

## Trabajo Fin de Grado

Caracterización experimental  
de la onda acústica producida por un piezoeléctrico  
en el seno de una masa líquida

Autor

Daniel Clavel Villagrasa

Director

Juan Antonio García Rodríguez

Co-director

José Luis Santolaya Sáenz

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2014

Agradecer en primer lugar a todos los profesores, investigadores y colaboradores del Departamento de Ciencia y Tecnología de Materiales y Fluidos con quienes he compartido todo este tiempo y de una forma u otra me han ayudado desinteresadamente en la realización de este proyecto.

También quiero agradecer a el director, J.A. García, responsable del proyecto que me animo a dar los primeros pasos en el mundo de la investigación y me ha ayudado a resolver todos los problemas que han ido surgiendo.

Finalmente mis agradecimientos a el co-director, J.L. Santolaya, por su grandísima dedicación y ayuda, sin la cual este proyecto no hubiera tenido sentido.



# Caracterización experimental de la onda acústica producida por un piezoeléctrico en el seno de una masa líquida

## RESUMEN

La utilización de ondas ultrasónicas para producir la atomización de líquidos es una alternativa a los métodos tradicionales de atomización, que resulta muy atractiva por las características de la distribución de tamaños que genera: monodispersas y con tamaño de gota controlado por la frecuencia de la onda. Podría ser aplicada en diversos procesos industriales como producción de energía, lubricación, procesos de secado, aplicación de pinturas y también en otros ámbitos, como en la atomización de medicamentos.

Los experimentos realizados hasta la fecha han tratado de determinar cuáles son los fenómenos físicos responsables del proceso de atomización ultrasónica, sin que todavía se conozcan con exactitud. Cavitación e inestabilidad en las ondas generadas en la superficie libre son las causas más estudiadas y que parecen intervenir de forma simultánea. Este trabajo pretende caracterizar la evolución de las perturbaciones ultrasónicas en el seno de una masa de líquido y tratar de aportar más conocimiento al origen de los procesos de atomización.

Para generar la onda ultrasónica en la masa líquida de agua se utilizan transductores piezoeléctricos con unas características definidas por el fabricante y en el estudio de las perturbaciones se emplea un hidrófono de alta sensibilidad. Se han establecido diferentes condiciones de ensayo. En particular, se han manejado diferentes voltajes de alimentación del piezoeléctrico, diferentes alturas de lámina de agua y dos configuraciones geométricas que han consistido, en un caso, en un transductor situado en la base del recipiente y en otro caso, en dos transductores enfrentados a 45°.

Para el desarrollo de los experimentos se ha construido una instalación apropiada y se han definido y determinado los parámetros que permiten la caracterización de la perturbación. En el trabajo se describe el montaje experimental y los equipos empleados durante la realización de las medidas. También los procedimientos seguidos, los problemas que han surgido y cómo se han resuelto.

En los resultados obtenidos se ha observado que la intensidad de la perturbación es muy sensible a las variaciones del voltaje de alimentación del piezoeléctrico y muy poco sensible a la altura de la lámina líquida para medidas realizadas a una misma distancia del piezoeléctrico. La utilización de dos piezoeléctricos permite incrementar localmente la intensidad de la perturbación y detectar diferencias en las frecuencias de vibración.

## ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN .....	4
1.1.	Atomización ultrasónica .....	4
1.2.	Cavitación bajo la superficie libre .....	5
1.3.	Inestabilidad de la superficie libre .....	5
1.4.	Cavitación e inestabilidad de las ondas de superficie.....	7
2.	EQUIPO EXPERIMENTAL.....	11
2.1.	Transductor ultrasónico .....	11
2.2.	Hidrófono .....	12
2.3.	Recipientes de ensayo.....	13
2.4.	Dispositivos de guiado.....	15
2.5.	Osciloscopios .....	15
2.6.	Fuente de alimentación. ....	16
2.7.	Estructura de la instalación.....	17
3.	DESCRIPCIÓN DE LOS EXPERIMENTOS .....	18
3.1.	Experimentos con 1 piezoeléctrico .....	18
3.1.1	Medidas con una altura fija de lámina fluida.....	18
3.1.2	Medidas a distancias próximas al piezoeléctrico. ....	20
3.1.3	Medidas con diferente altura de lámina fluida.....	21
3.1.4	Medidas a 0.5 mm del piezoeléctrico. ....	22
3.2.	Experimentos con 2 piezoeléctrico .....	23
4.	RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	26
4.1.	Resultados obtenidos de los experimentos con 1 piezoeléctrico.....	26
4.1.1	Resultados obtenidos con una altura fija de lámina fluida.....	26
4.1.2	Resultados obtenidos de medidas a distancias próximas al piezoeléctrico. ....	30
4.1.3	Resultados obtenidos de medidas con diferente altura de lámina fluida. ....	32
4.1.4	Resultados de medidas a 0.5 mm del disco. ....	36
4.2.	Resultados obtenidos de los experimentos con 1 piezoeléctrico .....	37
5.	CONCLUSIONES .....	40
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	42
	ANEXOS.....	43

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Representación simbólica de la inestabilidad de las ondas de superficie (Drews, 1979) .....	6
Figura 2.1. Circuito oscilador.....	11
Figura 2.2. Disco piezoeléctrico.....	12
Figura 2.3. Hidrófono y preamplificador.....	13
Figura. 2.4. Recipientes de metacrilato.....	14
Figura. 2.5. Marcas radiales sobre el recipiente de base plana.....	14
Figura 2.6. Componentes del dispositivo de guiado. ....	15
Figura 2.7. Osciloscopios utilizados durante los ensayos. ....	16
Figura 2.8. Fuente de alimentación e interruptores. ....	16
Figura 2.9. Montaje experimental final.....	17
Figura 3.1. Localizaciones de medida con una altura fija de lámina fluida.....	19
Figura 3.2. Localizaciones de medida a distancias próximas al piezoeléctrico. ....	20
Figura 3.3. Barridos realizados en cada altura de lámina fluida. ....	21
Figura 3.4. Localizaciones de medida a 0.5 mm del piezoeléctrico. ....	23
Figura 3.5. Localizaciones de medida en experimentos con dos piezoeléctricos. ....	24
Figura 4.1. Intensidad de la perturbación a diferentes profundidades. Voltaje de alimentación: 5 V.....	27
Figura 4.2. Intensidad de la perturbación a diferentes profundidades. Voltaje de alimentación: 10 V. ....	27
Figura 4.3. Intensidad de la perturbación a diferentes profundidades. Voltaje de alimentación: 15 V. ....	27
Figura 4.4. Cono formado a 5, 10, 15, 20 V respectivamente.....	28
Figura 4.5. Intensidad de la perturbación a diferentes voltajes. Profundidades: 5, 10, 15, 20, 25 y 30 mm.....	29
Figura 4.6. Intensidad de la perturbación en diferentes posiciones horizontales y en función de la profundidad.....	30
Figura 4.7. Intensidad de la perturbación a diferentes alturas próximas al piezoeléctrico.....	31
Figura 4.8. Intensidad de la perturbación a diferentes voltajes. Alturas: 0.5, 1.8, 3.8, 5.8mm..	31
Figura 4.9. Perturbaciones a 5 mm de profundidad con diferentes alturas de lámina fluida. ...	32
Figura 4.10. Perturbaciones a 25 mm de profundidad con diferentes alturas de lámina fluida.	32
Figura 4.11. Perturbaciones a una misma altura respecto del piezoeléctrico (20, 30, 40, 50), variando el nivel de lámina de agua.....	33

Figura 4.12. Perturbación a 25 mm de profundidad respecto de la lámina fluida (35 mm) y la imagen física del cono que se forma en la superficie. ....	34
Figura 4.13. Perturbación a 25 mm de profundidad respecto de la lámina fluida (45 mm) y la imagen física del cono que se forma en la superficie. ....	34
Figura 4.14. Perturbación a 25 mm de profundidad respecto de la lámina fluida (55 mm) y la imagen física del cono que se forma en la superficie. ....	34
Figura 4.15. Perturbación a 25 mm de profundidad respecto de la lámina fluida (65 mm) y la imagen física del cono que se forma en la superficie. ....	35
Figura 4.16. Perturbación a 25 mm de profundidad respecto de la lámina fluida (75 mm) y la imagen física del cono que se forma en la superficie. ....	35
Figura 4.17. Perturbación a 25 mm de profundidad respecto de la lámina fluida (100 mm) y la imagen física del cono que se forma en la superficie. ....	35
Figura 4.18. Perturbaciones a 0,5mm del piezoeléctrico con diferentes ángulos de barrido. ....	36
Figura 4.19 Sinusoides de las perturbaciones en posición -4 mm y 7.5 V de alimentación. ....	37
Figura 4.20 Sinusoides de las perturbaciones en posición -6 mm y 7.5 V de alimentación. ....	38
Figura 4.21. Interferencia de los conos. ....	39

## **1. INTRODUCCIÓN**

La atomización de un líquido es el proceso por el cual se disgrega formando ligamentos y gotas de un menor tamaño que las pertenecientes a la masa inicial. Esa disminución de tamaño se produce cuando las fuerzas de rotura (fuerzas centrífugas, aerodinámicas, de presión, etc.) son mayores que las fuerzas cohesivas del líquido (fuerzas intermoleculares y de tensión superficial).

Existen fenómenos en la naturaleza donde se produce la atomización de manera arbitraria (por la propia energía del fluido) como la formación de gotas en las cascadas. Sin embargo, la manera más habitual de producir este efecto es mediante un dispositivo denominado atomizador, que aplica una energía externa sobre la masa de líquido.

Múltiples factores y parámetros intervienen en el resultado de la atomización, entre las que cabe destacar las características propias del tipo y diseño de atomizador, las propiedades físicas del líquido atomizado y las de la fase continua que se utiliza como fluido auxiliar o que son propias del ambiente de inyección. Es por tanto, un proceso complejo debido a los numerosos mecanismos físicos que intervienen y la cantidad de parámetros necesarios para su caracterización.

Actualmente, los procesos de atomización tienen un papel destacado en la industria actual, principalmente en producción de energía, lubricación, aplicación de pinturas, agricultura, industria alimenticia o tratamiento de aguas. También en el campo de la medicina, donde se utiliza la nebulización de medicamentos para el tratamiento de enfermedades.

### **1.1. Atomización ultrasónica**

La atomización ultrasónica es una técnica que permite la atomización de fluidos mediante ultrasonidos. Para la producción de los mismos se emplea un disco piezoeléctrico que produce una deformación mecánica variable cuando se excita con una señal eléctrica variable. Este fenómeno produce gotas microscópicas, llegando a obtener tamaños de gota menores de 5  $\mu\text{m}$  a frecuencias del orden de mega hertzios.

Los cristales naturales tales como el cuarzo, presentan el efecto piezoeléctrico, mientras que las piezocerámicas, como el PZT, están basadas en el efecto ferroeléctrico. Dicho efecto se explica de la siguiente manera: en su estado natural, la estructura cristalina es eléctricamente neutra. Sin embargo, la deformación mecánica produce un desplazamiento del centro de cargas positivas con respecto al centro de cargas negativas, lo que da lugar a la aparición de un campo eléctrico. Y a la inversa, la aplicación de un campo eléctrico desplaza las cargas de un signo con respecto a las cargas del otro signo, originando una deformación mecánica (Yang, 2006).

La posibilidad de atomizar líquidos excitándolos con ondas ultrasónicas perpendiculares a la superficie libre fue descubierta por Wood y Loomis en 1927. Sin embargo el mecanismo de atomización no está claro todavía. Se manejan una serie de teorías que se describen en los siguientes apartados.

### **1.2. Cavitación bajo la superficie libre**

El fenómeno de cavitación ocurre cuando la presión hidrodinámica en un líquido es reducida por debajo de la presión de vapor en un sistema termodinámico a temperatura constante. Donde quiera que se presente este caso, en el seno del líquido pueden generarse burbujas y transformarse así en un sistema bifásico, conteniendo una fase fluida y una fase gaseosa.

A partir de 1935, Söllner y sus colaboradores realizaron diversos experimentos donde demostraron, primero como una onda ultrasónica puede dar lugar a la cavitación, y luego justificaron que la cavitación es a su vez la causa de la atomización ultrasónica.

Söllner concluyó que la formación de la neblina de gotas es fruto de la previa formación de cavidades, y el brusco colapso de estas en gotas debido al incremento de la presión o a la disminución de la temperatura en el seno del líquido.

Además, Söllner justificó la cavitación como causa de la atomización ultrasónica, argumentando que las ondas ultrasónicas consisten en compresiones y expansiones periódicas, y que por tanto, es legítimo suponer que cuando la energía de excitación es suficientemente alta, las cavidades pueden formarse en el líquido durante la fase de expansión e implosionar durante la fase de compresión.

Está aceptado por todos los investigadores, que la implosión ocurre de la siguiente manera: las burbujas están sometidas a diversas fuerzas: por una parte, la presión en el interior de las burbujas tiende a dilatarlas en oposición a la presión en el exterior que, por otro parte, tiende a comprimirlas. Las burbujas mantendrán una dimensión constante siempre y cuando haya equilibrio entre las distintas fuerzas que actúan sobre ellas. Como las burbujas están sometidas constantemente a fuertes depresiones y sobrepresiones debido a las vibraciones ultrasónicas, el equilibrio es imposible de mantener, las burbujas aumentan exageradamente su tamaño y se rompen: se dice entonces que las burbujas implosionan.

### **1.3. Inestabilidad de la superficie libre**

A pesar del importante trabajo realizado por Söllner postulando la cavitación como causa de la atomización ultrasónica, otros trabajos afirman que el mecanismo físico de este proceso es la inestabilidad hidrodinámica de las ondas capilares formadas en la superficie del líquido. En la Figura 1.1 puede verse una representación esquemática de este proceso.

Las ondas estacionarias producidas en la superficie de un fluido debido a un movimiento oscilatorio en dirección perpendicular a la superficie libre empezaron a ser estudiadas por Faraday en 1831. En 1871, Kelvin obtuvo la siguiente expresión para la longitud de onda,  $\lambda$ , de dichas ondas estacionarias:

$$\lambda = \sqrt[3]{\frac{2\pi\sigma}{\rho f^2}}$$

Donde  $\sigma$  y  $\rho$  son, respectivamente, la tensión superficial y la densidad del fluido.

En 1883, Rayleigh modificó la anterior expresión para expresarla en función de la frecuencia de forzado,  $F$ :

$$\lambda = \sqrt[3]{\frac{8\pi\sigma}{\rho F^2}}$$

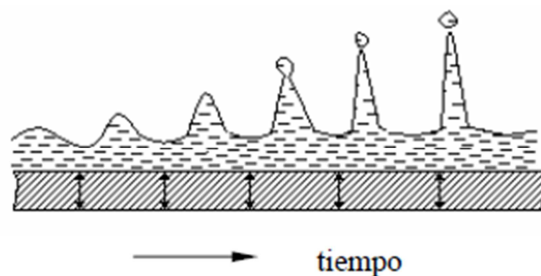


Figura 1.1. Representación simbólica de la inestabilidad de las ondas de superficie (Drews, 1979)

Los autores de esta teoría son muchos, entre otros, se puede nombrar a Sorokin (1957), Eisenmenger (1959), Lang (1962), Peskin y Raco (1963), Sindayihebura (1995), etc. Según ellos, cuando la amplitud de la fuerza de excitación aplicada a la masa líquida va aumentando, llega un momento en que empiezan a aparecer ondas de amplitud creciente sobre la superficie libre. La fase final de crecimiento de estas ondas conduce a la desintegración de la superficie libre y por consiguiente a la formación y emisión de gotas a partir de sus crestas.

Los autores anteriores realizaron diversas hipótesis, las cuales fueron confirmadas por Lang (1962) quien realizó un trabajo más integral con objeto de determinar el papel que juegan las ondas capilares en el proceso de atomización ultrasónica y encontrar si existe una relación entre la longitud de onda capilar a una frecuencia dada y el tamaño de partículas generadas. Para cumplir los objetivos previstos, Lang montó un dispositivo experimental con el cual midió el tamaño de las alteraciones causadas por el ultrasonido sobre la superficie líquida, y lo comparó con el tamaño de las gotas. Empleó muchas técnicas experimentales diferentes para activar la superficie líquida; pero en todo caso, fue necesario concentrar la energía ultrasónica a partir de la transducción piezoeléctrica. De este estudio, Lang sacó las siguientes conclusiones:

- Con frecuencia de excitación entre 10 y 800 KHz, hay presencia de patrones de ondas capilares transversales en la superficie libre del líquido cuando ocurre la atomización.

- El diámetro medio de las partículas generadas es proporcional a la longitud de onda capilar calculada por la ecuación de Rayleigh utilizando la frecuencia de excitación y las propiedades del líquido atomizado
- El mecanismo de atomización implica la rotura de las ondas capilares superficiales y la posterior eyección de las partículas desde las crestas de las ondas superficiales.

Estas conclusiones son, sin duda, el origen de la fórmula de predicción del diámetro medio de las gotas ( $D$ ), determinada por Lang, y ampliamente utilizada:

$$D = 0,34 \lambda_s$$

donde  $\lambda_s$  es la longitud de onda de las ondas de superficie.

Otros importantes resultados experimentales sobre la atomización ultrasónica basada en la teoría de las ondas de superficie fueron reportados por Stamm (1964). Reporto que la correlación entre sus resultados experimentales y aquellos predichos por la teoría de las ondas de superficie, era satisfactoria, y que la distribución del tamaño de gotas es una gaussiana logarítmica con un diámetro medio  $D_h$ :

$$D_h = \frac{\lambda_s}{4}$$

A partir de estos experimentos, Stamm explicó que la atomización ultrasónica está originada por la rotura periódica de las crestas de una red de ondas estacionarias de superficie. Concluyó que estas ondas superficiales expulsan gotas en la interfase líquido/vapor cuando la amplitud del modo fundamental de vibración excede un valor crítico. La amplitud crítica depende de la frecuencia de vibración y de los parámetros característicos de la sustancia atomizada. Afirmó que la generación de las gotas de la red de ondas, se basa en leyes estadísticas y que esta rotura empieza normalmente a amplitudes 3 a 6 veces superiores a la amplitud inicial de vibración de las ondas superficiales. Como se puede ver, para Stamm (1964), el coeficiente  $K_0$  que precede a  $\lambda_s$  vale 0,25, diferente del valor 0,34 encontrado por Lang (1962), lo que pone de manifiesto la incertidumbre en el valor de  $K_0$  y, por consiguiente, las dudas que pueden existir acerca de la exactitud de la ecuación:

$$D = 0,34 \lambda_s$$

#### 1.4. Cavitación e inestabilidad de las ondas de superficie

En la década de los 60 un grupo de investigadores encabezado por Eknadiousyants, retomó la hipótesis de Söllner (1936) con importantes aportes sobre la teoría de la cavitación ultrasónica. Previo a sus estudios, Esche (1955) avanzó otra hipótesis sobre el mecanismo de formación de las gotas, según la cual, las gotas son expulsadas de las crestas de las ondas estacionarias de superficie, pero precisamente en esta superficie ocurre un violento fenómeno de “reventones” periódicos, origen de muchas salpicaduras de líquidos.



Estos hechos motivaron a Rozenberg y Eknadosyants (1960) a estudiar con más detalles la cinética del proceso de atomización ultrasónica. Observaron la emergencia de un cono cuyo pico tiene una zona desde donde se desprenden tanto gotas gordas (0,95 mm de diámetro aproximadamente) como gotas muy finas. Las fotos registradas muestran que el proceso de formación de gotas no es continuo. Las observaciones revelan que las gotas finas se generan a partir de “reventones” de corta duración (400  $\mu$ s) de burbujas o de pedazos de líquidos de mayor dimensión (gotas gordas) que las gotitas

Rozenberg y Eknadosyants (1960) reconocieron que la teoría de ondas de superficie sirve para explicar la uniforme y estrecha distribución de las gotas generadas ultrasónicamente y la dependencia de sus tamaños de la frecuencia de excitación. Sin embargo, a partir del estudio de la cinética de formación de las gotas y de lo observado, no tenían bases suficientes para tomar posición a favor o en contra de una u otra hipótesis para explicar el mecanismo de atomización ultrasónica.

Gershenzon y Eknadosyants (1964) teniendo en cuenta que el mecanismo de las ondas predomina en el proceso de la atomización, pero que la formación de gotas puede deberse también a la influencia de otros factores tales como el efecto del golpe de ariete provocado por el colapso de las burbujas de cavitación, llevaron a cabo muchas investigaciones sobre los procesos que tienen lugar en la superficie del líquido en el momento previo al comienzo de la formación de las gotas. Estos autores investigaron el proceso de atomización (2MHz) de dieciséis líquidos que presentaban diferentes propiedades físico-químicas.

Observaron fenómenos de erosión, relacionados con la cavitación; y encontraron que el grado de manifestación de la cavitación depende mucho de las propiedades físico-químicas. Midió la cantidad de líquido transformado en aerosol y descubrieron que depende también de las propiedades físico-químicas (presión de vapor, viscosidad, tensión superficial, densidad, etc.) de cada una de las sustancias utilizadas. Estas dependencias proporcionan una evidencia firme a favor del mecanismo de cavitación - más que del mecanismo de onda capilar –como causa fundamental de la atomización ultrasónica.

También con el objetivo de demostrar las causas de la atomización ultrasónica Fogler y Timmerhaus (1965) hicieron un estudio minucioso abarcando un amplio rango de frecuencias ultrasónicas, utilizando fotomicrografía. Concluyeron sus trabajos con la hipótesis de que a bajas potencias ultrasónicas, el mecanismo de las ondas superficiales actúa como único responsable del fenómeno; mientras que, a altas potencias, la cavitación está involucrada en la generación de la neblina observada.

Pohlman y Lierke (1965) propusieron una nueva hipótesis respecto al mecanismo de atomización ultrasónica, la cual es, ni más ni menos que una mutua relación entre las hipótesis de cavitación y de onda capilar, y sobre todo, una contribución activa de la cavitación al proceso de atomización ultrasónica de grandes volúmenes líquidos. Para ellos, las gotas se forman a partir de las crestas de las ondas capilares de amplitud finita en la superficie del líquido atomizado, ayudado por la resonancia de las burbujas de cavitación.

Eknadosyants (1968) desarrolló la teoría de la cavitación ultrasónica postulando que los choques hidráulicos asociados a la cavitación, son las causas de la atomización ultrasónica.

Observó en sus experimentos, fenómenos de sonoluminiscencia, una prueba que evidencia la presencia de la cavitación. La sonoluminiscencia es la emisión de luz por ciertas sustancias que no se hallan en estado de incandescencia (disoluciones salinas, por ejemplo) cuando son excitadas por vibraciones sonoras o ultrasónicas.

Eknadiosyants investigó también la distribución del flujo de energía acústica en un transductor ultrasónico por métodos radiométricos. Estos estudios, junto a otros anteriormente realizados, revelaron que la cavitación ultrasónica ocurre en zonas exclusivas del chorro donde la presión estática es baja; y que precisamente en estas zonas es donde hay formación de neblina de gotas. Estos últimos experimentos unidos a otros anteriormente realizados por Eknadiosyants y sus colaboradores, les llevaron una vez más a la conclusión de que la cavitación tiene un papel activo en el proceso de atomización ultrasónica.

En vista de todos los resultados experimentales discutidos anteriormente, la única conclusión válida parece ser que la formación del aerosol en la atomización ultrasónica de volúmenes líquidos tiene su origen en la separación de las gotas de las crestas de las ondas capilares de amplitud finita en la superficie del líquido. Así pues la teoría de cavitación concuerda con la de la onda capilar. El punto esencial en esta hipótesis es la demostración de que la cavitación es la causa de las ondas capilares que se observan en la superficie libre del líquido excitado ultrasónicamente. De esta manera, Boguslavskii y Eknadiosyants (1969) unieron las teorías de cavitación y de onda capilar, al sugerir que los choques provenientes de los procesos de cavitación y las ondas capilares de amplitud finita, actúan recíprocamente, razón por la cual generan gotas de la misma forma.

Topp y Eisenklam (1972) recapitularon el panorama de este proceso hasta entonces e hicieron muchos experimentos. Debido a la distinción notable que existe en la construcción y en la tecnología de los atomizadores ultrasónicos, los clasificaron en dos grupos tomando como referencia la frecuencia de 125 kHz: los de alta frecuencia (aquellos cuya frecuencia de trabajo es superior a 125 kHz) y los de baja frecuencia (que funcionan por debajo de los 125 kHz). Para ellos, la teoría de la capilaridad basada sobre la inestabilidad de Taylor en la interfase líquido-gas expuesta a una fuerza perpendicular explica muy bien la física de la atomización ultrasónica a baja frecuencia, mientras que el fenómeno en juego en la atomización a alta frecuencia está acorde a la teoría de cavitación.

A pesar de estas conclusiones, Topp (1973) continuó trabajando y Observó y presentó evidencias fotográficas que justifican que, tanto las ondas superficiales como la cavitación, juegan ambos papeles importantes en el proceso de atomización ultrasónica.

Bassett y Bright (1976) aportaron otras evidencias que confirman una vez más la hipótesis defendida por Boguslavskii y Eknadiosyants (1969) y Topp (1973). Según estos investigadores, las gotas se generan cuando las ondas capilares se vuelven inestables por la cavitación en el líquido. Observaron la producción de pequeñas gotas en una sección del líquido donde hay “trenes de burbujas”. Las gotas (9  $\mu\text{m}$  de diámetro medio) se generan cuando desaparecen algunas de estas burbujas. La aparición de los “trenes de burbujas” en el líquido está asociada con la cavitación.

Gran parte de los estudios realizados sobre la atomización ultrasónica en las décadas de los años 1980 y 1990 se basan en la teoría de las ondas de superficie. La inestabilidad de la superficie libre, que conduce a la atomización ultrasónica de las láminas líquidas de pequeño espesor, es un fenómeno que está todavía por entenderse bien. Sindayieburu (1995), el cuál contribuyó a una mejor comprensión del mecanismo físico de desintegración de láminas líquidas de pequeño espesor y de extensión finita, sometidas a vibraciones transversales de frecuencia moderada. En su estudio, puso un acento particular en la inestabilidad de las ondas de superficie mediante un análisis de estabilidad lineal bidimensional de las ecuaciones de Navier-Stokes, antes de la emisión de las gotas.

En otros estudios, Al-Suleimani et al. (1999) realizaron experimentos de visualización sobre la atomización ultrasónica a baja frecuencia de vibración de una lámina líquida de agua y de aquí modelaron con un código de CFD el caso de una lámina líquida sometida a altas frecuencias. Después de analizar los resultados obtenidos, afirmaron que puede ser incorrecta la teoría según la cual las gotas se forman periódicamente a partir de las crestas de ondas capilares estacionarias ordenadas. Reconocieron que las ondas estacionarias están todas y bien ordenadas antes del inicio de formación de las gotas; pero justo después desaparece este orden durante el proceso de atomización. Atribuyeron esta desorganización de las ondas a la aparición de fenómenos secundarios de inestabilidad.

## 2. EQUIPO EXPERIMENTAL

En este capítulo se describe la instalación y los dispositivos necesarios para el desarrollo del proyecto así como los principios básicos en los que se basa el funcionamiento de estos equipos. El montaje experimental ha sido realizado en instalaciones del Laboratorio de Investigación de mecánica de fluidos de la EINA.

### 2.1. Transductor ultrasónico

Este dispositivo transforma una señal eléctrica de excitación en una deformación mecánica. Se compone de un circuito oscilador y de un disco cerámico con propiedades piezoeléctricas.

#### Circuito oscilador

Un oscilador electrónico es un circuito capaz de generar una señal de salida periódica. Esta señal periódica es la encargada de alimentar al piezoeléctrico. El principal problema de este tipo de circuitos reside en conseguir oscilaciones de gran amplitud y alta frecuencia sin un aumento considerable del contenido armónico de la onda.

El circuito es alimentado con corriente alterna rectificada a través de un puente rectificador de doble onda formado por cuatro diodos. La alimentación se filtra posteriormente mediante un condensador. El puente rectificador permite también el uso directamente de tensión continua.

La tensión nominal del circuito es de 48 voltios eficaces (68 voltios de tensión de pico). Por simplicidad de control durante el proyecto se ha utilizado una fuente de tensión continua regulable.

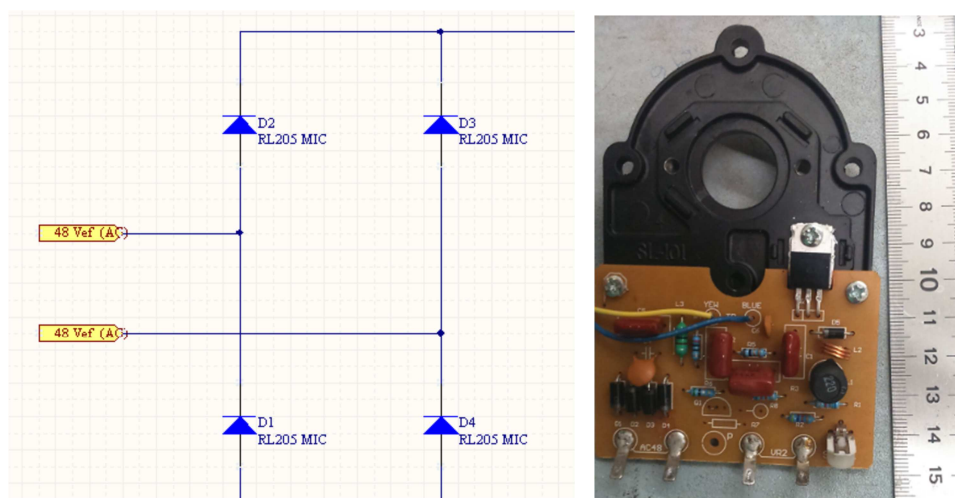


Figura 2.1. Circuito oscilador

### Disco piezoeléctrico

Este elemento transforma la energía eléctrica de la onda del oscilador en una deformación mecánica de alta frecuencia.

Para que se pueda producir el efecto piezoeléctrico es necesario orientar todas las partículas en una dirección determinada, de forma que al someter el material a un campo eléctrico, la atracción o repulsión se produce en una única dirección y permite una deformación uniforme y de mayor magnitud. Este tipo de cerámicas posee una estructura cristalina característica denominada perovskita, en principio completamente desordenada, pero que si se calienta por encima de la temperatura de Curie y se le aplica un campo eléctrico de gran intensidad, la estructura cristalina se alinea en una misma dirección, apareciendo momento dipolar. Si después se enfría lentamente, muchos de los cristales conservan la alineación. Éste es tanto más intenso cuanto mayor sea el número de cristales alineados.

Las cerámicas metálicas son materiales muy apropiados para obtener este efecto, de manera que al someterlas a un campo eléctrico, la atracción/repulsión que se produce entre sus partículas genera una deformación global uniforme y de elevada magnitud. Además, son materiales de gran dureza, soportan las vibraciones de alta frecuencia y al ser artificiales se pueden generar en diversos tamaños y geometrías.

En este trabajo se han utilizado discos de PZT (circonato-titanato de plomo) de 18 mm de diámetro y 1,2 mm de espesor. Los electrodos están colocados uno en cada cara del disco, de forma que el campo eléctrico sigue la dirección del momento dipolar y provoca esfuerzos de tracción-compresión perpendiculares a las caras del disco (Anexo I).

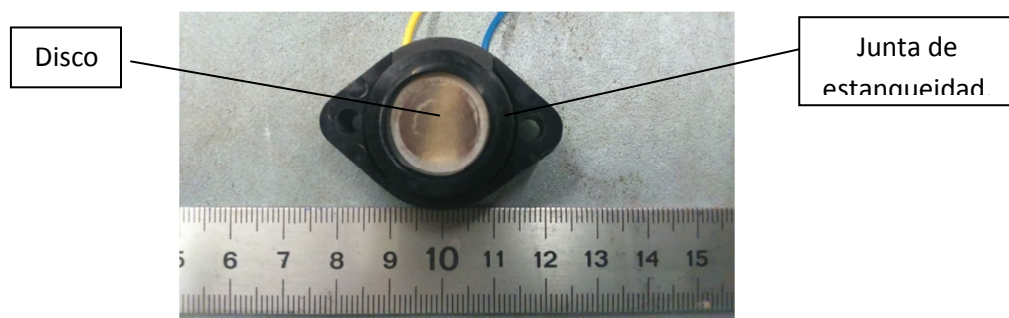


Figura 2.2. Disco piezoeléctrico.

## **2.2. Hidrófono**

El hidrófono permite captar las variaciones de presión en un fluido y será usado en este trabajo para detectar las perturbaciones generadas por el disco piezoeléctrico en el agua. El hidrófono emite una señal eléctrica que necesita un preamplificador, conectado entre el sensor que recibe la señal y el osciloscopio, para aumentar el nivel de la señal.

En este caso, se emplea un hidrófono con un rango de detección de frecuencias de 0.25 a 10 MHz y con una sensibilidad de 250 nV/pa. Las características de este dispositivo se pueden consultar en el Anexo I.

Como se muestra en la Figura 2.3, el sensor que detecta las variaciones de presión se encuentra en el extremo de una varilla de acero inoxidable.



Figura 2.3. Hidrófono y preamplificador.

Para el correcto posicionamiento del hidrófono en el punto de medida se emplean unos dispositivos de guiado milimétrico a los que se acopla una lámina de aluminio que proporciona soporte y hace que quede totalmente perpendicular a la superficie libre.

### 2.3. Recipientes de ensayo

Tienen la misión de contener el fluido que se va a someter al proceso de atomización y posicionar en su parte inferior los dispositivos piezoeléctricos.

Los recipientes son de metacrilato, sus paredes laterales forman un prisma cuadrangular y su parte superior está abierta a la atmosfera. Se han utilizado dos geometrías diferentes cuyos planos se adjuntan en el anexo I:

- Con una base plana y un disco piezoeléctrico centrado sobre la base.
- Con dos planos inclinados a  $45^\circ$  situados en la base y con un disco piezoeléctrico centrado en cada uno de estos planos. Los discos se encuentran enfrentados para favorecer la interferencia de las ondas que estos generan.

En los recipientes de ensayo se ha mecanizado un agujero pasante con un diámetro un poco mayor que los diámetros de los discos, ya que estos poseen una junta de estanqueidad (Figura 2.2) que asegura el sellado de las cubetas. Para poder realizar medidas sobre diferentes planos

se han realizado unas marcas en las bases de los recipientes de ensayo (Figura 2.4, dos líneas perpendiculares entre sí que pasan por el centro y son paralelas a las aristas de las bases).

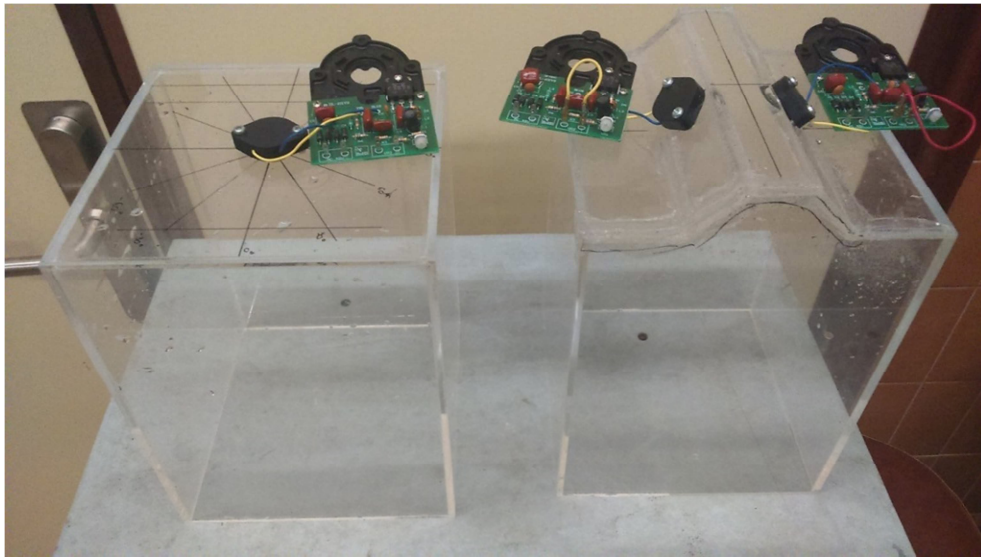


Figura. 2.4. Recipientes de metacrilato.

Adicionalmente, en la cubeta de base plana, se han realizado marcas radiales cada  $30^\circ$  para realizar barridos de medidas en diferentes ángulos.

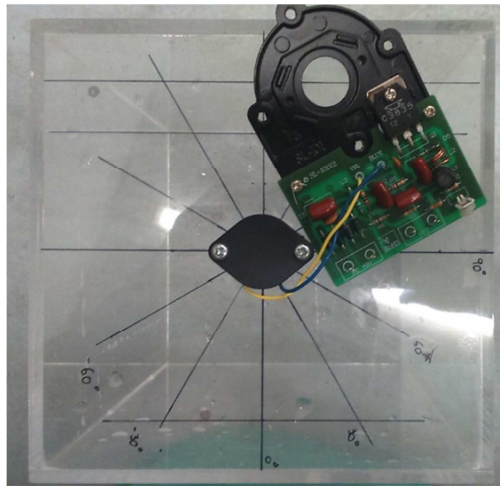


Figura. 2.5. Marcas radiales sobre el recipiente de base plana.

## 2.4. Dispositivos de guiado

Estos dispositivos permiten desplazamientos en una dirección con una precisión de decima de milímetro a través de un sistema piñón-cremallera. Se han utilizado dos de estos mecanismos para poder cubrir un plano de medida.

Cada uno de ellos consta de dos componentes metálicos con una elevada rigidez: uno es alargado y sobre él está colocada la cremallera. Normalmente, éste es el elemento que se fija, para que el sistema se desplace sobre él. El otro tiene forma cuadrada y contiene el piñón en una de sus caras. Este piñón es solidario a un eje que acaba en una rosca manual, la cual al ser girada y estando engranada con la cremallera, realiza el desplazamiento relativo.

En ambos elementos hay dos guías, que al coincidir, impiden cualquier movimiento que no sea el que se produce debido al engrane del sistema.

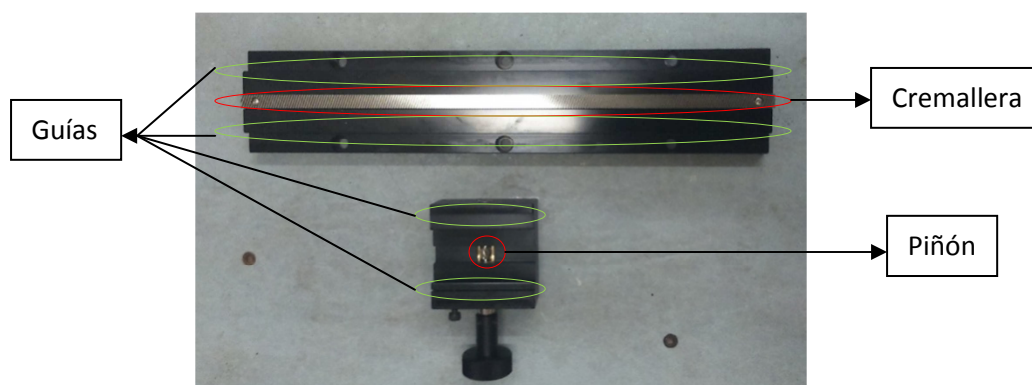


Figura 2.6. Componentes del dispositivo de guiado.

