

# DESARROLLO DE PALPADORES DE ULTRASONIDO

Albalat A.M.<sup>a, c</sup>, Ruzzante J.E.<sup>a, c</sup>, Carballal C.A.<sup>a</sup>, Cavalchini J.<sup>a</sup>, Elorriaga M.<sup>b</sup>, Antunez M. E.<sup>b</sup>

<sup>a</sup> *Laboratorio de Ensayos no destructivos, Departamento de Mecánica, Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Delta, ARGENTINA*

<sup>b</sup> *Laboratorio de Química, Departamento de Química, Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Delta, ARGENTINA*

<sup>c</sup> *Grupo de Investigación en Acústica Submarina, Universidad Nacional de Tres de Febrero, ARGENTINA*

*e-mail: [aalbalat@gmail.com](mailto:aalbalat@gmail.com)*

## RESUMEN

En este trabajo se desarrollan los resultados preliminares de la construcción de distintos “backing” para utilizarse en un palpador de ultrasonido. Estos deben tener características específicas de amortiguamiento y atenuación, que generalmente no figuran en la literatura sobre el tema. El estudio fue realizado en el laboratorio de END y de química de la Universidad Tecnológica Nacional Fac. Reg. Delta. El objetivo final de este trabajo es construir sensores de ultrasonido para la generación y recepción de ondas de Lamb con el objeto de usarlos en la detección de fallas en tuberías. Para tal fin se ensayaron compuestos, previamente pesados y mezclados, todos a base de tungsteno, negro de humo, cerámica o epoxy y en menor proporción, sulfato de cerio, óxido de plomo y óxido de zinc. El tiempo de solidificación fue de aproximadamente 12 hs. Una vez fraguadas, se determinó la densidad de las mismas y se les realizaron ensayos de ultrasonido. Se determinaron las atenuaciones acústicas de las muestras a una frecuencia de 5MHz utilizando equipos y palpadores de END convencionales. También se midió la resistencia eléctrica de las superficies frontales y posteriores de las muestras, con un medidor a cuatro puntas. Los resultados obtenidos muestran una gran atenuación acústica de las muestras, con una importante dispersión de los valores medidos de resistencia eléctrica. Los mismos resultados no se encuentran en la mezcla de epoxy. Por intermedio de microscopía se determina la morfología de los materiales. Disponiendo de las obleas piezoeléctricas se inicia la construcción de los primeros palpadores que luego serán caracterizados más en detalle.

*Palabras Clave:* Palpadores, sensores, ultrasonido, backing, ondas, ensayos no destructivos.

## Backings

Dentro de las diversas técnicas de ultrasonido, hay una de ellas que se encarga de verificar los defectos superficiales en tubos y chapas delgadas, generando y censando ondas de Lamb (un tipo particular de ondas superficiales) sobre la pieza. Para esto es requerido un palpador que genere ondas ultrasónicas, montado sobre una zapata (bloque de polimetimetacrilato con una pendiente particular según el material). El palpador o sensor, es constituido por un conector, un cable bipolar, un disco piezoeléctrico, una carcasa metálica, una suela protectora y un amortiguador acústico (backing), que se utiliza para amortiguar el impulso inicial generado por el equipo de ultrasonido, el cual también se encarga de realizar la medida de la presión acústica.

El backing o amortiguador, es poco conocido en la literatura actual, por lo que se propone, fundamentalmente, un estudio de la atenuación acústica, y la resistencia eléctrica de unas muestras a realizar. Estos están formados por ciertos compuestos químicos mezclados y fraguados.

Los palpadores de ultrasonido para ensayos no destructivos, poseen dos elementos centrales o fundamentales. Uno de estos es un disco piezoeléctrico, que se encarga de realizar la conversión entre energía eléctrica a mecánica y viceversa, y el amortiguador o backing, que va encima de este transductor, para atenuar la onda generada por la parte posterior, reduciendo el factor de selectividad o “Q” del piezoeléctrico. Otras definiciones sobre esta parte del palpador, radican en la utilización de la emisión del piezoeléctrico en una sola de las caras, como contramasa ubicada en la cara posterior que absorbe la energía mecánica en esa dirección, deteniendo la oscilación de la cerámica. De esta manera, se podrá aumentar la resolución del mismo, con la posibilidad de detectar defectos más pequeños. El valor de la resistencia eléctrica del amortiguador debe ser alto para evadir corrientes que fluyan sobre este, ya que esta corriente deberá ser máxima sobre los dos electrodos del piezoeléctrico. La impedancia acústica de la contramasa debe ser lo más similar posible a la del piezoeléctrico, para que haya una mayor transmisión energética hacia el backing y así evitar una reflexión devuelta hacia el cristal. Ramadas y otros diferencian los backings según su valor de impedancia acústica, como altos (16MRayl MKS), medios (8,1 MRayls MKS) y bajos (0,48 Rayls MKS). Generalmente (Low y Jones, Abas et al) se utiliza el tungsteno en polvo por su alto nivel de absorción acústica y por su densidad, lo que causa valores de impedancia acústica altos. Este debe tener un tamaño tal que sea comparable con una longitud de onda, de forma tal que la atenuación de la onda por difusión sea máxima. Por otra parte, la porosidad de la muestra cumple un rol en la atenuación acústica del backing. Para realizar transductores angulados, se debe utilizar un material como interfase que tenga poca pérdida por absorción del material, y tenga una impedancia acústica que no sea disímil a la del sensor ni a la de la carga utilizada (la pieza a analizar). Como en la mayoría de los casos se utilizará acero (material de las chapas y tubos) y el sensor será de PZT, se determinó que el polimetimetacrilato, más conocido como plexiglass, es el mejor material más idóneo.

