



## Trabajo Fin de Grado

**Influencia de las propiedades del fluido en la tasa  
de nebulización en atomizadores ultrasónicos**

Autor

**David Sánchez Mayayo**

Directores

**Juan Antonio García Rodríguez  
José Luis Santolaya Sáenz**

**Escuela de ingeniería y arquitectura  
2015**

Agradecer en primer lugar a los profesores del Departamento de Ciencia y Tecnología de Materiales y Fluidos, que de una u otra manera han colaborado desinteresadamente para que este proyecto llegara a buen puerto.

Especiales agradecimientos a J.A. García y J.L. Santolaya, responsables del proyecto y que en todo momento han estado disponibles cuando los he necesitado y con una actitud incansable de investigar transmitiéndome sus ganas y su optimismo y haciendo que las horas en el laboratorio se pasaran mucho más rápidas.

Especial mención a María Jesús, mi madre, porque gracias a su esfuerzo he tenido la oportunidad de llegar hasta aquí, y a Bea, porque sin ella, esto no hubiera sido posible.

# TRABAJOS DE FIN DE GRADO / FIN DE MÁSTER



Escuela de  
Ingeniería y Arquitectura  
Universidad Zaragoza

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D<sup>a</sup>. David Sánchez Mayayo,

con nº de DNI 18049515-N en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)  
Grado en electrónica y automática, (Título del Trabajo)

Influencia de las propiedades del fluido en la tasa de nebulización en atomizadores ultrasónicos

---

---

---

---

---

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 02 de septiembre de 2015

Fdo: David Sánchez Mayayo

# Influencia de las propiedades del fluido en la tasa de nebulización en atomizadores ultrasónicos

## RESUMEN

En este trabajo se ha estudiado, mediante técnicas experimentales, los efectos que un atomizador ultrasónico produce sobre diferentes líquidos. La atomización ultrasónica es actualmente objeto de interés en diferentes aplicaciones ya que permite obtener distribuciones de tamaño de gota muy finas pero presenta todavía muchas incertidumbres en relación con los procesos responsables de la rotura del líquido.

Para ello se ha realizado un montaje experimental formado por un dispositivo piezoeléctrico alimentado por una fuente de tensión hasta 60 V; una cubeta de ensayos en la que se han probado cuatro líquidos: agua, hexano, heptano y decano; y una serie de equipos de medida para obtener la tasa atomizada y determinar variaciones de presión y temperatura en el líquido.

Se han realizado ensayos con diferentes voltajes de alimentación del piezoeléctrico y se ha comprobado que con voltajes bajos, los líquidos que generan tasas de atomización más elevadas presentan unos valores de viscosidad y de tensión superficial más pequeños. Cuando el voltaje aumenta, la tasa de atomización se incrementa en el caso del agua pero en el resto de líquidos, los alkanos, se presenta punto máximo en 30-35 V, a partir del cual la tasa disminuye y la eficiencia del dispositivo cae bruscamente. La visualización del flujo nebulizado confirma este comportamiento.

Para intentar encontrar alguna diferencia significativa entre el comportamiento del agua y los alkanos se ha realizado una visualización del fenómeno. La estructura de la fuente formada es parecida y no ha sido posible explicar la diferencia en tasas de atomización, sin embargo, dicha visualización confirma el comportamiento descrito.

Las medidas de presión en el líquido muestran también una reducción de la amplitud en la frecuencia fundamental de oscilación a partir de un voltaje de excitación del piezoeléctrico. Este resultado permite apuntar a la influencia de los fenómenos de oscilación de la superficie libre sobre las causas de la atomización ultrasónica. Por otra parte, las pequeñas diferencias observadas en las tasas de atomización medidas en líquidos con presiones de vapor diferentes, apuntan a una menor influencia de la presión de vapor, la variable más directamente relacionada con los fenómenos de cavitación.

# Tabla de contenidos

1.	Introducción .....	1
1.1.	Atomización.....	1
1.1.1.	Atomización ultrasónica .....	3
1.1.1.	Base científica de la atomización ultrasónica.....	5
1.2.	Estudios previos .....	8
1.3.	Caracterización de fenómenos y parámetros de interés .....	10
2.	Montaje experimental y metodología de ensayos.....	12
2.1.	Instalación experimental.....	12
2.1.1.	Fuente de alimentación.....	12
2.1.2.	Transductor piezoelectrónico.....	13
2.1.3.	Recipiente de ensayos.....	15
2.1.4.	Sistema de extracción .....	16
2.1.5.	Balanza .....	16
2.1.6.	Hidrófono .....	17
2.1.7.	Sistema de guías del hidrófono .....	17
2.1.8.	Estructura metálica .....	19
2.1.9.	Termómetro .....	20
2.1.10.	Osciloscopio.....	20
2.2.	Características de los líquidos ensayados .....	21
2.3.	Método de trabajo .....	21
2.3.1.	Medida de la tasa de atomización .....	22
2.3.2.	Medida de la presión mediante el hidrófono .....	23
3.	Resultados obtenidos .....	25
3.1.	Tasas atomizadas de líquido.....	25
3.1.1.	Atomización de agua .....	25
3.1.2.	Atomización hidrocarburos.....	26
3.2.	Visualización de experimentos.....	31
3.2.1.	Formación y desarrollo del cono.....	31
3.3.	Medidas de presión.....	37
4.	Conclusiones y trabajo futuro .....	50
4.1.	Conclusiones.....	50
4.2.	Trabajo futuro .....	51
5.	Bibliografía.....	52
	Anexos.....	54

## 1. Introducción

### 1.1. Atomización

El proceso de atomización, consiste en separar un volumen de fluido, en gotas, mediante la aplicación de algún estímulo externo, que consigue ejercer una fuerza superior a las que cohesionan dicho fluido. Por una parte la viscosidad se opone al movimiento del fluido, por otra la tensión superficial (reflejo de las fuerzas de cohesión intermoleculares) se opone a la disgregación en gotas.

La atomización de líquidos es un proceso de gran importancia en diversas aplicaciones: mecánica, química, aeroespacial, ingeniería civil, alimentaria, humidificación, combustión, refrigeración, médica, agrícola e incluso meteorológica.

Este proceso es utilizado en la combustión en calderas, turbinas de gas, motores, cohetes, secado y enfriamiento, aire acondicionado, limpieza industrial y un sinfín de aplicaciones más.

Combustibles y agua son los fluidos más comúnmente atomizados. Los combustible líquidos, son la principal fuente de energía del planeta. En combustión, es muy habitual el uso de mezclas líquidas atomizadas para producir un mayor rendimiento de las reacciones de combustión. El agua, se atomiza normalmente para procesos de limpieza y refrigeración. También es muy común el uso de soluciones de agua y otros fluidos atomizados, como pesticidas, fungicidas y otros, para proteger las cosechas.

El diseño de un atomizador depende de las propiedades del fluido a atomizar y las condiciones de operación. Para atomizar fluidos con elevado caudal, lo más habitual es el uso de atomizadores rotativos. Para atomizar líquidos muy viscosos o emulsiones, se hace uso de atomizadores neumáticos o neumáticos-rotativos. Si lo que se desea es una atomización muy fina, se emplean atomizadores de bajo caudal pero con mayor consumo de energía.

Influencia de las propiedades del fluido en la tasa  
de nebulización en atomizadores ultrasónicos

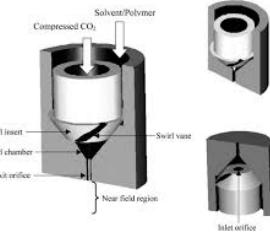
Clasificación de atomizadores	
Energía del líquido	<p>Atomizadores de chorro</p> 
	<p>Atomizadores con remolino</p> 
	<p>Atomizadores de chorro/con remolino</p> 
Energía del gas	<p>Mezcla interna</p>  <p>Mezcla externa</p> 
Energía mecánica	
Energía eléctrica, energía de vibraciones y otros	<p>Atomizadores acústicos, ultrasónicos, electrostáticos, etc.</p>

Tabla 1.1 Clasificación de los atomizadores según el tipo de energía utilizada

### 1.1.1. Atomización ultrasónica

En el caso de la atomización ultrasónica, el estímulo externo para lograr la desintegración del líquido, viene provocado por la focalización de ondas ultrasónicas de intensidad moderada, perpendiculares a la superficie del líquido, mediante la acción de un piezoelectrónico. Este piezoelectrónico, produce dichas ondas al verse excitado por una corriente eléctrica alterna de magnitud variable, lo que produce una deformación mecánica y variable en él y que nos permite obtener gotas micrónicas. Este comportamiento se basa en el efecto piezoelectrónico inverso.

Actualmente, esta técnica, goza de gran popularidad debido al gran abanico de posibilidades que ofrece en la industria, por ello, es un proceso utilizado en aplicaciones tan variadas como pueden ser, la congelación en polvos de alimentos como el café o la leche, el recubrimiento de materiales electrónicos, humidificar corrientes de gas, el secado ultrasónico, la lubricación de elementos mecánicos móviles o diversas aplicaciones en el ámbito de la medicina.

Además de que permite obtener gotas muy pequeñas, una de las ventajas de esta técnica de atomización es la posibilidad de atomizar en el vacío. El poder conseguir la nebulización de líquidos, en lugares en los que no haya existencia de un gas para pulverizarlos es una gran ventaja que abre nuevas posibilidades a esta técnica.

Un elevado número de factores influyen en el resultado de la atomización, desde las características físicas del propio atomizador, hasta las condiciones ambientales, pasando por la magnitud y la procedencia del estímulo externo.

La atomización ultrasónica permite la generación de gotas de micrónicas, en distribuciones de diámetro estrechas y es posible controlar el tamaño en función de las características del piezoelectrónico. En operación es posible también introducir elementos de control como el voltaje o la temperatura para regular la masa atomizada. Uno de los principales inconvenientes de la técnica es la dificultad para atomizar líquido de viscosidad media y alta (a partir de 20 cps pero dependiendo del líquido).