Además, cuentan con una escala milimétrica y su correspondiente contraescala. Está situada en uno de sus laterales y permite conocer cuál es el desplazamiento exacto que se realiza en cada momento. Para conseguir el movimiento en un plano se acoplan dos de estos mecanismos de guiado. Una vez acoplados ambos mecanismos, se atornillan en la parte superior de la estructura para realizar un barrido sobre el plano de medida.

## 2.5. Osciloscopios

Para la representación gráfica de señales eléctricas que pueden variar en el tiempo se utilizan dos tipos de osciloscopios. En ambos casos se trata de osciloscopios digitales, pero uno de ellos permite registrar la señal de la onda en un ordenador.

El primero de los osciloscopios utilizados en la toma de medidas fue un Philips PM97 50Mhz. Éste proporciona de forma automática valores eficaces de las ondas que recibe, pero no



permite registrar fluctuaciones de este valor eficaz. Para ello, fue necesario utilizar un segundo osciloscopio, más potente, capaz de registrar la onda y pasarla en forma de datos a un ordenador para estudiar de forma más detenida su comportamiento. Es un Tektronix TDS 3012 que mediante un cable RS232 y un programa informático (OpenChoice Desktop), permite registrar numéricamente la señal y pasar estos datos a un PC para su posterior tratado.

Existen, básicamente, dos tipos de controles que son utilizados como reguladores, que ajustan la señal de entrada y permiten, consecuentemente, medir en la pantalla.

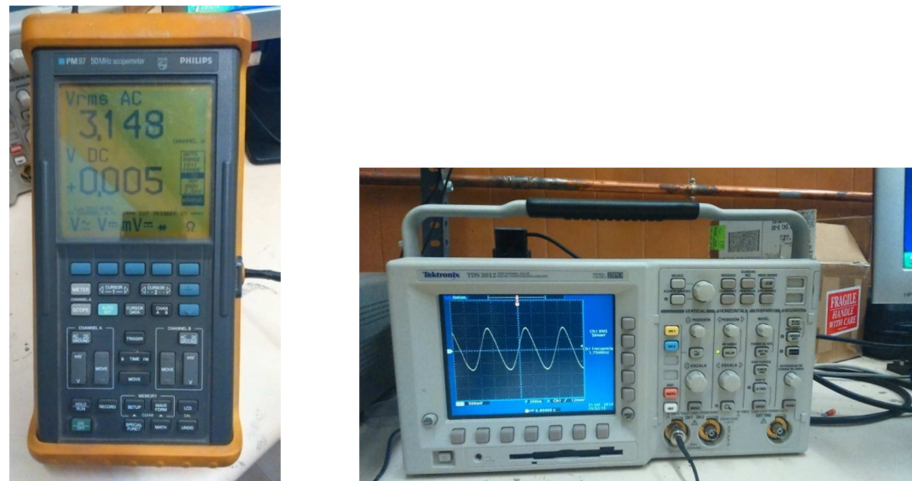


Figura 2.7. Osciloscopios utilizados durante los ensayos.

## 2.6. Fuente de alimentación.

Proporciona la alimentación al circuito oscilador del transductor piezoeléctrico. Es una fuente de tensión continua estabilizada con tensión de salida nominal 62.5 V y corriente de salida nominal 3A.

Dispone de un control preciso de tensión y corriente para limitar la potencia en caso necesario. La conexión al circuito oscilador se realiza a través de dos bornes. Adicionalmente, se instalan dos interruptores para controlar el paso de corriente a los dos transductores ultrasónicos.



Figura 2.8. Fuente de alimentación e interruptores.

## 2.7. Estructura de la instalación.

Su función principal es soportar los distintos componentes que forman del experimento, principalmente, la cubeta y los dispositivos de guiado. Está formada por barras de acero con perfiles en L unidas por tornillos.

En el diseño de la estructura se han tenido en cuenta dos aspectos relacionados con el correcto funcionamiento:

- Evitar que la parte central de la base de la cubeta apoye, ya que ahí va colocado el piezoeléctrico con su sistema de potencia. Para ello, la cubeta fue situada a una altura lo suficientemente elevada y utilizando como apoyos la parte exterior de la base.
- El sistema de desplazamiento debe colocarse de tal forma que permita al hidrófono moverse sobre un plano perpendicular al plano de la base de la cubeta. Para ello, el sistema se atornilla sobre una barra horizontal, la cual estará sujeta a otras dos barras también horizontales y paralelas entre sí montadas sobre los perfiles verticales de la estructura principal.

Finalmente, se ha nivelado la estructura para garantizar que el desplazamiento horizontal del hidrófono se produjera en un plano paralelo al de la base de la cubeta. También se ha comprobado que la base de la cubeta quede totalmente horizontal.

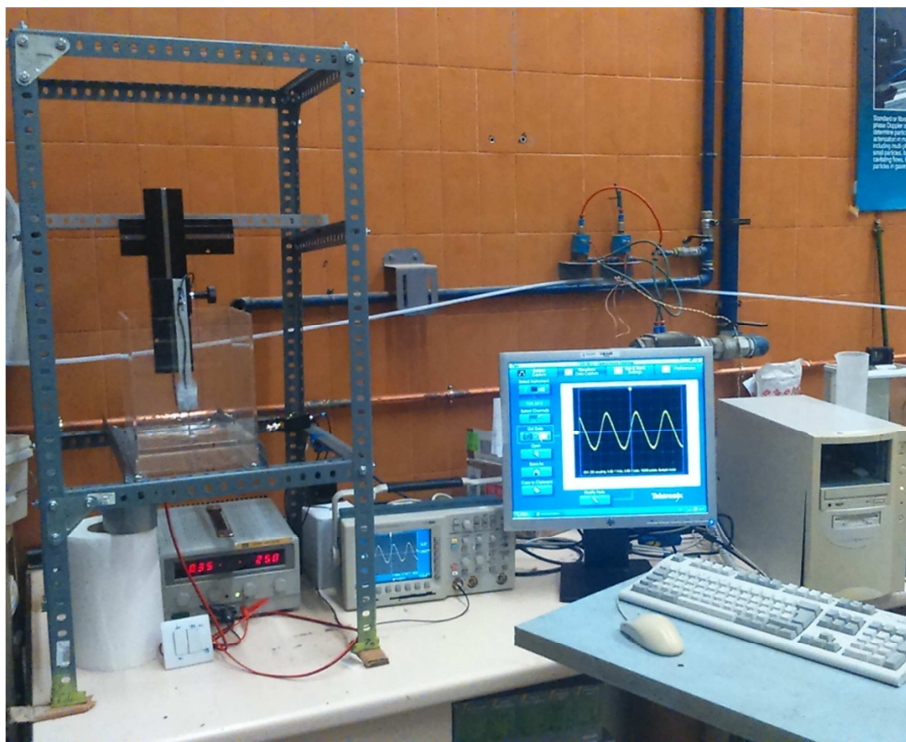


Figura 2.9. Montaje experimental final.

### 3. DESCRIPCIÓN DE LOS EXPERIMENTOS

Todos los experimentos se han realizado en la instalación descrita en el apartado anterior y con el objetivo común de observar cuál es la evolución de una onda ultrasónica en un medio fluido (agua). Se pueden englobar estos experimentos en dos grupos:

- Experimentos con 1 piezoeléctrico: son los realizados en el recipiente de base plana y que contiene un solo piezoeléctrico centrado en ella.
- Experimentos con 2 piezoeléctricos: son aquellos en los que se ha utilizado el recipiente que contiene dos dispositivos ultrasónicos enfrentados con un ángulo de  $45^\circ$  en la base.

#### 3.1. Experimentos con 1 piezoeléctrico

Están enfocados a caracterizar el tipo de perturbación que genera un piezoeléctrico en el seno de un fluido y a conocer cuál es su evolución a medida que ésta se desplaza en el fluido. Para ello, se han realizado una serie de medidas que se describen en los siguientes apartados.

##### 3.1.1 *Medidas con una altura fija de lámina fluida.*

En este caso, se pretende estudiar la evolución de la perturbación a diferentes profundidades y voltajes, dejando fija la altura de la lámina de agua. Se han realizado medidas a voltajes bajos (5, 10, 15), donde todavía no se produce la atomización del líquido y a voltajes medios (25 y 30 V), donde ya se detecta la formación de pequeñas gotas.

La evolución de la perturbación a voltajes bajos, en los que se observa la formación inicial de un cono en la superficie libre, ha sido objeto de un estudio muy detallado. En estas condiciones, la caracterización de la señal a través del osciloscopio es directa.

Las condiciones experimentales fueron las siguientes:

- Voltajes: 5, 10 y 15 V (voltajes bajos); 25 y 30 (voltajes medios).
- Altura de lámina: 35 mm (según el fabricante, Anexo I).
- Profundidades, respecto a la lámina fluida: 5, 10, 15, 20, 25 y 30 mm.
- Barridos horizontales: hasta 20 mm en cada sentido respecto al eje central.
- Medidas en un plano perpendicular al plano base de la cubeta, que pasa por el centro del piezoeléctrico y que es perpendicular al eje sobre el que se produce la inclinación que indica el fabricante.
- Datos tomados: voltaje eficaz de la onda sinusoidal.

En la Figura 3.1 se muestran las localizaciones de medida y las condiciones de ensayo.

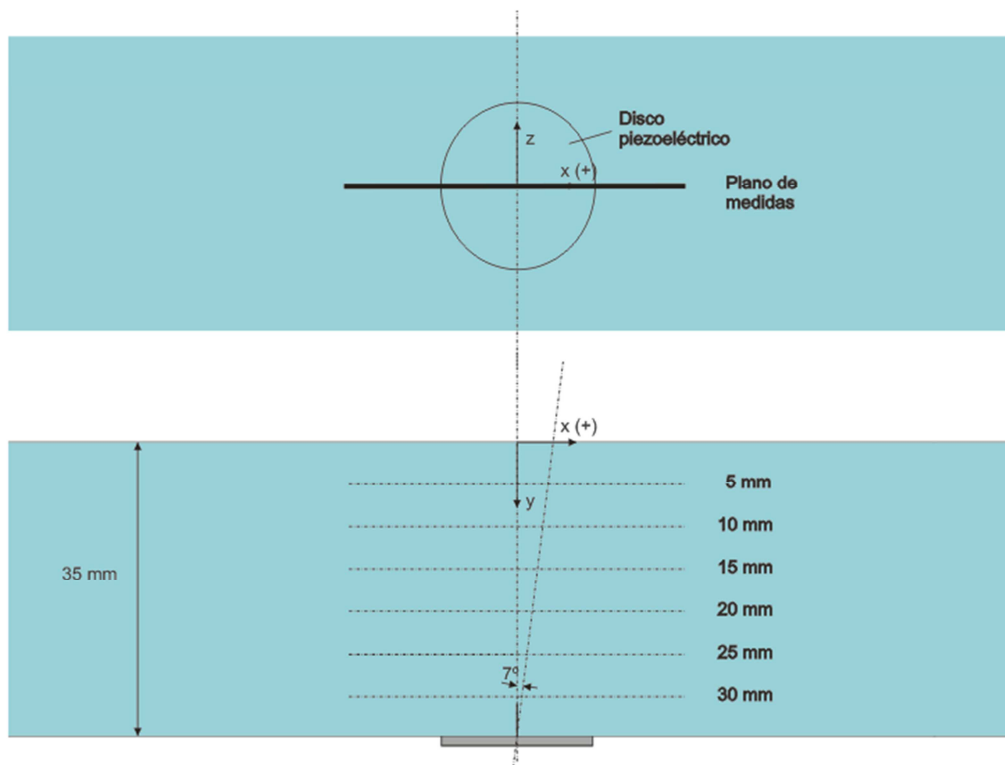


Figura 3.1. Localizaciones de medida con una altura fija de lámina fluida.

El método de operación para realizar las diferentes medidas fue el siguiente:

- 1) Calibración inicial y determinación de la posición de referencia (origen de coordenadas en la dirección x).  
Para ello, se coloca el recipiente de ensayos en el lugar correcto para que el hidrófono se pueda desplazar por el plano de medida. Con la cubeta vacía, se baja el hidrófono y ésta se mueve hasta que quede en el centro del piezoeléctrico. Seguidamente se sube un poco el hidrófono y se empieza a desplazar lateralmente. El objetivo es corregir la desviación angular. Debe coincidir en todo momento la punta del hidrófono con la línea que se realizó previamente sobre la cubeta.
- 2) Determinación de la posición de referencia (origen de coordenadas en la dirección y).  
Se añade agua hasta que la superficie libre llega a 35 mm. Una vez la cubeta está llena, se aproxima la punta del hidrófono hasta la superficie libre y se observa la medida que marca el dispositivo de guiado milimétrico que nos permite el desplazamiento vertical.
- 3) Ajuste del voltaje y toma de datos.  
El ajuste de voltaje se realiza a través de la fuente de alimentación. Se coloca el hidrófono en la posición 0 de desplazamiento lateral y en la profundidad que se quiera realizar el barrido (5, 10, 15, 20, 25, 30 mm). En cada localización se anota el valor de voltaje eficaz que indica el osciloscopio. A continuación, se desplaza el hidrófono horizontalmente un milímetro, se vuelve a anotar el nuevo valor de tensión y así sucesivamente hasta llegar a 20 mm. Se repite el proceso de medida a las diferentes profundidades.

### 3.1.2 Medidas a distancias próximas al piezoeléctrico.

En este ensayo, se ha estudiado la evolución de las intensidades de perturbaciones en posiciones a una distancia próxima al piezoeléctrico.

Las condiciones del experimento fueron las siguientes:

- Voltajes: 5, 10 y 15 V (voltajes bajos).
- Altura de lámina: 35 mm (según el fabricante, Anexo I).
- Alturas de medidas, respecto del centro del piezoeléctrico: 0.5, 1.8, 3.8 y 5.8 mm
- Barridos horizontales: 7 mm en cada dirección respecto al eje central (se abarca todo el disco).
- Medidas en un plano perpendicular al plano base de la cubeta, que pasa por el centro del piezoeléctrico y es perpendicular al eje sobre el que se produce la inclinación que indica el fabricante.
- Datos tomados: voltaje eficaz de la onda sinusoidal.

En la Figura 3.2 se muestran las localizaciones de medida y las condiciones de ensayo.

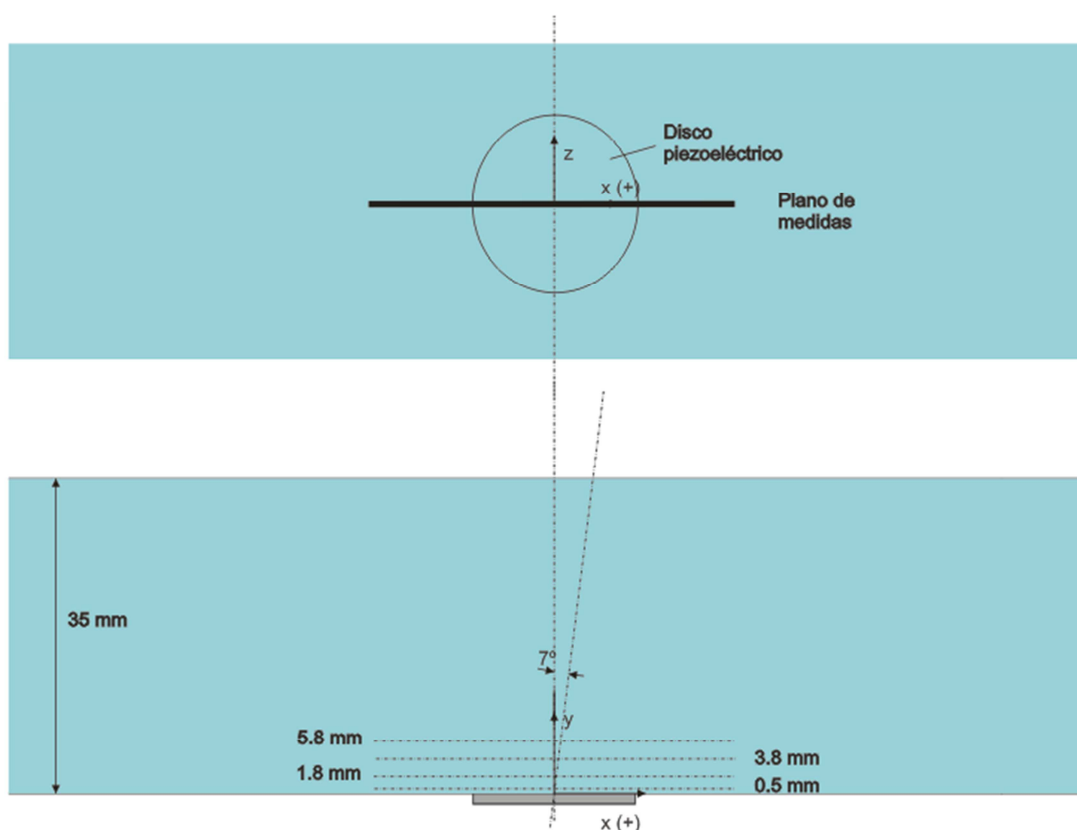


Figura 3.2. Localizaciones de medida a distancias próximas al piezoeléctrico.

El método de operación para realizar las medidas fue el siguiente:

- 1) Calibración inicial y determinación de la posición de referencia (origen de coordenadas en la dirección x). Se procede del mismo modo que en el experimento 3.1.1

- 2) Determinación de la posición de referencia (origen de coordenadas en la dirección y) y llenado de la cubeta. Estando la cubeta vacía y el hidrófono en su centro, se baja este hasta que toca el piezoeléctrico, se sube lo justo para que deje de hacer contacto, y se fija la medida que marca el dispositivo de guiado milimétrico que permite el desplazamiento vertical. Se añade agua hasta que la superficie libre llegue a 35 mm.
- 3) El ajuste de voltaje se realiza a través de la fuente de alimentación. Se coloca el hidrófono en la posición 0 de desplazamiento lateral y en la altura que se quiera realizar el barrido (0.5, 1.8, 3.8, 5.8 mm). En cada localización se anota el valor de voltaje eficaz que indica el osciloscopio. A continuación, se desplaza el hidrófono horizontalmente un milímetro, se vuelve a anotar el nuevo valor de tensión y así sucesivamente hasta llegar a 7 mm. Se repite el proceso de medida a las diferentes alturas.

### 3.1.3 Medidas con diferente altura de lámina fluida.

El objetivo es observar cómo afecta la altura de la superficie libre de agua a la evolución de la perturbación que aparece en el fluido. Se han realizado barridos de toma de datos con distintos niveles de agua (35, 45, 55, 65, 75, 100 mm) y a diferentes profundidades.

Las condiciones bajo las que se desarrolló este experimento fueron las siguientes:

- Voltaje: 15 V (voltaje bajo).
- Alturas de lámina: 35, 45, 55, 65, 75, 100 mm.
- Profundidades de medida: 5 y 25 mm respecto de cada una de las alturas de lámina. Adicionalmente, para comparar tres tomas de datos a una misma altura de medición respecto del piezoeléctrico con diferentes niveles de agua, en las alturas de lámina de agua de 55 y 65 mm se han realizado barridos a 15 y 35 mm de profundidad respecto de la superficie libre (Figura 3.3).
- Barridos horizontales: 20 mm en cada dirección respecto al eje central.
- Medidas en un plano perpendicular al plano base de la cubeta, que pasa por el centro del piezoeléctrico y es perpendicular a su eje de inclinación.
- Datos tomados: voltaje eficaz de la onda sinusoidal.

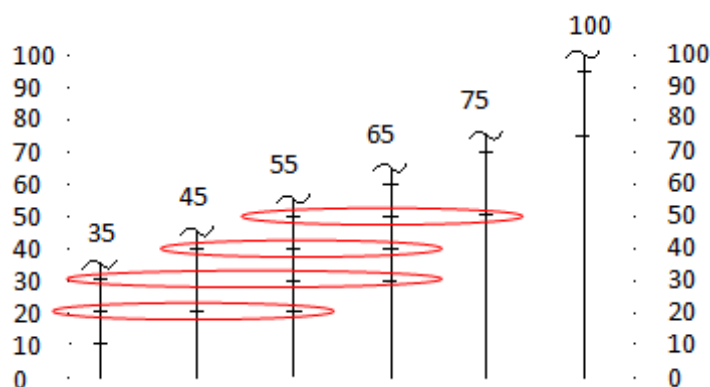


Figura 3.3. Barridos realizados en cada altura de lámina fluida.

El método de operación para realizar las medidas fue el siguiente:

- 1) Calibración inicial y determinación de la posición de referencia (origen de coordenadas en la dirección x). Se realiza igual que en los anteriores experimentos.
- 2) Determinación de la posición de referencia (origen de coordenadas en la dirección y). Se añade agua hasta que la superficie libre llega a la altura deseada. Una vez la cubeta está llena, se aproxima la punta del hidrófono hasta la superficie libre y se observa la medida que marca el dispositivo de guiado milimétrico que nos permite el desplazamiento vertical. Será necesario recolocar la posición de referencia vertical cada vez que se aumente la lámina de agua.
- 3) Ajuste del voltaje y toma de datos. El ajuste de voltaje se realiza a través de la fuente de alimentación. Se coloca el hidrófono en la posición 0 de desplazamiento lateral y en la profundidad que se quiera realizar el barrido (5, 15, 25, 35 mm). En cada localización se anota el valor de voltaje eficaz que indica el osciloscopio. A continuación, se desplaza el hidrófono horizontalmente un milímetro, se vuelve a anotar el nuevo valor de tensión y así sucesivamente hasta llegar a 20 mm. Sucesivamente se repetirá el proceso de medida a las diferentes profundidades.

#### 3.1.4 Medidas a 0.5 mm del piezoeléctrico.

Se han realizado barridos lineales que pasen por el centro del disco con un cierto ángulo respecto a los realizados hasta ahora y todos ellos a una altura de 0.5 mm respecto del disco.

Las condiciones bajo las que se desarrolló este experimento fueron las siguientes:

- Voltajes: 5 V (voltajes bajos)
- Altura de lámina: 35 mm (según el fabricante, Anexo I).
- Alturas de medición respecto del centro del piezoeléctrico: 0.5mm.
- Medidas en un plano paralelo al plano base de la cubeta
- Barridos horizontales: 7 mm en cada dirección respecto al eje central. Pasan todos por la proyección del punto central del piezoeléctrico sobre el plano y tienen una variación angular de 30° (0, 30, 60, 90, 120, 150 °)
- Datos tomados: voltaje eficaz de la onda sinusoidal

El método de operación para realizar las medidas fue el siguiente:

- 1) Calibración inicial y determinación de la posición de referencia (origen de coordenadas en la dirección x). Se procede del mismo modo que en los anteriores experimentos. Será necesario recolocar el recipiente: después de cada barrido se gira la cubeta 30° en sentido antihorario para realizar el próximo.
- 2) Determinación de la posición de referencia (origen de coordenadas en la dirección y) y llenado de la cubeta. Estando la cubeta vacía y el hidrófono en su centro, se baja éste hasta que toca el piezoeléctrico, se sube lo justo para que deje de hacer contacto, y se fija la medida que marca el dispositivo de guiado milimétrico vertical. Se añade agua

hasta que la superficie libre llegue a 35 mm. Del mismo modo, pero sin vaciar la cubeta, se comprueba la referencia vertical tras cada barrido.

- 3) Ajuste del voltaje y toma de datos. El ajuste de voltaje se realiza a través de la fuente de alimentación. Se coloca el hidrófono en la posición 0 de desplazamiento lateral y en la altura de 0.5 mm. En cada localización se anota el valor de voltaje eficaz que indica el osciloscopio. A continuación, se desplaza el hidrófono horizontalmente un milímetro, se vuelve a anotar el nuevo valor de tensión y así sucesivamente hasta llegar a 7 mm. Se gira la cubeta  $30^\circ$  y se repite el barrido.

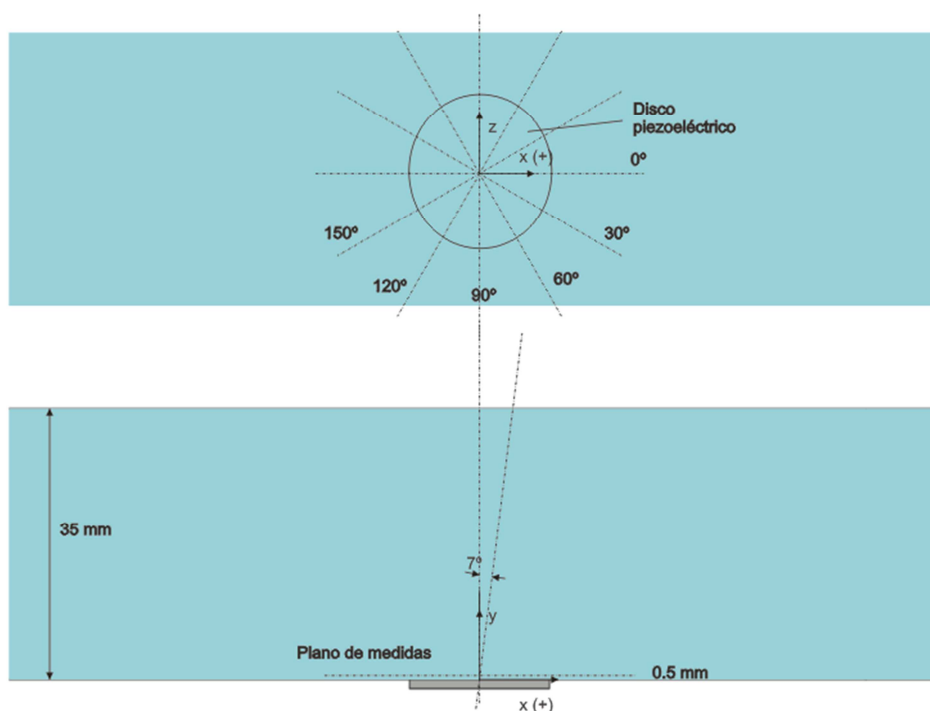


Figura 3.4. Localizaciones de medida a 0.5 mm del piezoeléctrico.

### 3.2. Experimentos con 2 piezoeléctrico

Están enfocados a caracterizar el tipo de perturbación que genera la interferencia de dos piezoeléctricos en el seno de un fluido y a conocer cómo afecta esto a la capacidad de atomizar. Para ello, se han realizado una serie de medidas que se describen en el siguiente apartado.

Se pretende estudiar la interferencia de las perturbaciones generadas por dos piezoeléctricos enfrentados con un ángulo de  $45^\circ$ . Para ello, se utilizó un recipiente con una geometría apropiada en su base y visualmente se estableció la altura de lámina fluida que permitía el contacto de los conos, pero sin que éstos se cruzasen bajo la superficie.

Se han realizado tomas de datos a una misma profundidad con diferentes condiciones de encendido eléctrico (derecho, izquierdo, ambos) y para diferentes voltajes de alimentación



(7.5, 10 V) de los transductores ultrasónicos. Las ondas registradas son enviadas como secuencia numérica de datos mediante un cable RS232 a un PC.

Las condiciones experimentales fueron las siguientes:

- Voltajes: 7.5 y 10 V (voltajes bajos).
- Altura de lámina: 30 mm respecto del plano más bajo de la base del recipiente.
- Profundidad, respecto a la lámina fluida: 3 mm.
- Barridos horizontales: 12 mm en cada dirección de la recta que une los dos discos.
- Medidas en un plano perpendicular al plano base de la cubeta, que pasa por la recta que une los dos centros de los discos.
- Datos tomados: ondas sinusoidales de perturbaciones de presión.

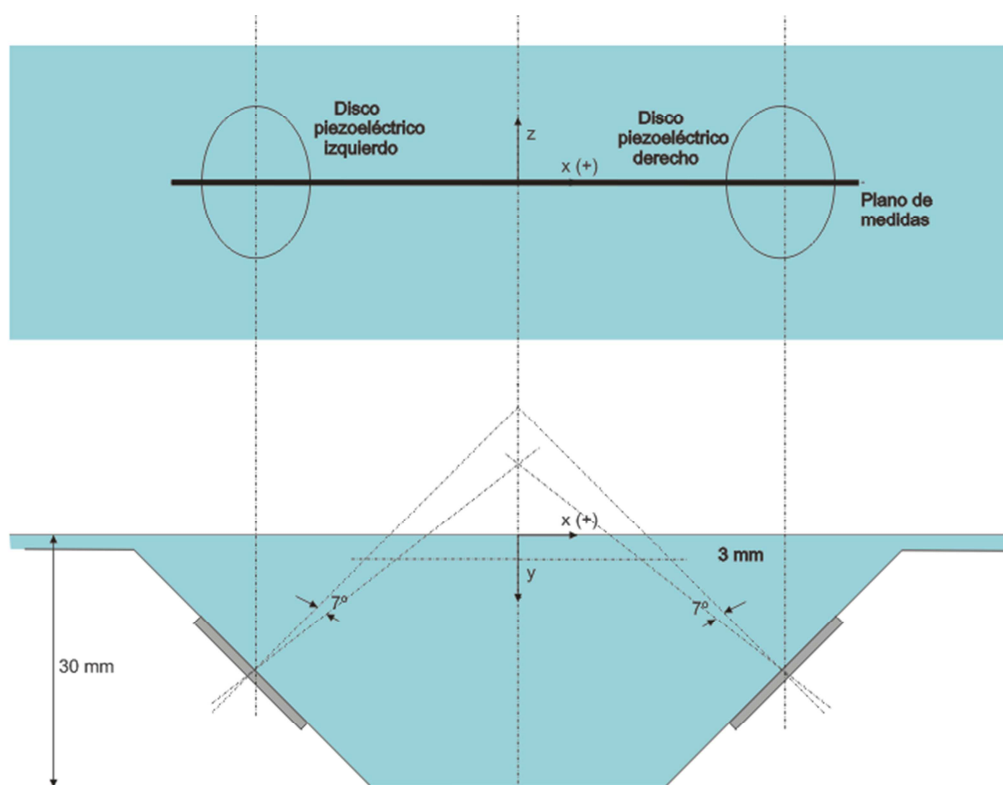


Figura 3.5. Localizaciones de medida en experimentos con dos piezoeléctricos.

El método de operación para realizar las medidas fue el siguiente:

- 1) Calibración inicial y determinación de la posición de referencia (origen de coordenadas en la dirección  $x$ ).

Se coloca el recipiente de ensayos en el lugar correcto para que el hidrófono se pueda desplazar por el plano de medida. Con la cubeta vacía, se baja el hidrófono y ésta se mueve hasta que quede centrado sobre la intersección de las líneas dibujadas (Figura 2.4). Seguidamente se sube un poco el hidrófono y se empieza a desplazar lateralmente. El objetivo es corregir la desviación angular. Debe coincidir en todo

momento la punta del hidrófono con la línea que se realizó previamente sobre la cubeta.

- 2) Determinación de la posición de referencia (origen de coordenadas en la dirección y). Se añade agua hasta que la superficie libre llega a 30mm. Una vez la cubeta está llena, se aproxima la punta del hidrófono hasta la superficie libre y se observa la medida que marca el dispositivo de guiado milimétrico que nos permite el desplazamiento vertical.

- 3) Ajuste del voltaje y toma de datos.

El ajuste de voltaje se realiza a través de la fuente de alimentación. Se coloca el hidrófono en la posición 0 de desplazamiento lateral y en la profundidad de 3 mm. En cada localización se registran y pasan a PC las ondas con diferentes escalas temporales y para los diferentes encendidos de los piezoeléctricos (derecho, izquierdo, ambos). A continuación, se desplaza el hidrófono horizontalmente dos milímetros, se vuelven a registrar las ondas y así sucesivamente hasta llegar a 12 mm.

## 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este capítulo se van a mostrar los resultados más relevantes obtenidos en los experimentos descritos en el apartado anterior.

### 4.1. Resultados obtenidos de los experimentos con 1 piezoeléctrico.

Todas las ondas que recoge el hidrófono en estos experimentos son ondas sinusoidales con una frecuencia entorno a 1,75 MHz, que es la frecuencia de excitación del piezoeléctrico, y se diferencian por su amplitud, es decir, por el nivel de perturbación de la presión.

Todas las gráficas que se muestran a continuación representan el voltaje (valor eficaz) de la onda ultrasónica.

#### 4.1.1 *Resultados obtenidos con una altura fija de lámina fluida.*

En la Figura 4.1, 4.2 y 4.3 se han representado las variaciones del valor eficaz del voltaje o intensidad de la perturbación en función de la posición horizontal,  $V_{rms} = f(d)$ . Se muestran las curvas obtenidas para un mismo voltaje de alimentación del piezoeléctrico, y diferentes profundidades respecto a la superficie libre de la lámina fluida. Este voltaje ha sido 5, 10 y 15 V respectivamente.

En los tres casos, se observa el aumento de la intensidad de la perturbación conforme la medida se realiza en posiciones más centrales. Esto se debe a que debajo de esta zona está situado el piezoeléctrico y las vibraciones que éste produce son perpendiculares a su eje.

Esta elevación tiene su pico ligeramente desplazado a la derecha respecto de la posición central. Este resultado se debe a que el fabricante del piezoeléctrico, para favorecer la atomización, le da una inclinación de 7°. La colocación de este piezoeléctrico de una determinada forma en la cubeta, implica que dicha inclinación quede orientada hacia el lado derecho.

Las elevaciones comienzan a formarse en torno a una distancia de -5 mm respecto del centro del piezoeléctrico, tienen su máximo en la posición 2-3 mm y vuelven a estabilizarse alrededor de los 8 mm.

Las curvas a un mismo voltaje prácticamente se superponen, independientemente de la profundidad a la que se hayan realizado los barridos. Se observa que sus máximos no varían mucho, 25% en el peor de los casos. Se deduce que la disipación de energía en el medio es pequeña dentro del rango de profundidades medido.

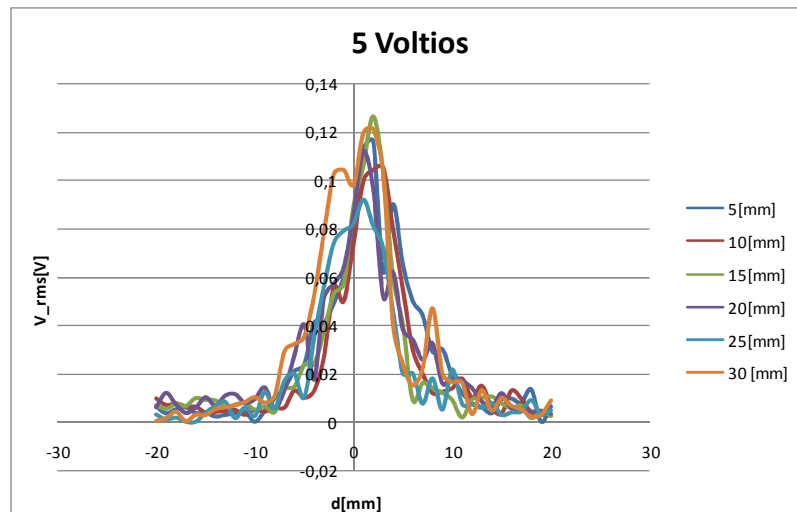


Figura 4.1. Intensidad de la perturbación a diferentes profundidades. Voltaje de alimentación: 5 V.

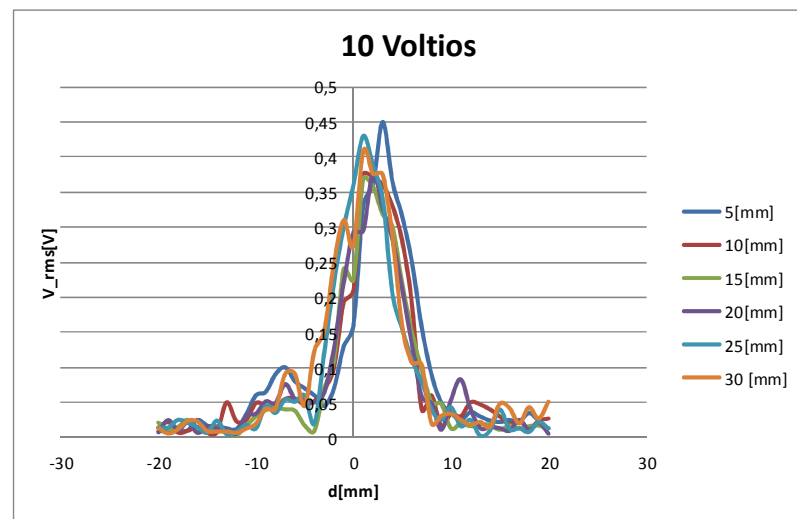


Figura 4.2. Intensidad de la perturbación a diferentes profundidades. Voltaje de alimentación: 10 V.

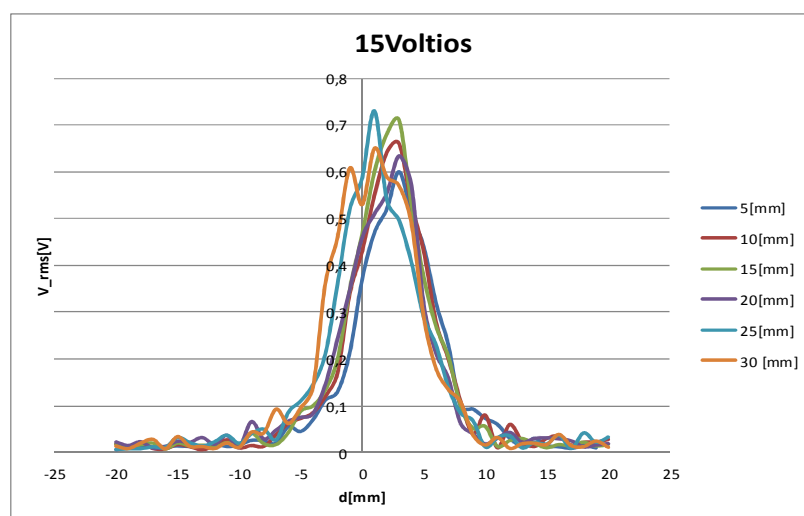


Figura 4.3. Intensidad de la perturbación a diferentes profundidades. Voltaje de alimentación: 15 V.

También se puede observar que conforme los barridos se realizan a mayor profundidad, el cono que aparece en la curva y también su máximo, se desplazan hacia la posición central. Este fenómeno se debe a la inclinación del piezoeléctrico. Las vibraciones que producen las perturbaciones en el medio se generan en la dirección del eje del piezoeléctrico. Al estar inclinado  $7^\circ$ , las perturbaciones también se desplazan en esta dirección.

Se han realizado unas capturas de imágenes en las que puede observarse la formación física del cono de agua a distintos voltajes: 5, 10, 15 y 20 V. (Figura 4.4)

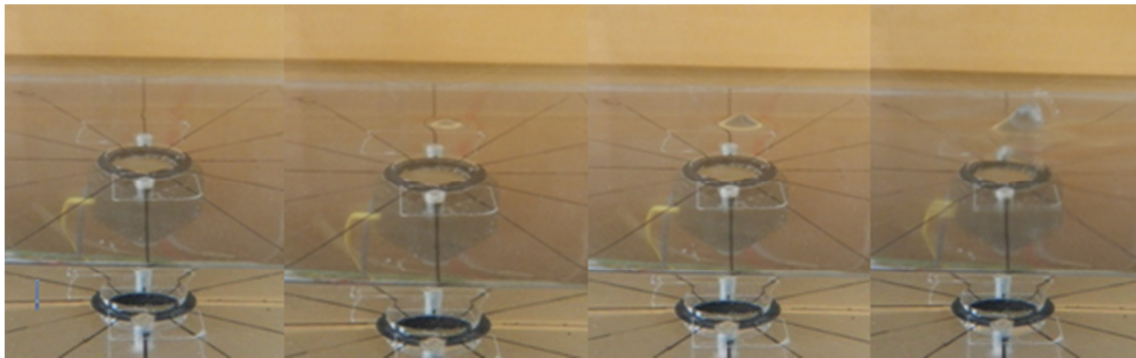


Figura 4.4. Cono formado a 5, 10, 15, 20 V respectivamente.