En cuanto a la protección del cristal piezoeléctrico, debido del desgaste del mismo, se pueden usar diversas resinas o materiales para cuidar y mantener las prestaciones del palpador. Se conoce del trabajo de Rubio y Marrero, y de otros autores, algunos escasos resultados del backing, utilizando araldite, baquelita, epoxy, alumina y otros polímeros y resinas en conjunto la mayoría de las veces con tungsteno, un material característicamente muy duro. Abas et al obtuvieron varios de los parámetros buscados, modificando la proporción de tungsteno respecto del total de la muestra para transductores de 2 y 5 MHz, utilizando mezclas con una relación de 4:1, con resultados suficientes salvo para la atenuación acústica.

### **Materiales y procedimientos de fabricación**

Se realizaron dos mezclas diferentes, la primera con un acrílico dental y la segunda con un epoxy con dureza shore D82, ambas en conjunto con diferentes óxidos (sulfato de cerio (4), óxido de plomo (2), óxido de zinc, todas calidad analítica) con el fin de elevar la resistencia eléctrica. También a estas dos muestras se les agregó negro de humo (Cabot, Vulcan 6), con el fin de aumentar el amortiguamiento. A ambas mezclas se les agregó tungsteno (wolframio) en polvo. Algunas imágenes de estos compuestos se muestran en la figura 1.

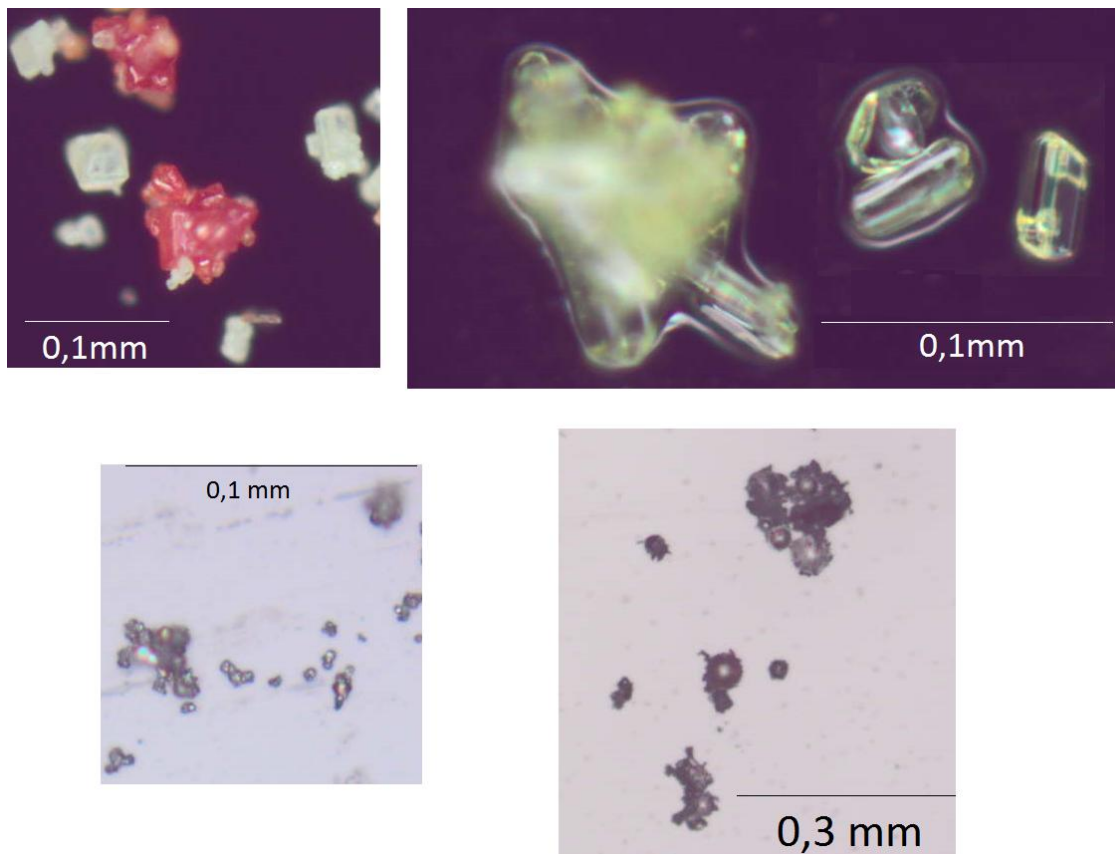


Figura 1. Fotografías tomadas con el microscopio Olympus BX51, en el laboratorio de Optoelectrónica y Metrología Aplicada de la UTN FRD. Fotografía superior izquierda: óxido de plomo, derecha: óxido de cerio. Fotografía inferior izquierda: tungsteno, derecha: acrílico.

