron y construyeron diversos tipos de focalizadores con el objetivo de comprobar experimentalmente cuales de ellos proporcionaban una mejor señal recibida. Los materiales utilizados fueron plexiglás y aluminio, y los diseños fueron cónicos y exponenciales. En la figura 2 se muestra una foto de los focalizadores construidos y del acoplamiento a las muestras de frutas:

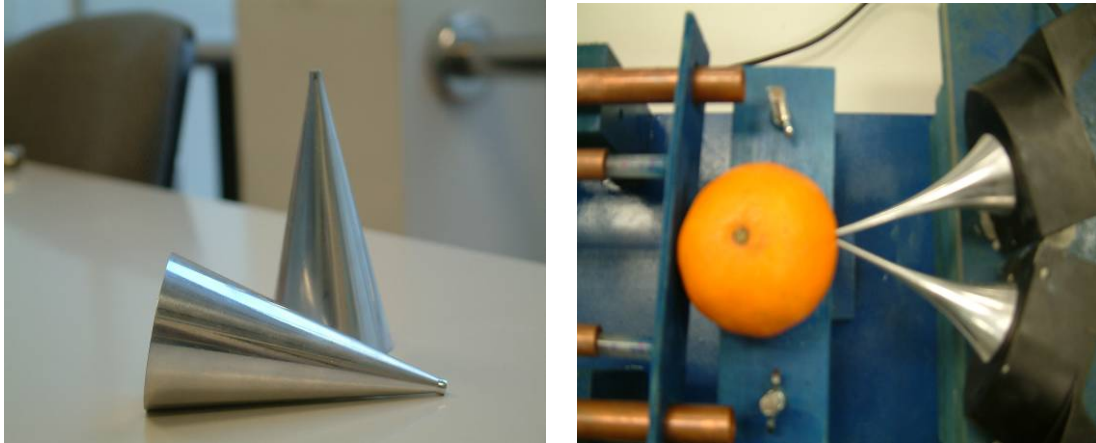


Figura 2 – Imagen de algunos focalizadores utilizados en el experimento y del acoplamiento entre las superficies del transductor y de la naranja.

La superficie mayor del focalizador ( $S_1$ ) venía fijada por el valor de la superficie de la cerámica piezoeléctrica utilizada, que era de  $15.4 \text{ cm}^2$ . El tamaño de la superficie pequeña ( $S_2$ ) fija el grado de amplificación del focalizador [4-5] que, no obstante, no crece indefinidamente, como en principio podría intuirse, al disminuir la superficie  $S_2$ , sino que presenta un límite (entorno a 4.6 para los focalizadores cónicos [4]) debido a que la energía en  $S_2$  no es completamente absorbida y parte se ve reflejada. Se construyeron focalizadores con diferentes superficies  $S_2$  con el fin de comprobar su funcionamiento, considerando que éstas, además, debían de acoplarse a la corteza de la fruta. La tabla 1 muestra las dimensiones de los diferentes focalizadores utilizados, donde  $D$  representa el diámetro de la superficie  $S_1$  y  $d$  el de la superficie  $S_2$ :

Tabla 1 – Dimensiones de los diferentes focalizadores.

Focalizador	D (mm)	d (mm)	Longitud (mm)
Cónico	44.3	1	89.1
Cónico	44.3	4.3	82.9
Cónico	25.5	2	84.45
Exponencial	44.3	2.1	88.5

La longitud de cada focalizador se ha obtenido de forma que la velocidad de vibración en las superficies sean máximas según el tratamiento dado en [4-6], donde se ha supuesto que las ondas que atravesaban el focalizador eran ondas planas, lo que en realidad no deja de ser una primera aproximación al problema. Las dimensiones obtenidas son pues aproximadas, pero para la consecución del objetivo principal del trabajo, obtener una señal adecuada para el dispositivo no destructivo, son suficientes. La tabla 2 muestra diversas configuraciones de medida de los dos transductores con sus respectivos focalizadores y el valor de la señal recibida. De ella se deduce que los focalizadores óptimos para nuestro experimento son los exponenciales, pues son los que mejor señal recibida obtienen, sólo por debajo de la señal obtenida aplicando directamente un transductor sobre el otro.