## Influencia de las propiedades del fluido en la tasa de nebulización en atomizadores ultrasónicos

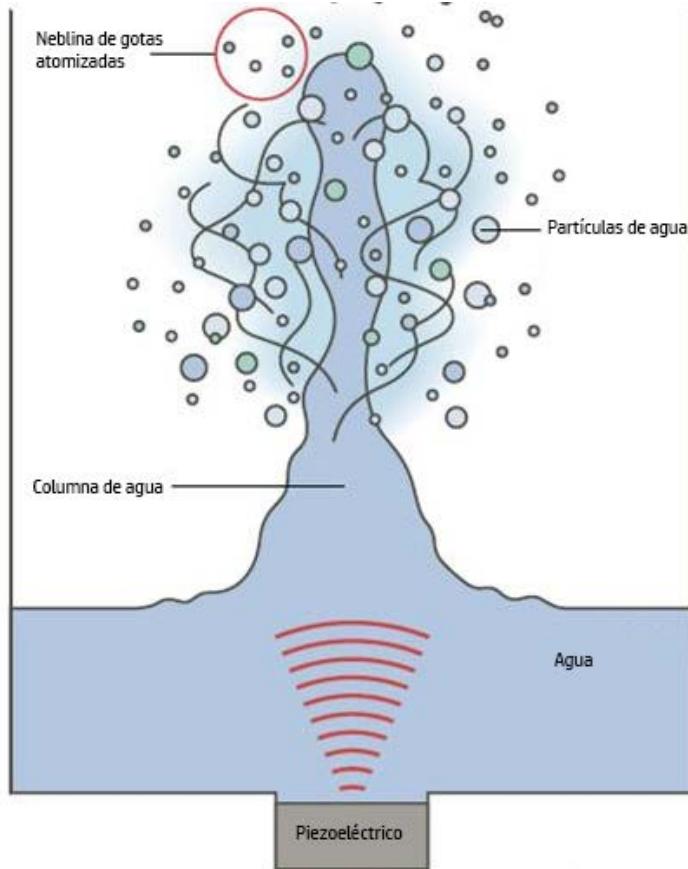


Figura 1.1 Esquema descriptivo del fenómeno de la atomización

Sin embargo, en este proyecto, se va a detallar el estudio realizado de la importancia y la relación entre las propiedades del fluido y la tasa de atomización obtenida a una tensión de excitación variable, midiendo la variación de algunas propiedades de éste.

Todavía no se conoce en detalle el mecanismo de atomización. Para las frecuencias y líquidos utilizados en este proyecto, se postula, que la atomización en gotas micrónicas se consigue, gracias a la combinación de dos fenómenos, la generación de ondas superficiales en la interfase líquido-gas y la presencia de cavitación.

### 1.1.1. Base científica de la atomización ultrasónica

Según Bond y Söllner, en consecuencia con los estudios realizados por Lord Rayleigh el fenómeno disruptivo de la atomización, causado por la aplicación de ondas ultrasónicas de alta energía, se atribuye, a la cavitación.

Wood y Loomis descubren, en 1927, la atomización ultrasónica. En sus experimentos, estos dos investigadores generaron en un baño de aceite, ondas acústicas de alta frecuencia y de gran intensidad con un oscilador piezoelectrónico de cuarzo excitado con 50.000 voltios y vibrando a 300 kHz. Dirigiendo perpendicularmente las ondas generadas a la superficie libre del aceite, se sorprendieron al observar la aparición de un spray de gotas muy finas.

Cuando un líquido fluye a través de una región donde la presión es menor, puede ocurrir que se llegue a alcanzar la presión de vapor de dicho líquido, de tal forma que cambia inmediatamente a estado de vapor, formándose burbujas o cavidades. Estas burbujas son transportadas por el líquido hasta llegar a una región de mayor presión, donde el vapor regresa al estado líquido de manera súbita, implosionando bruscamente las burbujas. Este fenómeno es el conocido como cavitación.

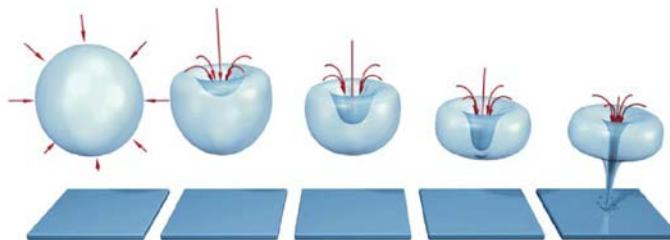


Figura 1.2 Evolución de las burbujas en la cavitación

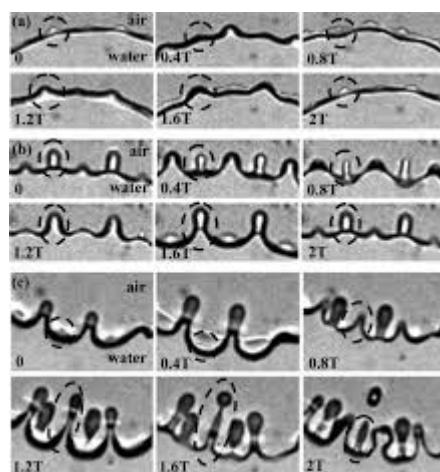
Si las burbujas de vapor se encuentran cerca o en contacto con una pared sólida cuando cambian de estado, las fuerzas ejercidas por el líquido al aplastar la cavidad dejada por el vapor pueden dar lugar a presiones localizadas muy altas.

## Influencia de las propiedades del fluido en la tasa de nebulización en atomizadores ultrasónicos

El fenómeno de la cavitación, puede resultar muy útil para algunas aplicaciones, ya que, cuando las burbujas ascienden hasta una zona de mayor presión e implosionan, se genera una variación de temperatura que en algunos compuestos, da lugar a cambios en su composición. Un caso práctico de esto, es el uso de la técnica de la cavitación para la depuración de purines, ya que se consiguen eliminar ciertas sustancias no deseadas mediante las variaciones térmicas producidas por la explosión de estas burbujas generadas. Sin embargo, estos cambios no son siempre beneficiosos y hay que tenerlos muy en cuenta, cuando se atomizan fluidos como por ejemplo aceites lubricantes, cuya calidad y o efectividad, puede verse deteriorada por los cambios en su composición producidos por la cavitación.

Otro fenómeno que tiene relación con la atomización ultrasónica, es el de la inestabilidad capilar de chorros de líquido en la superficie libre.

Como se muestra en la *figura 1.3*, cuando se aplica sobre un líquido, una excitación de amplitud variable, llega un punto en el cuál empiezan a aparecer ondas de amplitud creciente sobre la superficie libre del fluido, llegando a una fase final en la que se llega a desintegrar la superficie libre de estas ondas, produciendo la formación y emisión de gotas al final de éstas.



*Figura 1.3 Inestabilidad capilar en superficie libre*

A pesar de los numerosos trabajos que desde entonces se han publicado, todavía no está claro el mecanismo responsable de este fenómeno. Söllner, en 1936, postula que la cavitación producida por las ondas ultrasónicas es la responsable de la

ruptura de la superficie libre en gotas. Sin embargo, otros autores como Sorokin (1957), Eisenmenger (1959), Lang (1962), Peskin y Raco (1963), Sindayihebura (1995) apuntan que en la superficie libre se forman ondas cuya amplitud va creciendo, la llamada inestabilidad de Faraday, y explican la generación de gotas como la ruptura de las crestas de dichas ondas.

Lang (1962) y Stamm (1964) aportan expresiones que relacionan el tamaño medio de gotas con la longitud de onda de las ondas superficiales. Eknadiosyants (1963) estudia el fenómeno con cámara fotográfica de alta velocidad.

Sindayihebura (1995) realiza un estudio de 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.

Al-Suleimani et al. (1999) realizan experimentos de visualización sobre la atomización ultrasónica a baja frecuencia de vibración de una lámina líquida de agua y de aquí modelan con un código de CFD el caso de una lámina líquida sometida a altas frecuencias.

Algunos trabajos teóricos en situaciones simplificadas permiten obtener soluciones analíticas para la perturbación de la superficie libre en casos simplificados. En estos casos, se supone que un recipiente conteniendo líquido se hace vibrar (véase: Song Y. L. 2012). Sin embargo la configuración habitual, en la que el recipiente se mantiene estático y es un pequeño piezoelectrónico el que oscila en la base de dicho recipiente, es inabordable analíticamente. Algunos estudios se han centrado en configuraciones más próximas a esta geometría, son los relativos al “acoustic streaming” (flujo inducido por la onda) en los que se caracteriza como una onda sónica o ultrasónica induce una corriente en el seno del fluido (véase Trujillo F. J. 2011). Los estudios sobre acoustic streaming se han abordado experimental y numéricamente y no se han relacionado con situaciones en las que se produce la nebulización del fluido en la superficie libre.

A pesar de que numerosos investigadores han desarrollado experimentos para caracterizar y comprender los fenómenos asociados a la atomización ultrasónica,

todavía no se conocen en detalle los mecanismos que la originan. Para las frecuencias y líquidos utilizados en este proyecto se postula, que la atomización en gotas micrónicas se consigue, gracias a la combinación de dos fenómenos, la generación de ondas superficiales en la interfase líquido-gas y la presencia de cavitación.

## 1.2. Estudios previos

Hasta la fecha actual, se han realizado una serie de estudios relacionados con el tema que se trata, de forma directa o indirectamente.

La atomización ultrasónica se conoce desde 1927, cuando Wood y Loomis [Referencia: W. R. Wood, A.L. Loomis. "The physical and biological effects of high frequency sound-waves of great intensity", Phil. Mag. vol. 4 (22), 417-437, (1927)] propusieron el uso de este mecanismo para conseguir la atomización de la masa fluida. Desde entonces, numerosos investigadores han publicado experimentos para caracterizar y comprender este fenómeno.

En la Universidad de Zaragoza esta línea de investigación, comenzó en el LIFTEC, y se remonta a la tesis doctoral de Hyppolite Amaveda en 2003, que fue dirigida por Félix Barreras y Antonio Lozano. Se realizaron visualizaciones de la superficie libre perturbada por ondas ultrasónicas de 1.67 MHz, se observó la formación de un cono para voltajes de excitación bajos, la atomización de grandes gotas que se desprendían de la punta del cono cuando el voltaje se aumentaba y, para voltajes todavía mayores, la atomización en pequeñas gotas, de unas pocas micras. Se obtuvieron también las distribuciones de diámetro por difractometría para distintos voltajes de excitación. Los experimentos se realizaron con agua destilada.

El trabajo en este campo se retomó en 2009 con la concesión, por parte de la Universidad de Zaragoza, de financiación para el proyecto "Optimización energética de la atomización ultrasónica: extensión a líquidos viscosos", financiado por la Universidad de Zaragoza, con referencia (UZ2008-TEC-03) y dirigido por Juan Antonio García.

Gracias a la experiencia acumulada se pudo diseñar y construir un dispositivo para sembrar flujos que funciona por el principio de atomización ultrasónica. Dicho dispositivo se está usando en el proyecto Desarrollo de difusores de aire para quemadores de inyección (financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia, ENE2008-03137/CON). Se ha solicitado recientemente, el 5 de diciembre de 2011, la patente de este dispositivo con el título “Generador ultrasónico de gotas micrométricas de alto caudal y funcionamiento continuo” (P201131969).