Las composiciones utilizadas en la primeras mezclas, constaron de 3g de acrílico, 4g de solvente de acrílico, 3g de tungsteno, 1g de negro de humo y 0,04g de alguno de los tres óxidos previamente mencionados. La cuarta mezcla se realizó sin oxidos. El acrílico fraguó al mezclar sus dos componentes, una parte sólida en polvo con un solvente. Las mezclas se realizaron en un casquete cilíndrico de cerámica. Debido a que estas tres mezclas quedaron con una gran porosidad en su interior, con una pared de 3-5 mm, se realizaron otras 2 mezclas batidas y una más fraguada 48 hs en una bomba de vacío, todas con resultados similares, por lo que se procedió a utilizarse dos mezclas con epoxy. La primer mezcla de epoxy se realizó con 3g de EPO41A (resina de epoxy color marfil), 0,796 g de EPO41B (endurecedor de epoxy), 3,33 g de tungsteno y 1 g de negro de humo, mientras que la segunda mezcla necesitó de 24,035g de EPO41A (resina de epoxy color marfil), 2,09 g de EPO41B (endurecedor de epoxy), 12,375 g de tungsteno y 2,75 g de negro de humo. Esta última preparación lleva mayor porcentaje de tungsteno. La rigidez dieléctrica del epoxy está especificada como de 17 a 19 kV/mm, la cual es más que suficiente para los fines eléctricos del proyecto. Se midió la altura de las muestras de acrílico al fraguarse, la cual resultó en 1,5 cm. Luego las muestras se cortaron en discos de 3mm (acrílico) y de 4,7 mm y 15 mm (epoxy). La densidad de las muestras en acrílico es de 2007 Kg/m<sup>3</sup> y de 1402 Kg/m<sup>3</sup> y 2757 Kg/m<sup>3</sup> para las muestras en epoxy.

El primer piezoeléctrico utilizado es nombrado "Piezoeléctrico 1" con el cual se construyó el "Sensor 1". El mismo tiene una frecuencia de resonancia en el modo del espesor especificada en 690 kHz y una capacidad eléctrica de 1,3 nF medida con un puente RLC a una tensión cuadrática media de 1 volt en 1 kHz según el fabricante. Tiene un espesor de 3 mm y un diámetro de 3mm. Este disco fue fabricado con un material similar al tipo 1 (especificación de materiales piezoeléctricos según la marina de los EEUU explyada en la norma MIL-STD-1376B).

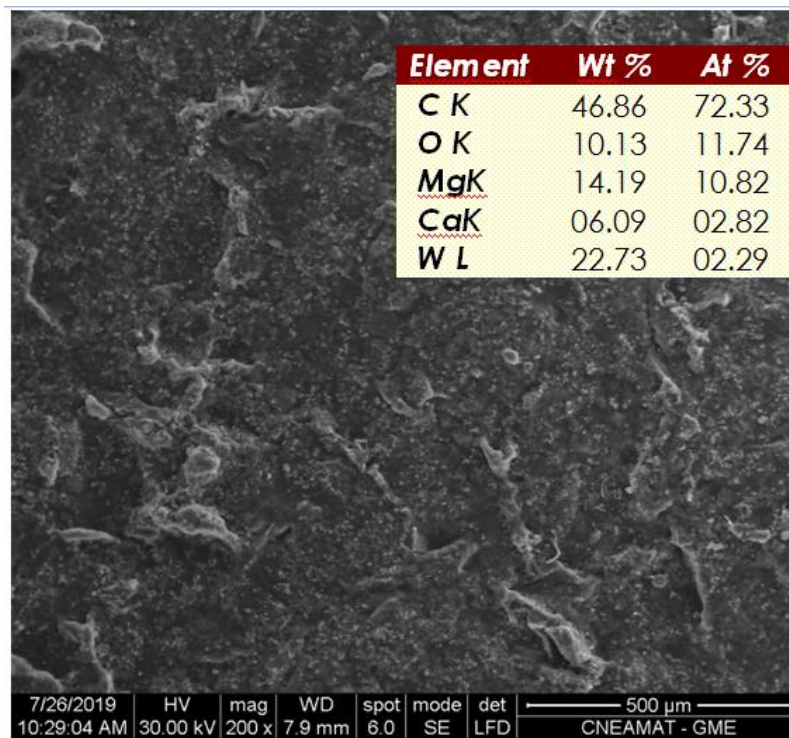


Figura 2. Fotografía electrónica de la muestra realizada con acrílico. En el margen superior derecho se muestra el porcentaje de peso y el porcentaje atómico. Las mismas se tomaron en la CNEA.

El segundo sensor se construyó con un piezoeléctrico de material similar al tipo 5, tiene una frecuencia de resonancia en el modo del espesor de 2MHz, un diámetro de 16 mm y un espesor de 1 mm. La capacidad eléctrica especificada es de 3,1 nF. Ambos se adquirieron en la firma Steminc (nombres SMD20T3R111 y SMD16T1R510 respectivamente). Se realizaron mediciones de la impedancia eléctrica de ambos piezoeléctricos, las cuales se muestran en las figuras 5 y 6.

El proceso de armado de los sensores comenzó al soldarse los electrodos de los piezoeléctricos con dos cables finos tipo wirewrap con estaño. Luego a los mismos se los adherieron con un adhesivo siliconado a un pequeño soporte plano para que no se muevan durante el armado. Sobre este se colocó un tubo de acero inoxidable de 4 cm de alto y una pulgada de diámetro y luego se vertió la mezcla de epoxy con las proporciones y materiales ya mencionados anteriormente.

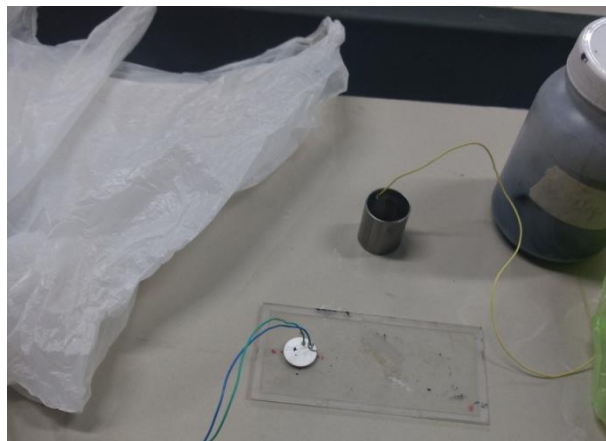


Figura 3. Construcción de los sensores. Se soldó un cable al tubo de acero el cual se unió a la masa del conector Lemo.