Tabla 2– *Diferentes configuraciones transductor-focalizador, valor de la señal recibida y frecuencia de resonancia del dispositivo. Donde T transductor, Fe focalizador exponencial, FC focalizador cónico de superficie grande, Fc focalizador cónico de superficie pequeña.*

Configuraciones	$V_{in}$ (V)	$V_{out}$ (mV)	$f_o$ (kHz)
T – T	10	950	49,9
T - (T + Fe)	10	408	53,7
(T + Fe) – (Fe + T)	10	764	40,8
(T + Fe) – T	10	282	49,1
(T + Fe) – T	10	64	54.5
(T + FC) – T	10	340	54,5

### 3. RESULTADOS

Una vez definido el dispositivo experimental a utilizar para la realización de las medidas de velocidad de propagación y de atenuación de las ondas, es necesario fijar un protocolo de medida, de forma que los resultados obtenidos sean lo más fiables posibles, es decir, determinar en qué medida afectan los diferentes elementos del dispositivo experimental a la dispersión de los resultados. De que esta dispersión sea suficientemente pequeña como para ser sensible a cambios en la hidratación de la corteza con el tiempo dependerá la validez, como método no destructivo, del dispositivo propuesto. Para la caracterización del dispositivo se realizaron las siguientes medidas:

#### 3.1 Dependencia de la señal con la presión. Sin gel acoplador.

Uno de los factores que más afectan a la señal detectada en el receptor es el acoplamiento entre los focalizadores y la corteza de la naranja. Este acoplamiento depende de la presión con que se aplica la fruta sobre los focalizadores, del ángulo en que se dispongan los focalizadores entre sí y de factores asociados a la fruta, como son la rugosidad de la piel o la propia hidratación de la fruta. En la figura 3 se muestra el aumento de la señal recibida en función de la fuerza de acoplamiento entre la fruta y los focalizadores para cinco puntos distintos de una misma naranja. Se observa un crecimiento constante en la señal hasta valores cercanos a los 9-10 N, donde los aumentos repentinos de la señal se deben a la rotura de las glándulas del aceite por parte de los focalizadores, lo que proporciona un líquido que hace las funciones de acoplador de impedancias facilitando la transmisión de las ondas de ultrasonidos. El aumento continuado de la señal se debe a que con la presión mejora el acoplamiento de los focalizadores a la corteza. El principal inconveniente de este método es la fuerte dependencia de la señal recibida con la fuerza de acoplamiento, lo que exige muy buena precisión en la presión ejercida y en la disposición del contacto piel-focalizador.

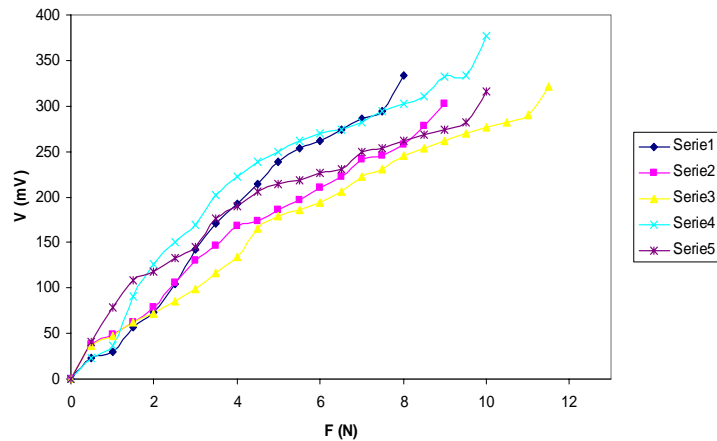


Figura 3 – Señal recibida frente a fuerza ejercida para cinco puntos distintos de una naranja.

### 3.2 Dependencia de la señal con la presión. Con gel acoplador.

La figura 4 muestra de nuevo la respuesta del receptor en función de la fuerza de acoplamiento. En este caso se aplicaron dos pequeñas gotas de gel en las puntas de los focalizadores, facilitándose de este modo la transmisión de las ondas acústicas. Se presentan ejemplos de los resultados obtenidos para dos naranjas diferentes, midiéndose cinco puntos de cada una de ellas. La primera conclusión es la aparición del plató, zonas donde la señal se mantiene constante independientemente de la fuerza ejercida por los focalizadores. En estas zonas el acoplamiento es óptimo, pues el aumento de la fuerza no supone un aumento de señal recibida. Estas zonas son las que caracterizan definitivamente el tipo de corteza medida y serán el objetivo de nuestro estudio.