También se han realizado dos proyectos relacionados con este tema, “Caracterización experimental de la atomización ultrasónica de líquidos con partículas en suspensión”, Ranz, 2004 y “Caracterización experimental de la onda acústica producida por un piezoelectrónico en el seno de una masa líquida”, Clavel, 2014, que llegaron a las siguientes conclusiones:

La perturbación se concentra en una pequeña región con un tamaño inferior al diámetro del disco piezoelectrónico 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. 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. Una primera hipótesis sobre los resultados obtenidos supone que la superficie del piezoelectrónico no tiene un movimiento homogéneo.

Las medidas de masa atomizada con suspensiones de alúmina revelan que la presencia de partículas en suspensión obstaculiza el proceso de atomización, reduciendo considerablemente la cantidad de masa atomizada en comparación con la del líquido sin partículas. Además, el incremento de la concentración de partículas, genera mayor dificultad para que se desarrolle los mecanismos de atomización.

Si se aumenta el voltaje de alimentación del piezoelectrónico en los líquidos que ensayó Ranz, que contenían partículas de alúmina, se incrementa la masa atomizada. No obstante, al aumentar la concentración también lo hace el voltaje mínimo para el cual es posible empezar a atomizar. Visualizar la evolución de las inestabilidades en la muestra cuando aumenta el voltaje ha permitido detectar que éstas se desarrollan cada vez a un voltaje mayor al aumentar la concentración de partículas.

### **1.3. Caracterización de fenómenos y parámetros de interés**

Los aspectos más interesantes que se han observado y cuyas causas y repercusiones se han pretendido conocer, son las siguientes.

A partir de un pequeño, voltaje, unos 20 voltios, se puede apreciar la formación de un pequeño cono justo sobre la zona donde está ubicado el piezoelectrónico. Este cono, que va aumentando de tamaño y altura, a medida que aumenta el voltaje aplicado, llega a generar una fuente, en la cual, las gotas más grandes vuelven a caer a la superficie del fluido, desde la parte superior del cono y gotas más pequeñas son atomizadas a partir de una determinada altura, la cual también varía dependiendo de la tensión aplicada.

Este fenómeno, se ha intentado relacionar, con las propiedades de los fluidos estudiados, como son, la tensión superficial, la viscosidad, la densidad, el módulo de compresibilidad y la temperatura de ebullición.

Así mismo, se ha buscado alguna relación que pudiera haber con el voltaje aplicado y con la geometría del montaje experimental utilizado.

Cabe decir, que hasta fecha de hoy, no se había realizado ningún estudio de la tasa de atomización de los líquidos que se tratan a lo largo de este proyecto. Sí que se ha realizado algún estudio, como el análisis del tamaño de las gotas atomizadas, pero no de la tasa de atomización Mccallion, Onm; Taylor, Kmg; Thomas, M; (1995). Si bien la atomización de estos fluidos, puede no suscitar gran interés de cara a aplicaciones prácticas, las similitudes de sus propiedades físicas con las de otros líquidos, como

## Influencia de las propiedades del fluido en la tasa de nebulización en atomizadores ultrasónicos

---

podrían ser algunos tipos de aceites lubricantes, sí que tiene gran interés por la gran importancia que tiene la atomización de estos elementos.

En un principio, la intención era realizar también una serie de medidas de las tasas de atomización de estos líquidos, en una cubeta con dos piezoelectrómicos cuyas ondas generadas interferían en un punto. Sin embargo, debido a la novedad de estos ensayos con los líquidos tratados y el haber encontrado ciertos comportamientos que han generado gran interés, se ha procedido a indagar más a fondo en el comportamiento que presentan estos líquidos al ser atomizados, mediante técnicas como la medida de presiones con el hidrófono.

## 2. Montaje experimental y metodología de ensayos

### 2.1. Instalación experimental

A continuación, se detallan los elementos que constituyen la instalación con la cual se han llevado a cabo las medidas realizadas y el porqué de la elección de esta configuración.



Figura 2.1 Descripción del montaje y sus elementos

En esta imagen se puede observar, de izquierda a derecha, la cubeta, apoyada sobre los tacos en la balanza, con el piezoelectrónico introducido en ella, fijado a las guías de desplazamiento. Se aprecia también, parte de la estructura metálica, alrededor de la cubeta y la balanza. En la parte derecha de la imagen, aparece la fuente de alimentación con su interruptor para cortar la alimentación, en caso de ser necesario y sobre ésta, el osciloscopio, que se encuentra conectado al hidrófono.

#### 2.1.1. Fuente de alimentación

A través de la fuente de alimentación se proporciona la energía necesaria para el funcionamiento del transductor piezoelectrónico y se controla la tensión que se suministra al circuito oscilador.

## Influencia de las propiedades del fluido en la tasa de nebulización en atomizadores ultrasónicos

Se utiliza para alimentar al transductor piezoeléctrico con el cual excitamos el fluido en cuestión. Mediante dicha fuente se controla la tensión de alimentación que se está suministrando al circuito oscilador.

Es una fuente de tensión continua con tensión de salida nominal de 62.5V y corriente de salida nominal de 3A. Dispone de un control de ajuste de mayor precisión para elegir el voltaje deseado con mayor exactitud. También se ha instalado a su salida un interruptor para poder cortar la alimentación del circuito oscilador en caso necesario.

Se puede encontrar más información sobre esta fuente en el *Anexo I*.



Figura 2.2 Fuente e interruptor

### 2.1.2. Transductor piezoeléctrico

Compuesto del circuito oscilador y el piezoeléctrico, es el encargado de transformar la señal eléctrica en una deformación mecánica debido al efecto piezoeléctrico del disco cerámico utilizado.

#### 2.1.2.1. Circuito oscilador

El circuito está alimentado por un puente rectificador de diodos a la entrada, para el caso de utilizarse con corriente alterna, aunque en este caso, como se ha comentado, se ha utilizado una fuente de continua para mayor simplicidad. Después del puente rectificador, se encuentra un condensador de filtrado para asegurar un correcto filtrado de la señal rectificada.

## Influencia de las propiedades del fluido en la tasa de nebulización en atomizadores ultrasónicos

Mediante el circuito oscilador se consigue crear una señal periódica para excitar al piezoelectrónico.

Se pueden encontrar detalles específicos del modelo utilizado en el *Anexo I*.

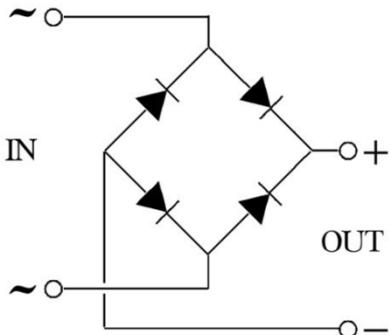


Figura 2.3 Alimentación circuito oscilador

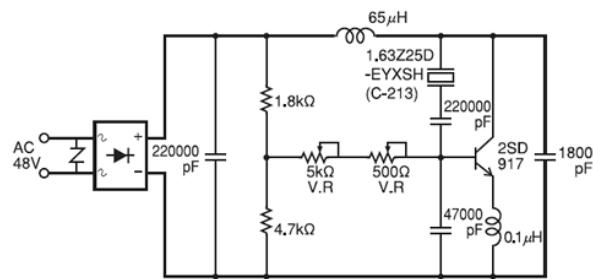


Figura 2.4 Circuito oscilador genérico



Figura 2.5 Nuestro transductor piezoelectrónico

### 2.1.2.2. Piezoelectrónico

Un piezoelectrónico, es un cristal con la propiedad característica de polarizarse eléctricamente cuando es sometido a una tensión mecánica, apareciendo

en sus superficies cargas eléctricas y estableciéndose entre ellas una diferencia de potencial.

Lo interesante de estos cristales, es la posibilidad que tienen de realizar este proceso a la inversa, es decir, cuando se les aplica un campo eléctrico, se produce una deformación mecánica, que cede cuando se elimina la perturbación eléctrica a la que está sometido.

En el caso particular que se está tratando, se han utilizado discos piezoeléctricos 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.



Figura 2.6 Disco piezoeléctrico

### 2.1.3. Recipiente de ensayos

Para realizar los ensayos, se ha utilizado un recipiente de metacrilato en forma de prisma cuadrangular sin la cara superior, con paredes de metacrilato y se ha instalado en el centro de la cara inferior el disco piezoeléctrico, situado en un agujero que se ha mecanizado con diámetro algo mayor que el de este piezoeléctrico, ya que posee una junta de estanqueidad.

En la parte superior se ha montado una cubierta de policarbonato de forma cuadrangular con unos pequeños salientes en la parte inferior para servir de guías para el recipiente y en cuya parte central se ha mecanizado un agujero pasante de 10 cm para insertar en él un embudo al cual se le conectará el sistema de extracción.

## Influencia de las propiedades del fluido en la tasa de nebulización en atomizadores ultrasónicos

Bajo esta cubierta y llegando hasta el agujero pasante, realizando una conexión sin contacto con el embudo, se ha ubicado, afianzado mediante unos tornillos y unas pequeñas escuadras realizadas en plástico, un tubo de metacrilato de 8.4 cm de diámetro interior y 9 cm de exterior.

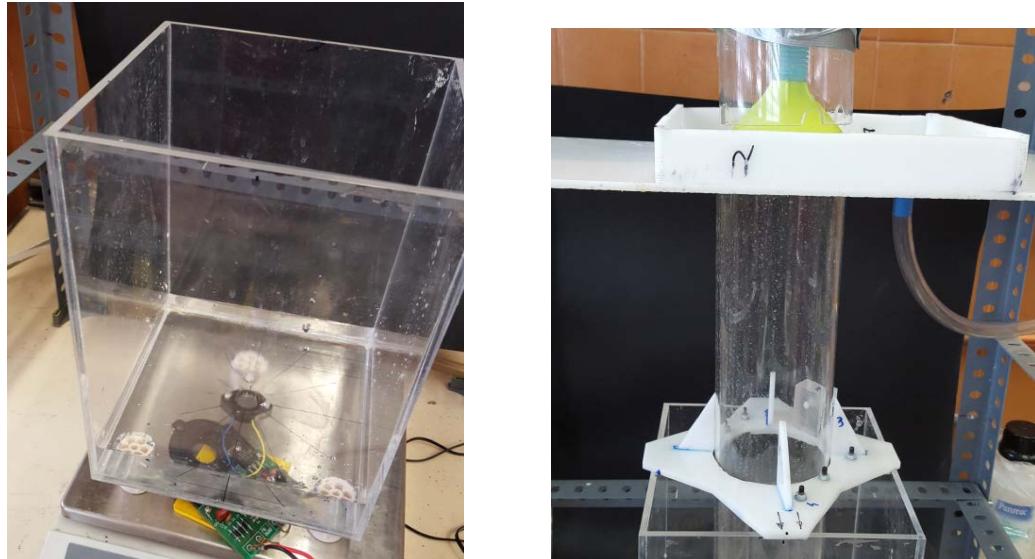


Figura 2.7 Recipiente de ensayos y cubierta superior

Las dimensiones se detallan en los planos del Anexo I.