## Resultados

Los resultados de las mediciones eléctricas sobre la superficie de las mezclas se muestran en la tabla 1. El método de medición a cuatro puntas, también conocido como método de Kelvin, es una técnica de medición de impedancia eléctrica que utiliza un voltímetro y un amperímetro para lograr mediciones más exactas de resistencia que al usar la técnica tradicional de medición a dos puntas. Se utilizó un equipo Signatone SP4 en conjunto con un medidor de impedancia. El nivel de tensión se eligió en 100V, comparables a la amplitud de tensión del pulser. Se tomaron 4 mediciones en cada cara, girándose la muestra 90° entre cada medición. Se registró el menor valor de resistencia medido.

Tabla 1. Valores de resistencias medidas sobre las superficies de las muestras. Las primeras cuatro muestras fueron realizadas en base de acrílico odontológico.

Material	Cara superior	Cara inferior
Sin óxido	500 $\Omega$	> T $\Omega$
Óxido de plomo (2)	24 k $\Omega$	15 M $\Omega$
Sulfato de Cerio (4)	25 k $\Omega$	550 k $\Omega$
Óxido de Zinc	5 M $\Omega$	> T $\Omega$
Epoxy	> T $\Omega$	> T $\Omega$

Se utilizó un equipo de ultrasonido tipo pulso eco marca Sonatest 380M para realizar las mediciones de atenuación acústica de los backings. Se realizó la técnica de transmisión, con dos palpadores en ambas caras planas. Los palpadores elegidos fueron dos UTX CX-280, de 0,375" de diámetro y 5 MHz de frecuencia.

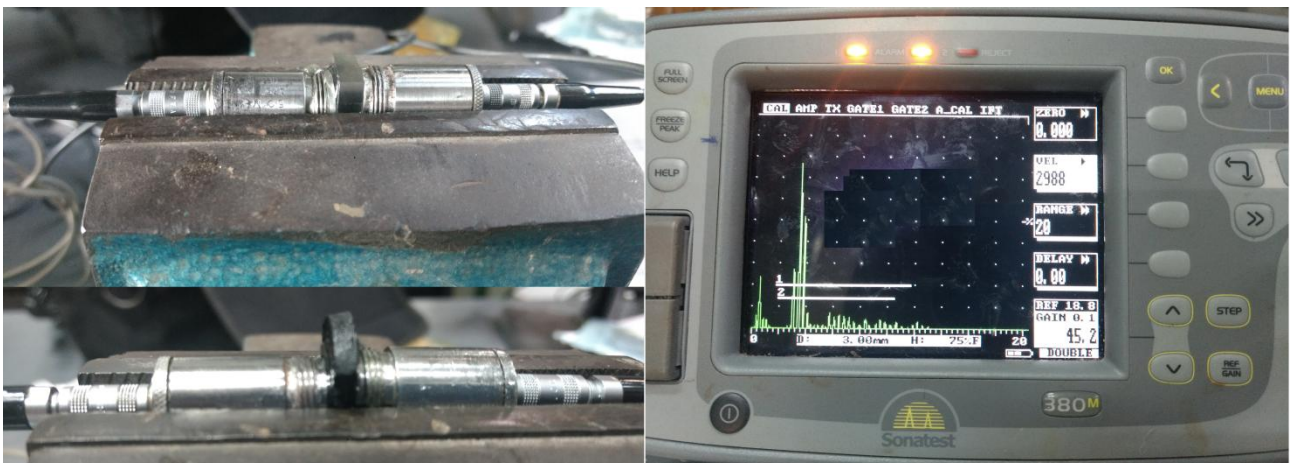


Figura 4. Fotografías de las mediciones de atenuación acústica utilizando la técnica de transmisión, de un bloque de acrílico de 5 mm (superior izquierda) y una muestra de 3 mm (base de acrílico, fotografía inferior izquierda). En la fotografía derecha se puede apreciar la pantalla de una medición realizada sobre la muestra de acrílico

La medición se hizo por comparación, entre un bloque de acrílico puro de 5mm de referencia y la muestra de epoxy de 4,7 mm, ya que no se pudo ver el segundo eco en la pantalla. Con una

atenuación de 0,81 db/mm para el bloque (medida en 10 mm), a una ganancia de 18,5 dB para el primer eco a un 80% de altura total de pantalla ATP, se obtiene una atenuación de 4,2 db/mm para la muestra de epoxy, con una ganancia de 32,8 dB también para un 80% de ATP. Con la muestra de acrílico se obtuvo una atenuación de 5,13 db/mm por la diferencia de ganancia requerida para llegar al 80% ATP entre el primer (48dB) y segundo eco (65,4dB). Se consideró una pérdida de divergencia en campo cercano de 2dB. La velocidad de esta muestra se calibró a un valor de 2988 m/s por lo que se obtuvo una impedancia acústica de 6 MRayls MKS.

Para la muestra de 15 mm en epoxy, se utilizó un palpador Krautkrämer B1S-0 de 1MHz y 1", en modo simple (pulso-eco). Se midió el primer eco a una ATP del 80% con una ganancia de 31,5dB y el segundo eco a una ganancia de 63dB. Suponiendo unos 6dB de pérdida por divergencia, se obtiene una atenuación de 0,77db/mm. Cabe aclarar que la pérdida por divergencia que se asume para el cálculo de la atenuación es el peor caso ya que la zona de campo lejano comienza en los 65 mm. La velocidad del sonido se calibró en 2200 m/s, por lo que se obtuvo una impedancia acústica de 6 MRayls MKS. Para un bloque de acrílico de las mismas dimensiones, se obtuvo una atenuación de 0,28 dB/mm, asumiendo también una caída de 6 dB de pérdidas por divergencia.