A continuación, en la Figura 4.5, se muestra la variación de la intensidad de la perturbación con el voltaje y en diferentes profundidades (5, 10, 15, 20, 25 y 30 mm).

Existe una gran similitud en la forma de las curvas que se generan al realizar barridos a una misma profundidad, pero a diferentes voltajes. La diferencia se aprecia en el valor del pico máximo de la perturbación. El aumento del voltaje de alimentación del piezoeléctrico implica mayores perturbaciones de presión en un mismo punto.

Se observa que la intensidad de la perturbación se amplifica a mayores voltajes de alimentación. Este fenómeno se debe a que las vibraciones del piezoeléctrico aumentan en amplitud al aumentar la tensión de alimentación de su circuito oscilador. La frecuencia de oscilación permanece constante (1,76MHz) independientemente del voltaje de alimentación del circuito oscilador.

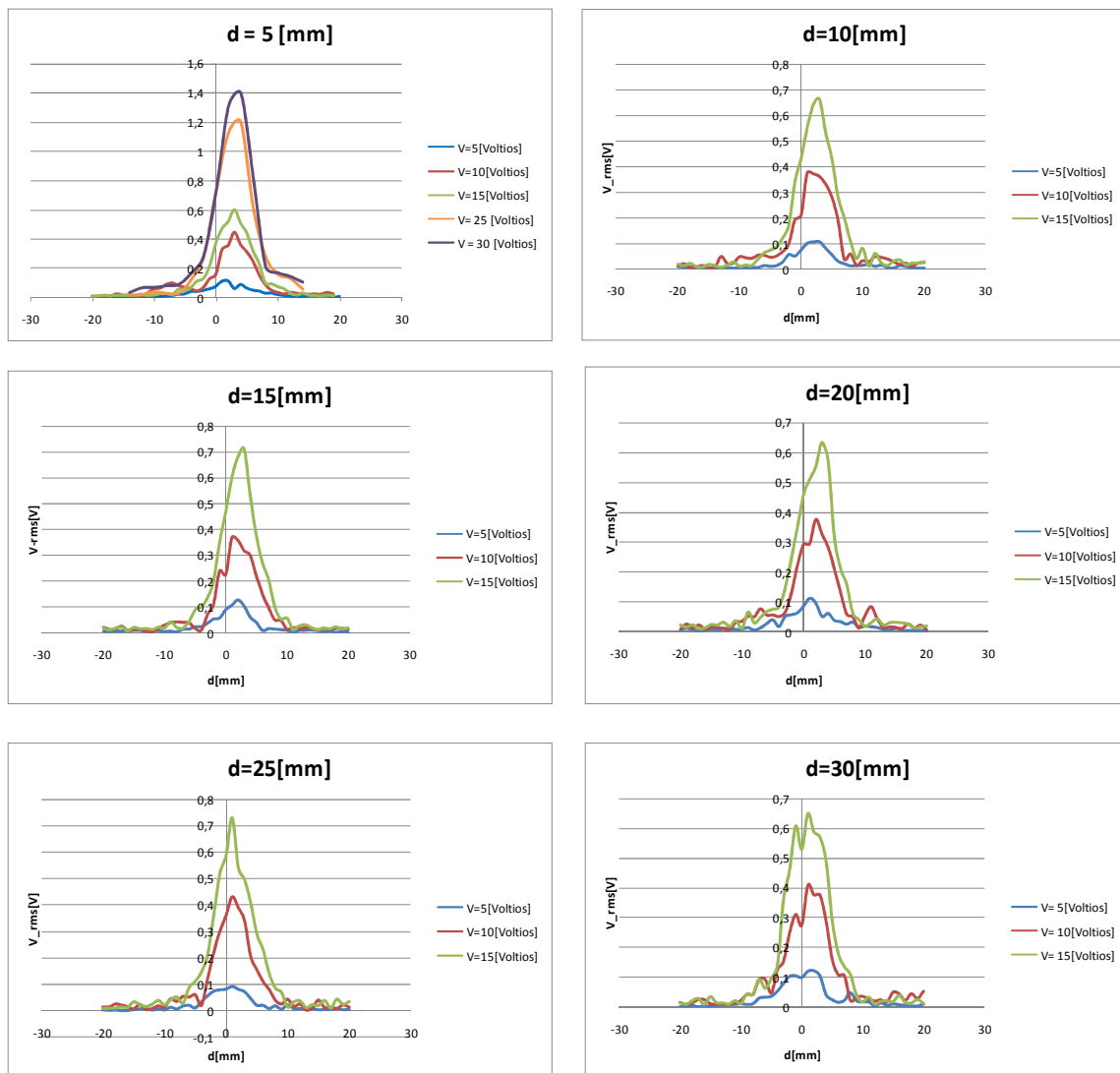


Figura 4.5. Intensidad de la perturbación a diferentes voltajes. Profundidades: 5, 10, 15, 20, 25 y 30 mm.

Por último en este primer experimento también se han graficado las evoluciones que sufre el valor de Voltaje eficaz de la onda ultrasónica a un mismo voltaje de alimentación del piezoeléctrico, en una misma posición horizontal, y variando en este caso las posiciones verticales de toma de datos. De esta manera, se han representado barridos verticales.

Puesto que las variaciones que se producen son bastante reducidas se puede deducir que la dispersión de la perturbación en el medio es pequeña. Las pequeñas fluctuaciones en estos valores pueden estar ocasionadas por la inclinación del piezoeléctrico, que hace que estas perturbaciones se transmitan con una inclinación de  $7^\circ$  y en cambio el barrido que se realiza es totalmente vertical a la superficie libre.

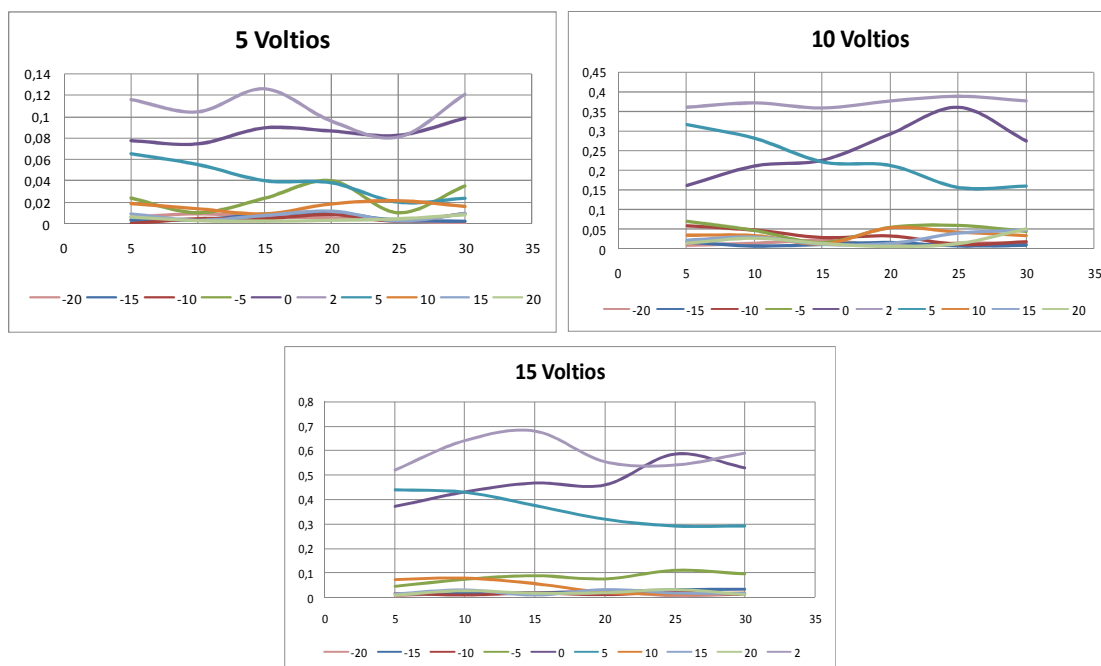


Figura 4.6. Intensidad de la perturbación en diferentes posiciones horizontales y en función de la profundidad.

#### 4.1.2 Resultados obtenidos de medidas a distancias próximas al piezoeléctrico.

En la Figura 4.7, se muestra la variación de la intensidad de la perturbación en función del desplazamiento lateral a diferentes alturas respecto del disco (0.5, 1.8, 3.8 y 5.8 mm) y a un voltaje de 15 V.

En la gráfica del barrido de 0.5 mm, se observa un mínimo y dos máximos de perturbación. El mínimo está situado en la zona central y los máximos uno a cada lado del mínimo centrados entre el 0 y los extremos. Este comportamiento se atenúa al aumentar la altura (1.8 mm) respecto al disco piezoeléctrico: los dos máximos siguen existiendo, pero los conos que forman se van ensanchando, aumentando de este modo el valor mínimo que aparecía en la posición anterior. A las distancias de 3.8 y 5.8 mm aparece un único máximo. Éste se desplaza ligeramente a la derecha en el caso de 5.8 mm de altura.

Este comportamiento parece indicar el desplazamiento en la superficie libre del piezoeléctrico no es homogénea. Esto puede deberse a la gran relación entre el diámetro y el espesor del disco, que harían que no se estuviera comportando como un sólido-rígido y se produjeran deformaciones. De este modo, no estarían vibrando homogéneamente todos los puntos del disco. Estas suposiciones no han sido corroboradas, para ello sería necesario realizar experimentos adicionales.

En la Figura 4.8 se han añadido los voltajes de 5 y 10 V a las gráficas anteriores. Se observa una disminución de la intensidad de la perturbación al disminuir el voltaje de alimentación.

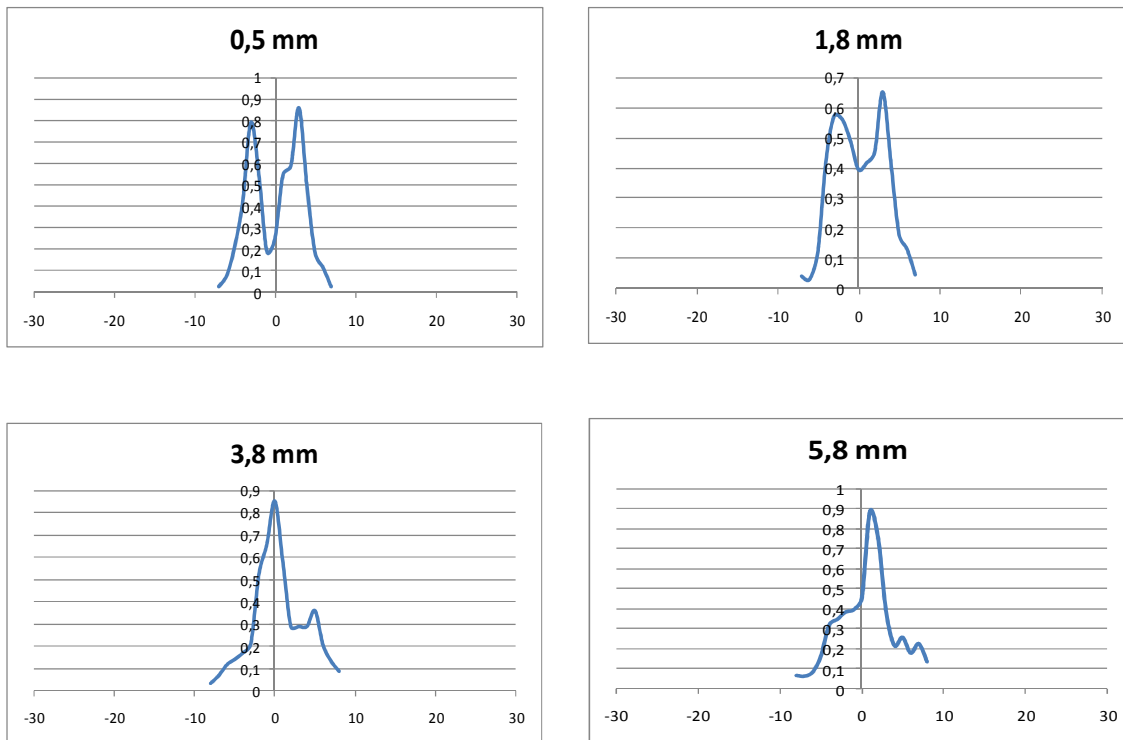


Figura 4.7. Intensidad de la perturbación a diferentes alturas próximas al piezoeléctrico.

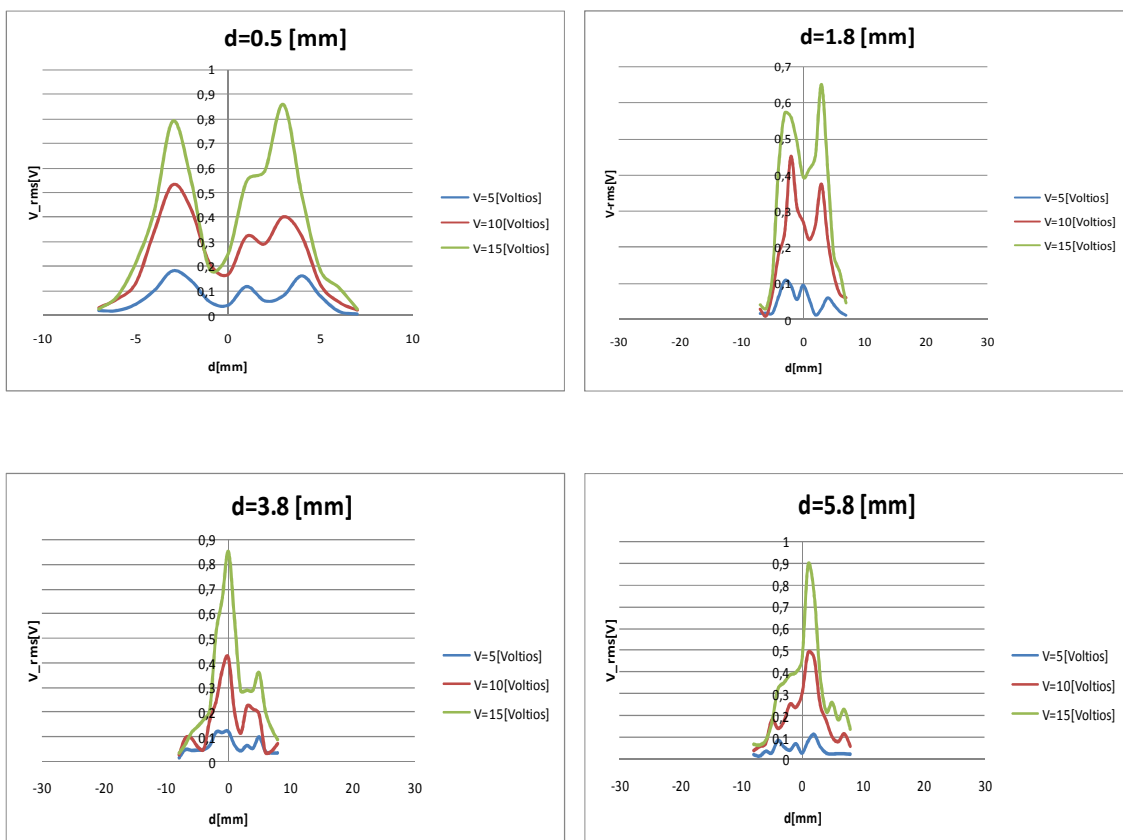


Figura 4.8. Intensidad de la perturbación a diferentes voltajes. Alturas: 0.5, 1.8, 3.8, 5.8mm.



#### 4.1.3 Resultados obtenidos de medidas con diferente altura de lámina fluida.

En las Figuras 4.9 y 4.10 se representan las intensidades de las perturbaciones a 5 y 25 mm de profundidad respectivamente para diferentes niveles de altura de lámina fluida. Al aumentar la altura de lámina de agua, midiendo a una misma profundidad, se están realizando medidas a mayor altura respecto del disco piezoeléctrico.

Se observa que las perturbaciones al alejarse del disco piezoeléctrico no se ve influenciada por la altura de la lámina de agua, ya que los resultados se asemejan a los vistos en el apartado 4.1.1, donde la altura de lámina fluida era constante. El cono se desplaza a la derecha al aumentar la altura de barrido (debido a la inclinación de  $7^\circ$ ), y su máximo disminuye el nivel de intensidad de la perturbación (disipación de energía).

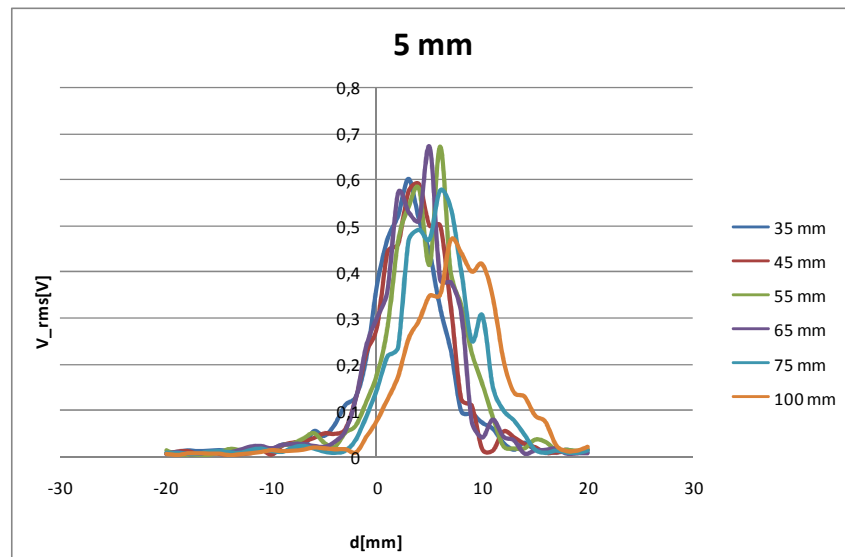


Figura 4.9. Perturbaciones a 5 mm de profundidad con diferentes alturas de lámina fluida.

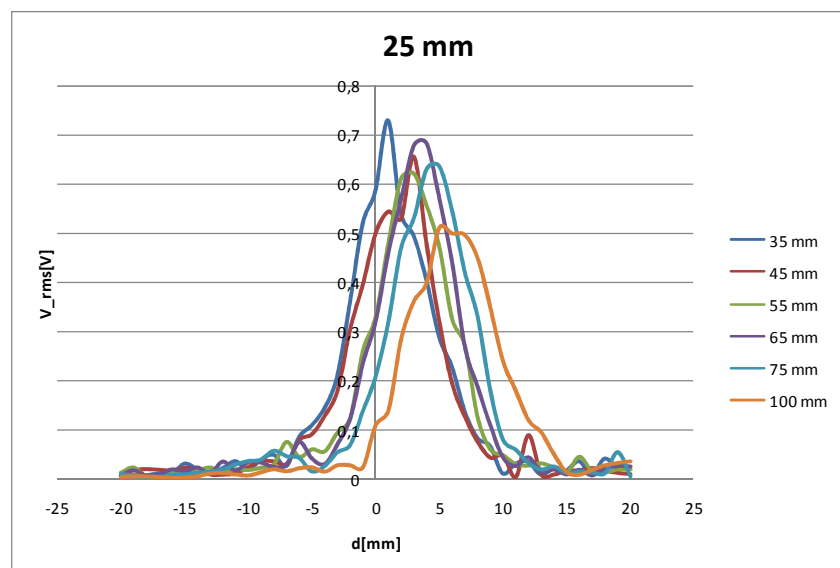


Figura 4.10. Perturbaciones a 25 mm de profundidad con diferentes alturas de lámina fluida.

La figura 4.11 muestra las perturbaciones a una misma altura respecto del disco piezoeléctrico (20, 30, 40 y 50) pero con diferentes niveles de lámina fluida. Se observa que las diferentes curvas coinciden, demostrando que la altura de lámina fluida no influye en la perturbación que se registra. Es decir, las perturbaciones (variaciones en presión) que recoge el hidrófono no se ven afectadas prácticamente por la presión hidrostática que ejerce la columna de fluido.

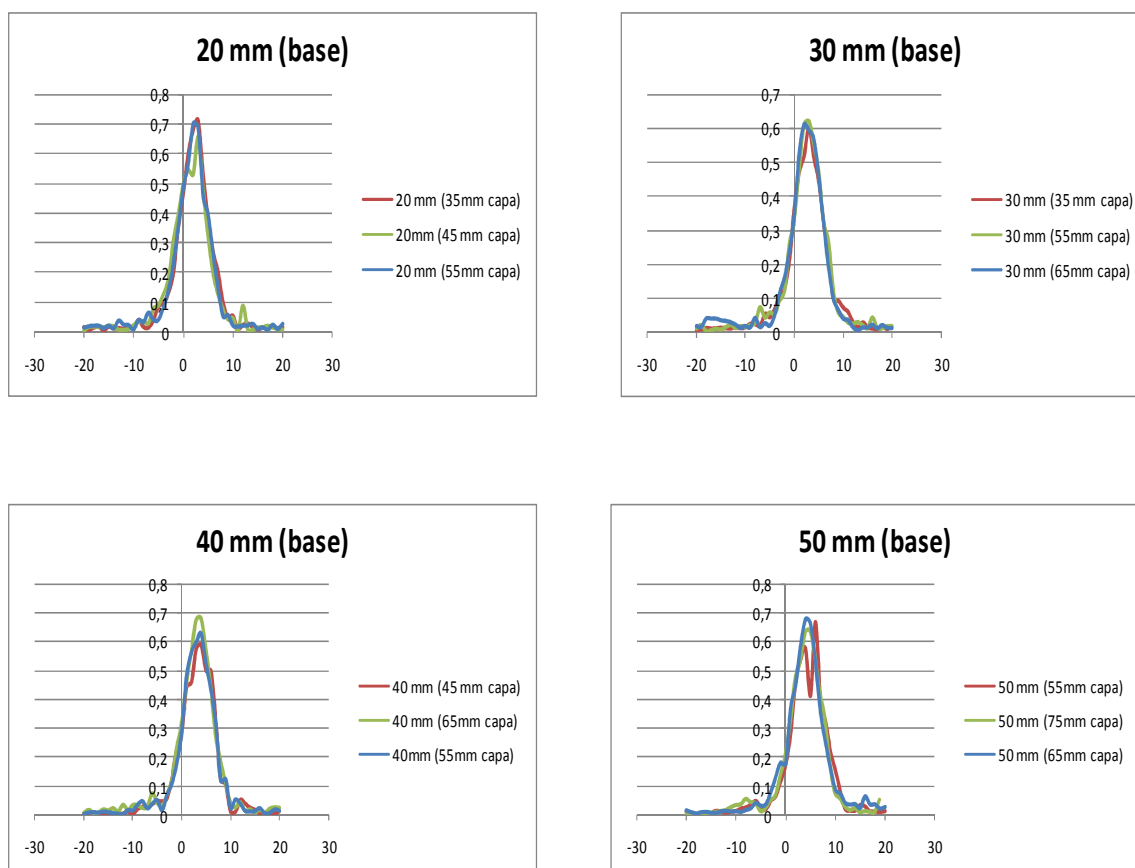


Figura 4.11. Perturbaciones a una misma altura respecto del piezoeléctrico (20, 30, 40, 50), variando el nivel de lámina de agua.

Las Figuras 4.12 a 4.17 muestran las perturbaciones a 25 mm de profundidad respecto de la superficie libre con diferentes niveles de lámina de agua (35, 45, 55, 65, 75 y 100 mm) y sus correspondientes imágenes para un voltaje de alimentación del piezoeléctrico de 15 Voltios.

Existe similitud entre lo visualizado en las imágenes y las perturbaciones captadas por el hidrófono. Al aumentar el nivel de agua, se observa como el cono se desplaza a la derecha, su pico tiene menor intensidad de perturbación y la forma de este pico pasa de ser puntiaguda a más suave y redondeada.

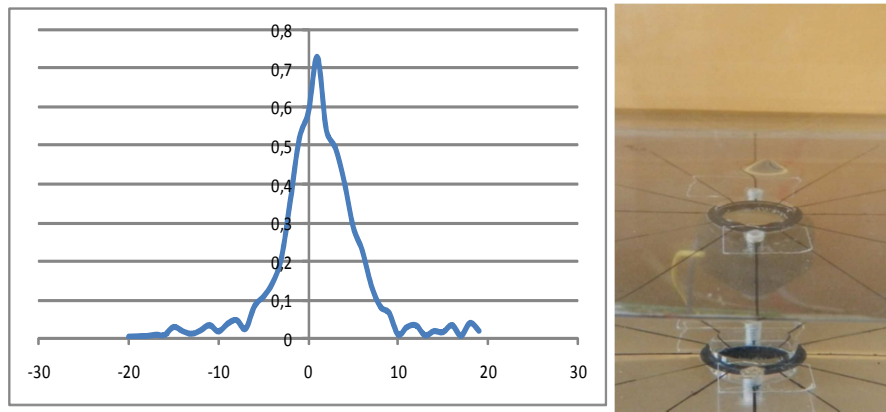


Figura 4.12. Perturbación a 25 mm de profundidad respecto de la lámina fluida (35 mm) y la imagen física del cono que se forma en la superficie.

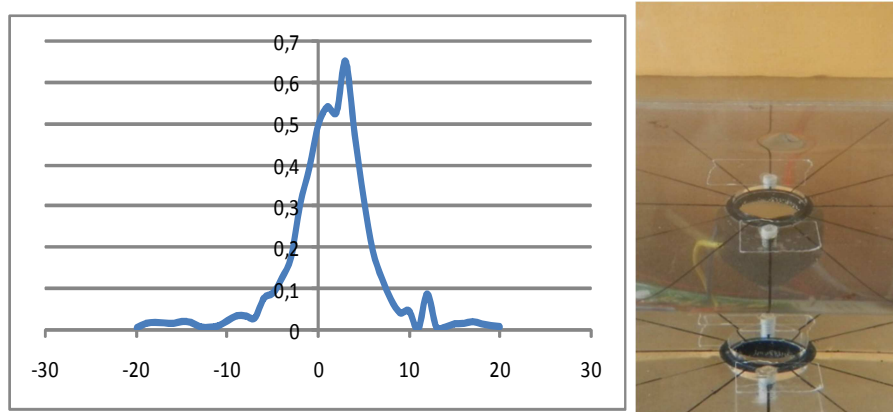


Figura 4.13. Perturbación a 25 mm de profundidad respecto de la lámina fluida (45 mm) y la imagen física del cono que se forma en la superficie.

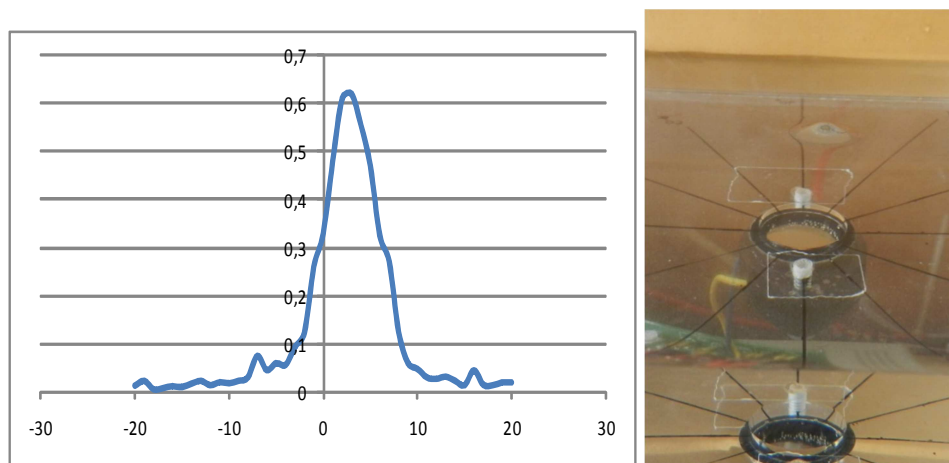


Figura 4.14. Perturbación a 25 mm de profundidad respecto de la lámina fluida (55 mm) y la imagen física del cono que se forma en la superficie.

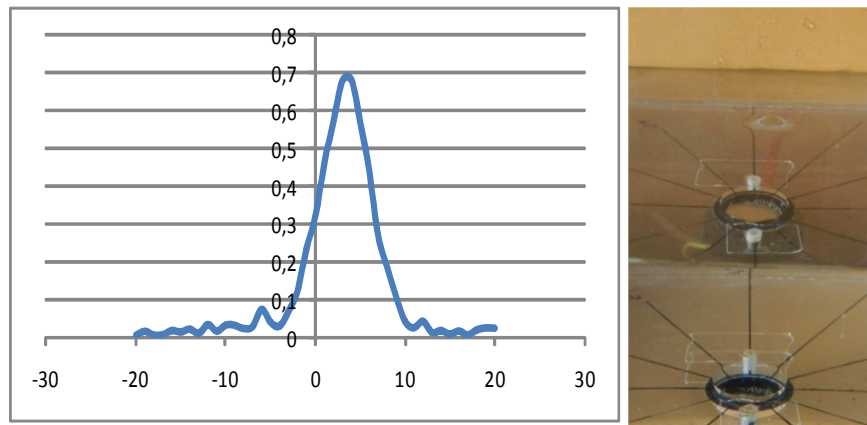


Figura 4.15. Perturbación a 25 mm de profundidad respecto de la lámina fluida (65 mm) y la imagen física del cono que se forma en la superficie.

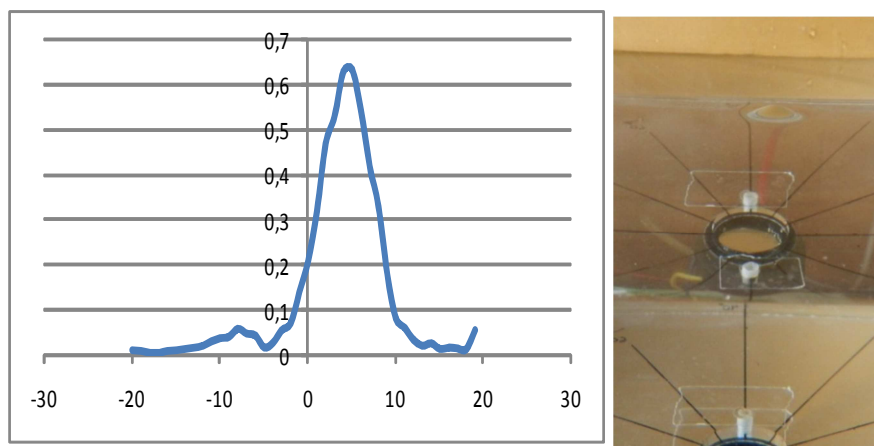


Figura 4.16. Perturbación a 25 mm de profundidad respecto de la lámina fluida (75 mm) y la imagen física del cono que se forma en la superficie.

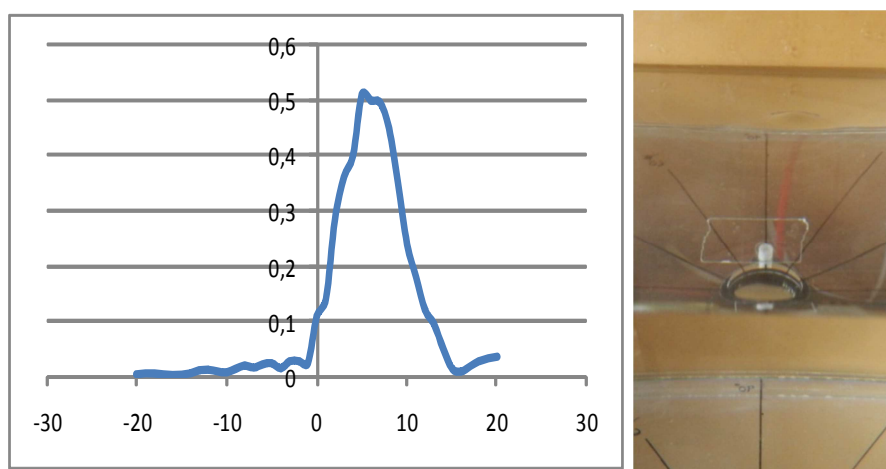


Figura 4.17. Perturbación a 25 mm de profundidad respecto de la lámina fluida (100 mm) y la imagen física del cono que se forma en la superficie.

#### 4.1.4 Resultados de medidas a 0.5 mm del disco.

En la figura 4.18 se muestran las intensidades de las perturbaciones al realizar barridos horizontales a una altura de 0,5 mm respecto del centro del piezoelectrico. Cada uno de estos barridos está desfasado 30° con respecto al anterior.

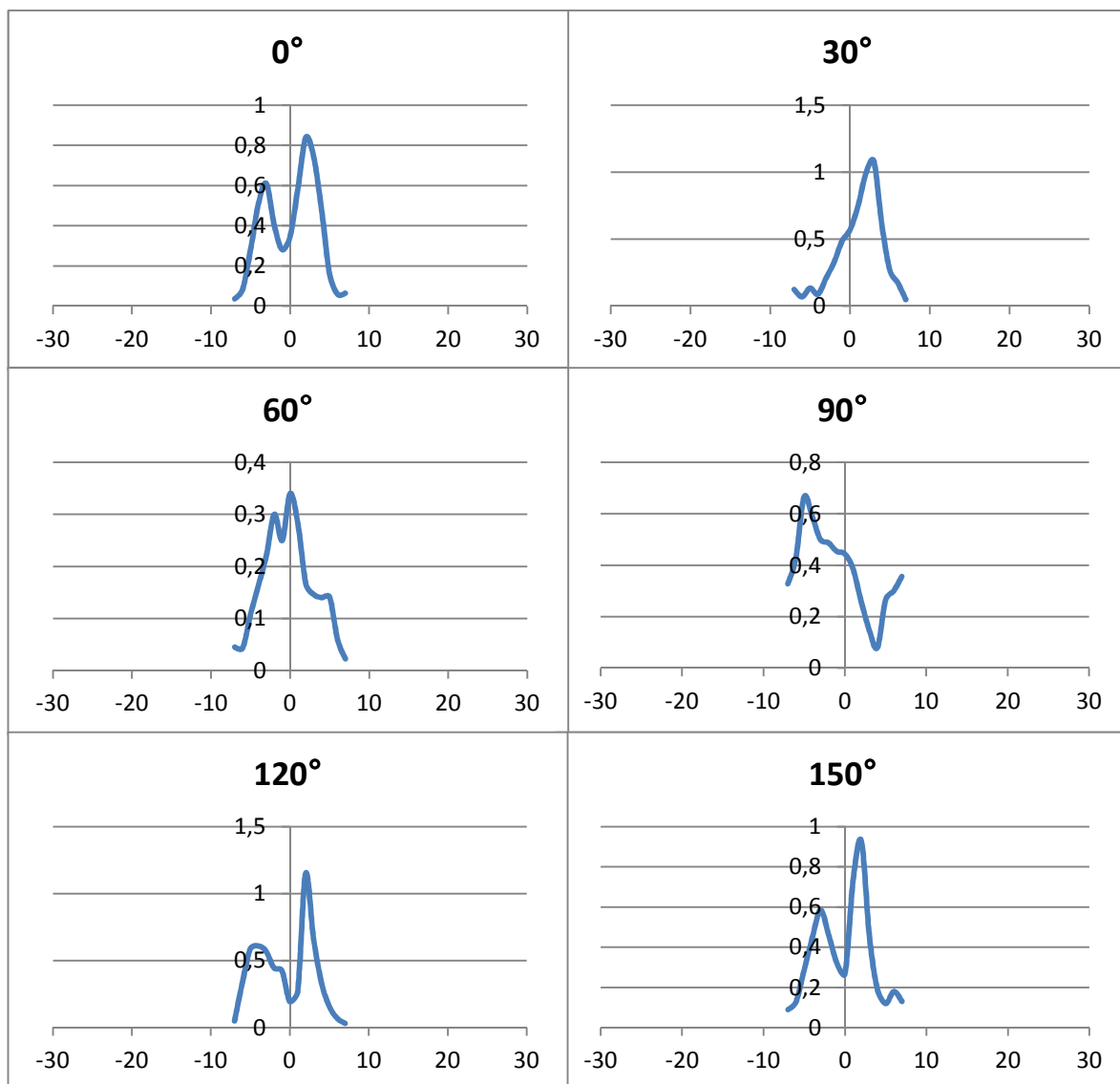


Figura 4.18. Perturbaciones a 0,5mm del piezoelectrico con diferentes ángulos de barrido.

De los resultados obtenidos se desprende la falta de simetría axial. La inclinación del eje del piezoelectrico y el movimiento no homogéneo de su superficie del piezoelectrico pueden ser algunas de las causas de este comportamiento.

## 4.2. Resultados obtenidos de los experimentos con 1 piezoeléctrico

Todas las ondas que recoge el hidrófono en estos experimentos son ondas sinusoidales con una frecuencia entorno a 1,75 MHz, que es la frecuencia de excitación del piezoeléctrico, y se diferencian por su amplitud, es decir, por el nivel de perturbación de la presión.

Se aprecian variaciones temporales del nivel máximo de las perturbaciones en una misma localización. Por ello, a diferencia del apartado anterior 4.1, no se ha podido tomar el valor eficaz de la perturbación como dato, siendo necesario registrar las ondas, para intentar interpretar lo que sucede. Todas ellas representan la perturbación [V] frente al tiempo [s] en una determinada posición.

En la Figura 4.19 puede observarse la onda de la perturbación en la posición -4 mm con los diferentes encendidos y para un voltaje de alimentación de 7.5 V. En los encendidos individuales de los piezoeléctricos, no se produce prácticamente variaciones en los valores máximos de las perturbaciones y por ello se ha tomado como objeto de estudio. En la perturbación interferencia, se puede observar como el valor máximo corresponde a la suma de los valores máximos de las perturbaciones con encendido individual. También se observa como la amplitud de esta senoide esta modulada.