### 2.1.4. Sistema de extracción

Con la finalidad de extraer las gotas atomizadas y poder valorar la masa que se ha nebulizado, se ha instalado un sistema de extracción para eliminar dichas gotas que aparecen.

El sistema consta de un extractor, gracias a un ventilador SODECA CMAT-426-2T, con un motor de 50 Hz con conexión triángulo estrella de 0.37 kW y factor de potencia 0.85, al cual está conectado un conducto flexible de aluminio corrugado, utilizado en sistemas de extracción.

### 2.1.5. Balanza

Permite cuantificar la masa que se ha atomizado, se ha hecho uso de una balanza de mesa digital de 0,1 g de precisión y 8 kg de pesaje máximo.

### 2.1.6. Hidrófono

El hidrófono es un elemento que convierte presión a una señal eléctrica, para poder cuantificar los valores medidos. Puede utilizarse en agua o cualquier otro fluido.

En éste caso, se ha utilizado el modelo HNP-500 de la firma Onda Corporation, que permite la obtención de las ondas acústicas en el rango 1-20 MHz. Los datos de éste se pueden consultar en el *Anexo I*.



Figura 2.8 Hidrófono y preamplificador

La utilidad que tiene para el proyecto radica en que la medida que nos da el hidrófono realmente es una presión, por lo tanto es interesante para poder estudiar como varía la presión en el fluido cuando se ve excitado con la onda del piezoelectrónico para poder entender los fenómenos que están ocurriendo.

A la salida del hidrófono se ha conectado un preamplificador de la señal y una resistencia de 50 ohm, para poder visualizar de una manera más cómoda la señal, de acuerdo a las instrucciones facilitadas por el fabricante.

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.

### 2.1.7. Sistema de guías del hidrófono

Para realizar las medidas con el hidrófono a las mismas alturas con los distintos líquidos, se ha empleado un sistema de guiado formado por cremallera y piñón, con escala milimétrica, que permite desplazarse, o bien en el eje vertical o en el horizontal,

dependiendo de la guía utilizada, para poder determinar la presión a distintas alturas o como varía al movernos, a altura constante, en el plano horizontal, para determinar la posible existencia de superposición de ondas.

Consta de una rosca manual, para poder determinar con precisión la posición exacta donde se desean realizar las medidas y están fabricadas de metal de alta rigidez. La guía principal, se ha fijado a la estructura metálica de la instalación mediante tornillos, para asegurar la precisión en las medidas. El desplazamiento es manual y el sistema está fabricado en metal de alta rigidez.

El resto de características pueden ser consultadas en el Anexo I.

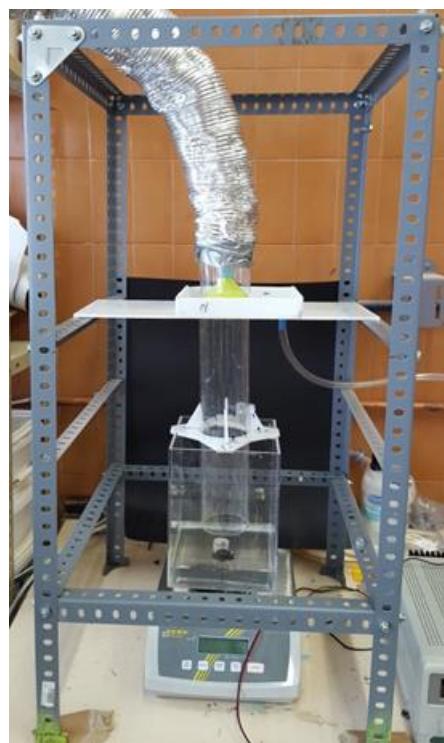


*Figura 2.9 Utilización del sistema de guiado*

### 2.1.8. Estructura metálica

Con el fin de afianzar el recipiente y las guías, se ha construido una estructura de barras metálicas con agujeros pasantes, para poder fijar todos los elementos mediante tornillos y realizar las mediciones siempre en la misma posición.

La estructura cuenta de 14 barras de distintas medidas, 4 de 100 cm y 10 de 50 cm, unidas en las esquinas mediante perfiles metálicos en forma de “L”, formando un prisma cuadrangular, con la posibilidad modificar la altura de las barras de la parte central, para seleccionar la altura principal del hidrófono y para fijar la cubierta superior del recipiente, que forma parte del sistema de extracción y así evitar que las vibraciones originadas por dicho sistema extractor puedan influir en el resultado de las medidas.



*Figura 2.10 Fotos de la estructura*

Se han situado 3 tacos de goma entre el recipiente del líquido y la balanza digital, persiguiendo varios propósitos:

- Reducir posibles vibraciones transmitidas por el sistema extractor, aunque al separar la cubierta superior del recipiente de metacrilato, se han mitigado casi por completo.
- Permitir que exista una distancia suficiente entre la parte inferior del recipiente y la balanza electrónica para poder situar el sistema generador de ultrasonidos.

### **2.1.9. Termómetro**

Para determinar las variaciones de temperatura en los líquidos ensayados, debido a los efectos producidos por la excitación del piezoelectrónico, la posible refrigeración debida a la extracción, a la evaporación y a la propia atomización, se ha utilizado un termómetro digital modelo multi-thermometer 91000-50/F, con un rango de medida de -50°C a 150°C y una resolución de 0.1°C.

### **2.1.10. Osciloscopio**

El registro de la señal captada por el hidrófono, se ha realizado a través de un osciloscopio digital Tektronix TDS 3012, que gracias a su salida serie RS232, permite la comunicación con un pc, mediante el software proporcionado Tekvisa, y brinda la oportunidad de registrar numerosos datos de la onda y exportarlos a Excel para su posterior análisis e incluso capturar la imagen de la forma de onda y almacenarla como un archivo de imagen.



*Figura 2.11 Osciloscopio Tektronix TDS 3012*

## 2.2. Características de los líquidos ensayados

En la siguiente tabla, se pueden consultar las propiedades físicas más relevantes de los líquidos ensayados y que pueden determinar su comportamiento en los experimentos.

Son líquidos con unas propiedades muy distintas, lo cual es bastante importante de cara a aplicar los resultados a otros con características similares. Si nos fijamos en la densidad, el hexano es el que presenta un valor más bajo, aunque bastante similar al del hexano, y el agua el más alto, al igual que la viscosidad. Los datos de tensión superficial son muy variados y sigue la misma tendencia que las otras dos propiedades. También en ésta línea están el módulo de compresibilidad y la temperatura de ebullición, que presentan un valor más elevado para el caso del agua y disminuyen hasta el hexano, con los valores más bajos. La única propiedad que no sigue esta tendencia, es la presión de vapor, que tiene su valor máximo para el hexano y el mínimo para el decano, con una gran diferencia entre ellos.

	Densidad $\rho(\text{g/cm}^3)$	Viscosidad $\nu(\text{cP})$ a $20^\circ\text{C}$	Tensión superficial $\sigma(\text{dina/cm})$ a $20^\circ\text{C}$	Presión de vapor (kPa) $25^\circ\text{C}$	Módulo de compresibilidad K(Pa) $20^\circ\text{C}$	Temperatura de ebullición ( $T_B$ )
Agua	1	1	72.75	2.3393	$2.2 \times 10^9$	100
Hexano	0.6548	0.294	18.43	17	$7.9 \times 10^8$	69
Heptano	0.6838	0.408	19.7	4.8	$9.4 \times 10^8$	98
Decano	0.73	0.92	23.37	0.17	$1.1 \times 10^9$	174

Tabla 2.1 Propiedades de los líquidos ensayados

## 2.3. Método de trabajo

Mediante el uso del termómetro, se ha determinado al inicio de todos los experimentos, que las condiciones iniciales de temperatura existentes, eran similares durante la realización de todos los ensayos, para evitar variaciones en las propiedades de los distintos líquidos.

### 2.3.1. Medida de la tasa de atomización

Para medir las tasas de atomización se ha seguido el siguiente procedimiento:

- Se rellena el recipiente de metacrilato hasta la marca de 3 cm, para tener constancia de la cantidad de líquido inicial en todo momento.
- Inicialmente, se ha realizado la conexión del circuito transductor del piezoelectrónico a la fuente de alimentación y se ha fijado una tensión inicial de 60 V.
- Se posiciona el termómetro digital dentro del recipiente fijado a la pared del mismo mediante un elemento adhesivo y se anota la temperatura inicial del líquido en cuestión.
- Se activa la alimentación y la extracción y en el momento en que se empiezan a cronometrar los 5 minutos, se anota la masa inicial.
- Una vez transcurrido el tiempo fijado, se corta la alimentación y se detiene la acción del sistema extractor.
- Se anotan los valores finales de masa y de temperatura.
- Se realiza el cálculo de los valores de variación de masa, temperatura y masa atomizada, haciendo uso de la variación de masa, en gramos y del tiempo transcurrido, en segundos.
- Se disminuye la tensión 5 V y se repite el proceso.

Se han realizado todas las medidas, partiendo de 60 V y finalizando en 20 V, con intervalos de 5 V y dejando actuar al piezoelectrónico y al sistema extractor durante, exactamente, 5 minutos (300 segundos).

Una vez se han realizado las medidas en las diferentes tensiones, se procede al cambio del líquido. Primero se extrae el fluido analizado, se realiza una limpieza a conciencia de la cubeta de metacrilato, para evitar mezcla entre los distintos líquidos estudiados: agua, hexano, heptano y decano.

Este proceso se ha realizado para los 4 líquidos en cuestión, agua, hexano, heptano y decano.

Se han estudiado otros opciones de actuar, pero finalmente se ha optado por seguir estos pasos debido a que son los que mejores resultados arrojan.

### **2.3.2. Medida de la presión mediante el hidrófono**

Para estas medidas, no es necesario el uso del sistema extractor, ya que no se calcula la masa que se atomiza, sino que simplemente se desea estudiar la variación de la presión en el interior del fluido.

Como puntos de partida es necesaria la instalación de las guías del hidrófono sobre una de las barras metálicas que atraviesan la estructura metálica. Se hará uso de una guía u otra, dependiendo de si se van a realizar las medidas en el eje z, vertical o en el eje x, horizontal.