Las mediciones eléctricas de los piezoeléctricos no solamente muestran sus resonancias en el modo del espesor cercanas a las especificadas, sino también un gran acoplamiento del modo radial en los 100 kHz como así también sus armónicas, sobre todo en el piezoeléctrico nombrado SMD20T3R111. Las frecuencias de resonancia halladas fueron de 687 kHz y 2,35 MHz con unas impedancias de  $20\Omega$  y  $5\Omega$  respectivamente en esas frecuencias. Las mismas se midieron con un medidor de impedancia compleja Solartron SL1260 con una tensión alterna de 100 mV de valor cuadrático medio.

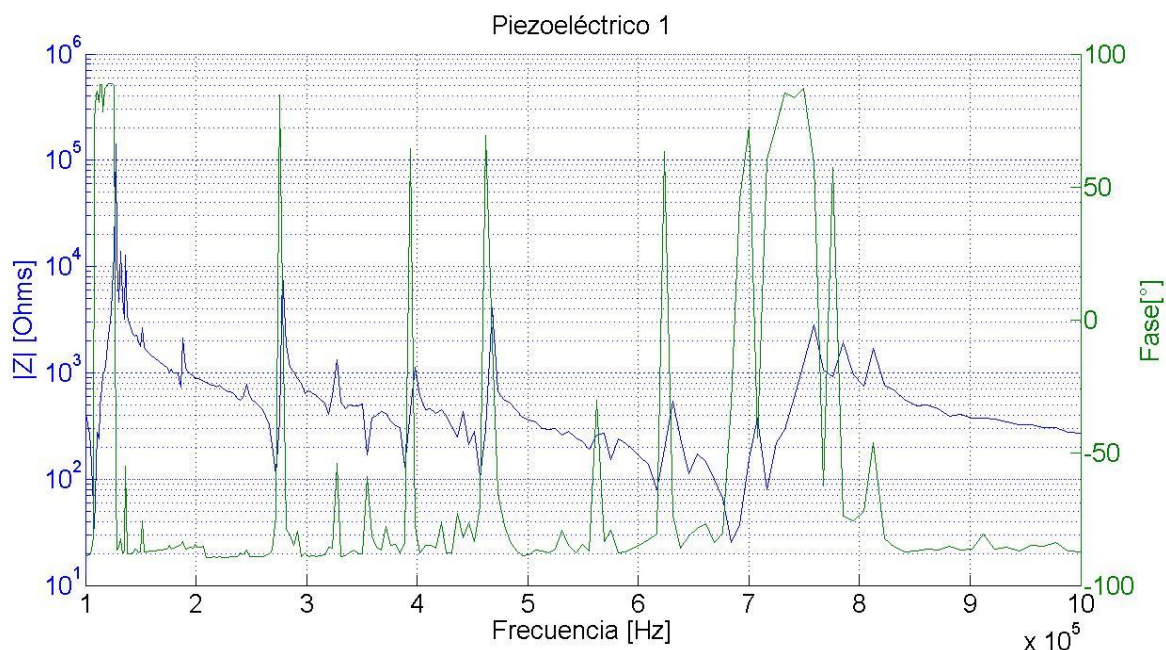


Figura 4. Medición del módulo de la impedancia eléctrica del primer piezoeléctrico y su fase.

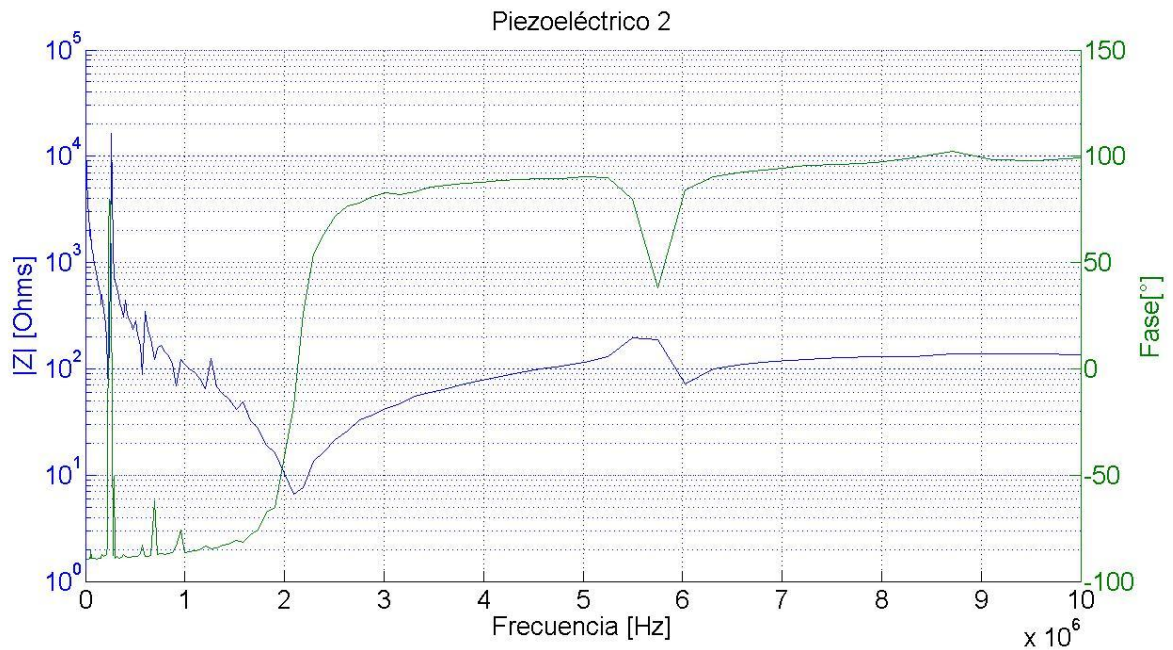


Figura 5. Medición del módulo de la impedancia eléctrica del segundo piezoeléctrico y su fase.