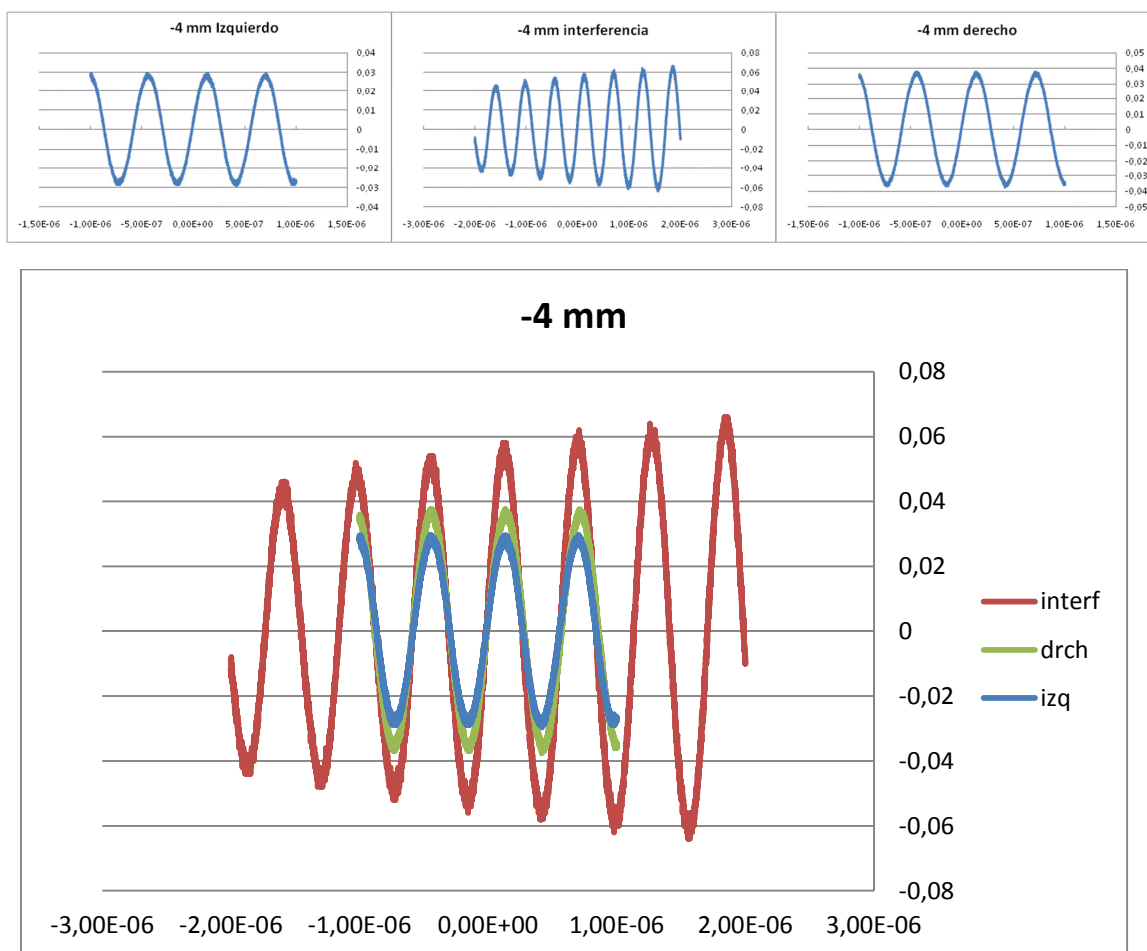


Figura 4.19 Sinusoides de las perturbaciones en posición -4 mm y 7.5 V de alimentación.

En la figura 4.20 se han representado las perturbaciones en la posición -6 mm con los diferentes encendidos y para un voltaje de 7.5 V. Se ha utilizado una escala temporal de mayor rango que permite observar las modulaciones completas.

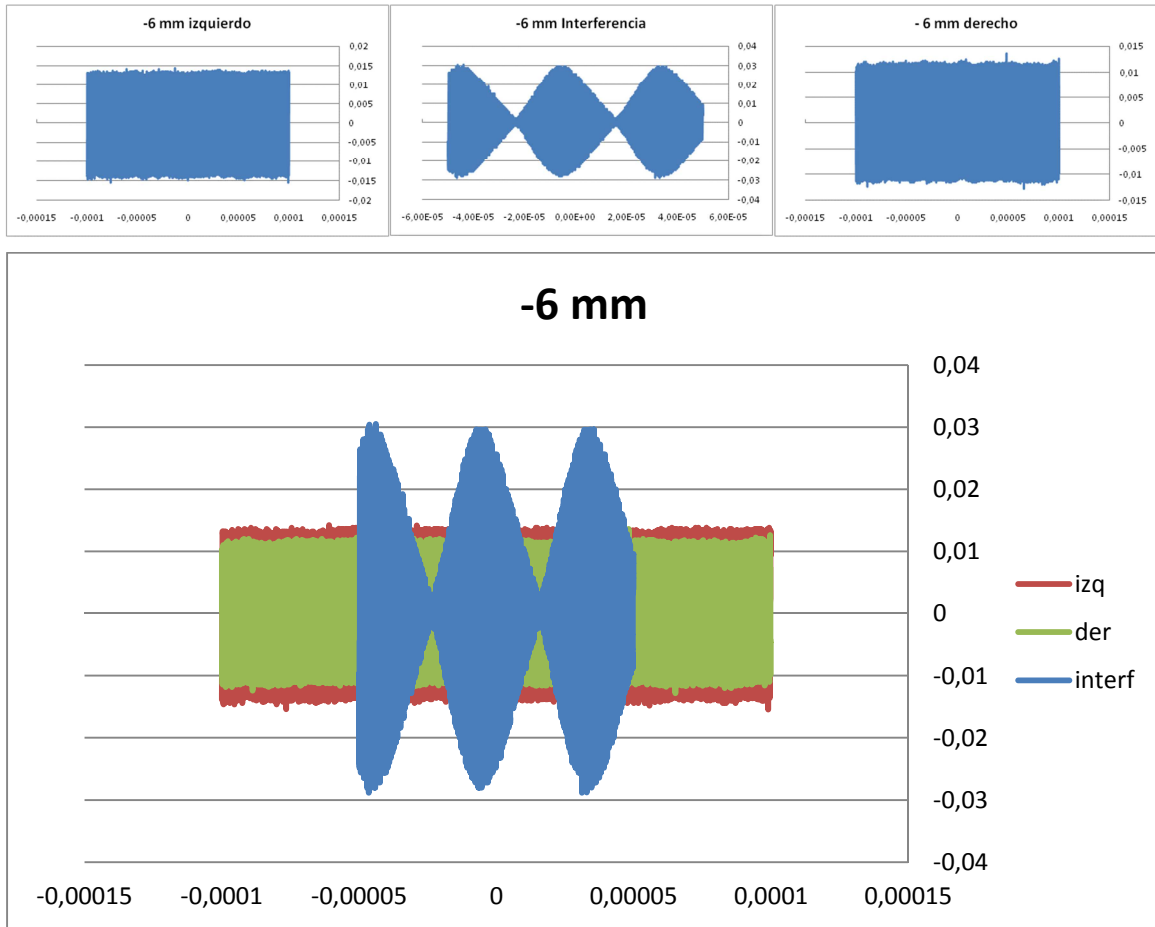


Figura 4.20 Sinusoides de las perturbaciones en posición -6 mm y 7.5 V de alimentación.

Estas modulaciones en amplitud que se observan en las perturbaciones interferencia, se deben a la pequeña diferencia que existe en la frecuencia de vibración de los discos piezoelectricos. Y puede cuantificarse mediante la propiedad de la suma de dos senos:

Ecuación de la suma de dos senos:

$$\text{Sen}(A) + \text{Sen}(B) = 2\text{Sen}\left(\frac{A+B}{2}\right)\cos\left(\frac{A-B}{2}\right)$$

Sinusoide de la perturbación izquierda:

$$\text{Sen}(\alpha)$$

Sinusoide de la perturbación derecha:

$$\text{Sen}(\beta) = \text{Sen}(\alpha + \Delta\alpha)$$

Sinusoide de la perturbación interferencia:

$$\text{Sen}(\alpha) + \text{Sen}(\beta) = 2\text{Sen}\left(\alpha + \frac{\Delta\alpha}{2}\right)\cos\left(\frac{\Delta\alpha}{2}\right) \approx 2\text{Sen}(\alpha)\cos\left(\frac{\Delta\alpha}{2}\right)$$

De la interferencia de las dos sinusoides de frecuencias muy similares, aparece una sinusoide con la misma frecuencia (Figura 4.19), pero su amplitud se modula con el  $\cos(\Delta\alpha/2)$  (Figura 4.20)

En la Figura 2.20 se observa que el periodo con el que se modula la amplitud es de  $3.83\text{E-}5$  [s]

$$T = 38.3[\mu\text{s}] \rightarrow f = \frac{1}{38.3[\mu\text{s}]} = 0.02611[\text{MHz}] = 26.11[\text{KHz}]$$

Indica que la diferencia en frecuencia de vibración de los piezoeléctricos esta en torno a las decenas de kilohertzios

En cuanto a las variaciones en amplitud que se observan en algunos puntos estando encendido solamente uno de los piezoeléctricos, podrían estar ocasionados por el visible movimiento que se aprecia en el cono. Este continuo movimiento invita a pensar que hay una cierta inestabilidad en él. Todas la graficas obtenidas en este experimento pueden verse en el anexo II.

Se observa una falta de simetría entre los valores positivos y negativos, esto podría estar relacionado con la desviación que se produce en uno de los piezoeléctricos, que no proyecta el cono sobre la línea que une ambos discos. (Figura 4.21.)

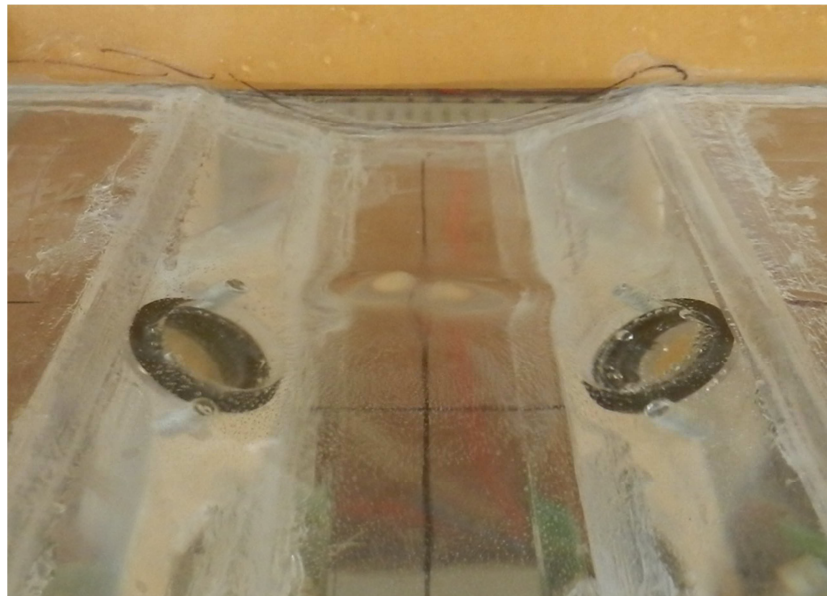


Figura 4.21. Interferencia de los conos.



## 5. CONCLUSIONES

Este trabajo ha permitido investigar la evolución de una onda ultrasónica en el seno de una masa líquida. Este tipo de ondas se han generado con un material piezoeléctrico y con ello se pretende atomizar localmente el líquido y generar una nube de gotas finas.

Para ello se ha diseñado y montado una instalación de atomización y se han utilizado diferentes equipos que permiten a través de técnicas experimentales la caracterización y análisis de una perturbación ultrasónica. En particular, se ha puesto en funcionamiento una instalación con dos configuraciones geométricas de ensayo, utilizando uno y dos transductores piezoeléctricos respectivamente, y se ha empleado un hidrófono de alta sensibilidad para detectar y caracterizar la onda producida.

Durante los ensayos se ha observado la evolución de la inestabilidad en la superficie libre. Cuando se trabaja con voltajes bajos de alimentación del piezoeléctrico, se forma un pequeño cono sobre la superficie, que se hace inestable cuando el voltaje aumenta, produciéndose la proyección de líquido en la parte superior y la generación de gotas finas. La presencia de este cono se asocia al ligero incremento de la presión media detectado en los puntos situados en la vertical del dispositivo piezoeléctrico. La forma del cono y su localización en la superficie libre están condicionadas por la posición relativa del disco piezoeléctrico respecto a la superficie.

Se ha caracterizado la onda ultrasónica a diferentes profundidades manteniendo un nivel fijo de lámina de líquido. Los resultados muestran que la perturbación se concentra en una pequeña región con un tamaño inferior al diámetro del disco piezoeléctrico y con un pico de amplitud en la zona central. Esta perturbación experimenta sólo ligeras variaciones con la profundidad de medida, lo que indica la pequeña disipación de energía durante su desarrollo en la masa de líquido. Cuando se trabaja con alturas de lámina líquida muy superiores, se puede observar una atenuación más significativa en la evolución de la perturbación. No obstante, esta altura de lámina líquida influye mínimamente en su generación.

En la mayoría de los ensayos se han manejado voltajes relativamente bajos para facilitar la captura de la señal. El incremento del voltaje supone una variación muy importante en la amplitud de la onda ultrasónica, que aumenta progresivamente sus valores máximos. El incremento del voltaje de alimentación se manifiesta también sobre la superficie libre, en la atomización del líquido y generación de mayor cantidad de gotas finas.

También se han realizado medidas en puntos muy próximos al piezoeléctrico para tratar de caracterizar la perturbación en su origen. Una primera hipótesis sobre los resultados obtenidos supone que la superficie del piezoeléctrico no tiene un movimiento homogéneo. Sin embargo, es necesario contrastar esta hipótesis con otros experimentos y con el análisis del flujo inducido, lo cual será objeto de trabajos futuros.

Se han realizado experimentos con dos piezoeléctricos enfrentados a 45°, funcionando simultáneamente, para conseguir que las dos ondas interfirieran en la superficie libre. Se observa el aumento de la amplitud de la perturbación y pequeñas variaciones en la frecuencia de vibración de unos dispositivos a otros

Se ha detectado cierta inclinación en algún disco piezoeléctrico diferente a la de  $7^\circ$  que hace imprevisible la proyección del cono. Se deberá solucionar este problema para futuros ensayos.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Allen, J. S. et al., 2011. A synchronized particle image velocimetry and infrared thermography technique applied to an acoustic streaming flow.
- Amaveda, H., 2003. Generación de gotas microscópicas y caracterización de aerosoles. Tesis Doctoral, CPS, Departamento Ciencia y Tecnología de Materiales y Fluidos, Universidad de Zaragoza.
- Barreras, F. et al., 2002. Transient high frequency ultrasonic water atomization" Experiments in Fluids 33, pp 405-413.
- Berger, H.L., 1984. Ultrasonic nozzles take pressure out of atomizing processes. Research and Development 26, pp. 124-127.
- Howard, B., 2010. High speed photography of ultrasonic atomization.
- Lang, R.J., 1962. Ultrasonic atomization of liquids. The Journal of the Acoustical Society of America, vol 34, nº1, pp. 6-8.
- Lierke, E.G. & Griesshammer, G., 1967. The Formation of Metal Powders by Ultrasonic Atomization of Molten Metals. Ultrasonics, pp. 224-228.
- Lozano, A., 1992. Laser-excited luminescent tracers for planar concentration measurements in gaseous jets, Ph.D. Thesis, Stanford University, Stanford, CA.
- Lozano, A. et al., 2010. Influence of viscosity on droplet size distribution and generation rate in ultrasonic atomization" LITEC, CSIC-Univ. Zaragoza. Atomization and sprays, pp. 923-934.
- Lozano, A. et al., 2011. High flow-rate ultrasonic seeder. LIFTEC, CSIC- Universidad de Zaragoza
- Navarro J.L., 2009. Caracterización de dispositivos de atomización ultrasónica. PFC Escuela Ingeniería Técnica Industrial, Área de mecánica de Fluidos, Universidad de Zaragoza.
- Santolaya, J.L., 2004. Estudio experimental del spray de aceite usado generado por un atomizador de presión con rotación" Tesis Doctoral, CPS, Departamento Ciencia y Tecnología de Materiales y Fluidos, Universidad de Zaragoza.
- Sindayihebura, D., 1995. Pulverisation Ultrasonique des Films de faible épaisseur. Thèse de Doctorat, Université Catholique de Louvain Bruxelles (Belgique).
- Söllner, K, 1936. Experiments to demonstrate cavitation caused by ultrasonic waves. Trans Faraday Soc 32:1537–1538.
- Topp, M. N. & Eisenklan, P., 1972. Industrial and Medical Uses of Ultrasonic Atomizers. Ultrasonics 10.nº 3, pp 127-133.
- Trujillo, F. J. & Knoerzer, K, 2011. Ultrasonics Sonochemistry. Journal homepage: [www.elsevier.com/locate/ultsonch](http://www.elsevier.com/locate/ultsonch). pp 1263–1273.

Yang J. 2006. Analysis of Piezoelectric Devices. University of Nebraska-Lincoln, USA, World Scientific

## **ANEXOS**

## **ANEXO I: EQUIPO EXPERIMENTAL – DATOS TÉCNICOS**

- 1) TRANSDUCTOR ULTRASONICO
- 2) HIDROFONO
- 3) RECIPIENTE CON 1 PIEZOELECTRICO
- 4) RECIPIENTE CON DOS PIEZOELECTRICOS
- 5) DISPOSITIVOS DE GUIADO
- 6) FUENTE DE ALIMENTACIÓN

- 1. Transductor ultrasónico.



## **Ultrasonic Nebulizer Units**

Humidifier for mist generating system

Incorporate type

NB series

Issue date: March 2012

- All specifications are subject to change without notice.
- Conformity to RoHS Directive: This means that, in conformity with EU Directive 2002/95/EC, lead, cadmium, mercury, hexavalent chromium, and specific bromine-based flame retardants, PBB and PBDE, have not been used, except for exempted applications.

## Ultrasonic Nebulizer Units Incorporate Type

### NB Series

The TDK ultrasonic humidifier unit was the first such product in the world to be developed. There is an increasing need for indoor humidification due to the proliferation of clean air heat pumps and central heating systems.

When the appropriate amount of humidity is added as determined by the relationship between humidity and sensible temperature (temperature perceived by the body), humidification is advanta-

geous from the standpoint of both health and reduced energy consumption.

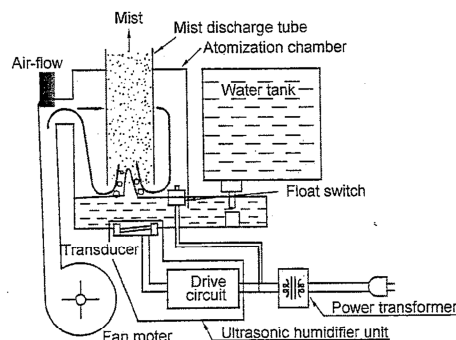
In addition to such home uses, these ultrasonic humidifier units have numerous advantages for humidification of vegetable show-cases, preservation and growth of agricultural products, industrial applications, etc. A wide variety of standard units are available from TDK.

#### ELECTRICAL CHARACTERISTICS

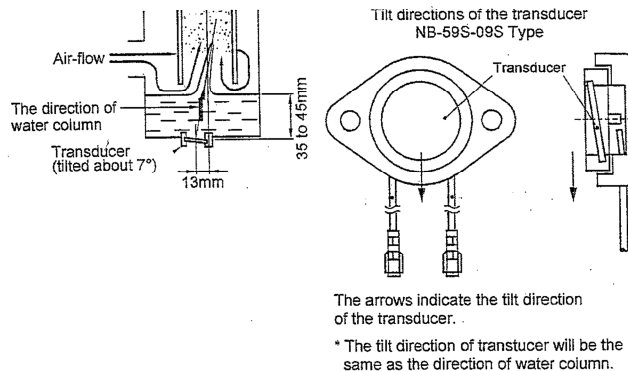
Part No.	NB-59S-09S-0	NB-80E-01-H
Rated input voltage	$E_{ac}(V)$ $E_{dc}(V)$	$12 \pm 10\%$
Power consumption (W)	$30 \pm 5$	13.2max.
Mist output ratio (l/h)	$450 \times 10^{-3} \text{ min.}$	$(150 + 100, -50) \times 10^{-3}$
Ultrasonic frequency (kHz)	1600 to 1750	2350 to 2600
Normal water level (mm)	40	35
External potentiometer (k $\Omega$ )	—	10
Operating water temperature range (°C)	0 to 45	0 to 45
Water quality	Drinking water	Drinking water
Transducer element life (h)	10000	5000
Cooling method	Water cooled	Air cooled
Parallel connected operation	Yes	Yes
Weight (g)	60	60
Main application	Various humidity control systems	Microparticle applications such as for medical use

• The character at the end of the product number indicates the transducer's direction of tilt.

#### EXAMPLE OF ATOMIZATION CHAMBER CONSTRUCTION

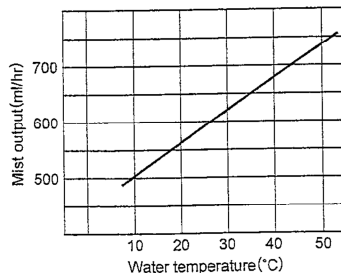
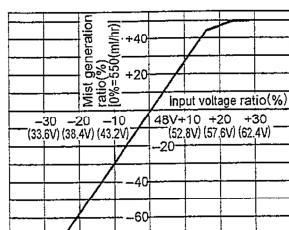


#### TYPICAL TRANSUCER INSTALLATION

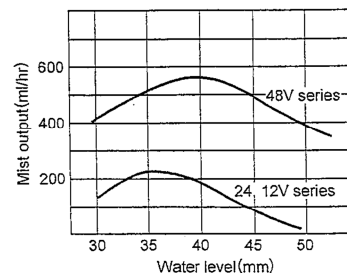


#### TYPICAL CHARACTERISTICS OF HUMIDIFIER UNITS

##### VOLTAGE CHARACTERISTICS(48V) WATER TEMPERATURE CHARACTERISTICS(48V)



##### WATER LEVEL CHARACTERISTICS



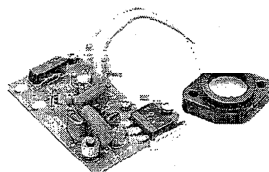
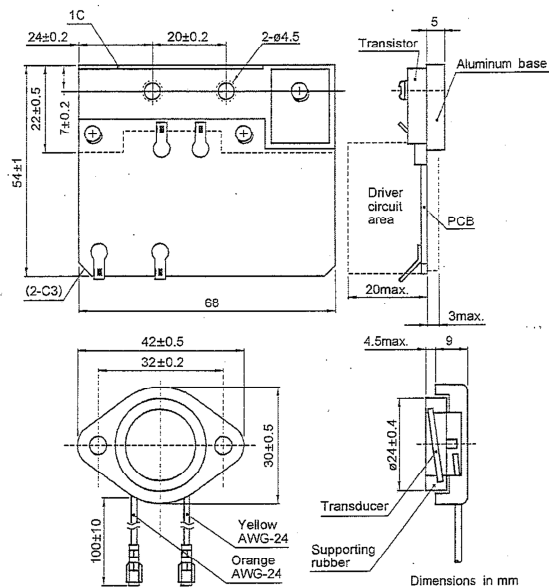
• All specifications are subject to change without notice.

002-03 / 20120316 / ef441\_nb.fm

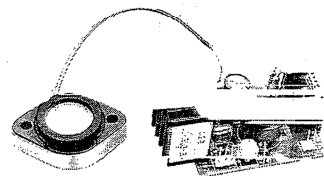
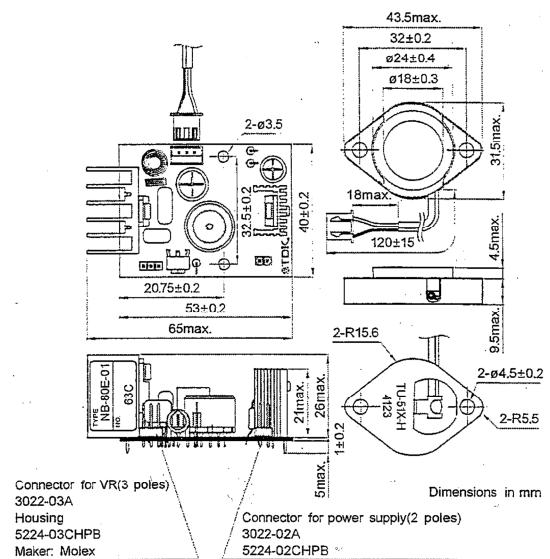


**NB-59S-09S TYPE****FEATURES**

- Compact, with highly reliable circuitry.
- Separate transducer and drive circuit sections provide superior layout versatility.

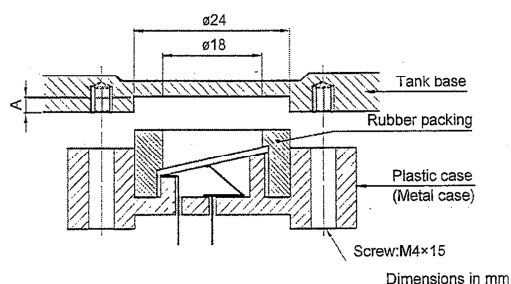
**SHAPES AND DIMENSIONS****NB-80E-01 TYPE****FEATURES**

- Compact, with highly reliable circuitry.
- Separate transducer and drive circuit sections provide superior layout versatility.
- Because the ultrasonic frequencies used are higher than with typical household-type units, mist particle size is extremely fine. This part is thus ideal for products intended for smaller spaces.

**SHAPES AND DIMENSIONS**

• All specifications are subject to change without notice.

002-03 / 20120316 / ef441\_nb.fm

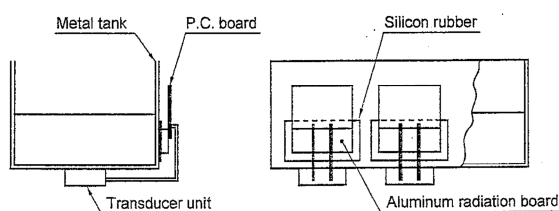
**MOUNTINGS (Reference)****1.NB59S, NB-80E TYPES**

The transducer can break off if the A dimension depth is shallow. TDK recommends a 2mm A-dimension depth and a screw tightening torque of 0.6N·m.

**2.CONSTRUCTION OF NB59S**

The drawing below shows an example method for transistor heat dissipation. The attached aluminum cooling fins should be fixed using silicon rubber to a metallic water tank, etc. with sufficient heat dissipation capacity.

(It is recommended to use a plastic water tank. However, if a metallic water tank is absolutely must be used, be sure to insulate it from the power supply line.)

**PRECAUTIONS**

- These units are readily damaged by operation when empty (without water). Therefore a means (float switch, etc.) should be provided to assure operation does not occur when empty.
  - Contact TDK prior to use of this unit for applications utilizing liquids other than water.
  - The unit should be used only after sufficient consideration of the product specifications for that specific unit.
  - When using units in parallel, make sure that voltage differences do not occur between the individual transducers.
  - Do not use the unit to atomize a liquid other than drinking water. Doing so can deteriorate the transducer.
  - Do not operate the transducer when the atomization unit tank is not charged with drinking water.
  - Drain water from the transducer and clean the equipment into which the unit is incorporated if not used for a long period of time.
  - Clean the transducer periodically to prevent any degradation in the atomizing capacity due to buildup in the transducer of such substances as calcium, sodium, magnesium, and silicon, commonly found in drinking water.
  - TDK is not responsible for damage to the transducer resulting from use of oscillator circuitry not supplied or not approved by TDK.
  - TDK is not responsible for worsening of unit performance resulting from operation in environments other than those recommended, storage in environments other than those recommended, or use of the unit in configurations other than those recommended by TDK for efficient mist generation.
  - TDK is not responsible for the vaporization of pathogenic bacteria or particles, not responsible if drinking water contains substances that impede vaporization, and not responsible for bacterial growth due to lack of a water purification function.
  - Please select a plastic material of construction for the water tank design. Metallic construction can result in electrolytic corrosion between the chamber base and water tank.
- Furthermore, if multiple units are used with the same tank, and if each unit is equipped to be separately turned ON/OFF, the power supply terminal for each unit should use a double-pole switch.

- 2. Hidrófono.



## HNR Hydrophones

The HNR Series needle hydrophones are excellent sensors for laboratory use in high intensity ultrasonic field mapping, with pinpoint access and good spatial resolution. Due to their high sensitivity these hydrophones are commonly operated without amplification.

### Features

- Small size
- High sensitivity
- Rugged
- Low cost

### Technical Specifications

	HNR-0500	HNR-1000
Frequency range ( $\pm 6$ dB)	0.25 - 10 MHz	
* EOC Nominal Sensitivity [nV/Pa]	250	450
Acceptance angle (-6dB at 5 MHz)	30°	15°
Capacitance	200 pF	
Max. Operating Temperature	50°C	

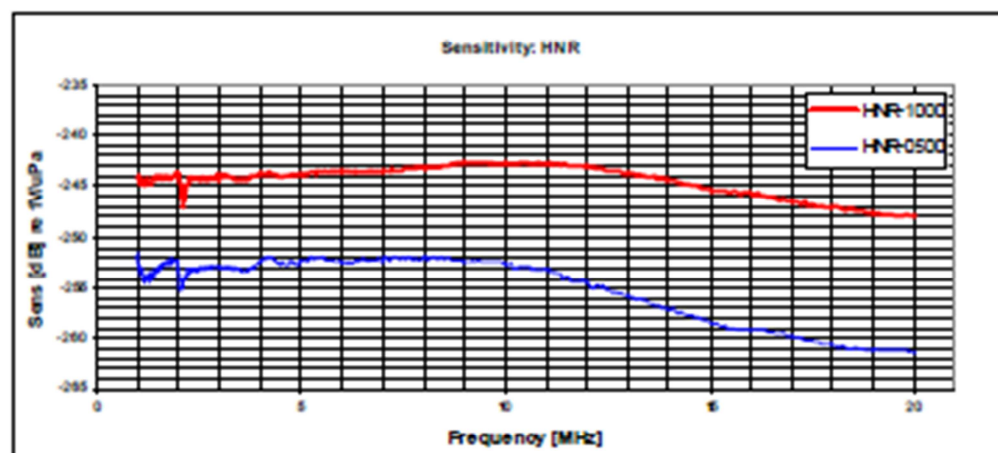
\* EOC ("end of cable") is the open-circuit output sensitivity of the hydrophone. Calibration with an amplifier can be determined from the gain and input impedance of the amplifier.

Provided with traceable calibration 1-20 MHz at 50 KHz intervals. For other calibrations available visit our web site.



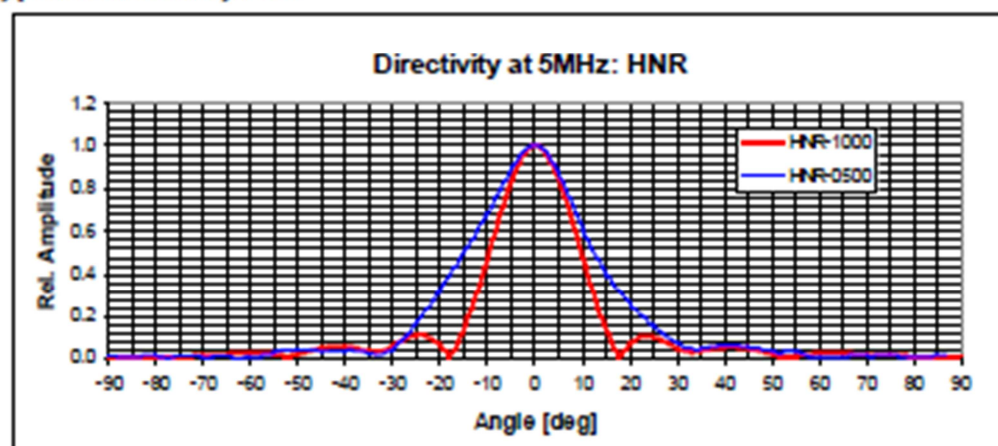
HNR Hydrophone

### Typical Sensitivity Plot

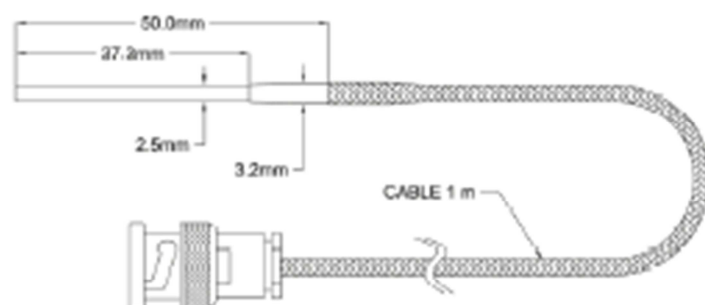


Note that intrinsic to this design is a resonance (notch) at 2 MHz typical, whose amplitude may vary.

### Typical Directivity Plot



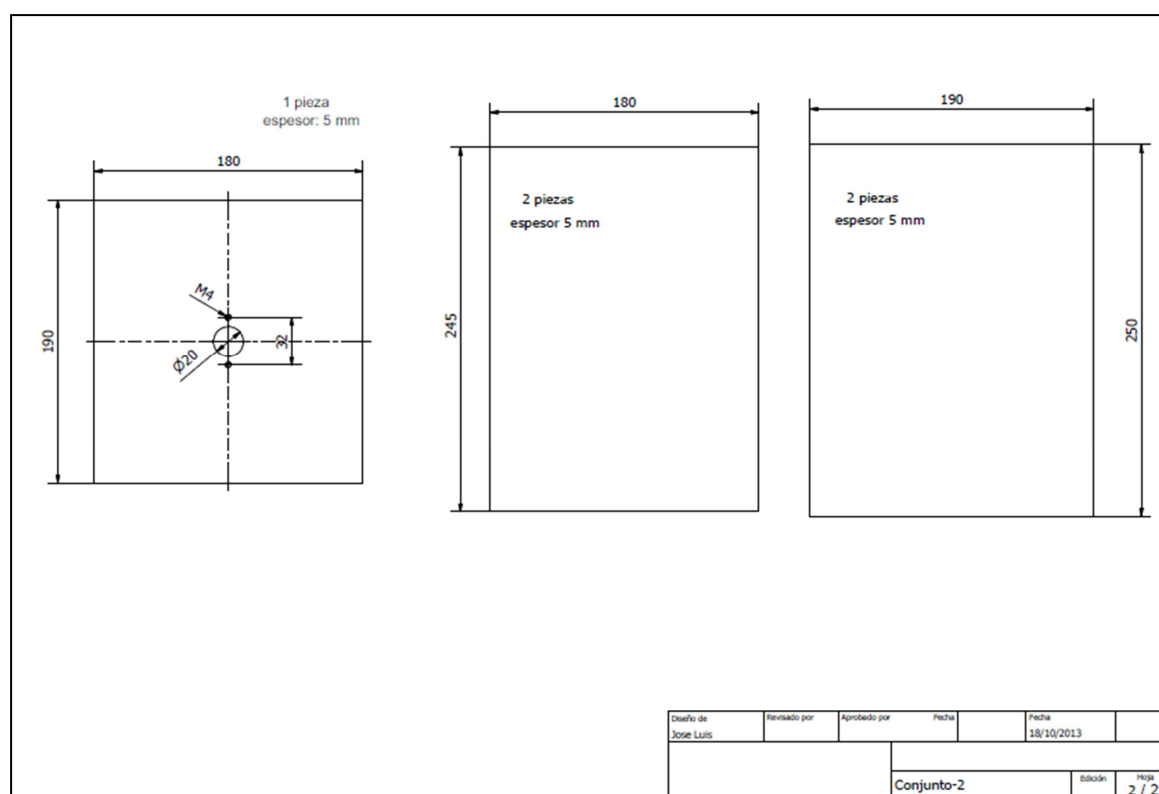
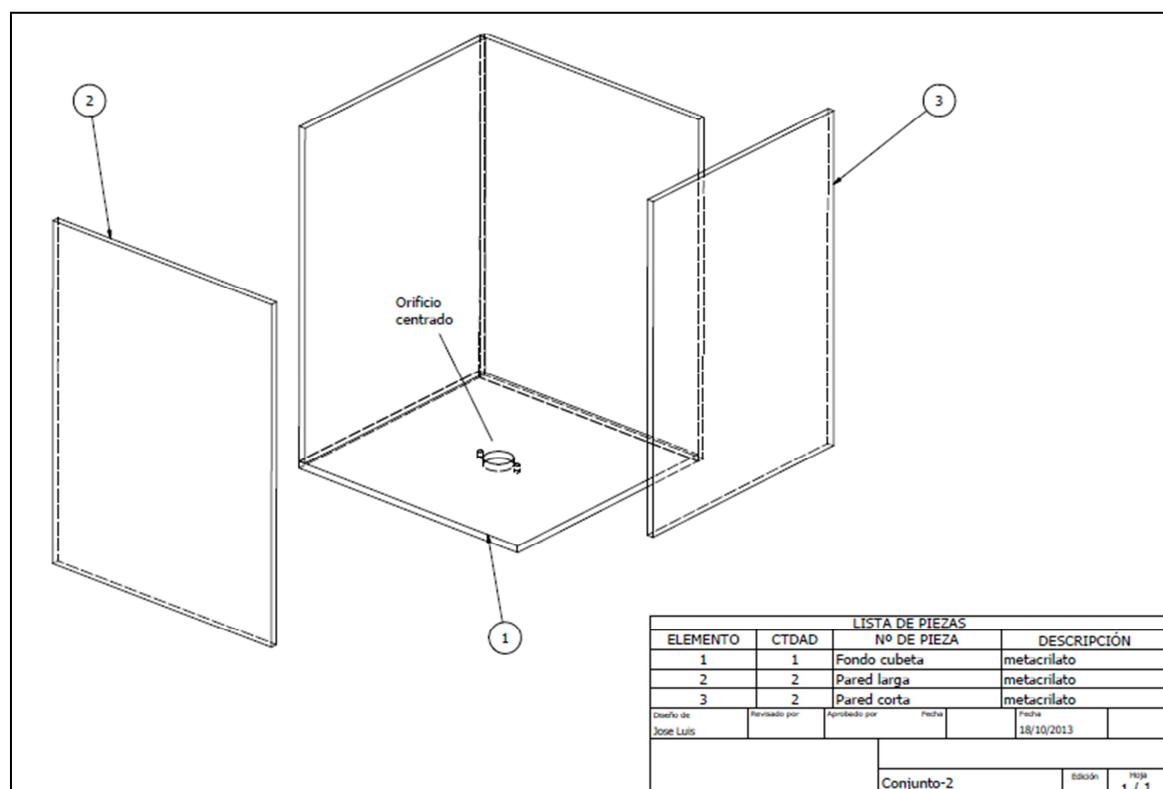
### Mechanical Specifications



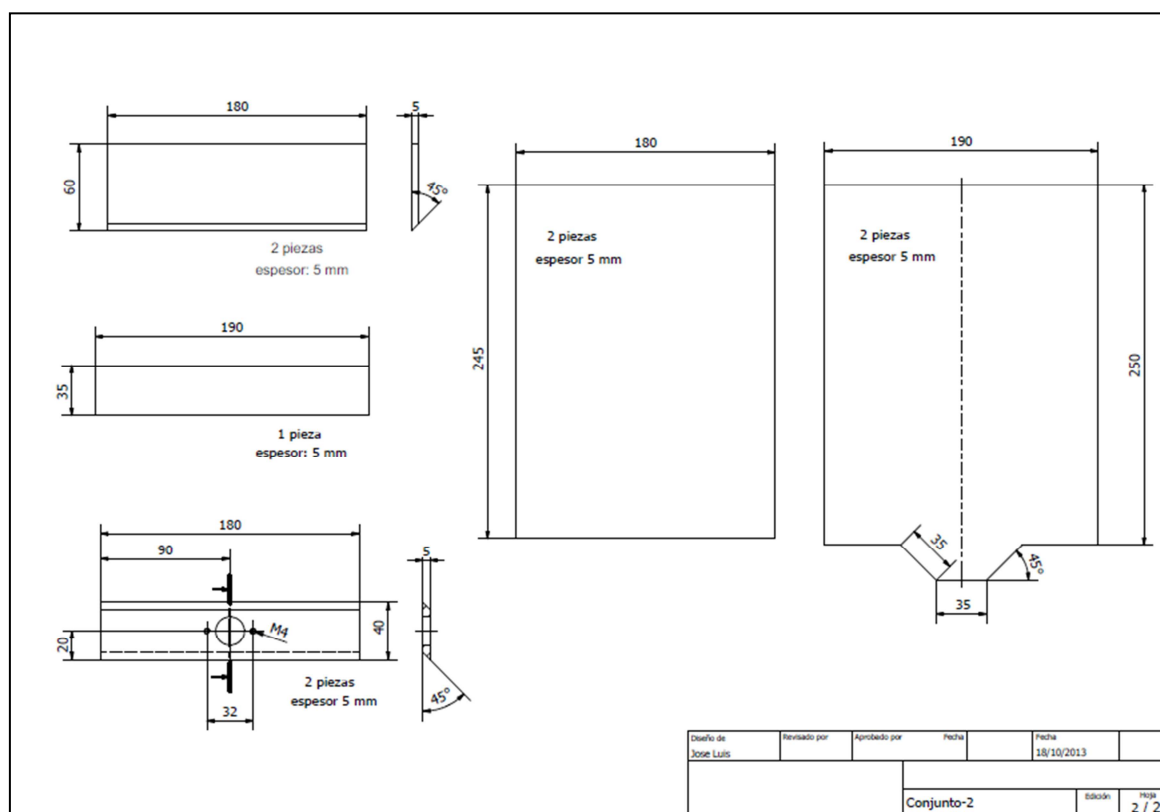
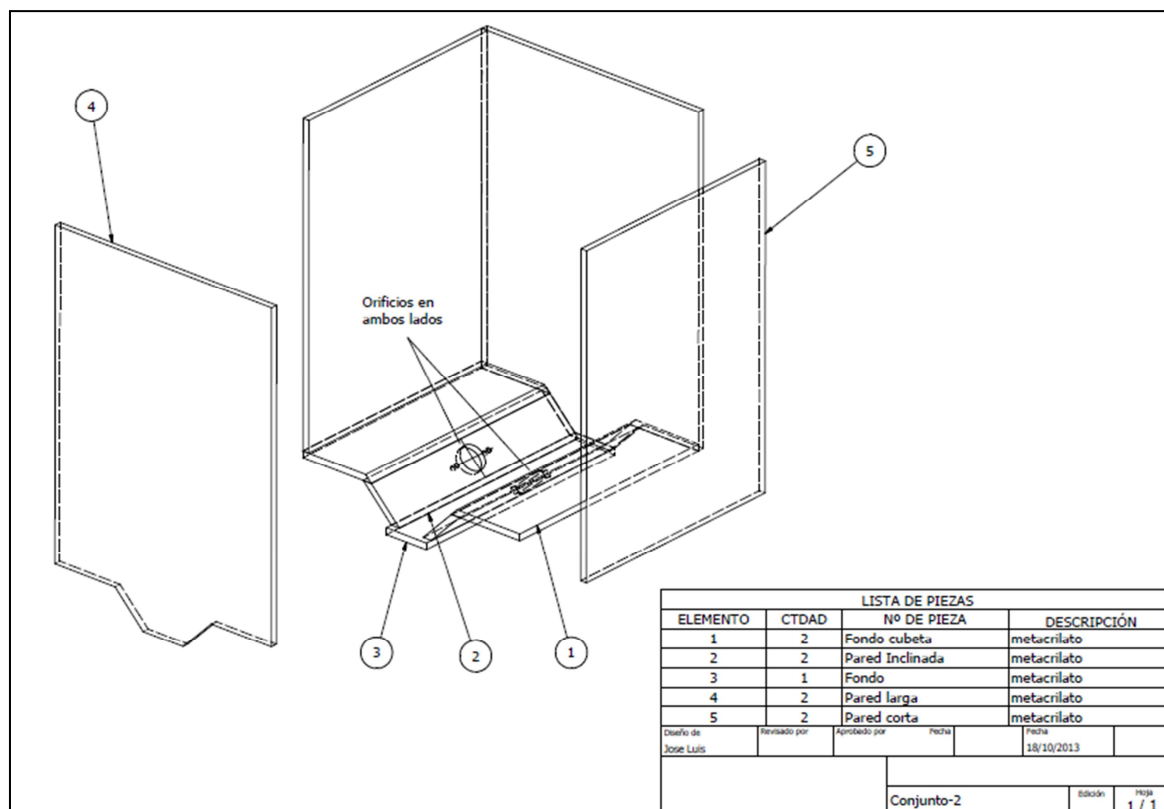
**ONDA**

1290 Hammerwood Avenue, Sunnyvale, CA 94089, USA | Tel: 408.745.0383 | Fax: 408.745.0956 | [www.onda.com](http://www.onda.com)

- 3. Recipiente con 1 piezoeléctrico.