También es necesaria la conexión del osciloscopio al ordenador mediante el estándar de comunicación RS232 y haber encendido en primer lugar el osciloscopio antes de comunicarlo con el ordenador, para evitar conflictos en la comunicación. Tras esto, se ejecuta el programa de proporcionado por el fabricante del osciloscopio y se realiza la configuración desde el ordenador, para poder obtener los datos del osciloscopio.

A continuación, se realizan las siguientes tareas:

- Se conecta el hidrófono al preamplificador, a la resistencia de 50 Ohm y al osciloscopio.
- Se rellena el recipiente hasta que el líquido alcanza un nivel de 3 cm.
- Se centra el hidrófono hasta dejarlo en el centro del disco piezoelectrónico.
- Se hace descender el hidrófono, haciendo uso de la rosca de precisión de las guías, hasta una posición de -30 mm, tomando como referencia la superficie libre del líquido. Esta posición de -30 mm, coincide con la parte inferior del recipiente, de forma que quede levemente por encima del disco piezoelectrónico y coincidiendo con su centro.
- Se conecta la alimentación a una tensión inicial de 50 V.

## Influencia de las propiedades del fluido en la tasa de nebulización en atomizadores ultrasónicos

---

- Se congela en el osciloscopio la forma de onda que obtenemos y desde el ordenador, capturamos la onda del osciloscopio, haciendo uso del software.
- Se guarda en un fichero csv (valores separados por comas en sus siglas inglesas) los datos y un fichero que contiene la imagen de la forma de onda obtenida. Los datos son leídos por Excel y son usados para obtener el espectro de frecuencias. Elevamos el hidrófono hasta -20 mm y repetimos el proceso.
- Unas vez hemos llegado a nuestra referencia de 0 mm, la superficie libre del líquido, vamos aumentando la posición de 5 mm en 5 mm, ascendiendo por el cono que se genera en el fluido, hasta una altura que en la cual se pueda distinguir correctamente la forma de onda. Esta altura variará dependiendo de la tensión de alimentación.
- Este proceso se repite con unas tensiones de 50 V, 30 V y 20 V.

Este proceso, al igual que el anterior, se ha realizado para los 4 líquidos en cuestión, realizando una correcta limpieza del recipiente cada vez que se realiza un cambio de líquido.

También es muy importante no conectar la alimentación del piezoelectrónico en seco, ya que se produce un calentamiento del mismo rápidamente y se estropea fácilmente.

### 3. Resultados obtenidos

A continuación, se exponen los resultados obtenidos en cada experimento, con sus correspondientes gráficos para una correcta visualización y comprensión de los mismos.

#### 3.1. Tasas atomizadas de líquido

Como se ha comentado en apartados anteriores, en todos los ensayos de atomización con los distintos líquidos, se han fijado unas condiciones de partida idénticas, para poder comparar los resultados entre ellos.

Se ha llenado el recipiente hasta alcanzar un nivel de 3 cm, punto en el cual los fabricantes del piezoelectrónico (TDK), recomiendan realizar las medidas y además, se ha comprobado mediante estudios anteriores, que es en torno a este nivel en el cual se atomiza en mayor medida.

La temperatura inicial, siempre ha sido la temperatura ambiente y los ensayos se han realizado en días próximos, para que ésta fuera lo más similar posible.

##### 3.1.1. Atomización de agua

En la siguiente tabla se muestran los resultados de atomización con agua a un voltaje de excitación que varía desde 25 V a 60 V y la variación de la temperatura.

V	M <sub>i</sub>	M <sub>f</sub>	ΔM	T <sub>m</sub> (min)	Tasa atom. (g/s)	T <sub>a<i>i</i></sub>	T <sub>a<i>f</i></sub>	ΔT <sub>a</sub>
60	2251,8	2039,0	212,8	5	0,7093	18,7	18,1	-0,6
55	2094,0	1948,5	145,5	5	0,4850	18,2	18,3	0,1
50	2007,4	1889,6	117,8	5	0,3927	18,2	18,3	0,1
45	1933,7	1867,6	66,1	5	0,2203	18,4	18,7	0,3
40	1883,7	1848,8	34,9	5	0,1163	19	18,5	-0,5
35	1840,5	1824,7	15,8	5	0,0527	18,4	19,3	0,9
30	1824,8	1817,5	7,3	5	0,0243	19	19,1	0,1
25	1823,5	1819,7	3,8	5	0,0127	19,1	19,2	0,1

Tabla 3.1 Datos atomización agua

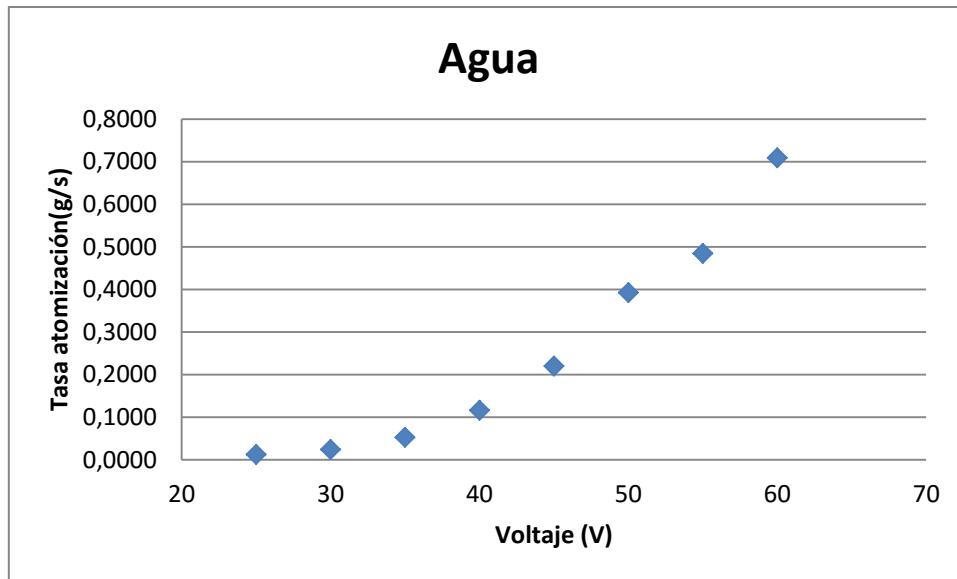


Figura 3.1 Tasa atomización agua frente voltaje

De la gráfica, se puede visualizar que, a partir de unos 30 voltios, donde comienza la atomización, se va produciendo un aumento en la tasa de ésta de forma cuadrática.

En un principio, era el comportamiento esperado para todos los líquidos ensayados, ya que cuanto mayor sea la tensión aplicada, se podría pensar que mayor será la excitación del fluido y por tanto, más se atomizará. Sin embargo, a continuación y mediante la exposición de las gráficas de los otros tres líquidos, se comprueba que esto no es así.

### 3.1.2. Atomización hidrocarburos

A continuación se muestran los resultados de atomizar con los tres hidrocarburos: hexano, heptano y decano y el posterior análisis de los datos obtenidos.

**Influencia de las propiedades del fluido en la tasa  
de nebulización en atomizadores ultrasónicos**

V	mi	mf	Δm	T <sub>m</sub> (min)	Tasa atom. (g/s)	T <sub>a</sub> i	T <sub>a</sub> f	ΔT <sub>a</sub>
<b>60</b>	1946,0	1898,1	47,9	2	0,3992	19,2	15,0	-4,2
<b>55</b>	1950,8	1912,8	38,0	2	0,3167	13,6	8,3	-5,3
<b>50</b>	1978,0	1943,4	34,6	2	0,2883	9,9	8,7	-1,2
<b>45</b>	2016,0	1984,0	32,0	2	0,2667	9,1	7,9	-1,2
<b>40</b>	1980,9	1942,3	38,6	2	0,3217	7,9	6,8	-1,1
<b>35</b>	1970,6	1914,4	56,2	2	0,4683	7,7	5,4	-2,3
<b>30</b>	1943,2	1871,0	72,2	2	0,6017	7,2	4,4	-2,8
<b>25</b>	2005,6	1956,7	48,9	2	0,4075	8,1	5,9	-2,2

*Tabla 3.2 Datos atomización hexano*

V	mi	mf	Δm	T <sub>m</sub> (min)	Tasa atom. (g/s)	T <sub>a</sub> i	T <sub>a</sub> f	ΔT <sub>a</sub>
<b>60</b>	2058,6	2000,5	58,1	5	0,1937	17,2	16	-1,2
<b>55</b>	2054,7	1998,2	56,5	5	0,1883	16,8	15,9	-0,9
<b>50</b>	2052,2	2000,4	51,8	5	0,1727	16,6	15,8	-0,8
<b>45</b>	2049,2	1993,4	55,8	5	0,1860	17,1	16,1	-1,0
<b>40</b>	2047,9	1963,1	84,8	5	0,2827	16,3	15,0	-1,3
<b>35</b>	2053,8	1909,0	144,8	5	0,4827	15,7	13,9	-1,8
<b>30</b>	2053,4	1858,4	195,0	5	0,6500	15,7	12,4	-3,3
<b>25</b>	2065,3	1958,7	106,6	5	0,3553	15,2	12,9	-2,3

*Tabla 3.3 Datos atomización heptano*

V	mi	mf	Δm	T <sub>m</sub> (min)	Tasa atom. (g/s)	T <sub>a</sub> i	T <sub>a</sub> f	ΔT <sub>a</sub>
<b>60</b>	2133,2	2121,8	11,4	5	0,0380	20,4	24,4	4,0
<b>55</b>	2121,1	2105,9	15,2	5	0,0507	24,4	26,6	2,2
<b>50</b>	2103,1	2078,9	24,2	5	0,0807	26,6	27,6	1,0
<b>45</b>	2075,8	2018,8	57,0	5	0,1900	27,6	27,7	0,1
<b>40</b>	2032,9	1933,0	99,9	5	0,3330	27,7	26,4	-1,3
<b>35</b>	1960,9	1826,5	134,4	5	0,4480	26,4	25,2	-1,2
<b>30</b>	1842,4	1738,7	103,7	5	0,3457	25,2	23,4	-1,8
<b>25</b>	1756,7	1677,5	79,2	5	0,2640	23,4	22,3	-1,1