En las medidas realizadas aparecen diferentes tipos de plató. A altos valores de la presión ejercida se observan diferentes respuestas debido a la forma en que se rompe primero las glándulas del aceite y posteriormente la corteza, pudiéndose observar tanto crecimientos repentinos que acaban decreciendo drásticamente, como decaimientos sin previo aumento de la señal. La física de estos procesos es complicada por tratarse de procesos de rotura de membranas. Por otra parte, se observa que para una misma naranja obtenemos valores del plató que son considerablemente distintos. Esto es debido a que existen zonas de la naranja que presentan desigual grado de hidratación y textura, principalmente debido a que, durante su crecimiento en el árbol, la parte que da al exterior ha sufrido mayores inclemencias climatológicas. Un caso extremo es el de la naranja cuyos resultados se muestran en la figura 4a, en ella las series 1,2 y 3 corresponden a puntos donde la corteza es apreciablemente más blanda a simple vista, mientras que las series 4 y 5 están medidas en puntos donde la corteza es más dura. También se observa que el plató se alcanza más tarde, de 4 a 6 N, en estos puntos. No obstante, el caso típico es el que se muestra en la figura 4b, donde las series 1 y 5 corresponden de nuevo a puntos de mayor dureza en la corteza, pero las diferencias son menores del 10% a lo largo de toda la muestra (un estudio estadístico del problema se presenta a continuación). La dispersión de los valores del plató son menores del 1.5%, lo cual proporciona resultados muy precisos.

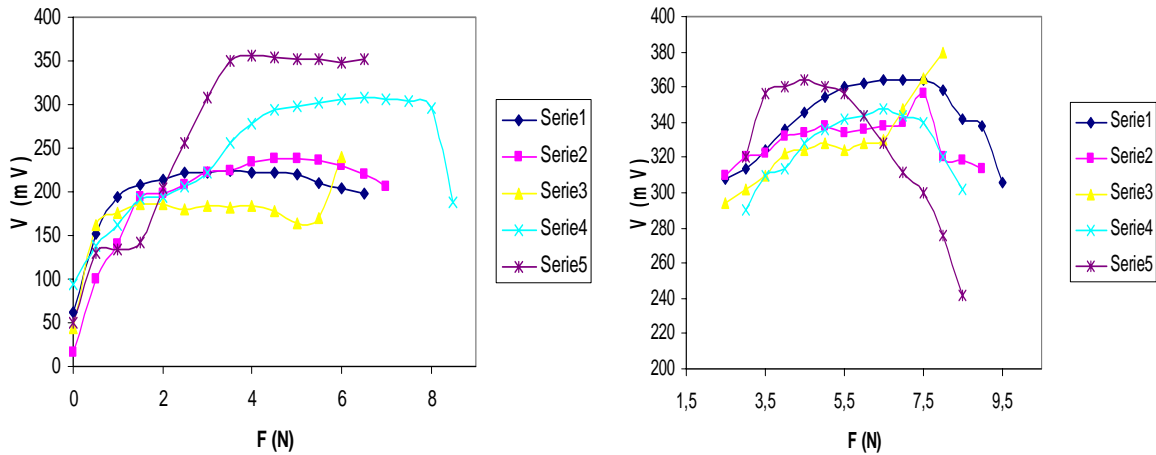


Figura 4 – Señal recibida frente a fuerza ejercida para cinco puntos distintos de dos naranjas.

En la figura 5a se muestra la dispersión de 30 puntos medidos a lo largo del ecuador de la naranja para una fuerza de acoplamiento de 4.5 N. La dispersión es del orden del 7.5% del valor medio, pero incluye tanto efectos producidos por el dispositivo experimental como efectos propios de las variaciones de textura en diferentes zonas de la corteza de una misma naranja. En la distribución se observan tres picos (el primero y el último corresponden a la misma zona de medida) que coinciden con las tres zonas visiblemente diferentes. La dispersión en cada una de las zonas es menor del 2%.