- 4. Recipiente con dos piezoeléctricos.



- 5. Dispositivo de guiado.

## TECHSPEC® English Long Travel Linear Translation Stages and Tracks

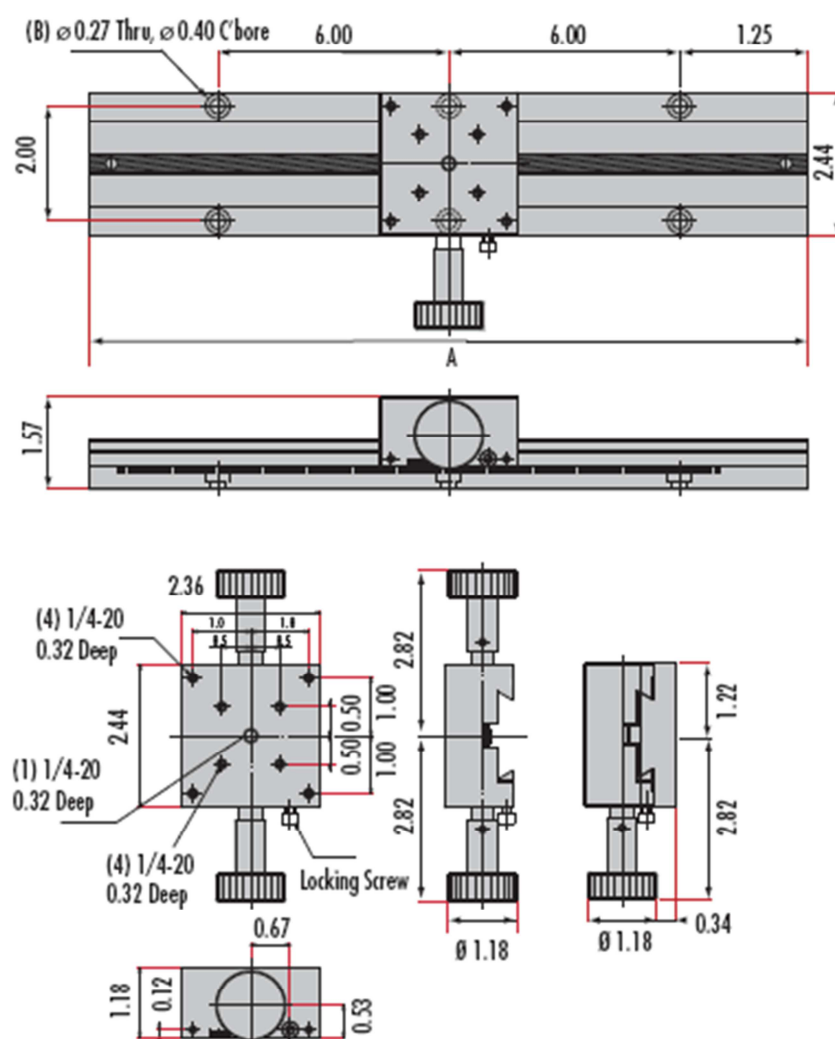


[View More Images](#)  

One Knob Stage and Track Combination

- Stage Features 1/4-20 Mounting Holes
- 6", 12", and 24" Travel Options for Tracks
- Vernier Scale with 0.01" Resolution

Our English Long Travel Rack & Pinion stages have been designed to allow for easy integration of standard English positioning equipment. The stage features 9 1/4-20 tapped holes while the track has C'bored holes for 1/4-20 socket head cap screws. Each stage includes Allen wrenches for both the tension and locking screws. Each track includes 1/4-20 socket head cap screws for mounting to an English breadboard, using the 6" spaced counterbores.



Units: Inches

- 6. Fuente de alimentación.

DC OUTPUT		
	Output Volts (V)	Output Amps (A)
GPR-1810HD	0 ~ 18	0 ~ 10
GPR-3060D	0 ~ 30	0 ~ 6
GPR-6030D	0 ~ 60	0 ~ 3
CONSTANT VOLTAGE OPERATION		
Regulation	Line regulation $\leq 0.01\% + 3\text{mV}$ Load regulation $\leq 0.01\% + 5\text{mV}$ ( $<10\text{A}$ ) Load regulation $\leq 0.02\% + 5\text{mV}$ ( $\geq 10\text{A}$ )	
Ripple & Noise	$\leq 1\text{mVrms}$ (5Hz ~ 1MHz)	
Recovery Time	$\leq 100\mu\text{S}$ ( 50% load change, minimum load 0.5A )	
Output range	0 to rating voltage continuously adjustable	
CONSTANT CURRENT OPERATION		
Regulation	Line regulation $\leq 0.2\% + 3\text{mA}$ Load regulation $\leq 0.2\% + 3\text{mA}$	
Ripple Current	$\leq 3\text{mA}_{\text{rms}}$	
Output Range	0 to rating current continuously adjustable	
METER		
Type	3 1/2 Digits 0.5" LED Display	
Accuracy	$\pm( 0.5\% \text{ of rdg} + 2 \text{ digits} )$	
INSULATION		
Chassis and Terminal	20M $\Omega$ or above (DC 500V)	
Chassis and AC Cord	30M $\Omega$ or above (DC 500V)	
POWER SOURCE		
	AC 100V/120V/220V/240V $\pm 10\%$ , 50/60Hz	
ACCESSORIES		
	User manual x 1 Power cord x 1 Test Lead GTL-104 x 1	
DIMENSIONS & WEIGHT		
	255(W) x 145(H) x 335(D)mm Approx. 11.5kg	



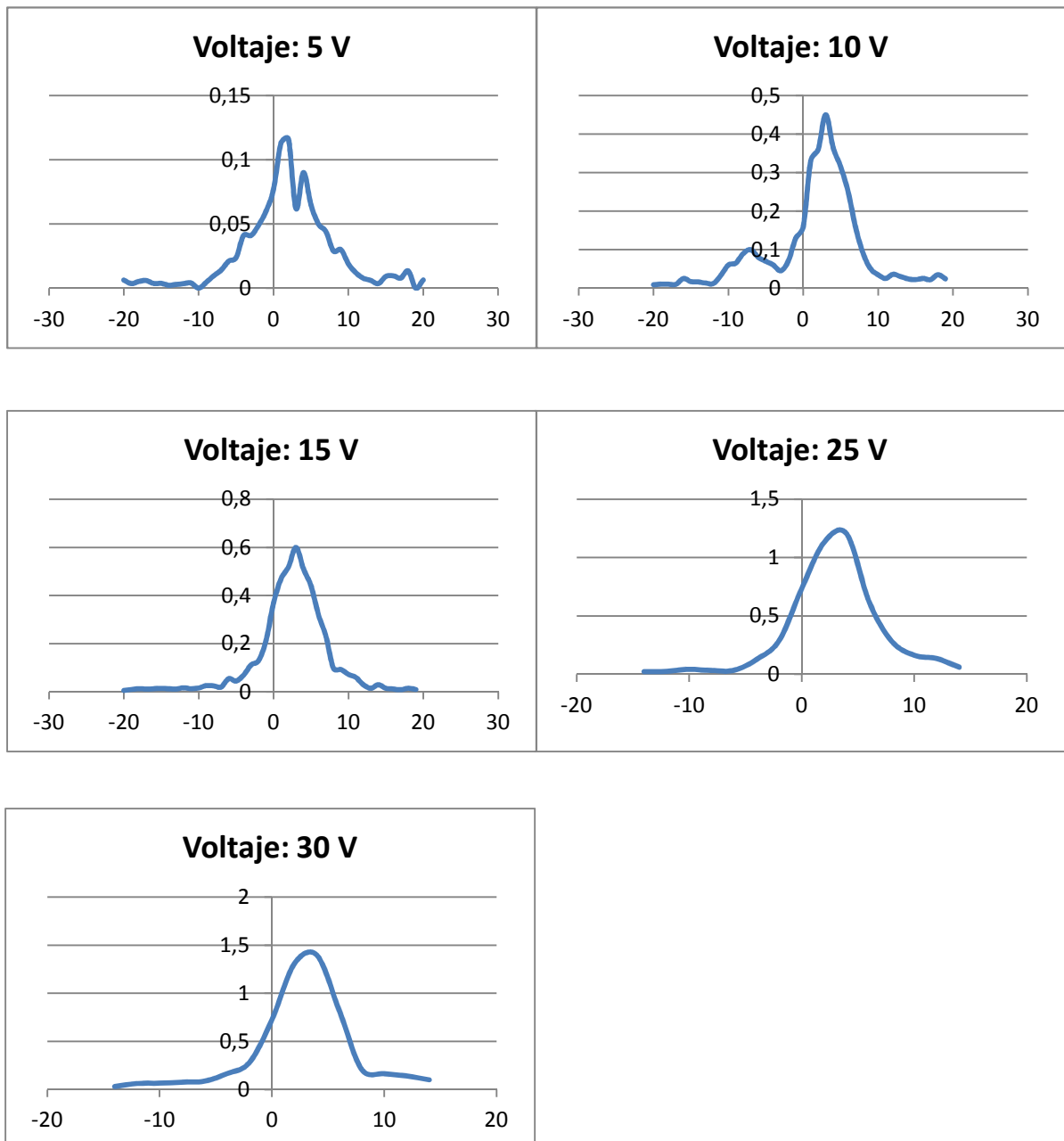
## **ANEXO II: RESULTADOS DE LAS MEDIDAS**

- 1) GRAFICAS OBTENIDAS DEL EXPERIMENTO 3.1.1
- 2) GRAFICAS OBTENIDAS DEL EXPERIMENTO 3.1.2
- 3) GRAFICAS OBTENIDAS DEL EXPERIMENTO 3.1.3
- 4) GRAFICAS OBTENIDAS DEL EXPERIMENTO 3.1.4
- 5) GRAFICAS OBTENIDAS DEL EXPERIMENTO 3.2

**1. Graficas obtenidas del experimento 3.1.1 (medidas con una altura fija de lámina fluida.)**

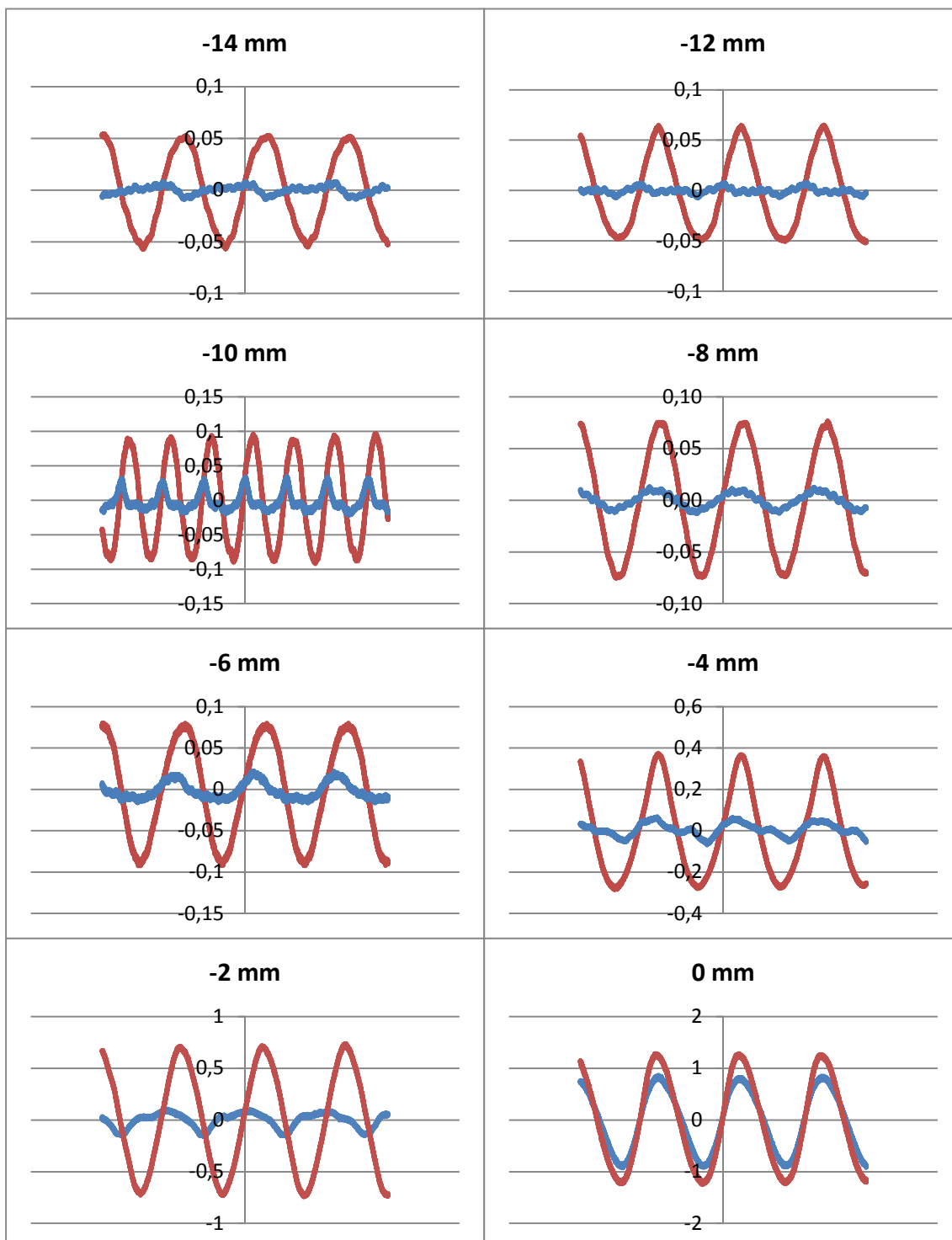
Las graficas representan voltaje eficaz de la perturbación frente al desplazamiento horizontal.

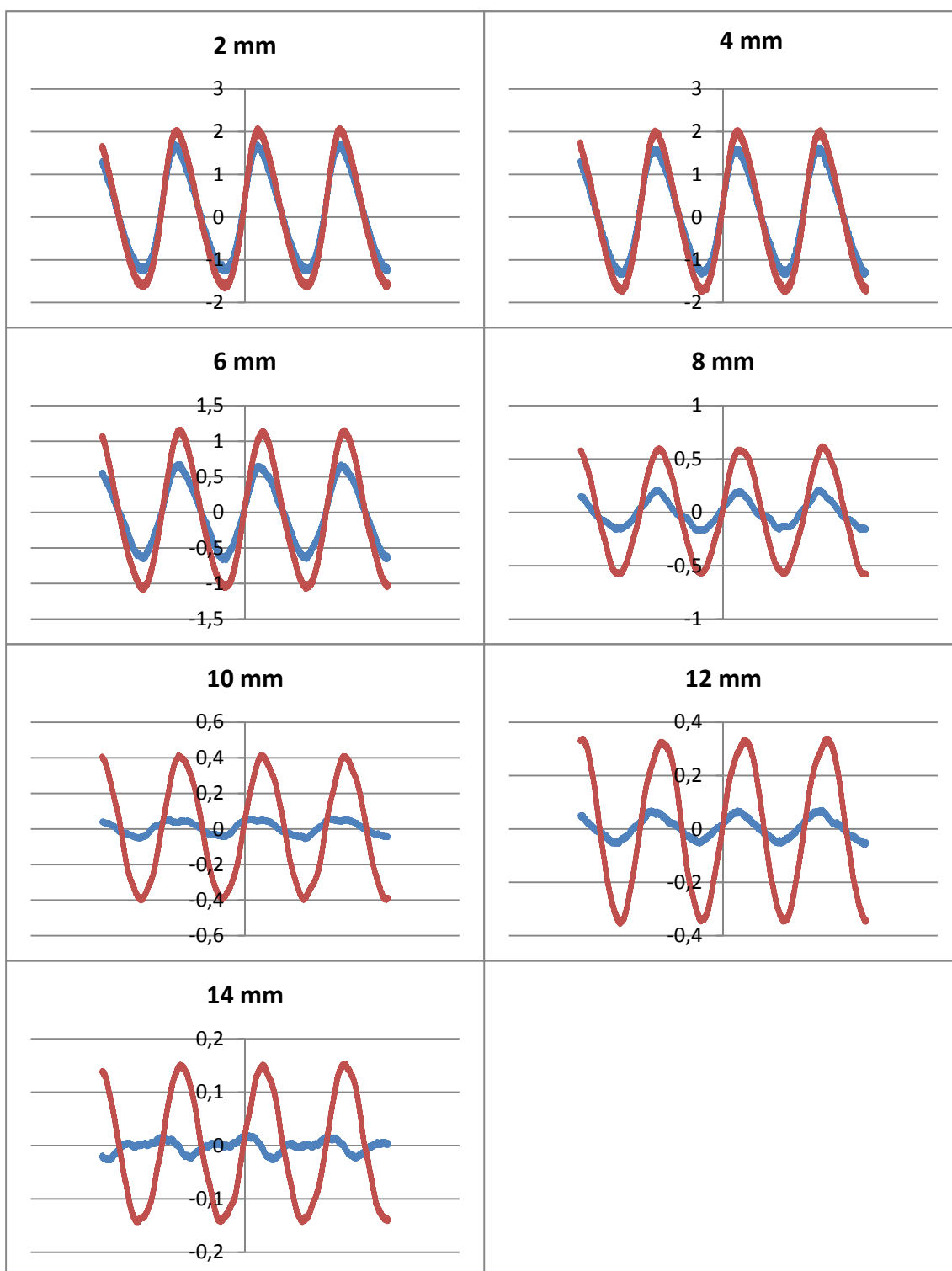
- Profundidad: 5 mm



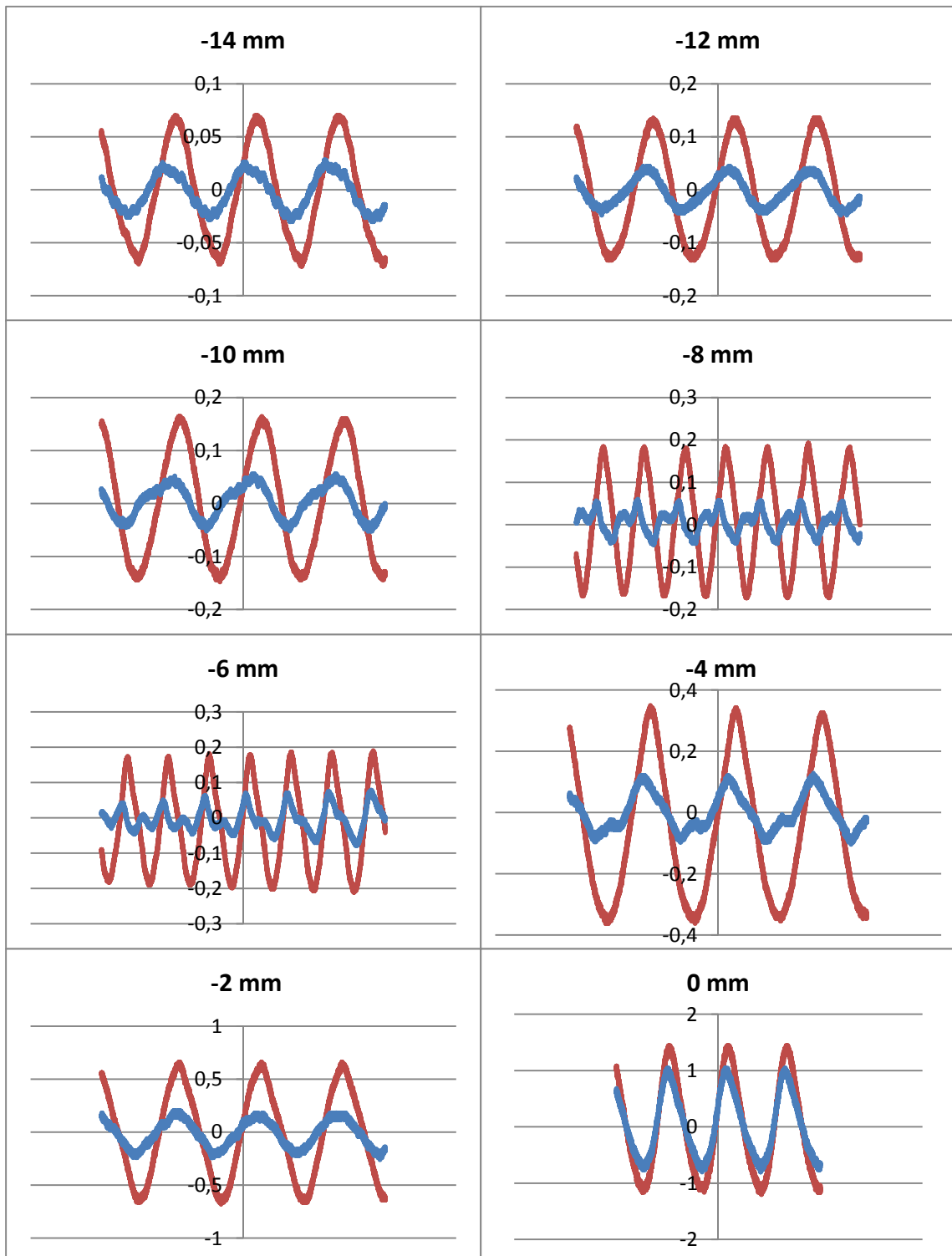
Se registraron las ondas de máxima y mínima perturbación en cada localización para la representación de las curvas de perturbaciones de 25 y 30 V en función del desplazamiento horizontal. Todas ondas tienen una frecuencia de 1,75 MHz.

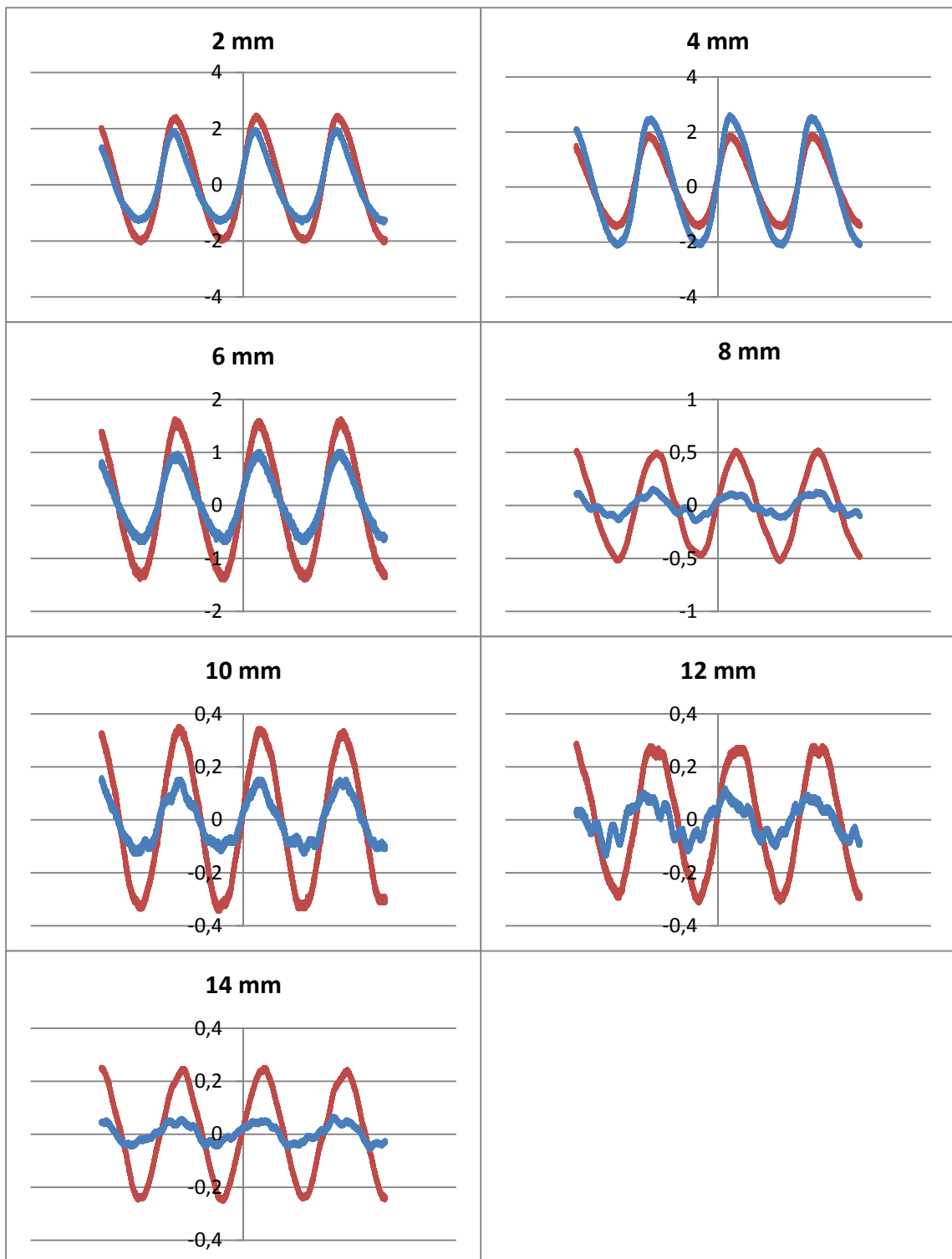
- 25 Voltios.