*Tabla 3.4 Datos atomización hexano*

## Influencia de las propiedades del fluido en la tasa de nebulización en atomizadores ultrasónicos

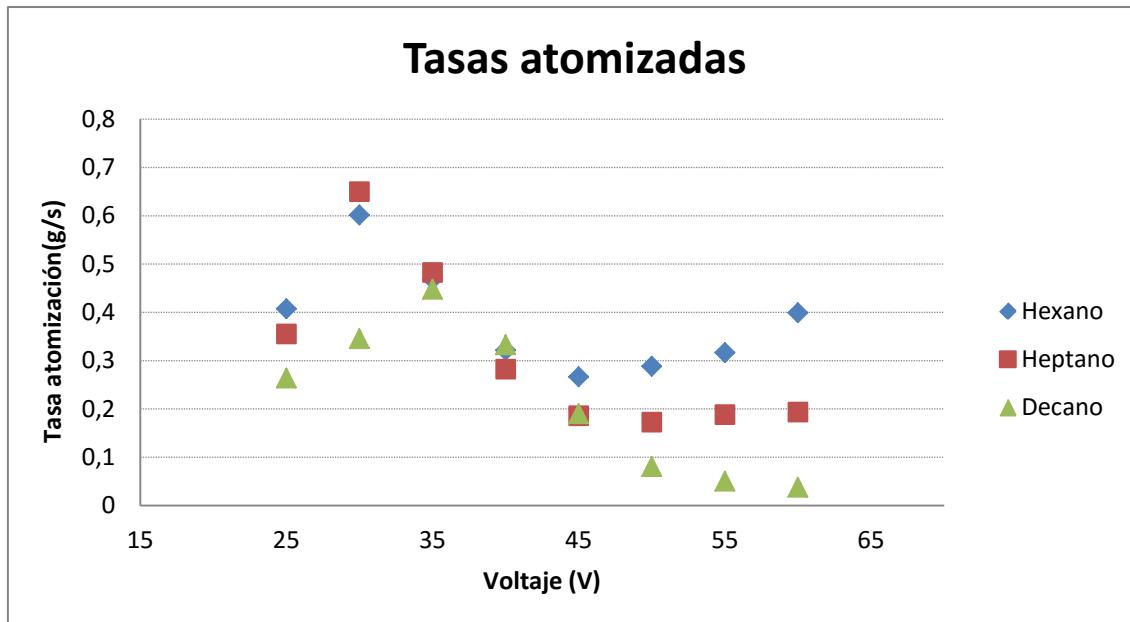


Figura 3.2 Tasa atomización frente voltaje

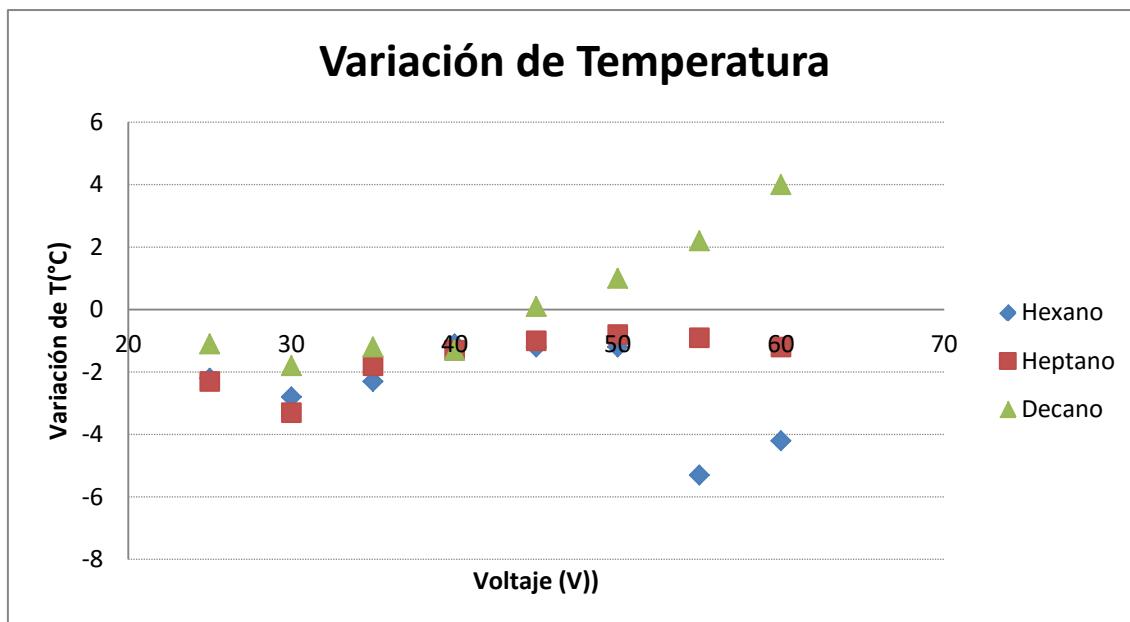


Figura 3.3 Variación de Temperatura frente voltaje

## Influencia de las propiedades del fluido en la tasa de nebulización en atomizadores ultrasónicos

---

Lo que más llama la atención a primera vista, es la diferencia entre la tendencia que sigue la gráfica del agua y la que aparece en los casos del hexano, el heptano y el decano.

En el primer caso, el del agua, la atomización aumenta, como se ha comentado, aproximándose a un polinomio de segundo grado, en ningún momento disminuye, si el voltaje no lo hace. Sin embargo, en el caso de los hidrocarburos, esta tasa, crece, desde valores inferiores al caso del agua, con una mayor rapidez, hasta que llega a un máximo, a 30 voltios para el hexano y el heptano y a 35 en el caso del decano. A partir de este punto, la atomización decrece de la misma manera en los tres alcanos hasta los 45 voltios, a partir de los cuales, la tendencia entre éstos evoluciona de distinta manera. En el caso del hexano, vuelve a aumentar. Sin embargo, en el heptano se mantiene más o menos estable y en el decano todavía decrece más.

Este comportamiento, podrá ratificarse al consultar las imágenes de la evolución del cono y la atomización, en el apartado 3.2.

A parte de los datos de atomización, también se ha graficado la evolución de la temperatura en los tres hidrocarburos, conforme aumenta el voltaje.

En los tres casos, la temperatura disminuye hasta los 30 voltios, aproximadamente, valor a partir del cual comienza a aumentar hasta que se aplican 45 voltios, punto a partir del cual, difieren los tres alcanos. La temperatura en el decano sigue aumentando, mientras que en el heptano se mantiene en una zona prácticamente estable y destaca el hexano que desciende bastante.

Esto que se acaba de comentar, es muy interesante relacionarlo con las tasas de atomización.

Si nos fijamos en el heptano y en el hexano, siguen una tendencia, tanto en variación de temperatura como en tasa de atomización, muy similar y si se observa la *tabla 1.1*, encontraremos que las propiedades, con la salvedad de la presión de vapor, son muy parecidas, lo cual puede explicar esta similitud en su comportamiento. En

## Influencia de las propiedades del fluido en la tasa de nebulización en atomizadores ultrasónicos

---

cambio el decano, que tiene unas propiedades más distantes a los dos hidrocarburos que se acaban de citar, difiere más en su comportamiento.

Si se compara la tendencia que siguen las gráficas de atomización y la que se puede apreciar para la variación de temperatura, se observa una clara relación. En los puntos en los que la temperatura disminuye, la tasa de atomización aumenta y por el contrario, si la temperatura aumenta, la atomización disminuye de nuevo. Esto está ocurriendo en el caso de los tres alkanos, por lo tanto, además del voltaje aplicado, queda patente que la temperatura está influyendo en el comportamiento de estos líquidos.

La razón de que en estos hidrocarburos la atomización sea mayor a voltajes menores, radica en que, su viscosidad y tensión superficial, es bastante menor que la del agua, sobre todo en los casos del heptano y el hexano. Por tanto, mayor facilidad para que las ondas generadas por el piezoelectrónico, afecten a la superficie libre del líquido, generando inestabilidades y por tanto favoreciendo la atomización y también, adoptando la teoría de la cavitación, a menor viscosidad, más fácil será que se formen burbujas cuando se alcance la presión de vapor y que se desplacen a puntos de presiones mayores.

Otro dato que podemos extraer de las gráficas de la temperatura, *figura 3.3*, es que en la mayoría de los puntos ensayados, con la salvedad de los voltajes altos en el decano, la variación de temperatura es negativa. La explicación de esto, radica en que, el fluido, al estar atomizándose aumenta su tasa de evaporación dado que la superficie de la interfase líquido-aire aumenta, y por tanto, el fluido se enfriá. Fenómeno, que se da en mayor medida, en el hexano cuando se eleva la tensión aplicada al piezoelectrónico por encima de los 45 voltios, al contrario que en el caso del decano, el cual se está calentando debido a la transmisión de calor del piezoelectrónico al fluido, que aunque también está presente en el resto de los casos, aquí está elevando la temperatura ya que escasamente se está evaporando.

Como se está comprobando, los datos de atomización, están relacionados con las propiedades de los fluidos como se ha ido comentando, sin embargo, inicialmente

se pensaba que una de las propiedades que más iba a influir en los resultados, iba a ser la presión de vapor, ya que además es muy distinta en cada líquido, sin embargo y como se ha podido comprobar después, no es una propiedad determinante, ya que, por ejemplo, la presión de vapor del hexano, dista bastante de la del heptano y sin embargo las tasas de atomización son muy parecidas.

Retomando el tema de la evaporación y su influencia en la variación de la temperatura en el fluido, también tiene una estrecha relación con las propiedades físicas. En el caso del hexano, que es el que más se evapora, está propiciado por la baja temperatura de ebullición y la alta presión de vapor que presenta, lo que facilita la evaporación del mismo.

Otra propiedad muy importante, en relación al tema que se ha tratado, es el módulo de compresibilidad, ya que, la velocidad del sonido y la energía aportada al fluido, guardan una estrecha relación con esta propiedad física.

### **3.2. Visualización de experimentos**

#### **3.2.1. Formación y desarrollo del cono**

A continuación, se exponen una serie de fotografías, de cómo evoluciona el cono en los distintos líquidos en función del voltaje aplicado, el punto dónde se produce la atomización en el mismo y la intensidad con la que se produce este fenómeno, para posteriormente, realizar una comparativa entre los distintos resultados obtenidos.