Una vez construidos los sensores, se procedió a realizar unas pruebas sobre diferentes piezas de acero. Además, se las comparó con el desempeño de un sensor Krautkrämer BIS-0 de 1MHz y un sensor Mitech F30 de 1MHz (diámetro de 25 mm). Para el sensor 1 y el comercial, se eligió de prueba un bulón de 55 cm de alto y 13 cm de diámetro de cabeza con una fisura en su parte inferior. En las figuras 8 y 9 se muestran la serie temporal y una transformada discreta de Fourier DFT con transformada rápida de Fourier FFT para la emisión y recepción de las señales de un pulso de emisión. Lo mismo se realizó con el sensor 2, pero sobre una barra de acero de 8 cm de alto. Estas mediciones se realizaron con un pulser receiver DPR 300 y un osciloscopio digital. La señal del pulser se configuró en 4 de 5 pasos disponibles y la ganancia de recepción en 30 dB con una resistencia de amortiguamiento serie de 24 Ohms salvo para el caso del sensor Mitech (ganancia del pulser en 1).



Figura 7. Mediciones preliminares en un bloque V1 del primer sensor.

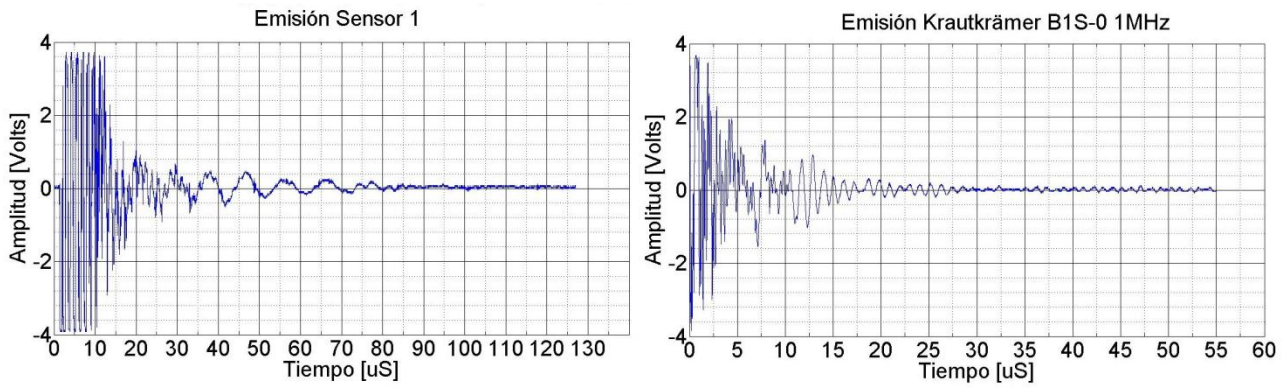


Figura 8. Emisión de un pulso ultrasónico sobre un bulón industrial con una fisura. Se muestra la serie temporal para el primer sensor y un sensor comercial Krautkrämer B1S-0 de 1 MHz. Al ser 4 Volts el máximo de recepción posible por el pulser/receiver, se puede ver la distorsión por saturación en el inicio de los pulsos de ambas figuras. Esta sensibilidad se mantuvo así para poder visualizar con detalle las señales reflejadas en la fisura (figura 9)