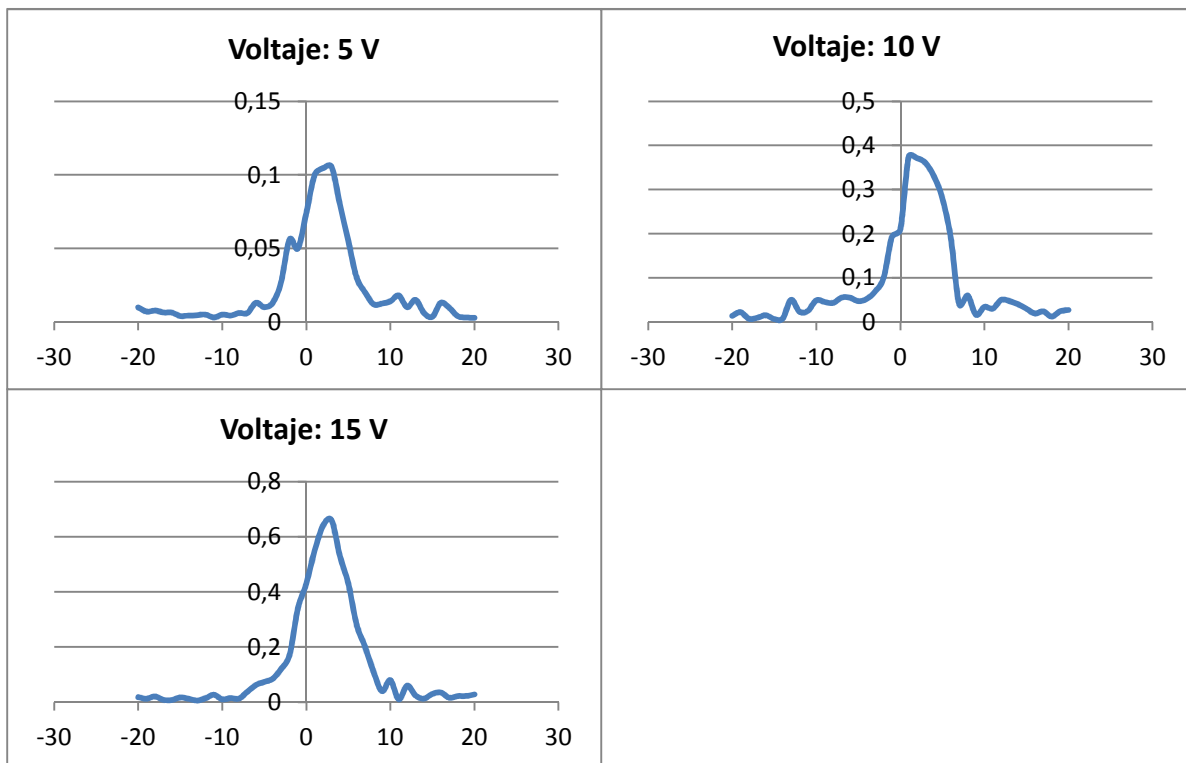


- 30 Voltios

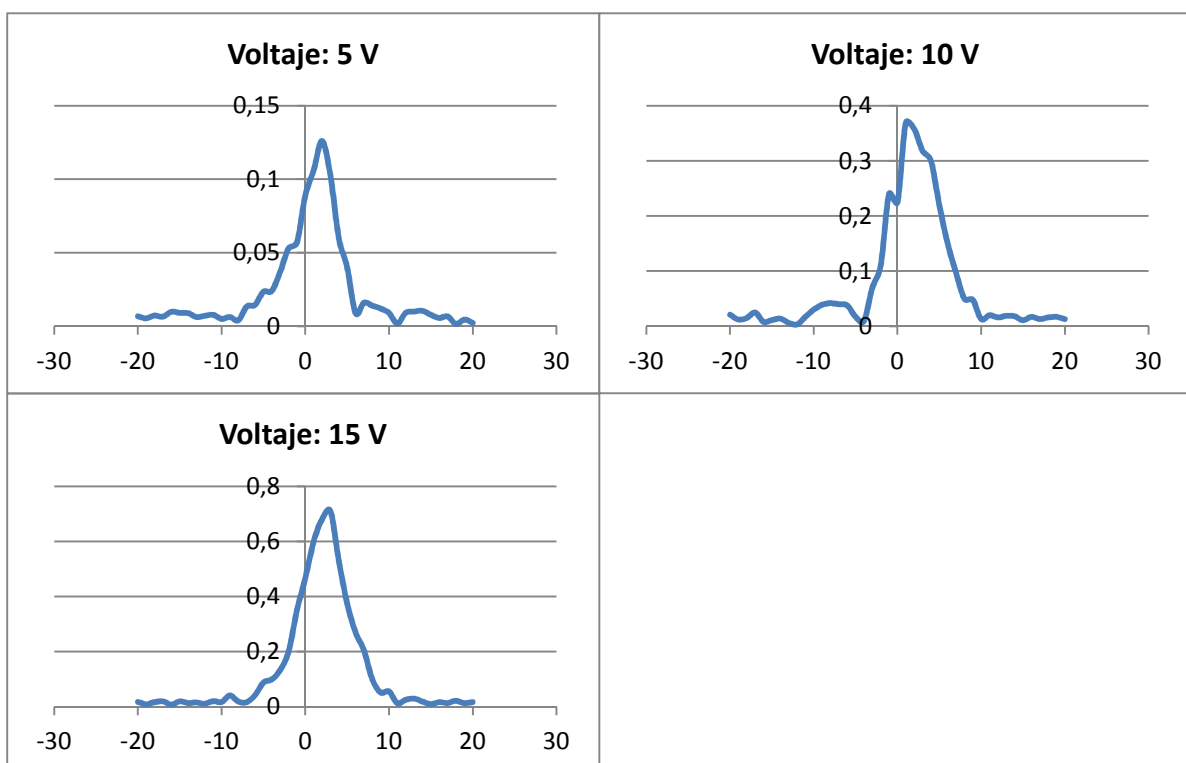




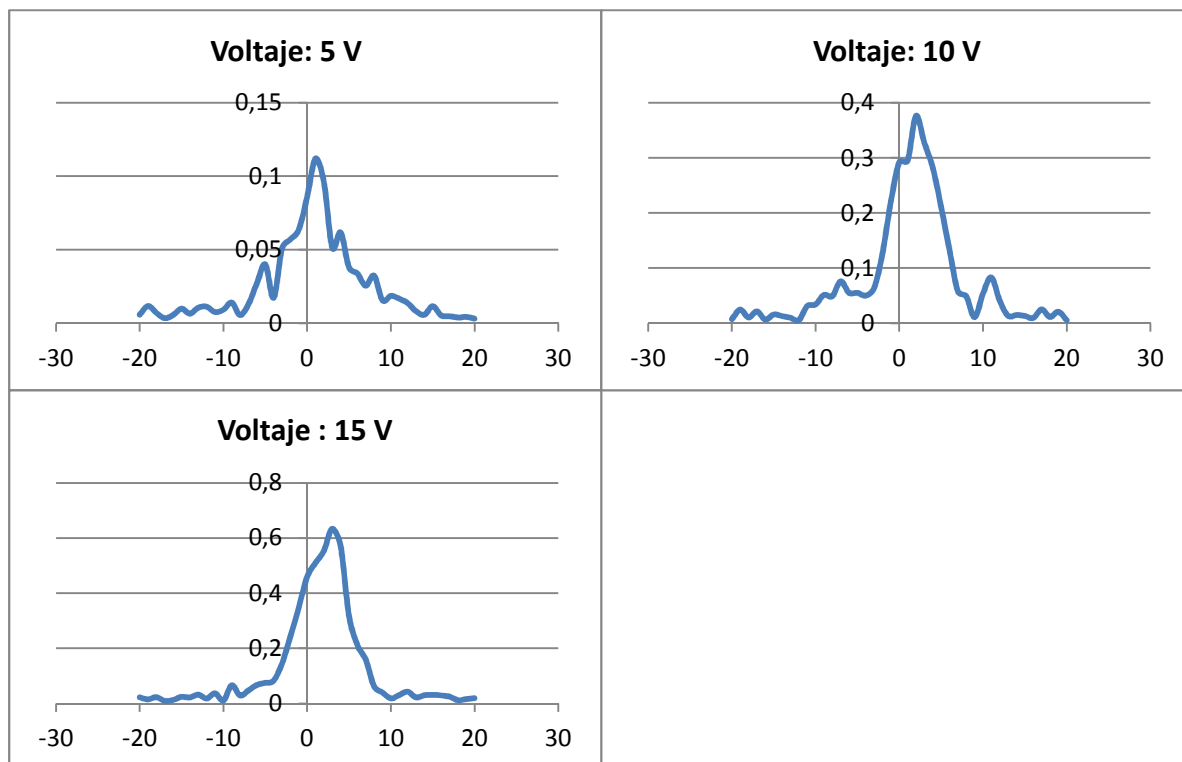
- Profundidad: 10 mm



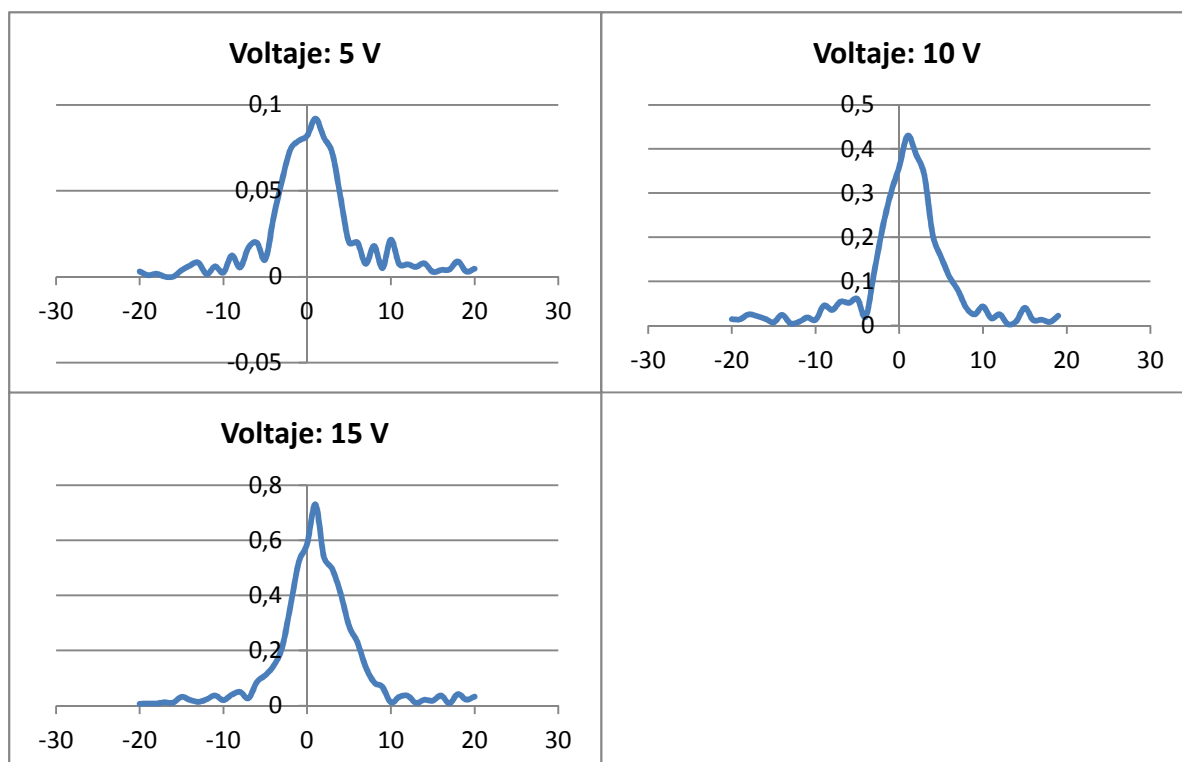
- Profundidad: 15 mm



- Profundidad: 20 mm

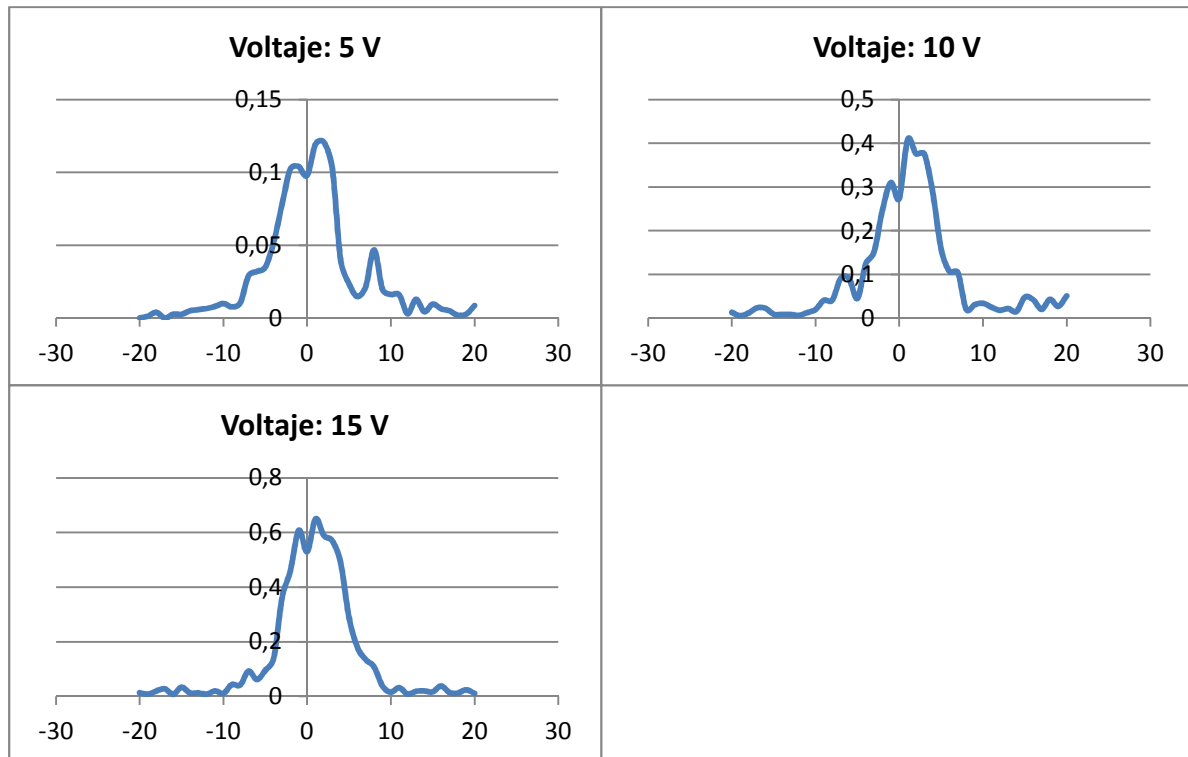


- Profundidad: 25 mm





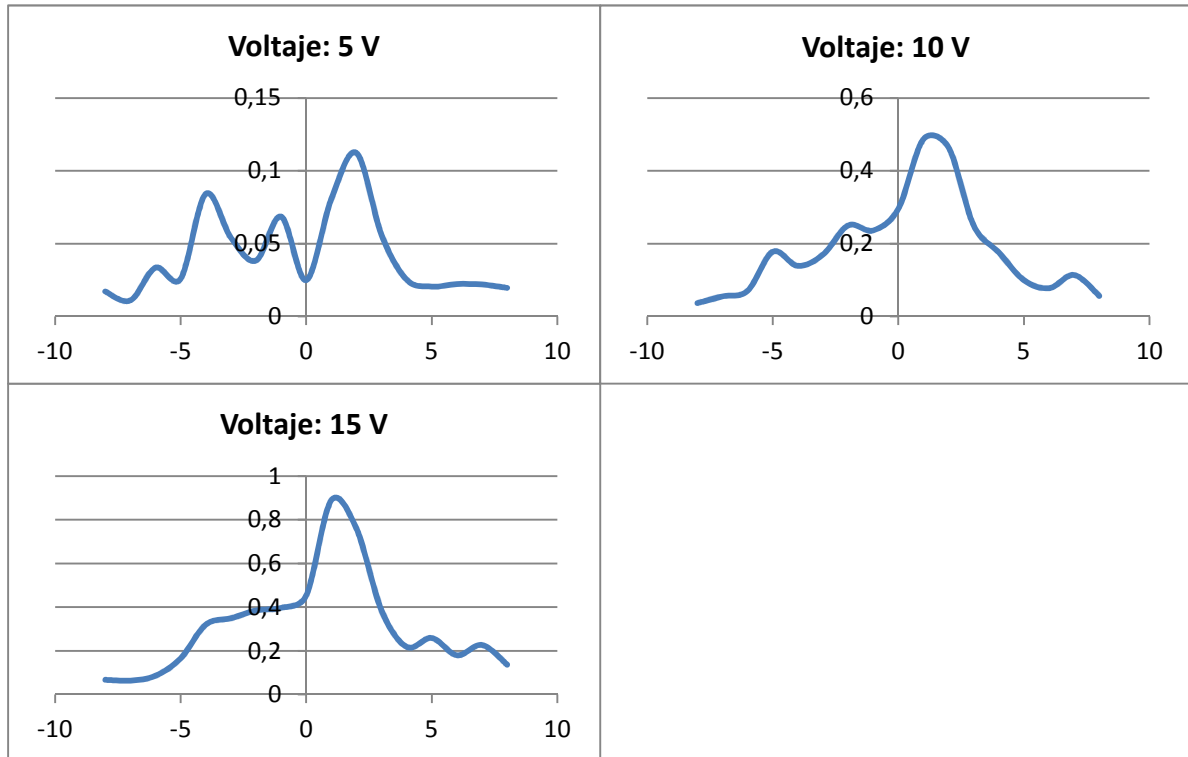
- Profundidad: 30 mm



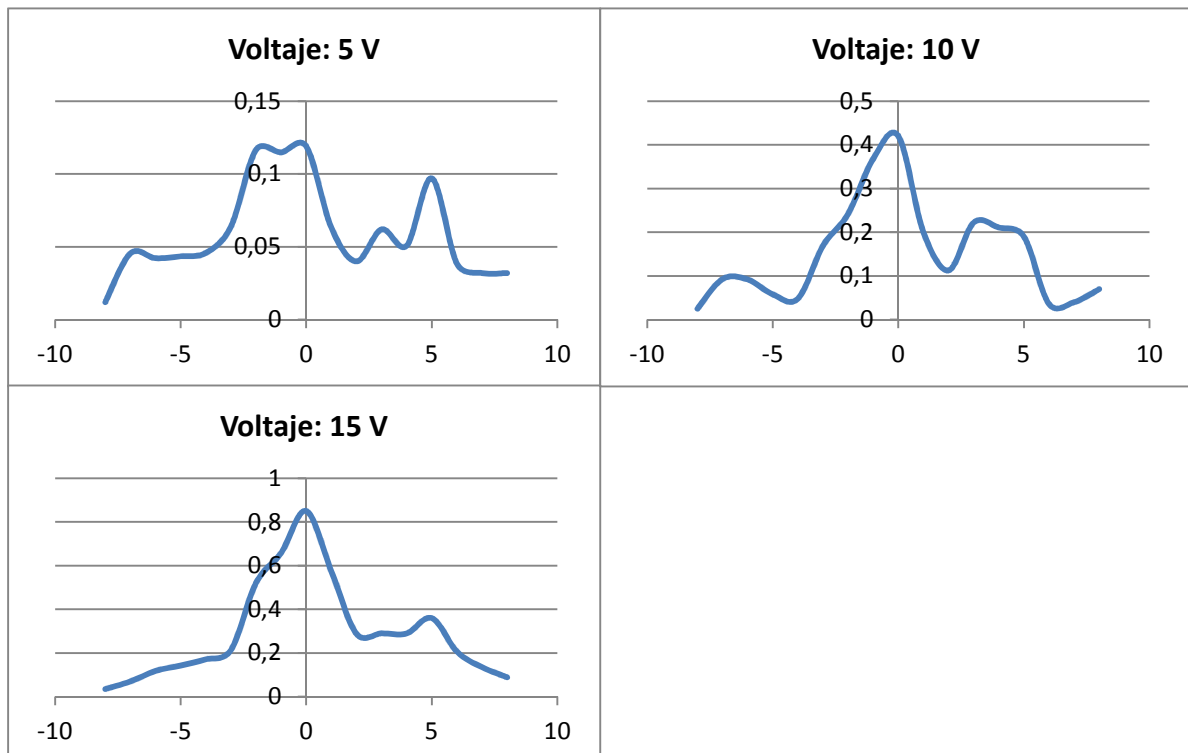
## 2. Graficas obtenidas del experimento 3.1.2 (medidas a distancias muy próximas al disco.)

Las graficas representan voltaje eficaz de la perturbación frente al desplazamiento horizontal.

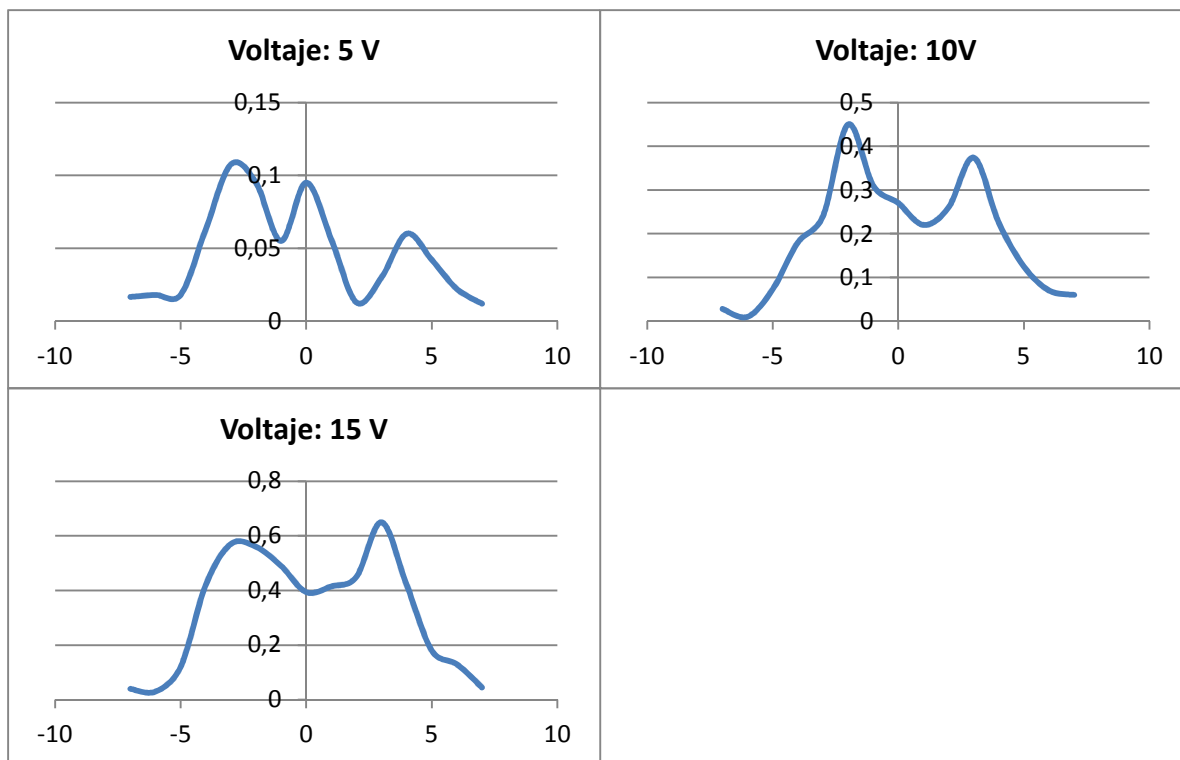
- Altura de medición: 5.8 mm



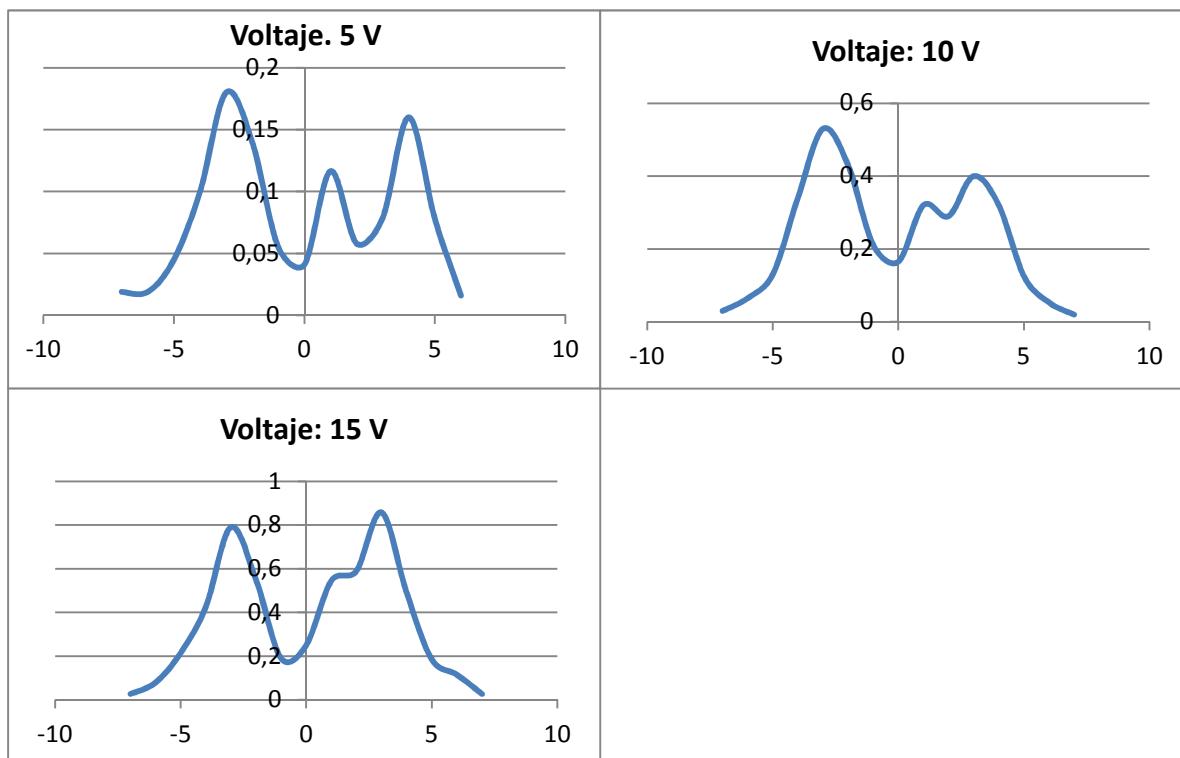
- Altura de medición: 3.8 mm



- Altura de medición: 1.8 mm



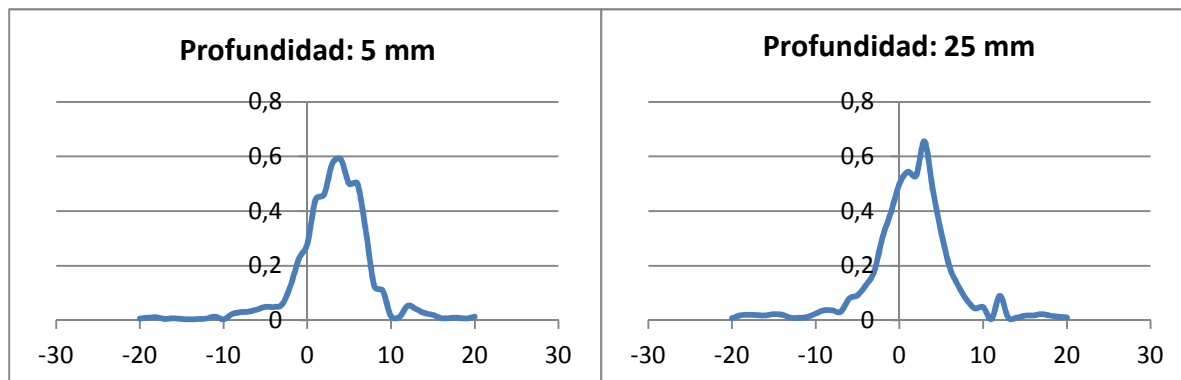
- Altura de medición : 0.5 mm



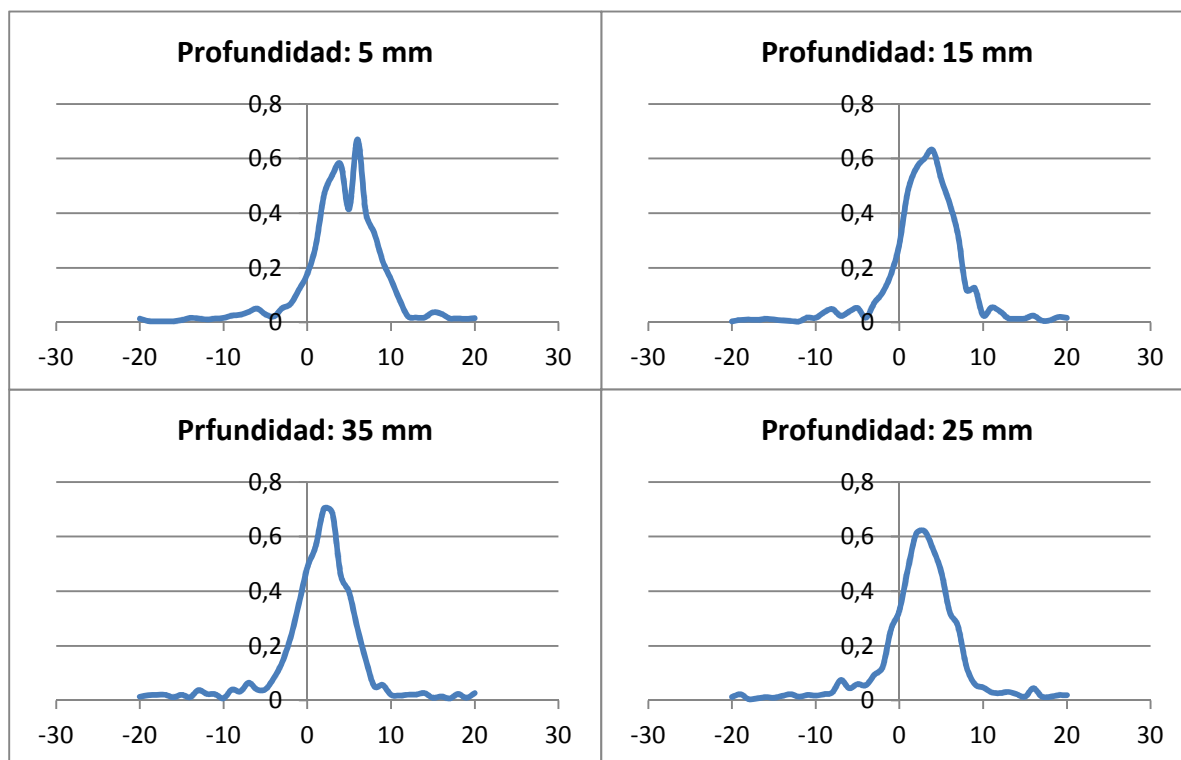
### 3. Gráficas obtenidas del experimento 3.1.3 (medidas a diferentes profundidades)

Las Gráficas corresponden a barridos con diferentes niveles de lámina y un voltaje de alimentación de 15 V.

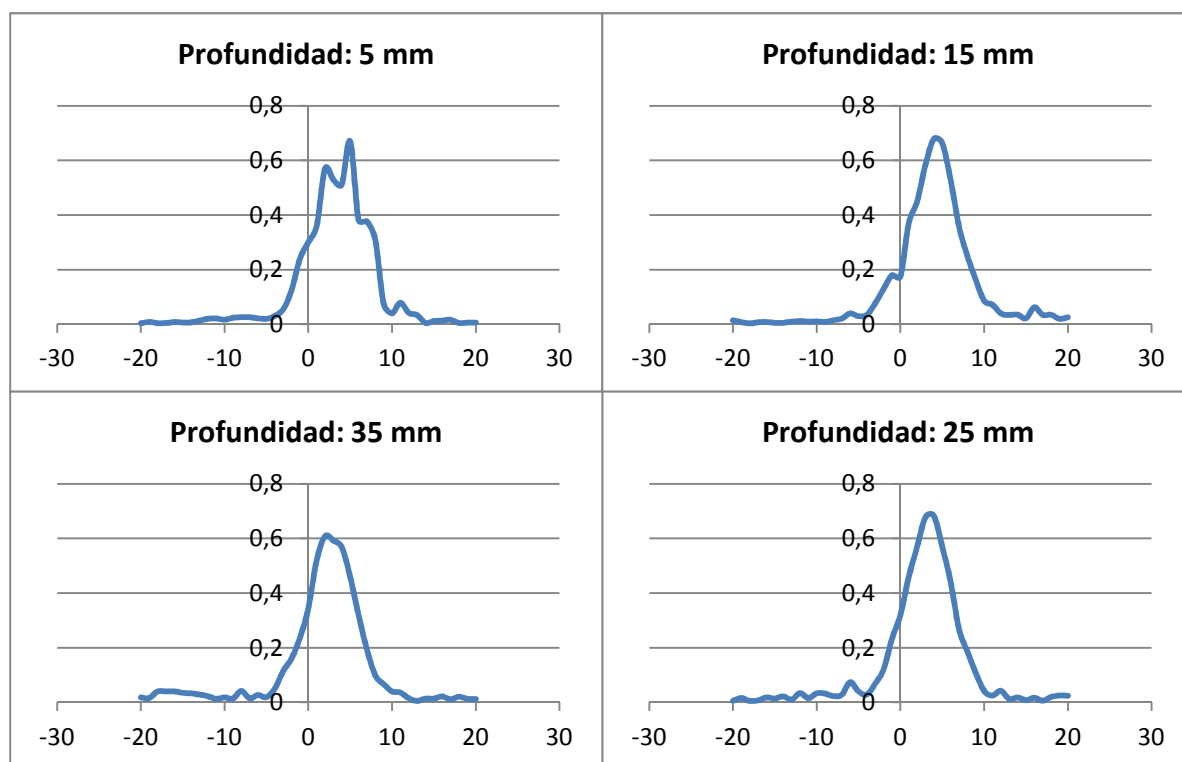
- Altura de lámina fluida: 45 mm.



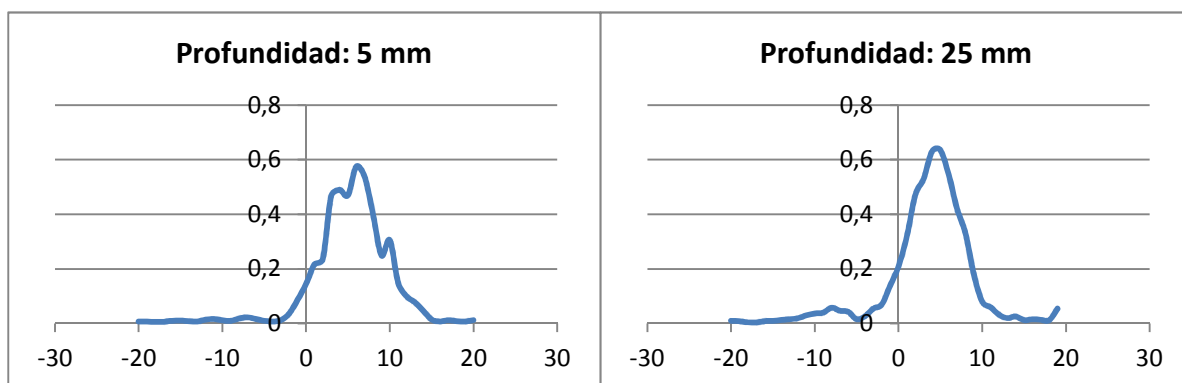
- Altura de lámina fluida: 55 mm.



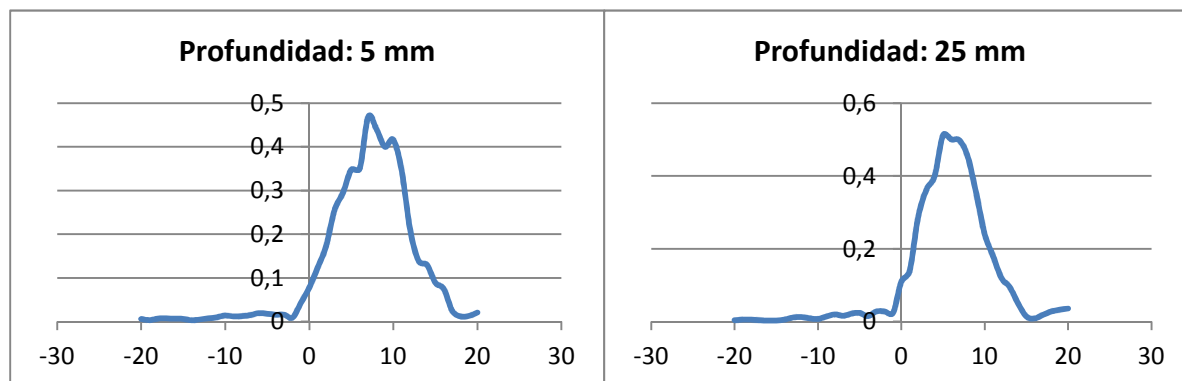
- Altura de lámina fluida: 65 mm.



- Altura de lámina fluida: 75 mm.

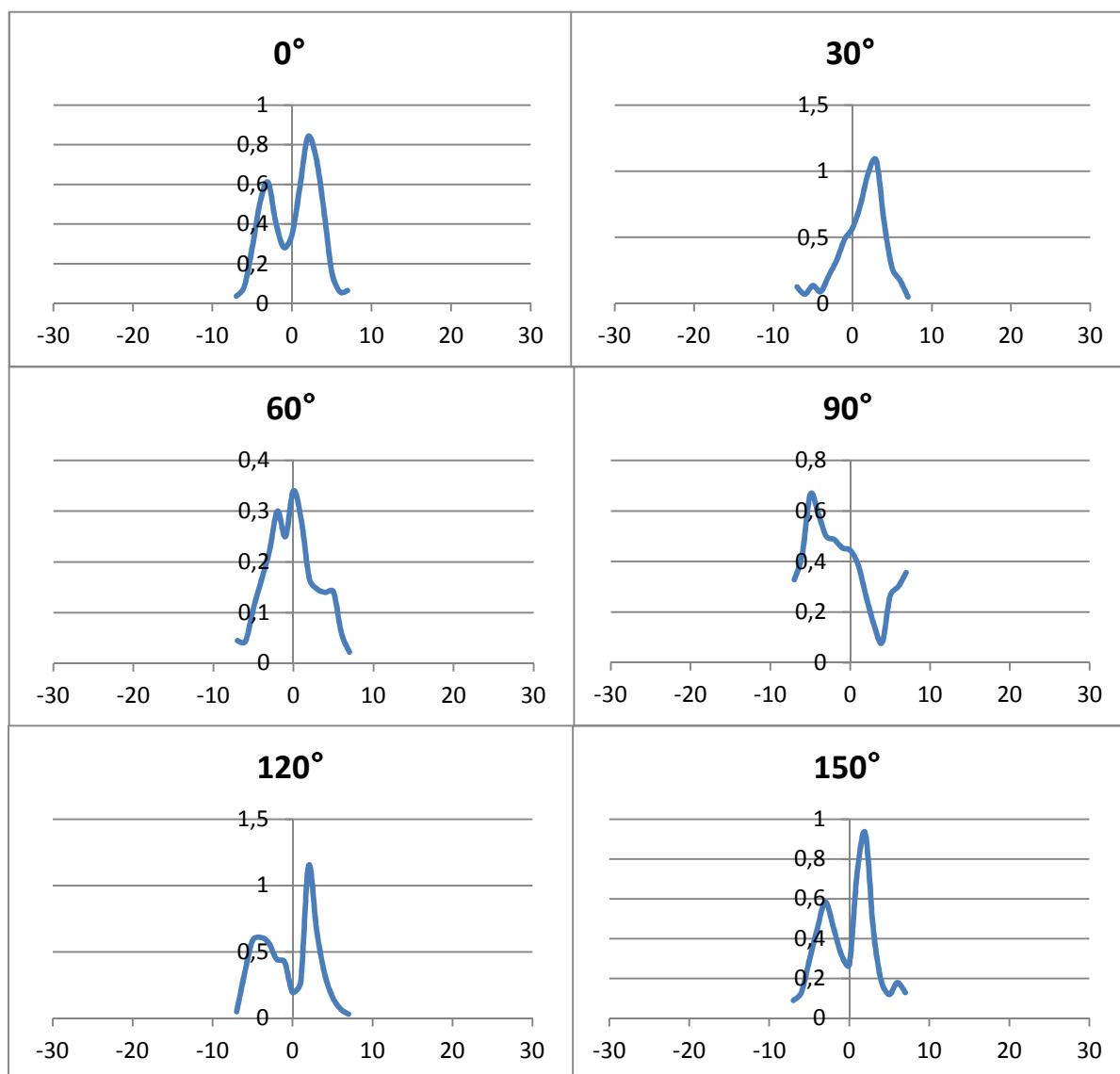


- Altura de lámina fluida: 100 mm.



**4. Graficas obtenidas del experimento 3.1.4 (Medidas angulares a 0.5 mm del disco).**

- Altura de medición: 0.5 mm; Voltaje de alimentación: 15 V.

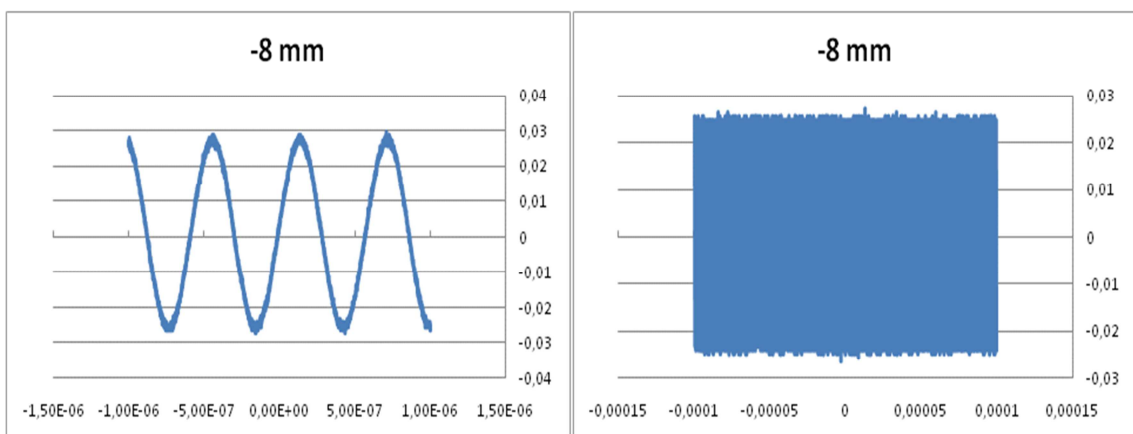
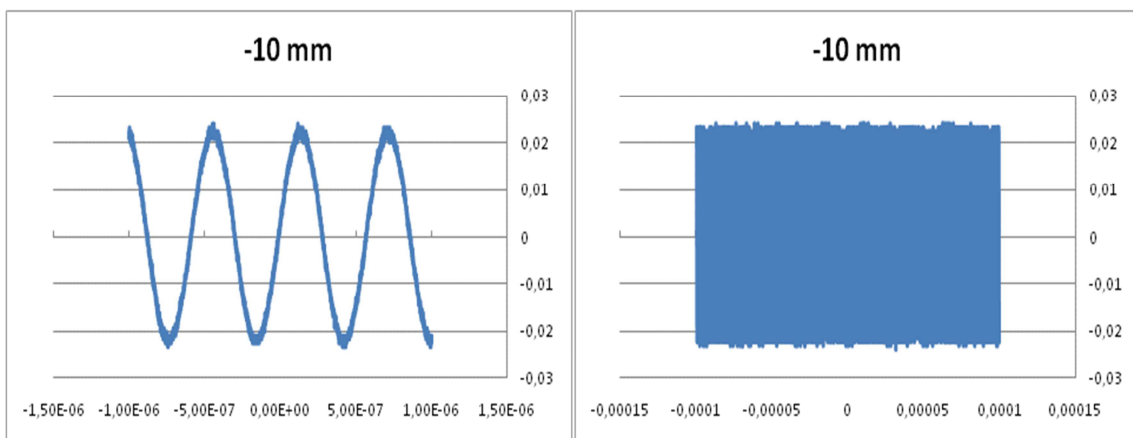
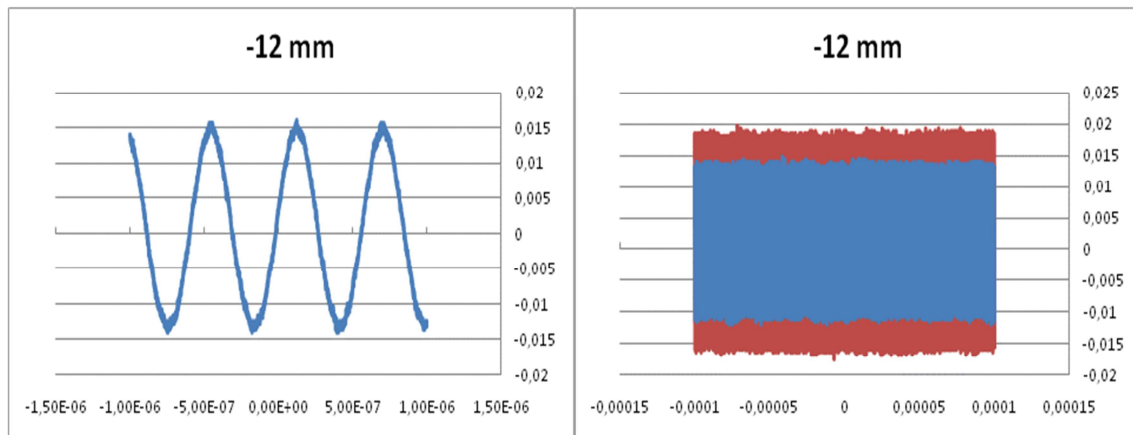


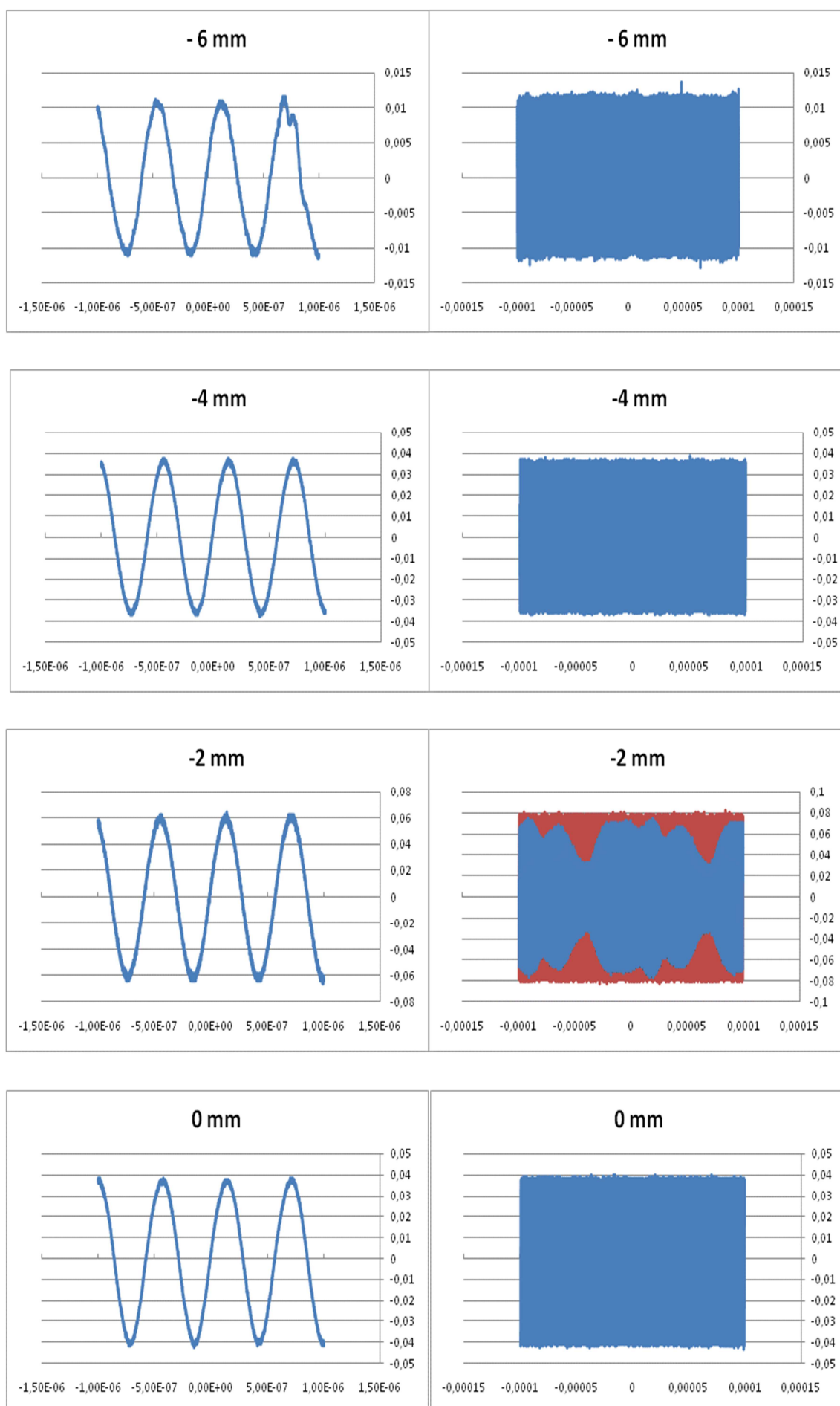
#### 4. Graficas obtenidas del experimento 3.2 (Medidas de interferencia de dos piezoelectricos)

Se registraron las ondas de perturbación en cada localización, con diferentes escalas temporales, para voltajes de alimentación de 7.5 y 10 V y para los distintos encendidos de los piezoelectricos (derecho, izquierdo, interferencia). En algunos casos se registran varias ondas para una misma escala temporal.