Influencia de las propiedades del fluido en la tasa  
de nebulización en atomizadores ultrasónicos

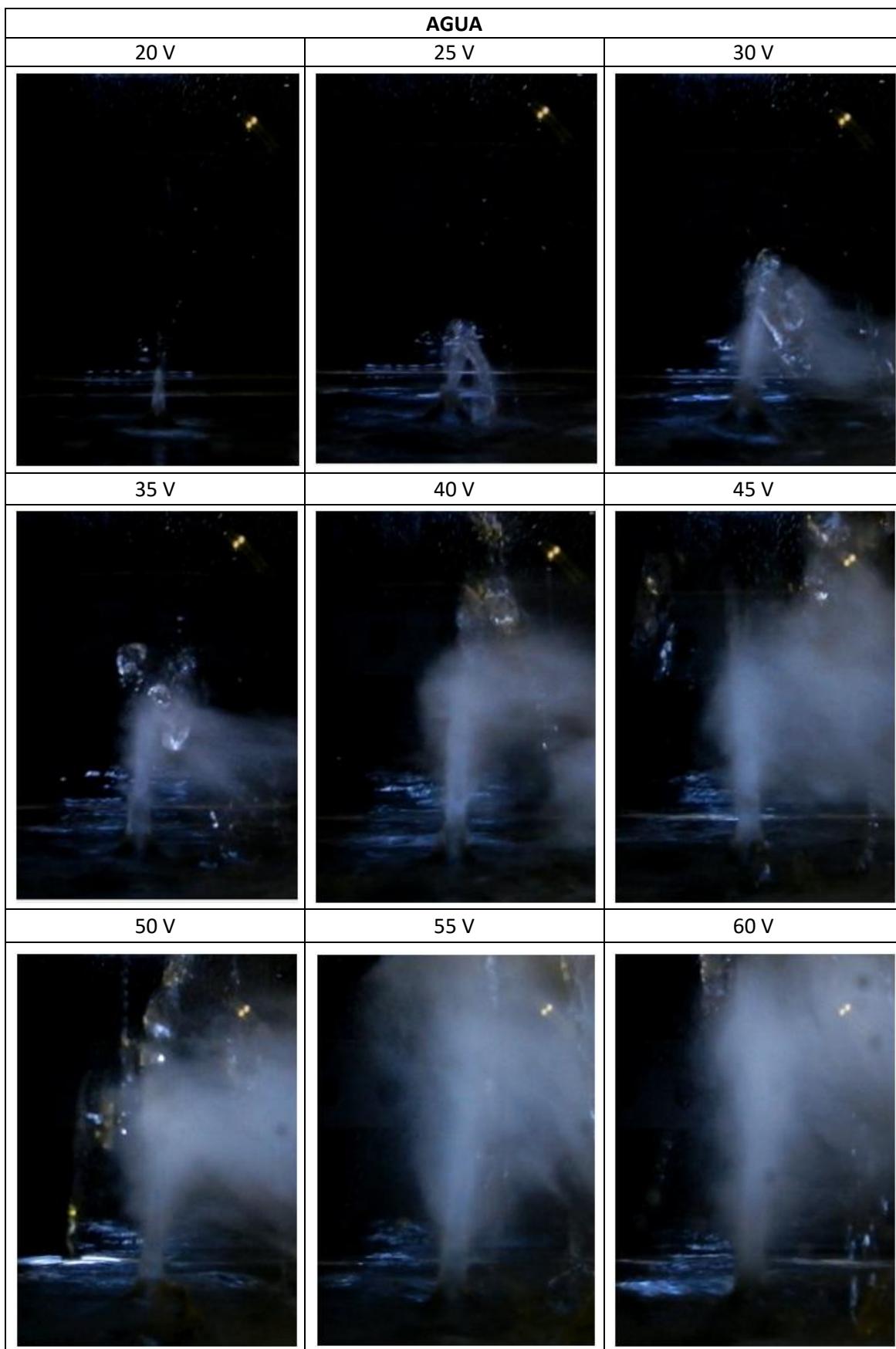


Tabla 3.5 Forma del cono atomización agua

Influencia de las propiedades del fluido en la tasa  
de nebulización en atomizadores ultrasónicos



Tabla 3.6 Forma del cono atomización hexano

Influencia de las propiedades del fluido en la tasa  
de nebulización en atomizadores ultrasónicos

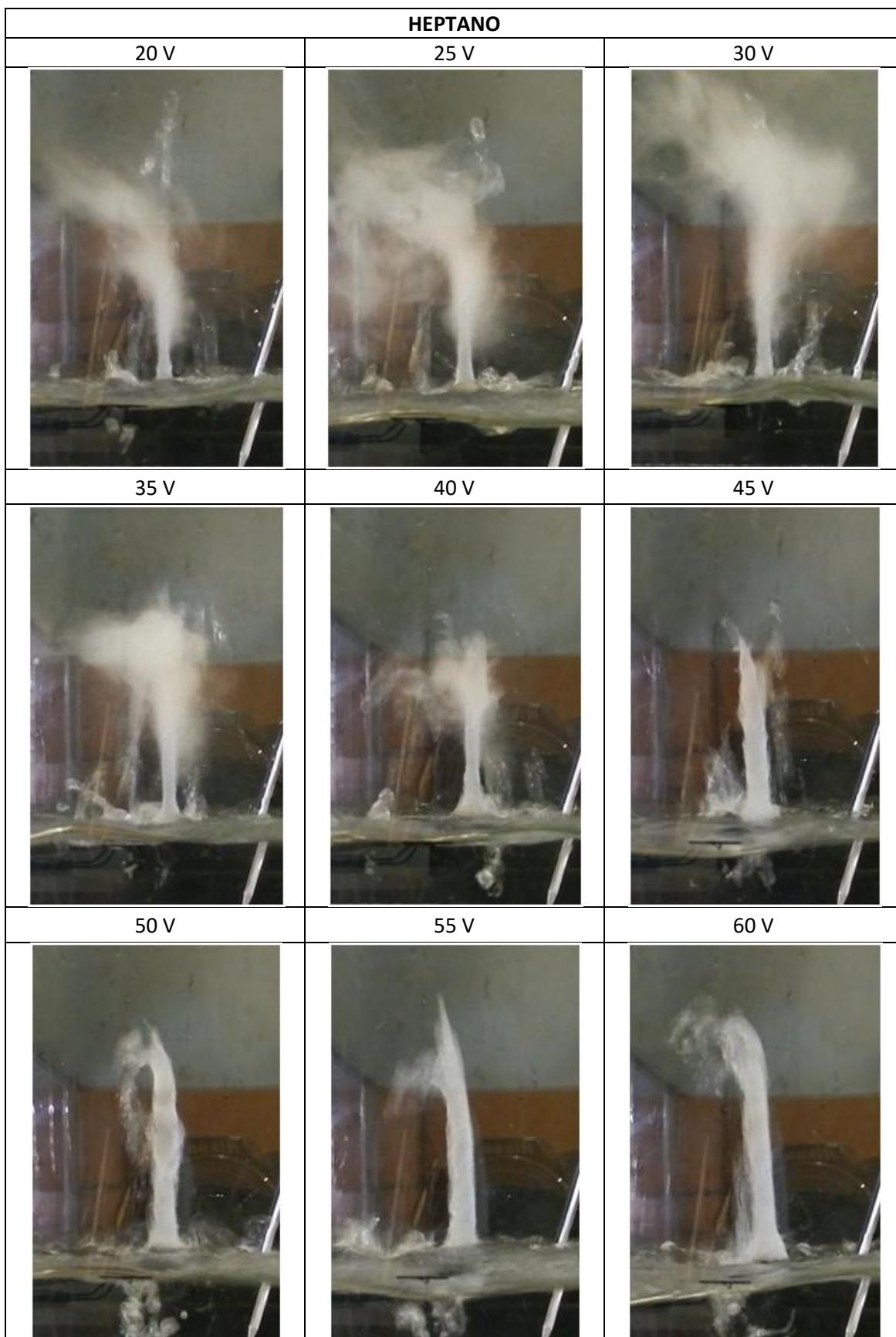


Tabla 3.7 Forma del cono atomización heptano

Influencia de las propiedades del fluido en la tasa  
de nebulización en atomizadores ultrasónicos

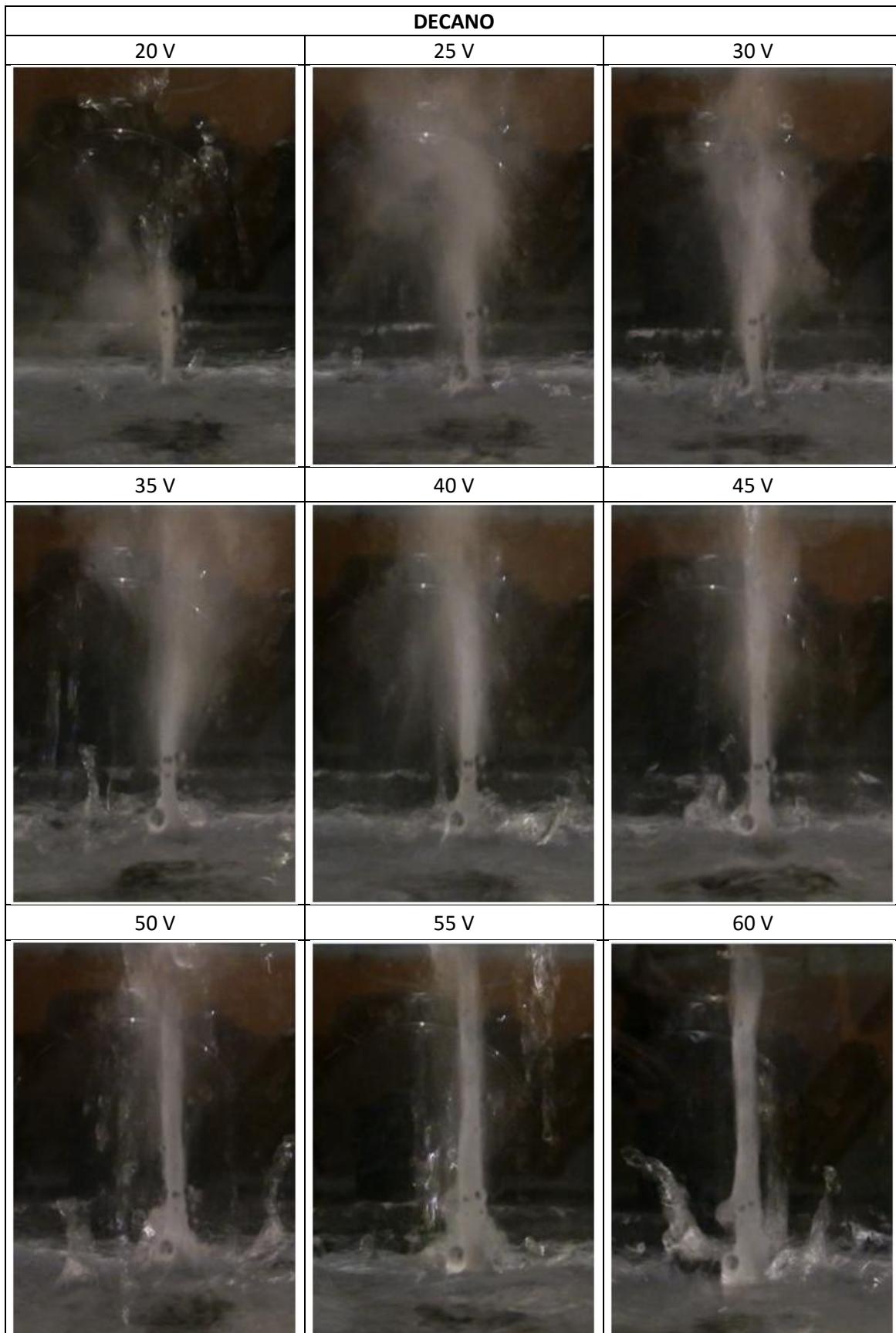


Tabla 3.8 Forma del cono atomización decano

## Influencia de las propiedades del fluido en la tasa de nebulización en atomizadores ultrasónicos

---

Visualizando las imágenes anteriores, se confirman las conclusiones que se habían obtenido a partir de las gráficas de las tasas de atomización y de la variación de temperatura.