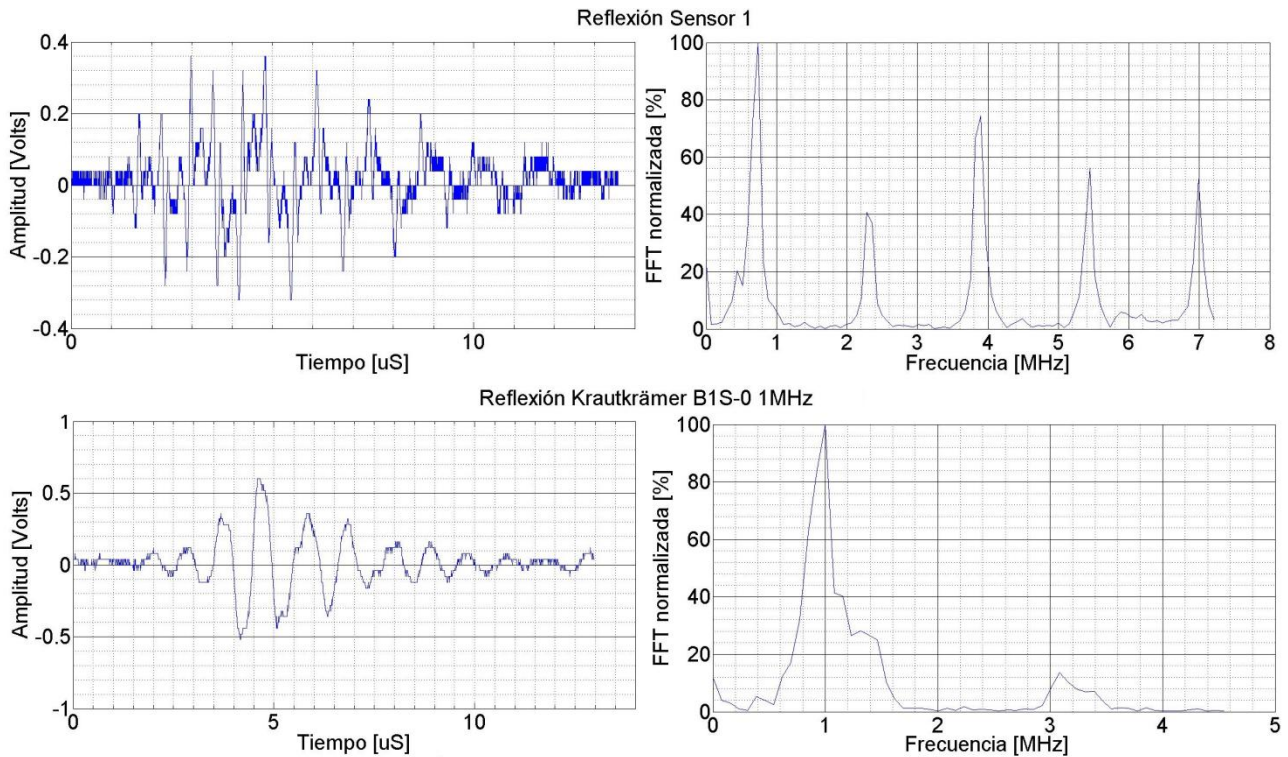


Figura 9. Recepción de las reflexiones de las señales emitidas en la figura 8. Se muestra la serie temporal como frecuencial para el primer sensor y un sensor comercial Krautkrämer B1S-0 de 1 MHz.

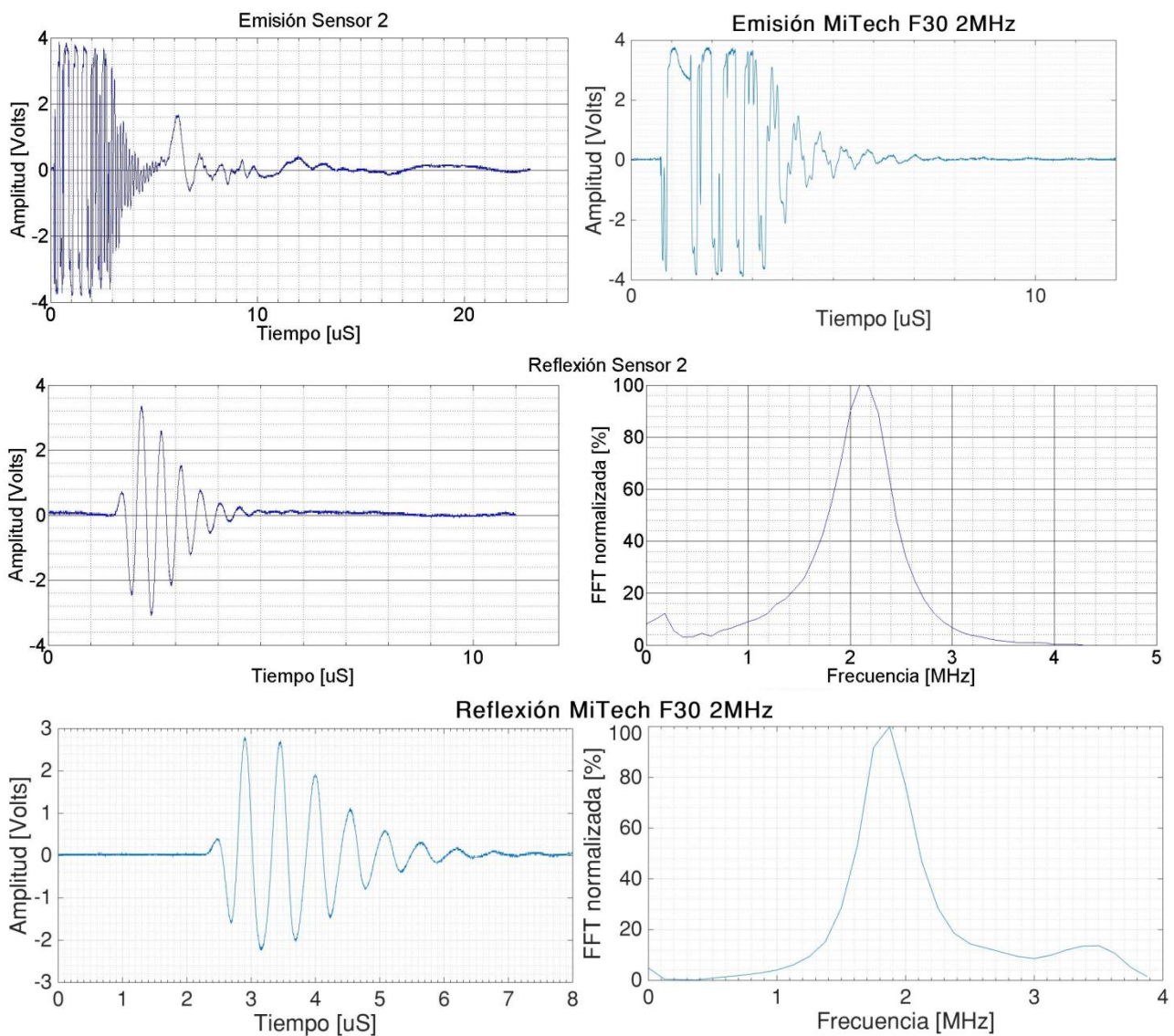


Figura 10. Emisión y recepción de un pulso sobre una barra de acero de 11cm de alto utilizando el sensor 2 y el sensor Mitech.