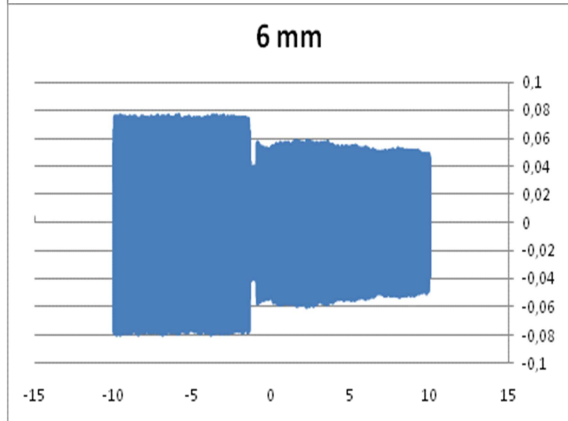
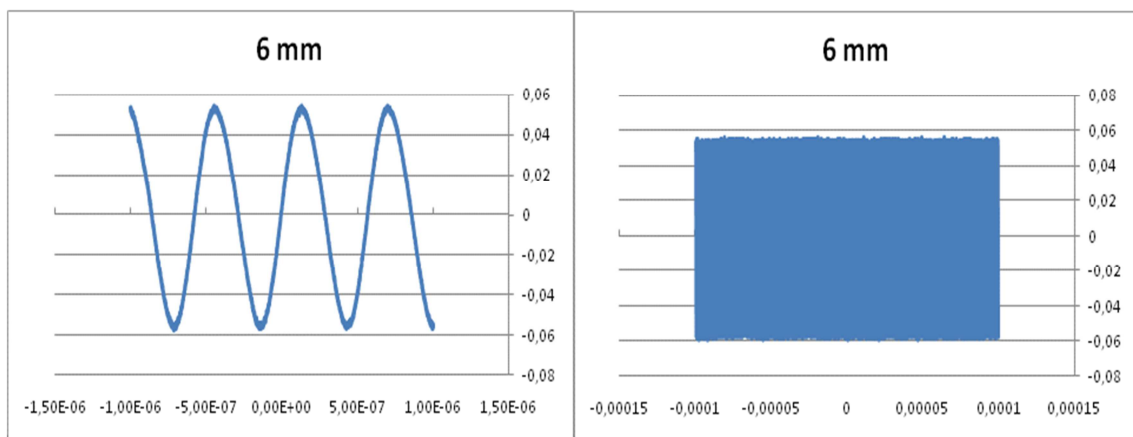
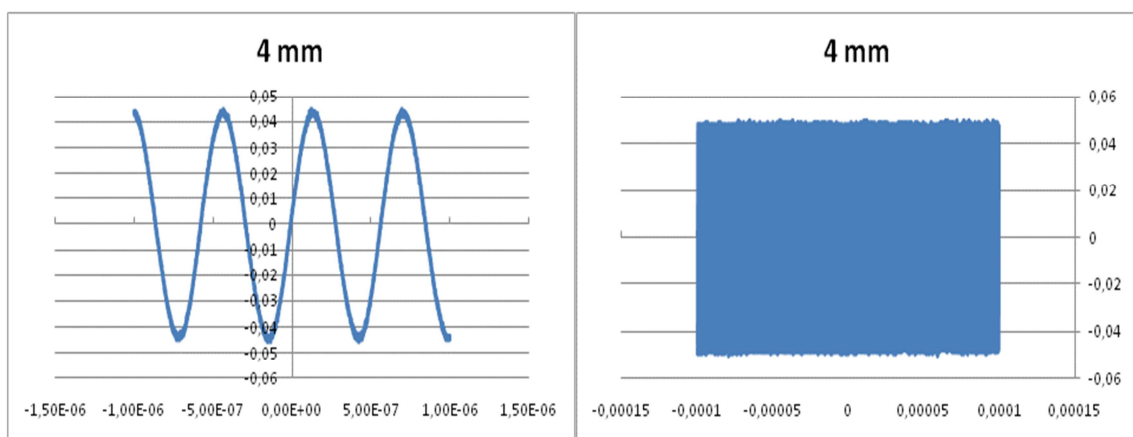
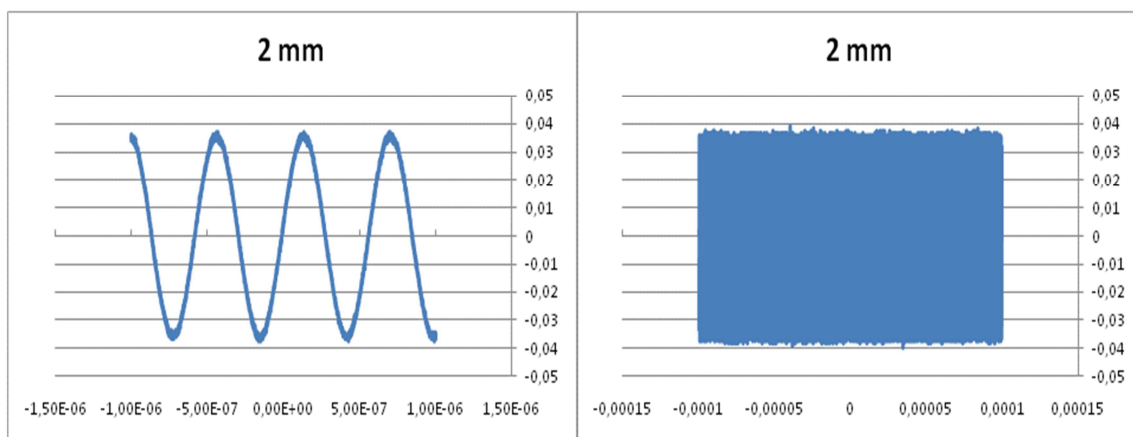
- **Voltaje: 7.5 V.**

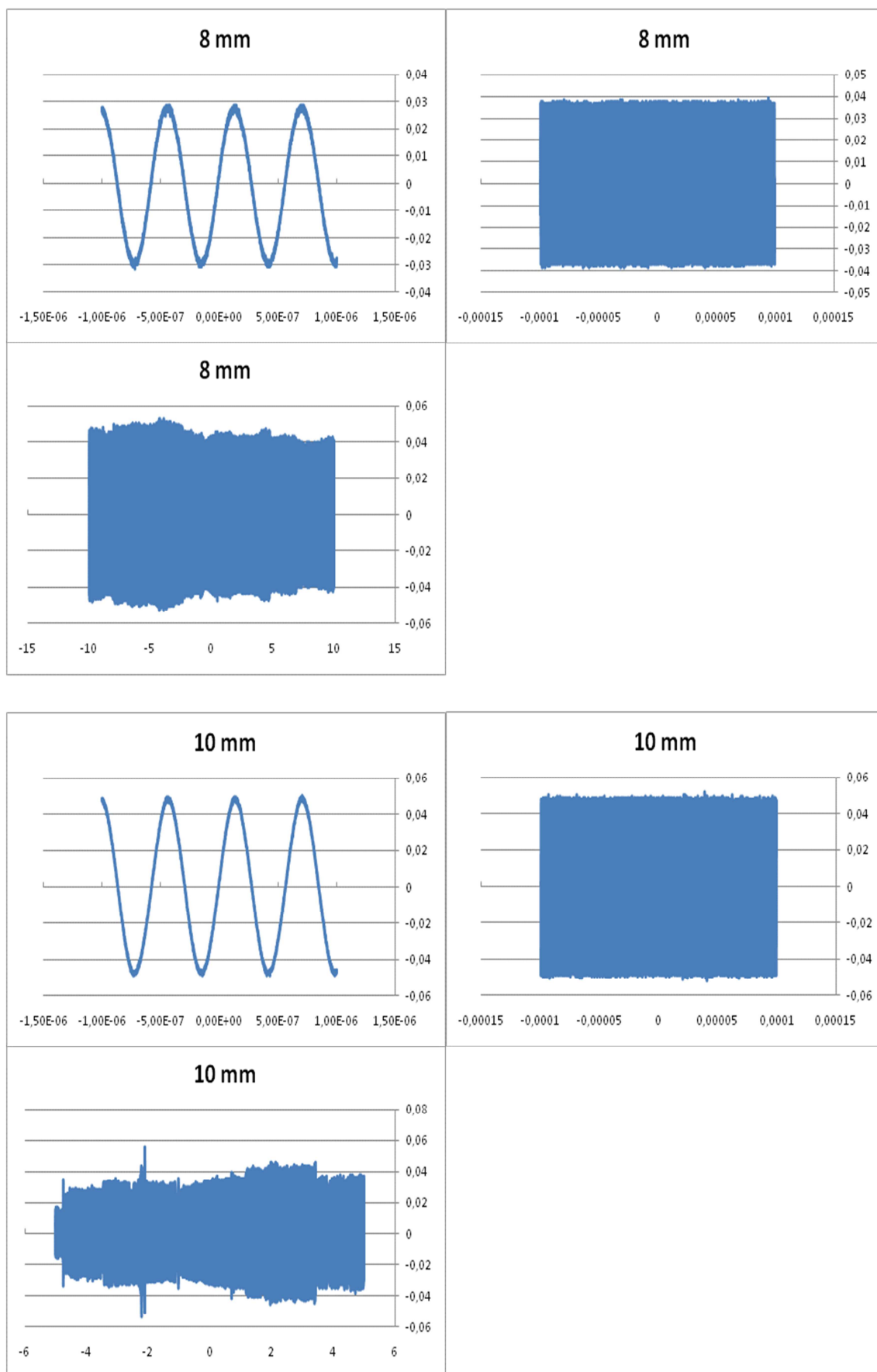
o **Disco encendido: Derecho.**

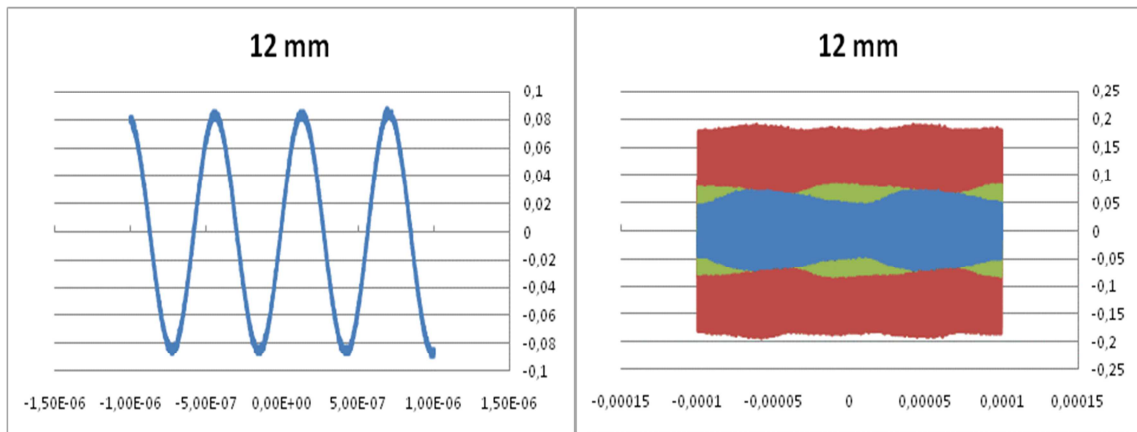






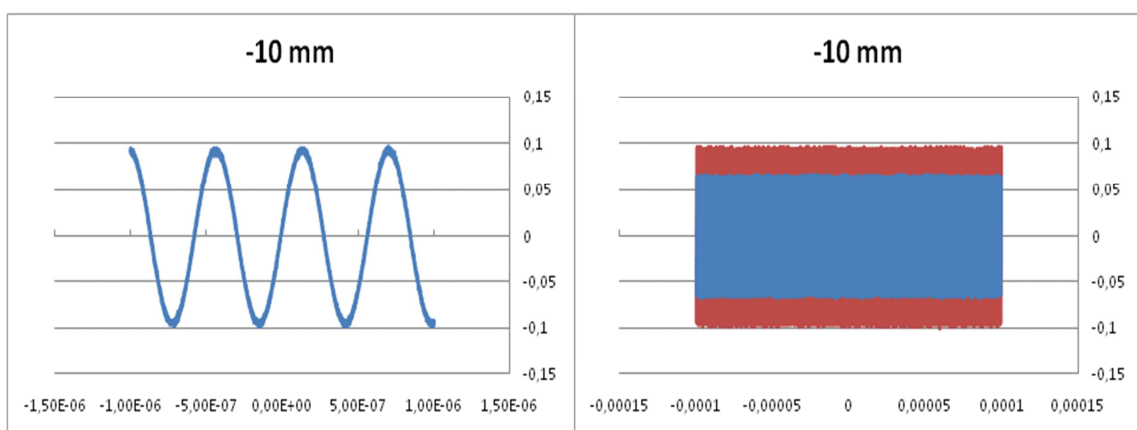
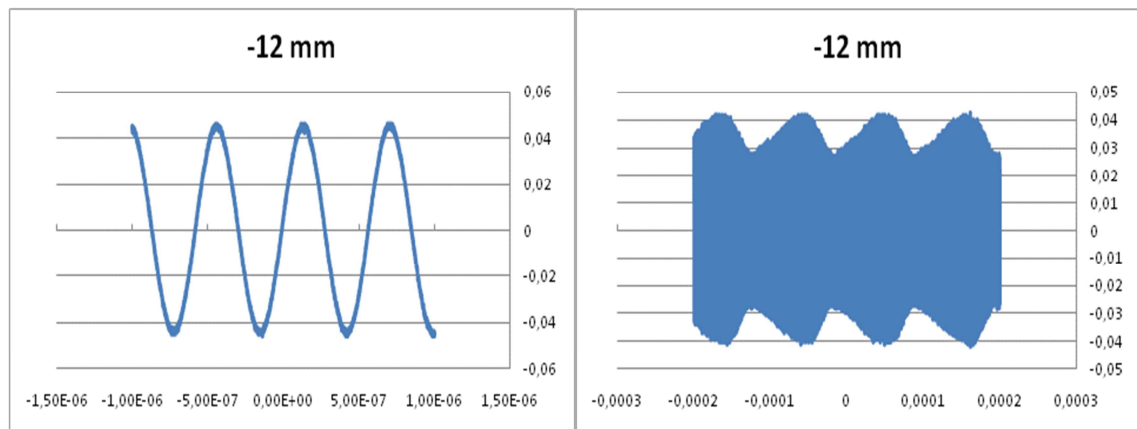


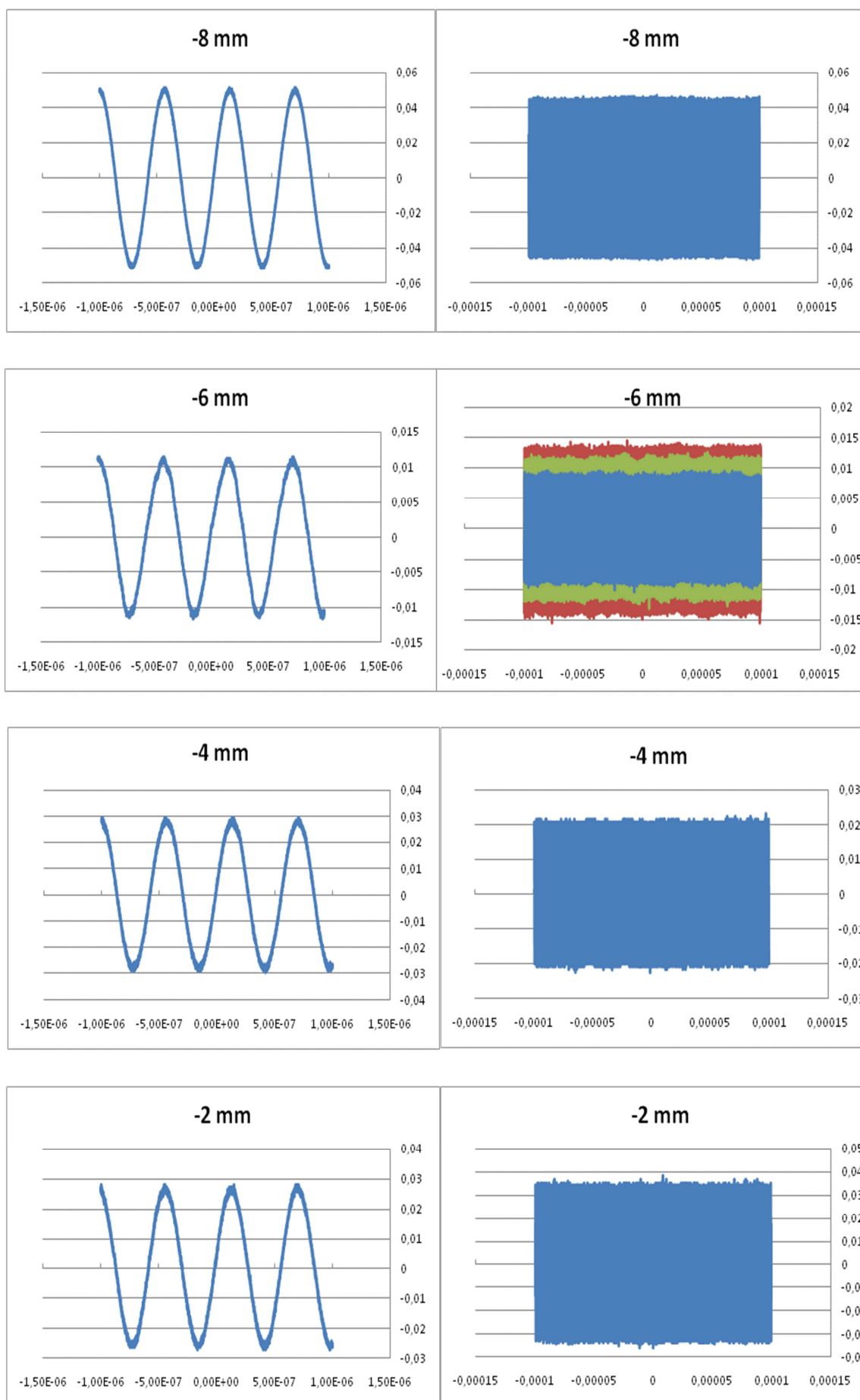


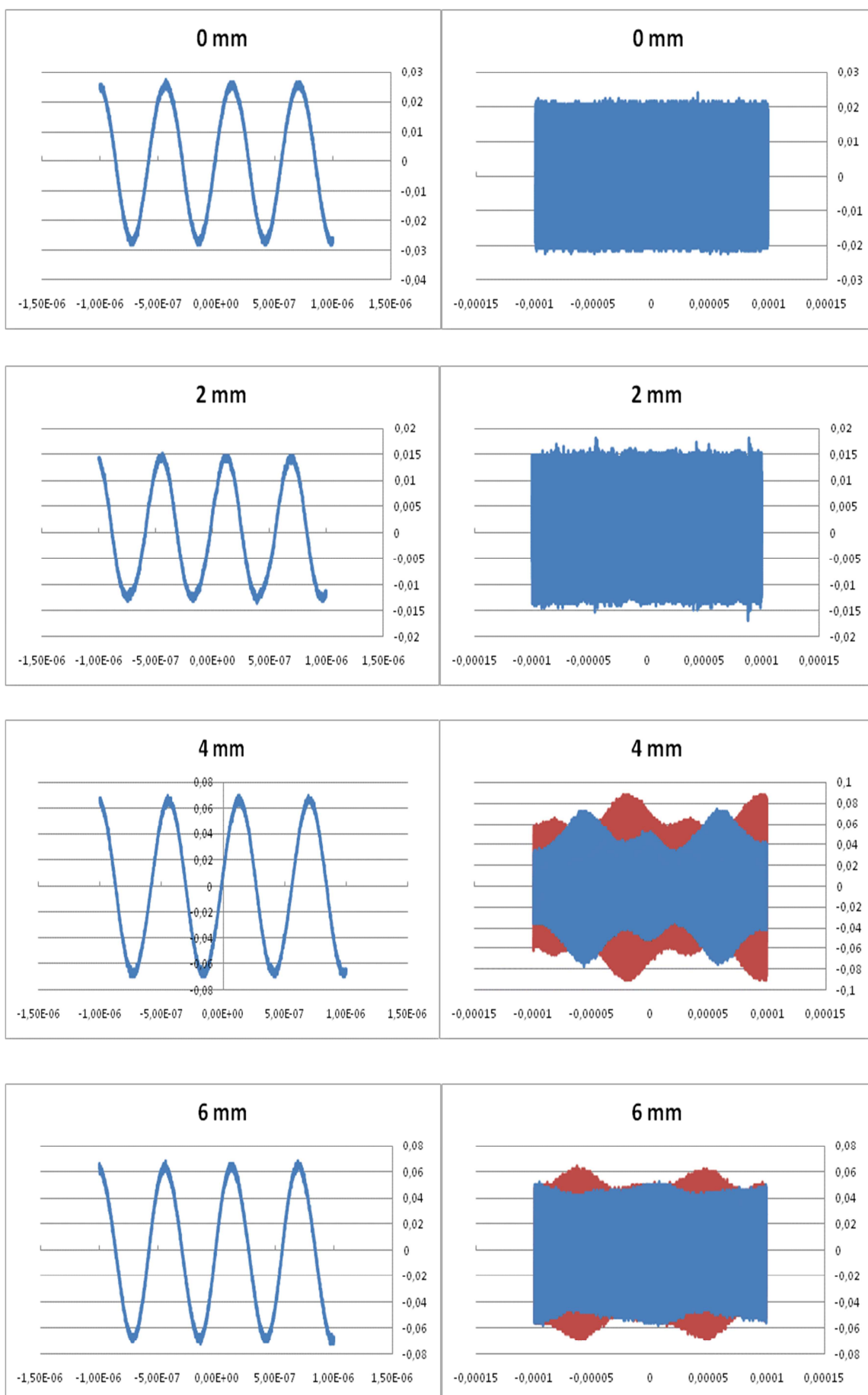


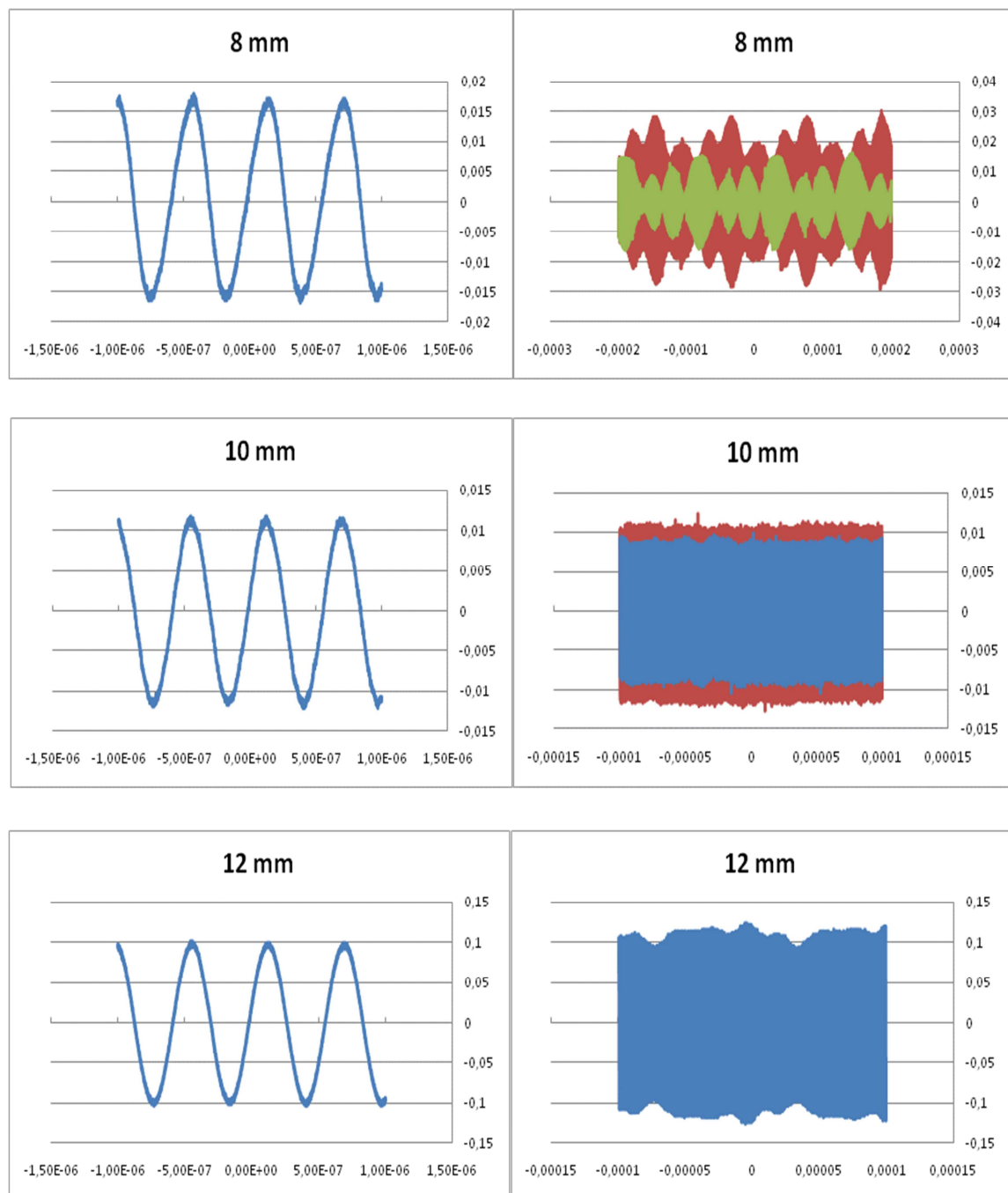
- **Voltaje: 7.5 V.**

○ **Disco encendido: Izquierdo.**



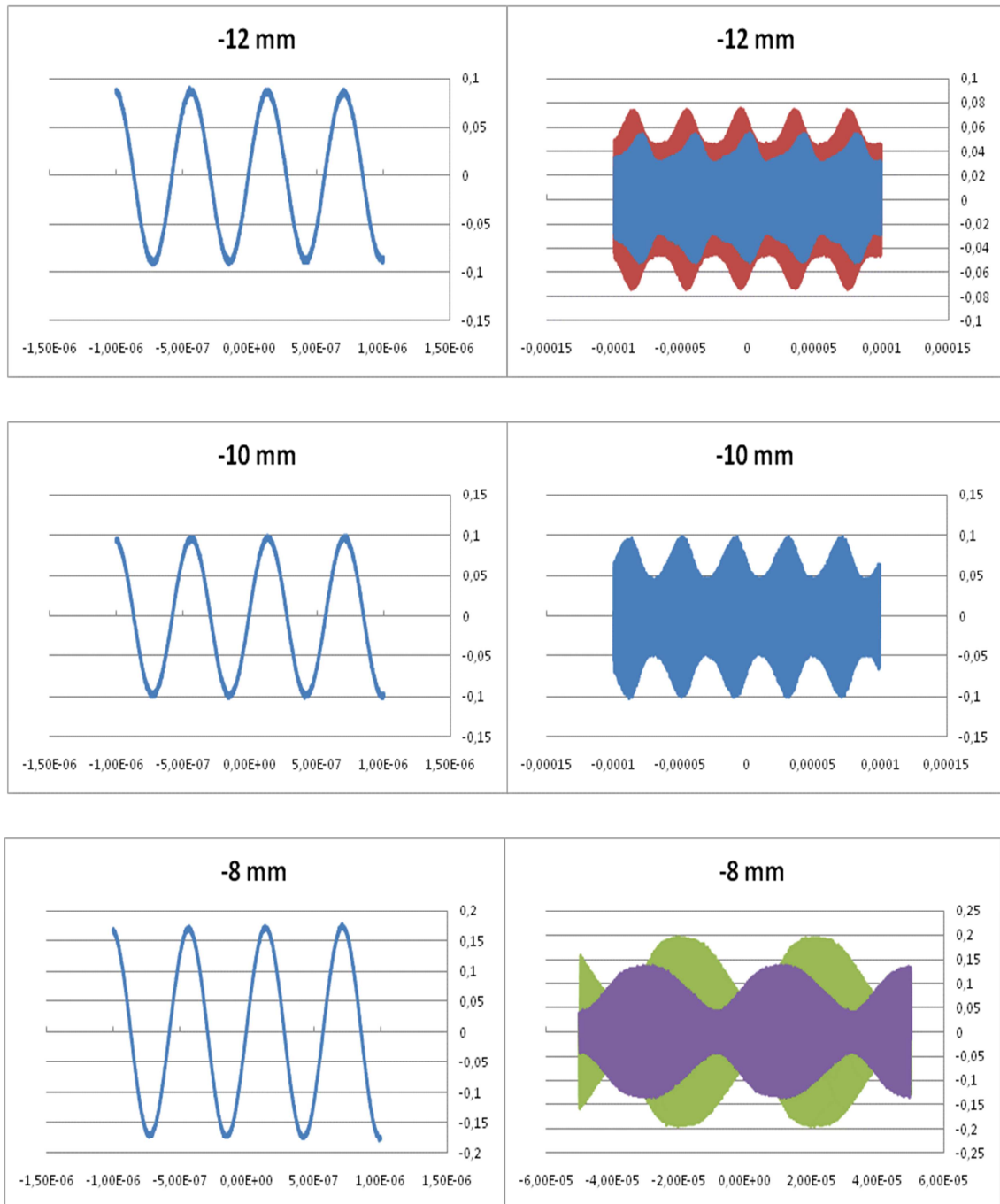


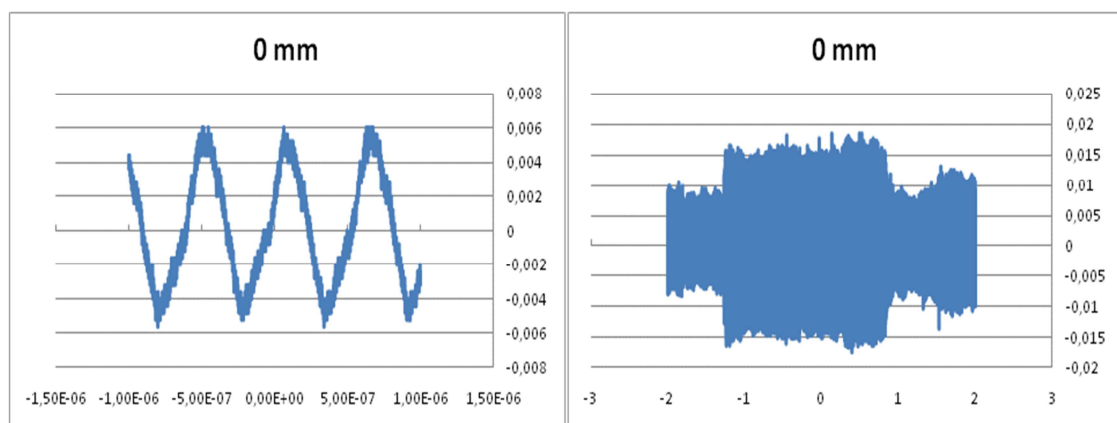
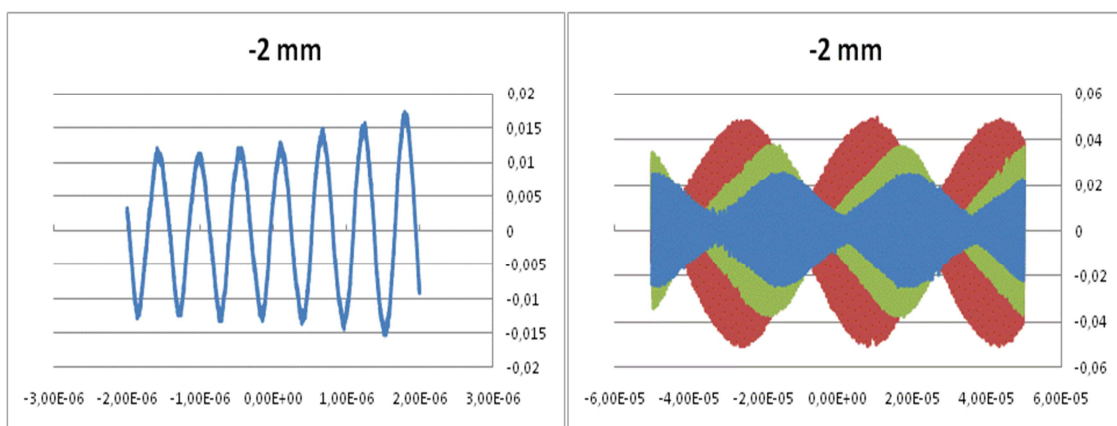
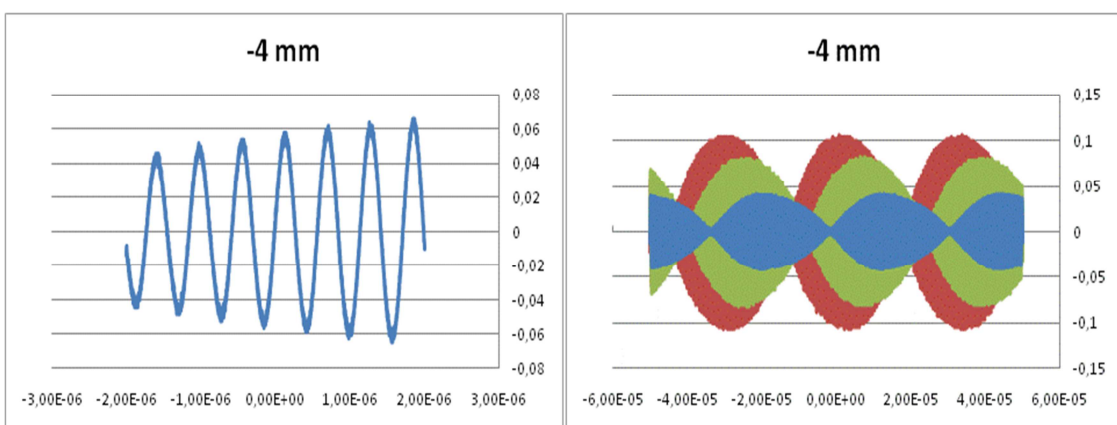
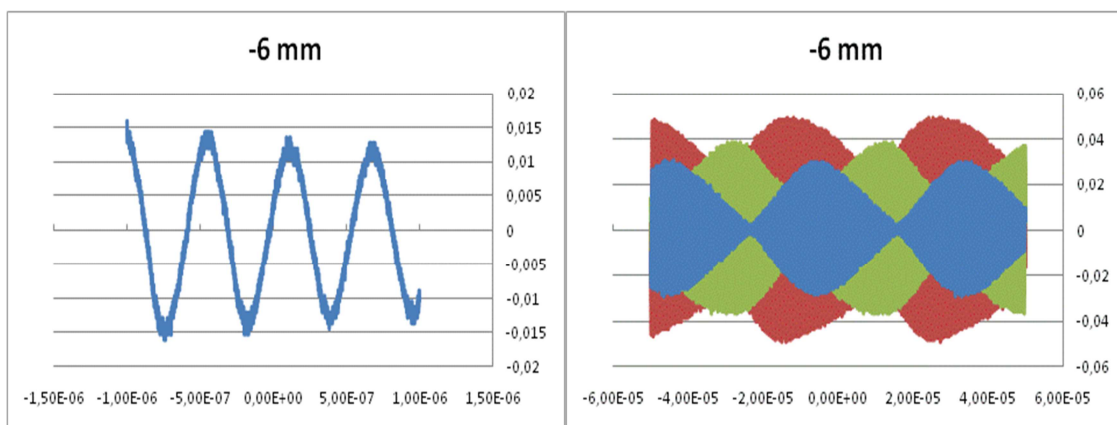




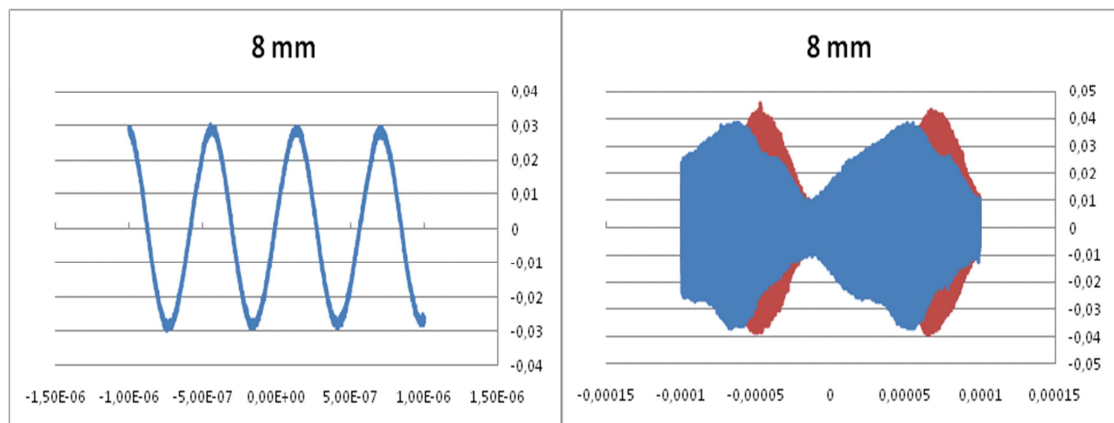
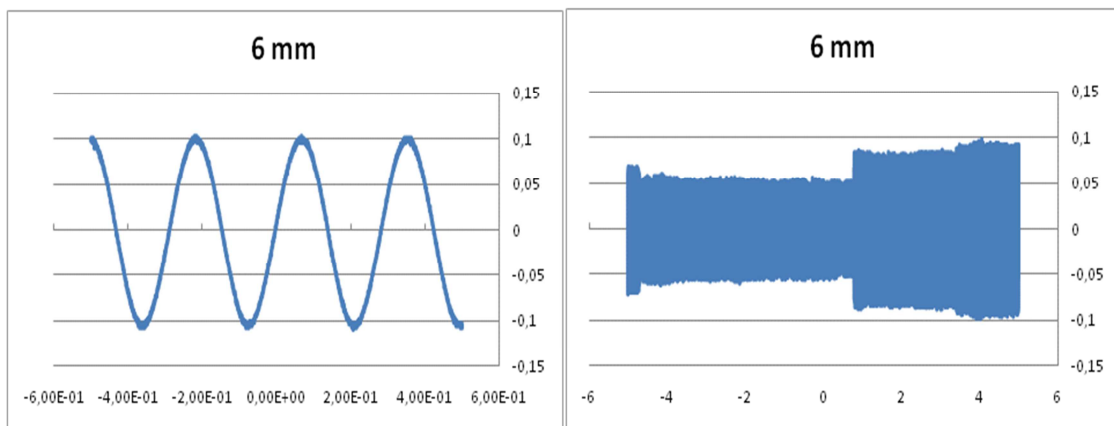
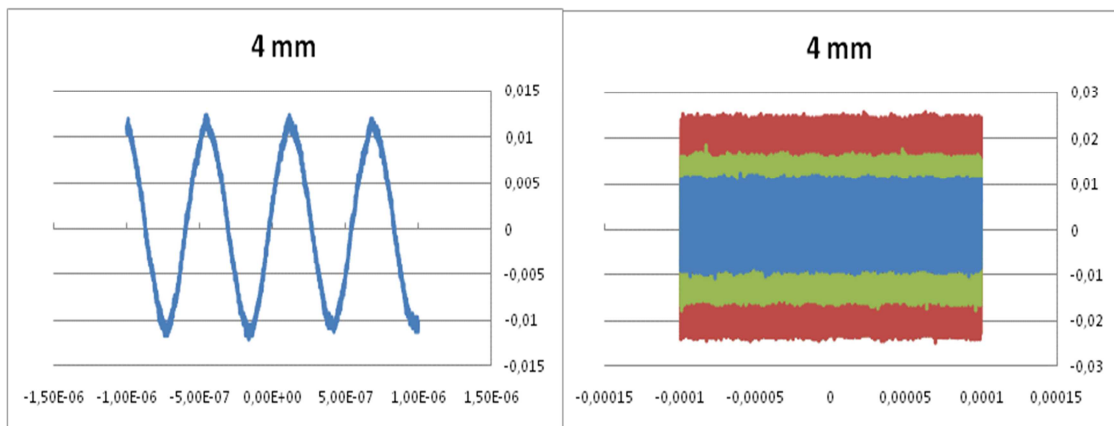
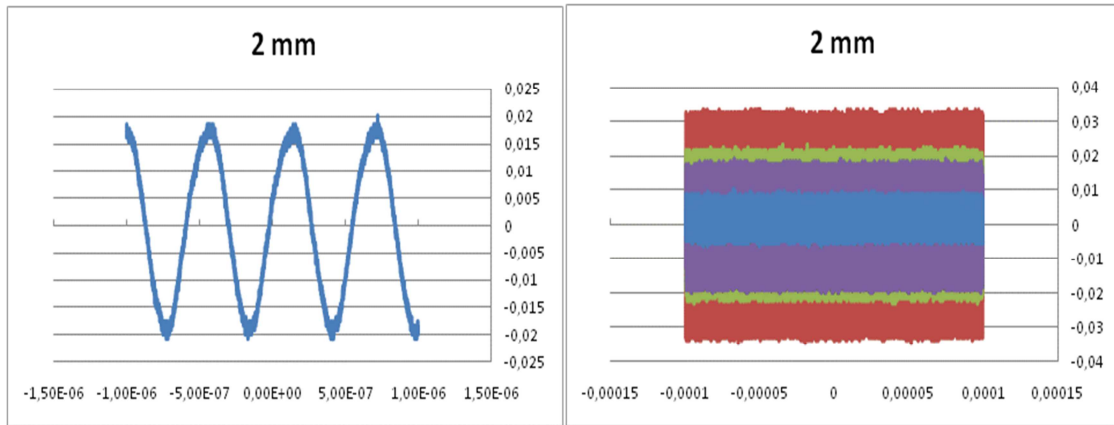
- **Voltaje: 7.5 V.**