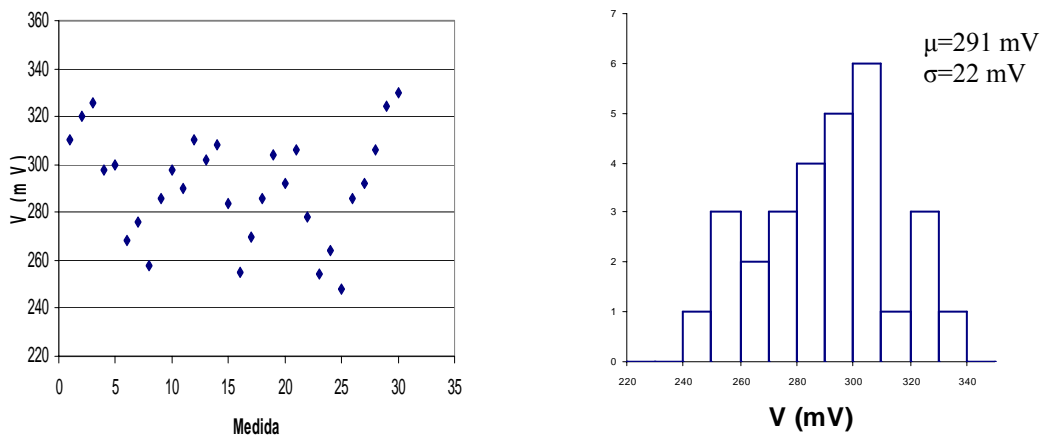
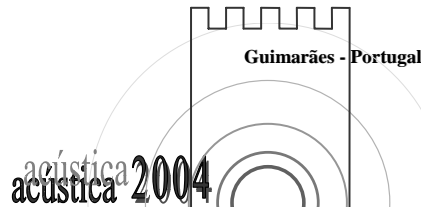


Figura 5 – a) Dispersión de 30 puntos a lo largo del ecuador de la naranja. b) Histograma de los puntos



## 5. CONCLUSIÓN

En este trabajo se presenta el diseño y la caracterización de un dispositivo para la medida no destructiva de los parámetros acústicos característicos de frutas y vegetales. Se han descrito los distintos elementos constituyentes y la forma de realizar las medidas para obtener una buena dispersión. En resultados anteriores [3] se demostró que el coeficiente de absorción de las ondas de ultrasonidos propagándose a través de la corteza de naranjas mantenidas en condiciones ambiente durante 15 días disminuía en un 40%, y un 10% si se mantenían en condiciones frigoríficas. La dispersión del dispositivo actual se ha fijado entorno al 3% en la señal recibida, lo que se traduce en una dispersión del 3 al 4% en el cálculo del coeficiente de absorción, concluyéndose que el dispositivo es perfectamente válido para la realización de estudios de deshidratación de muestras de naranjas, en particular si éstas se realizan en periodos temporales mayores, como ocurre en el caso práctico. Como planes de futuro se establecerá una escala absoluta de hidratación, de forma que a partir del valor de la señal recibida se pueda extrapolar directamente el grado de hidratación de la muestra y se está construyendo un dispositivo robotizado para mejorar la precisión del dispositivo.

## REFERENCIAS

- [1] P. Barreiro, M. Ruiz-Altisent; *Instrumentación de la calidad en frutas y hortalizas frescas*. Comunicación interna.
- [2] ISO 847, UNE 34-177-81
- [3] F. Camarena, et al. *Caracterización mediante ultrasonidos de la evolución temporal de las propiedades físicas de la piel de naranja*. Revista de Acústica. Vol:34 N°:1,2. 2004.
- [4] H. Kuttruff; *Ultrasonics. Fundamentals and Applications*. Elsevier Science Publishers LTD, New York, 1991.
- [5] G. Amza, D. Drimer; *The design and construction of solid concentrators for ultrasonic energy*. Ultrasonics, September 1976.
- [6] I.N. Kanevskii; *Efficiency of high-frequency ultrasonic concentrators*. Soviet Physics-Acoustics. Vol.16, N° 1, 64-68. 1969.