Cabe aclarar que la saturación mostrada en los pulsos iniciales, es propia de la limitación en la recepción de las señales y no por parte del amplificador emisor del pulso. En los pulsos iniciales, para todos los casos, se logra visualizar claramente con un 40% o más de la FFT normalizada, la influencia del modo radial. Esta aparece en el final de la serie temporal, antes de la extinción de los pulsos. Para el caso del sensor 1, se observa una gran sensibilidad de emisión (debido al gran número de pulsos saturados) y una pobre sensibilidad de recepción a comparación del comercial (unas diez veces), aun teniendo una frecuencia de resonancia más baja. Esto está probablemente relacionado con el material del piezoeléctrico. Para el caso del sensor, 2, se observa una gran sensibilidad de emisión y recepción de la señal, con una clara y prolija señal de recepción, al no tener más de un 15% de la FFT normalizada fuera de la banda de trabajo del sensor (cercana a los 2 MHz) o ver la sinusoidal amortiguada en la evolución temporal de la reflexión. Lo mismo sucede en el sensor Mitech.

## Conclusiones

Se alcanzaron buenos niveles de atenuación acústica, de 5,18 veces y de 6,33 veces la atenuación del acrílico de referencia para 5MHz y de 2,7 veces en 1 MHz, mientras que las impedancias encontradas fueron de valores medios. Se intentarán conseguir impedancias más altas subiendo la proporción de tungsteno en las mezclas.

También se midió la resistencia eléctrica de una de estas muestras en un medidor de cuatro puntas, registrándose valores en función del óxido utilizado. Los resultados indicaron una gran dispersión de valores según la orientación de la muestra respecto a las puntas en la cara plana evaluada, aunque los valores de resistencia eléctrica encontrados en la muestra con óxido de Zinc son aceptables para la realización de un backing con este material. Se deberán repetir los ensayos con una mayor cantidad de muestras.

El desempeño del palpador 1 a comparación del comercial, muestra una sensibilidad de 20 dB inferior en la recepción lo cual únicamente tiene explicación en la calidad y tipo de material piezoeléctrico. En el caso del palpador 2, se lograron resultados satisfactorios al encontrar una gran sensibilidad por la distancia que tuvo que recorrer el haz y la frecuencia de trabajo propia del palpador, siendo tres veces (9,5 dB) menos sensible que el sensor Mitech pero igual de sensible que el sensor Krautkramer. Esta diferencia de sensibilidad está relacionada con el diámetro de los piezoeléctricos. La gran cantidad de ciclos saturados logrados en ambos casos a comparación del comercial muestran una gran sensibilidad de emisión para los palpadores construidos.

## Trabajos a realizar

El paso siguiente será caracterizar eléctricamente a los sensores construidos (Impedancia real y compleja). Se deberá medir la impedancia acústica del piezoeléctrico elegido. También debe registrarse el ancho de banda del transductor (caída de -6dB respecto a la frecuencia de resonancia), la evolución de la amplitud de la señal acústica en función del tiempo, la relación señal a ruido, la resolución en acero y la longitud del pulso hasta -20dB respecto al máximo.

Luego buscar un mejor desempeño utilizando filtros pasivos sobre el sensor y construir una capa de acoplamiento de un cuarto de longitud de onda para proteger a los palpadores del desgaste.

## Agradecimientos

Agradezco al laboratorio de Optoelectrónica y Metrología Aplicada, al departamento de Mecánica y de Química de la UTN FR Delta y a Miriam Rocio Neyra Astudillo y Andrés Di Donato de la CNEA por las fotografías y mediciones realizadas para este trabajo.

## REFERENCIAS

- PEÑA MAESTRE, M.R. "Diseño, construcción y caracterización de un transductor ultrasónico focalizado". Tesis de grado. Universidad Politécnica superior de Gandia. 2014.
- MORALES LOPEZ, E. "MODELADO, CONSTRUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE TRANSDUCTORES DE ULTRASONIDO PARA ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS". Tesis de grado. Universidad Autónoma de Occidente. 2012.
- PEREZ DÍAZ, A. et al. "Ultrasonic transducers: From analytical modelling to design optimisation and validation" ERASMUS MUNDUS MASTER IN COMPLEX SYSTEMS SCIENCE. Junio de 2014.

- ABAS, A.A. et al. "EFFECT OF BACKING LAYER COMPOSITION ON ULTRASONIC PROBE BANDWIDTH". IAEA INIS journal. 2010.
- ALBALAT, A.M. et al. "RESULTADOS PRELIMINARES DE UNA CONSTRUCCIÓN DE SENSORES ULTRASÓNICOS". E-GLEA 10. 2019.
- LOW, G.C., JONES R.V. "Design and construction of short pulse ultrasonic probes for nondestructive testing". Ultrasonics. 1984.
- AMINI, M.H. "DESIGN AND MANUFACTURE OF AN ULTRASONIC TRANSDUCER FOR LONG-TERM HIGH TEMPERATURE OPERATION". Tesis doctoral. 2016.
- RUBIO C., MARRERO O." Fabricación de Transductores Ultrasónicos para Equipos Automatizados de inspección de líneas de Tuberías". NDT NET. 2010
- RAMADAS S.N., O'LEARY R.L., GACHAGAN A. "Ultrasonic Sensor Design for NDE Application: Design Challenges & Considerations". Proceedings of the National Seminar & Exhibition on Non-Destructive Evaluation. Diciembre de 2009.