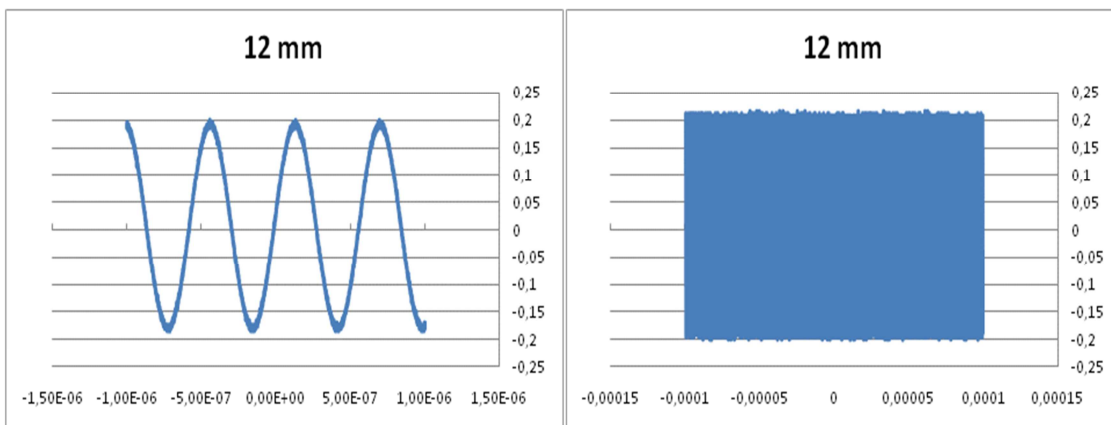
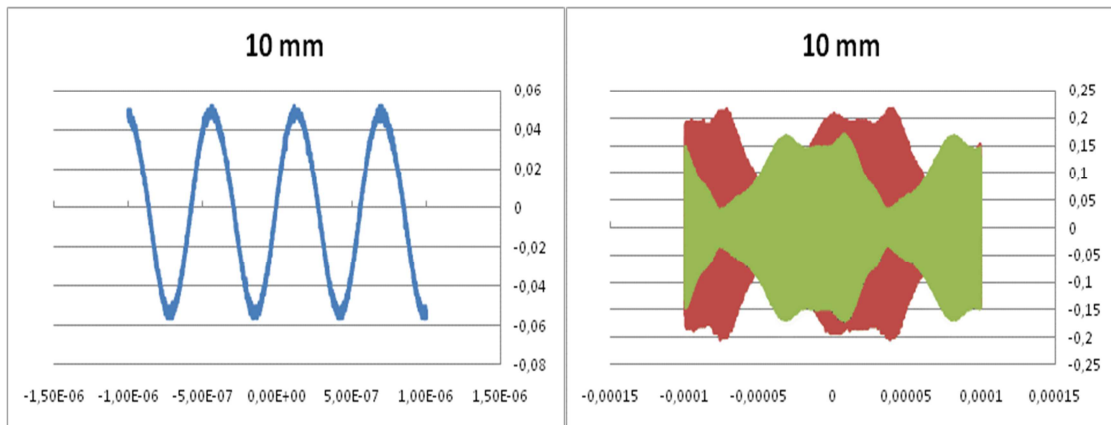
○ **Disco encendido: Derecho & Izquierdo.**





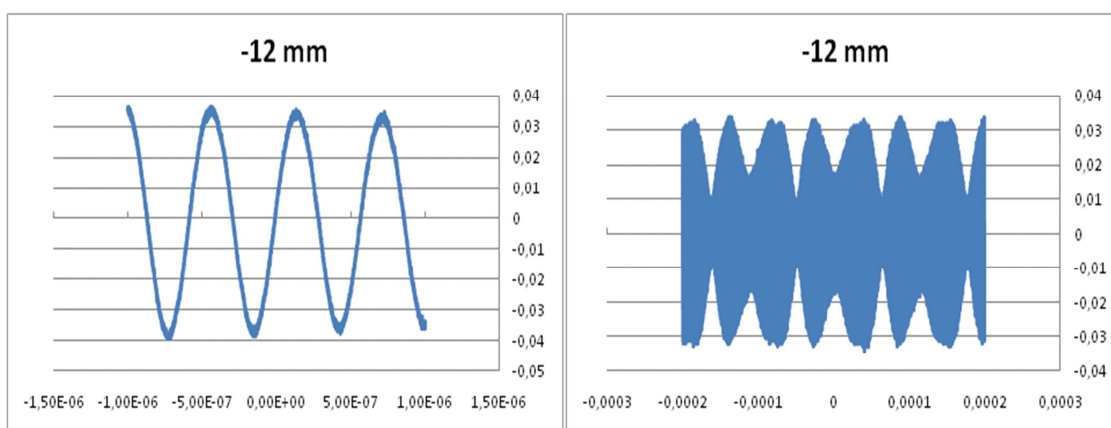


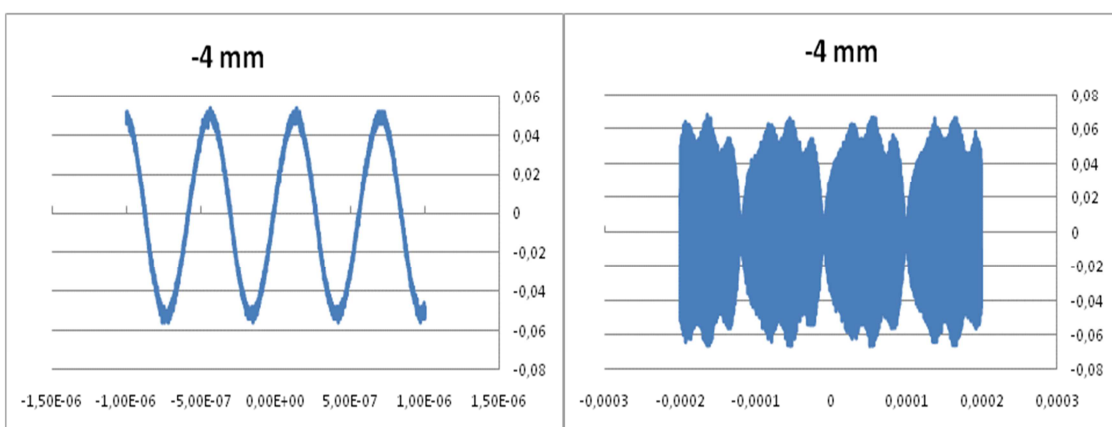
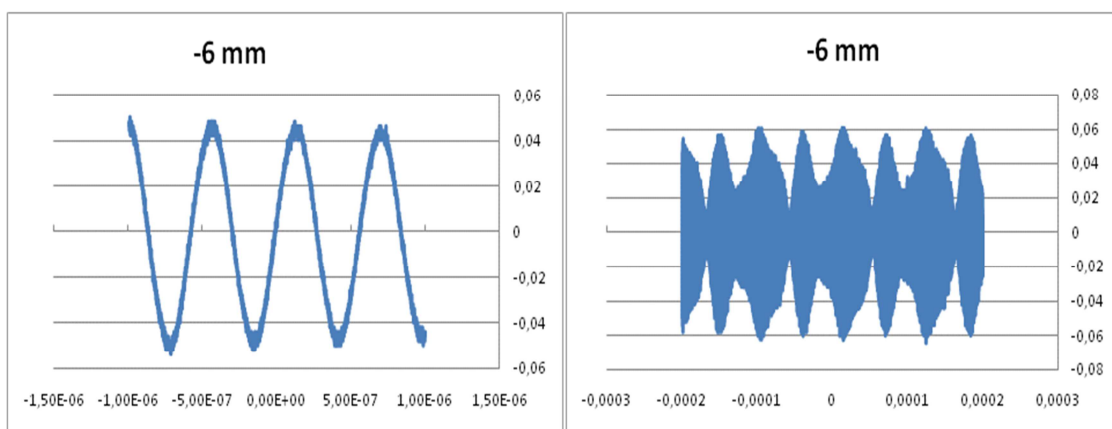
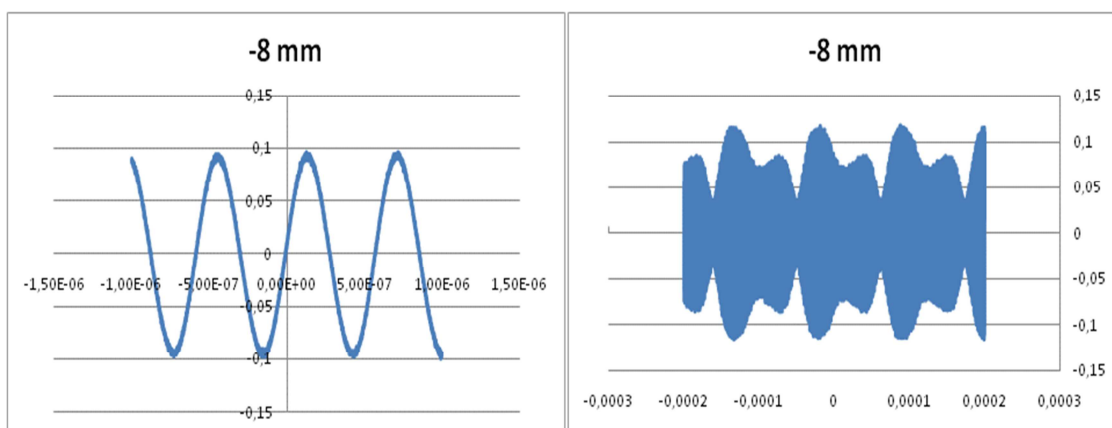
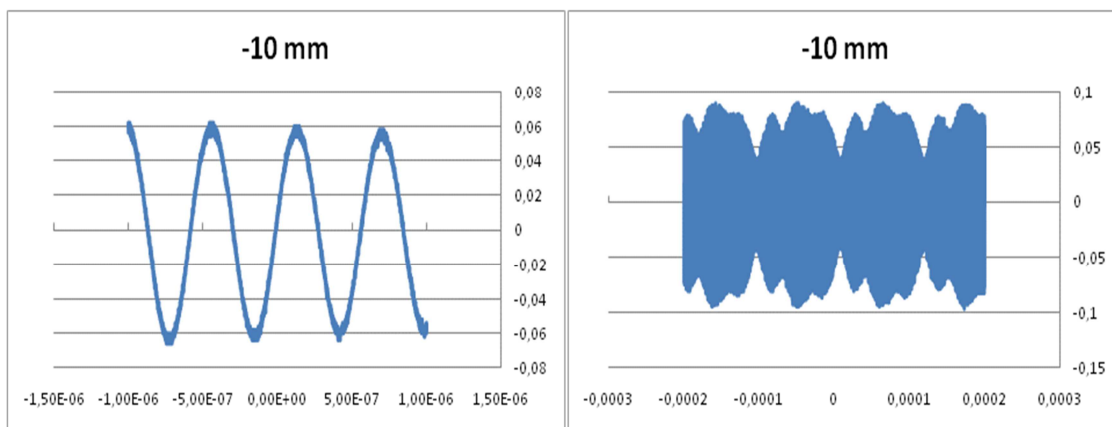


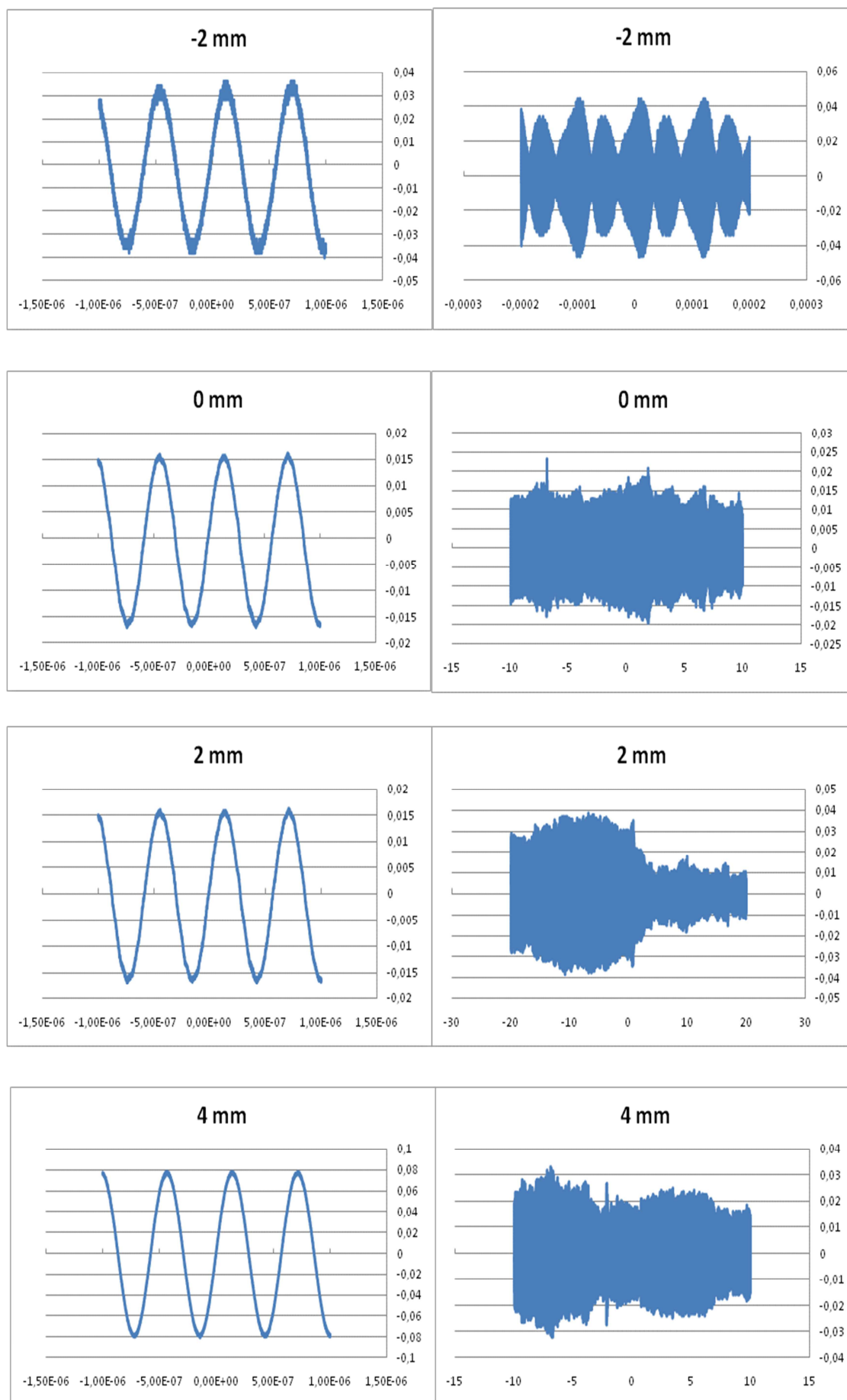


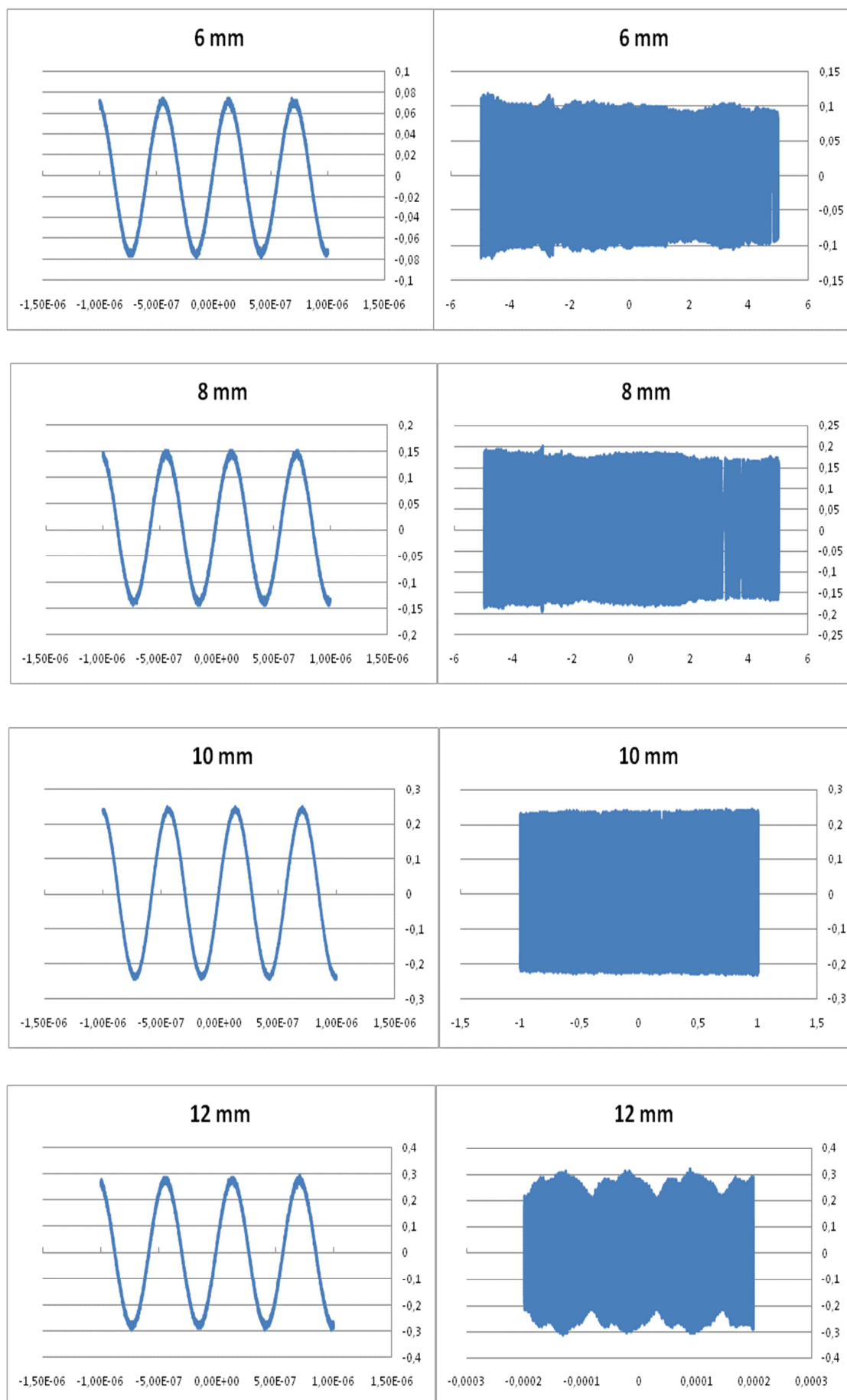
- **Voltaje: 10 V.**

o **Disco encendido: Derecho.**



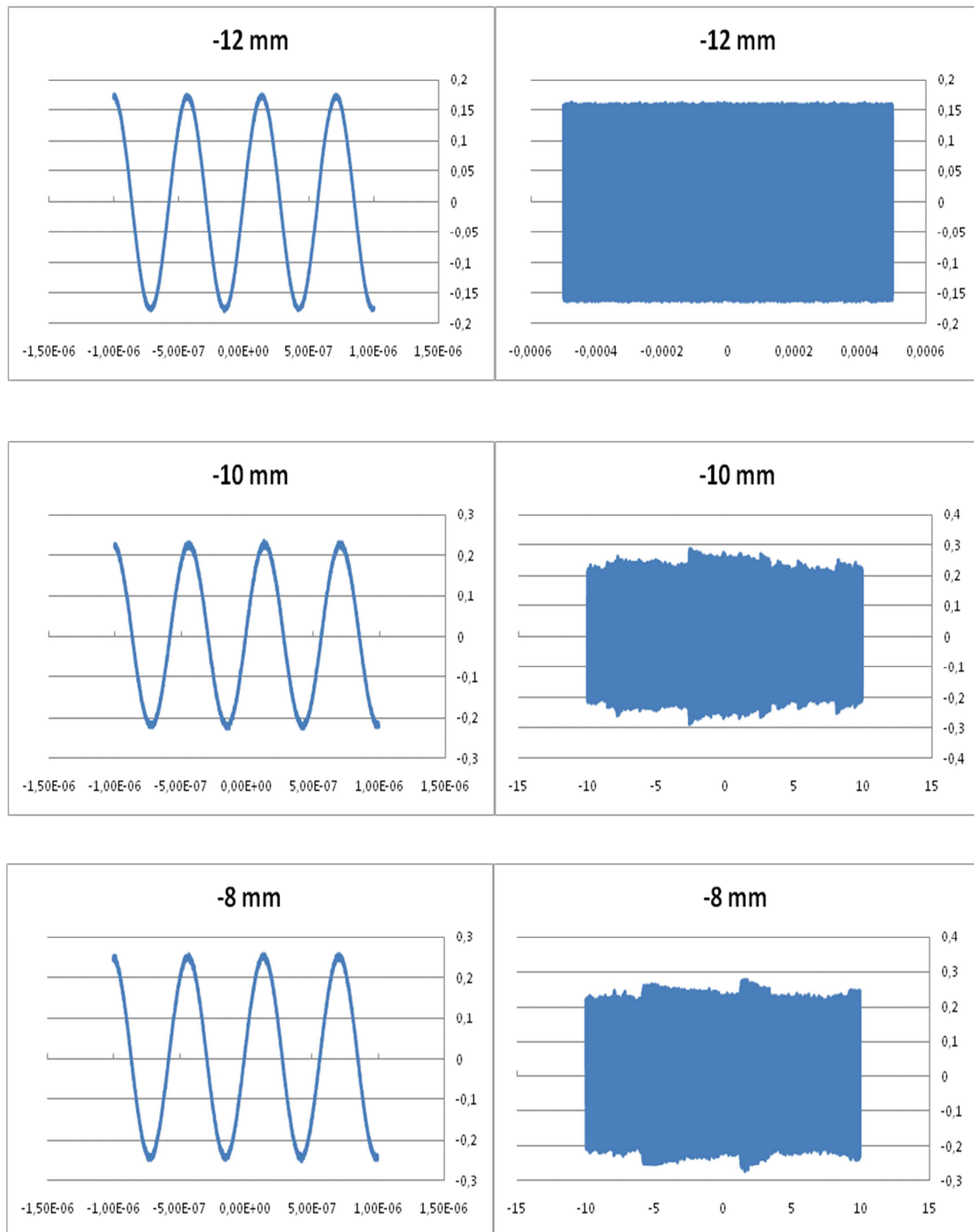


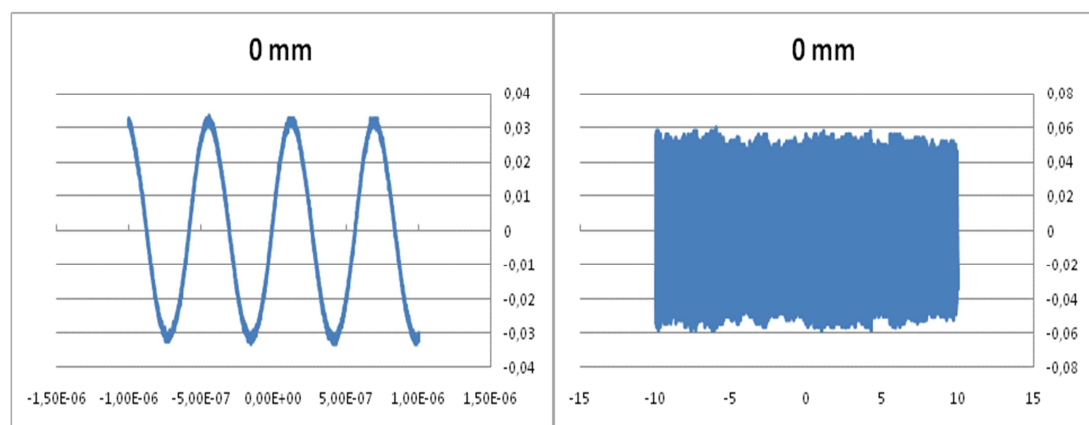
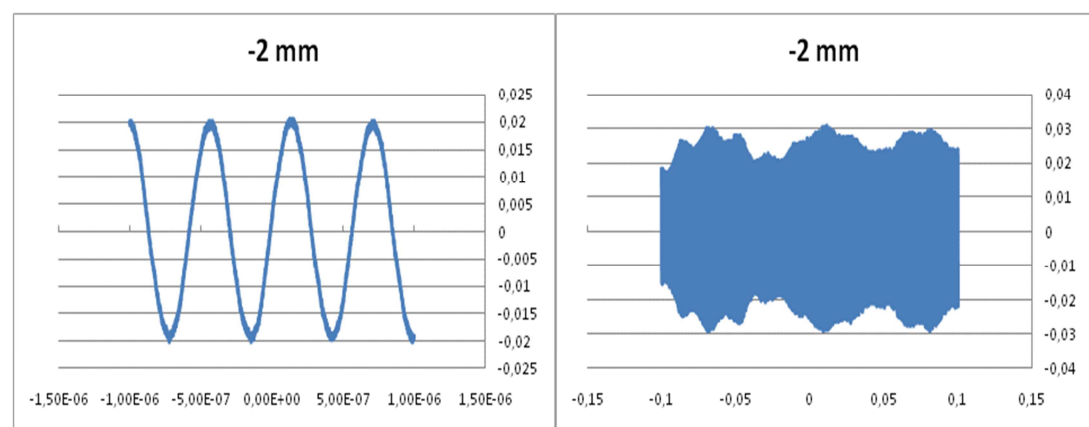
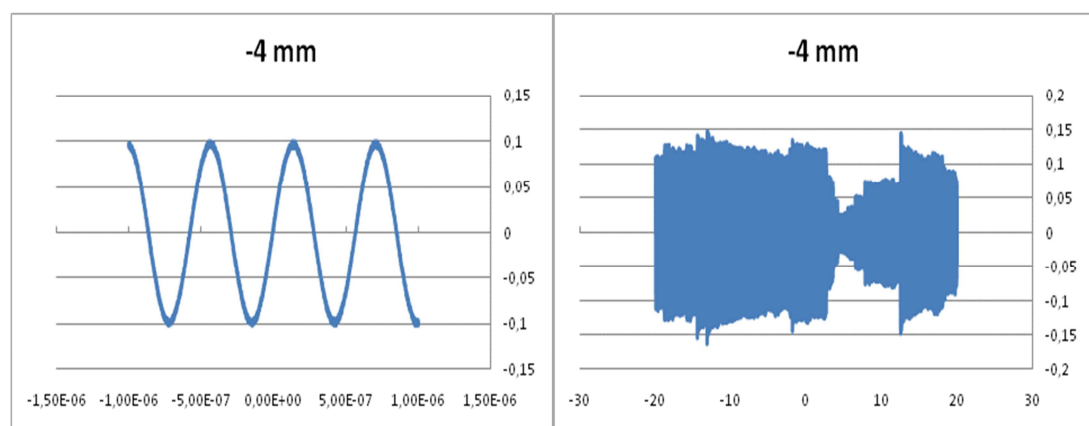
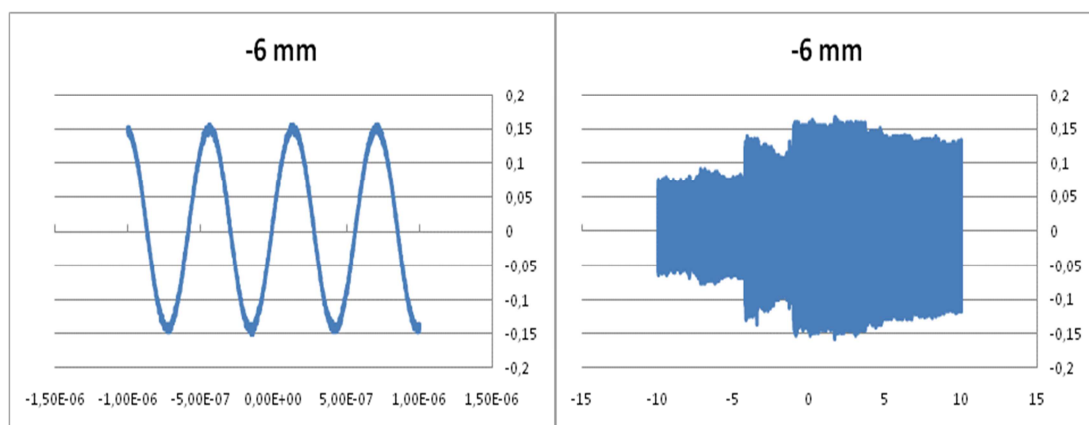


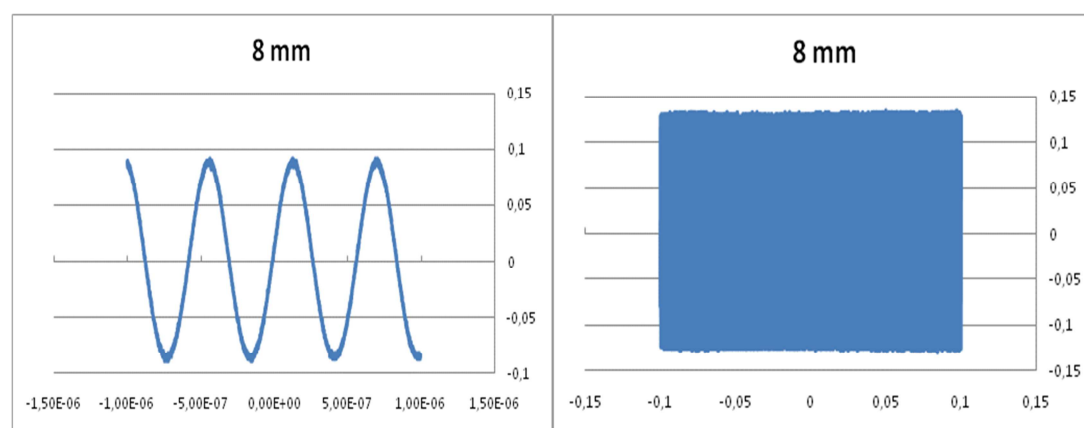
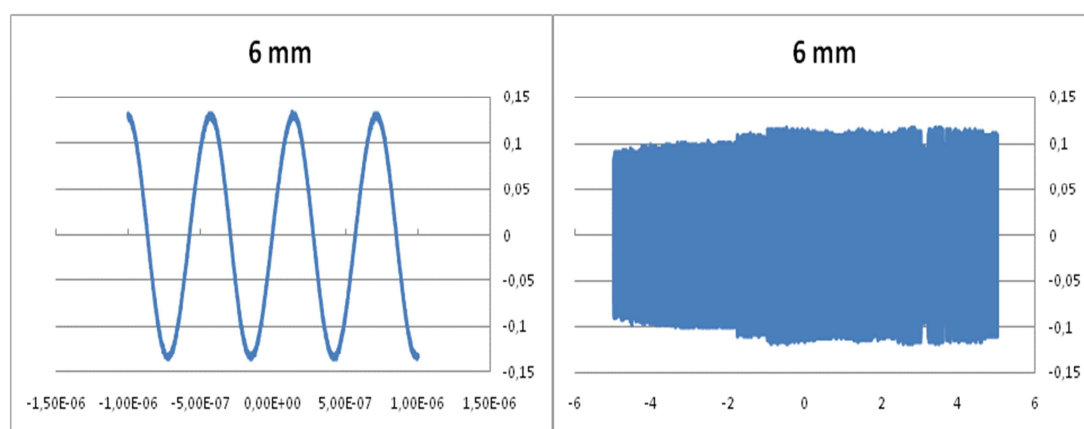
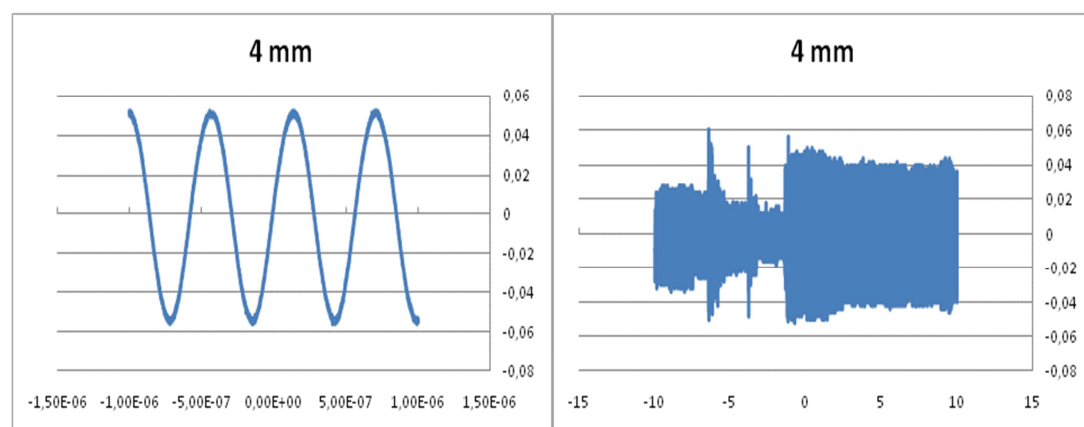
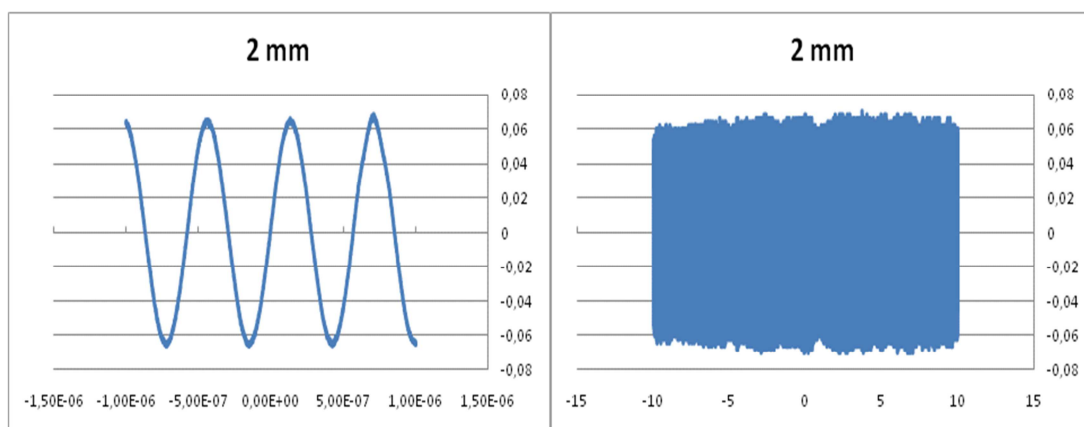


- **Voltaje: 10 V.**

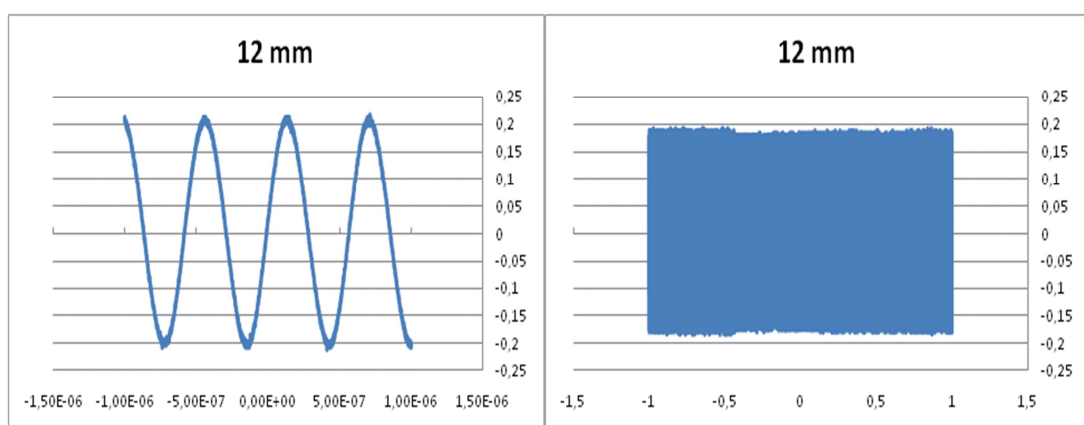
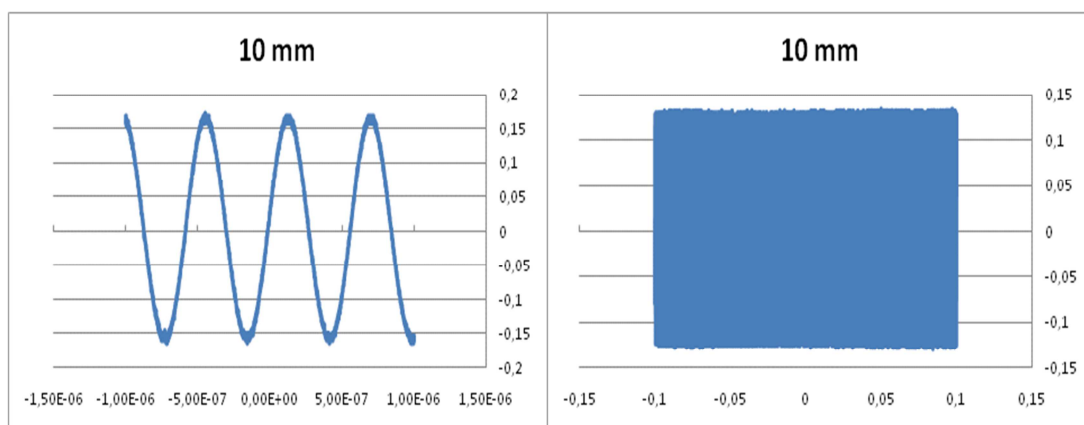
o **Disco encendido: Izquierdo**











- **Voltaje: 10 V.**

- Disco encendido: derecho & izquierdo.