Comencemos por el caso más simple, el del agua. La atomización va creciendo a medida que se eleva el voltaje, ocurriendo lo mismo con la altura y el grosor del cono. También se aprecia que, una vez el cono ha alcanzado una altura en la que atomiza sin problema, el punto en el cuál lo hace, se mantiene prácticamente estable aunque aumente la altura alcanzada por el mismo.

En el caso del hexano, a 20 voltios ya se nota que atomiza de manera considerable, cosa que no ocurría con el agua hasta alcanzados los 30 voltios. La atomización sigue creciendo hasta un punto máximo situado en el rango entre 30 y 35 voltios, coincidiendo con lo obtenido en las gráficas en el punto 3.1.2. A partir de aquí, la atomización va decreciendo hasta que el voltaje se fija a 45 voltios, donde parece que es prácticamente nula. En este punto, la temperatura empezaba a disminuir y lo que ocurría con la atomización era que crecía nuevamente hasta el punto de máxima tensión, en el cuál se observa que se está atomizando una cantidad importante de líquido.

La tasa de atomización del heptano, crece de una manera similar a la del hexano hasta alcanzados los 30-35 voltios, donde de nuevo se encuentran los valores máximos. Sin embargo en este caso, la atomización se mantiene prácticamente igual aunque se aumente el voltaje de excitación del piezoelectrónico, al igual que está ocurriendo con la temperatura, cuya variación es ínfima.

El caso del decano es muy curioso, sobre todo a valores altos, ya que ocurre justo lo contrario al hexano. En los valores más bajos de tensión, la atomización va aumentando, aunque en menor medida que los otros dos alkanos, pero siguiendo la misma tendencia, hasta la zona de 30-35 voltios. Una vez superada esta tensión, la masa del líquido que se atomiza por segundo, disminuye continuamente hasta que, en la zona de valores más altos casi se anula y la temperatura aumenta, puesto que se reduce el mecanismo de refrigeración por evaporación.

### 3.3. Medidas de presión

A continuación, se exponen algunos valores de amplitud, obtenidos directamente del hidrófono, mediante el software que nos permitía capturar una serie muestrada de valores de la señal en las condiciones establecidas y captar la forma de la onda, junto a las transformadas de Fourier, realizadas mediante el software de procesamiento numérico Octave. Éstos, se relacionarán con los datos de las tasas de atomización y las propiedades de los fluidos, para proponer algunas conclusiones de qué es lo que está ocurriendo.

Las primeras gráficas están medidas en el punto de  $z = -10$  mm, en el cual se da una buena concentración de las ondas y está cercano a la superficie libre. La tensión aplicada es de 30 voltios, una de las tensiones que más interés han suscitado en este proyecto, debido a que aquí aparecen los máximos de atomización.

Se han obtenido las siguientes formas de onda para los fluidos ensayados. Atención a las escalas de las gráficas que no es constante en todos los casos, con el fin de poder visualizar con mayor facilidad la onda.

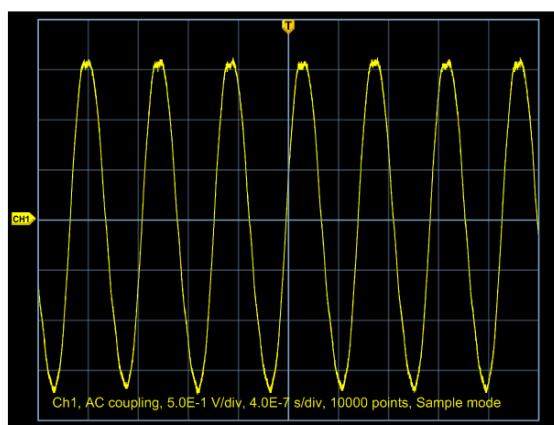


Figura 3.4 Agua -10 mm y 30 voltios

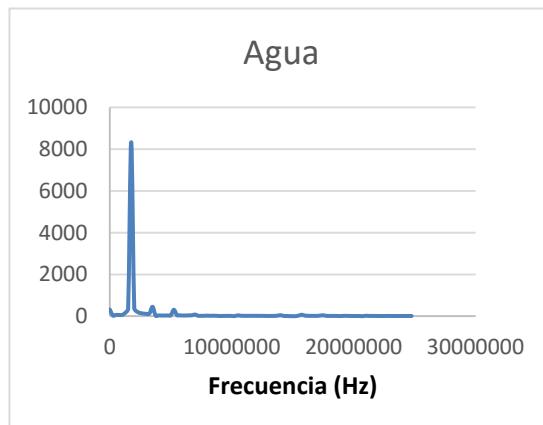


Figura 3.5 TdF agua -10 mm y 30 voltios

## Influencia de las propiedades del fluido en la tasa de nebulización en atomizadores ultrasónicos

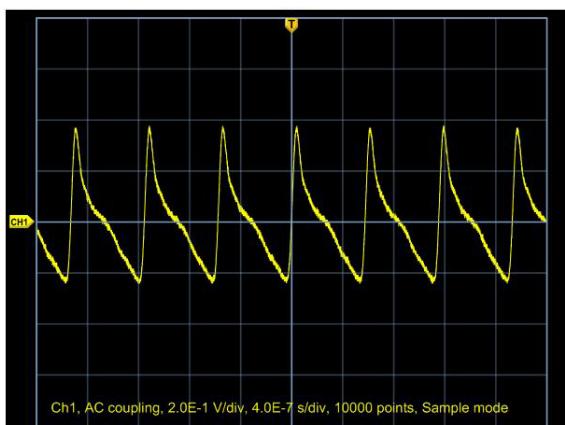


Figura 3.6 Hexano -10 mm y 30 voltios

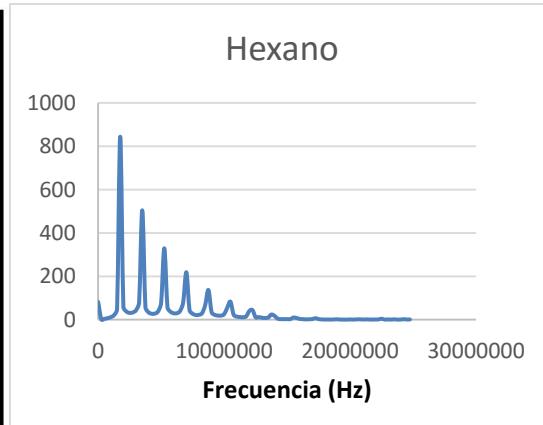


Figura 3.7 TdF hexano -10 mm y 30 voltios

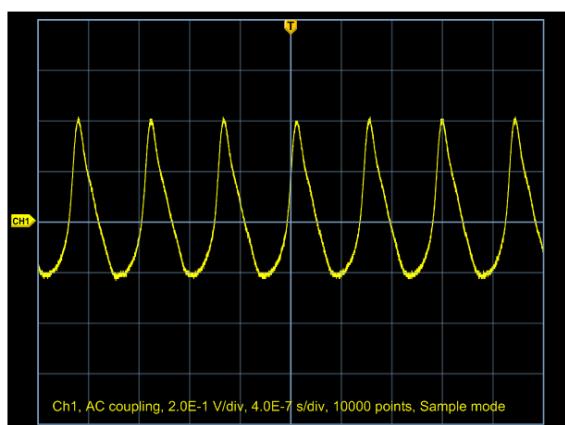


Figura 3.8 Heptano-10 mm y 30 voltios

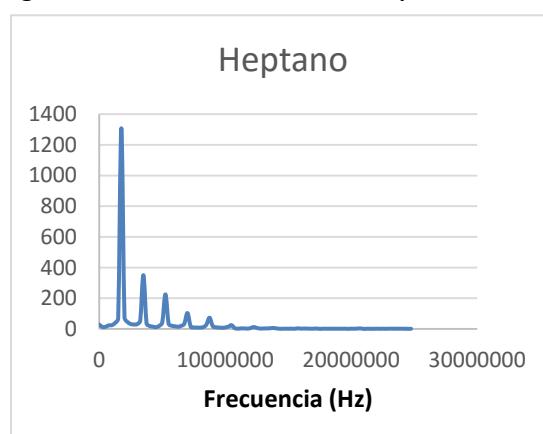


Figura 3.9 TdF heptano -10 mm y 30 voltios

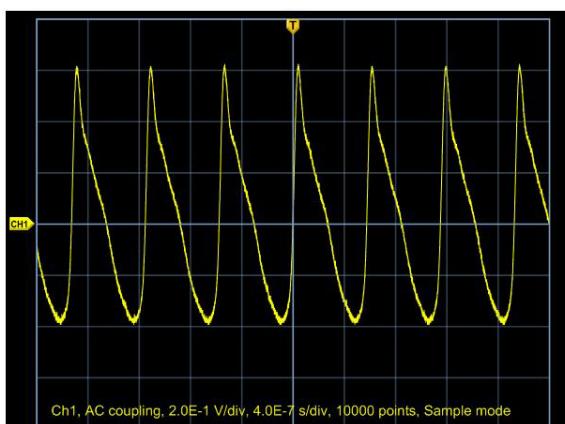


Figura 3.10 Decano -10 mm y 30 voltios

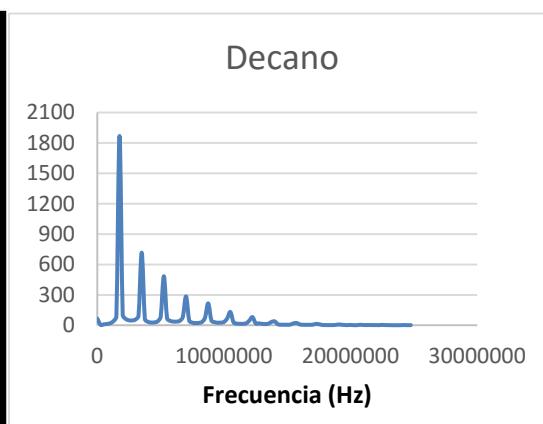


Figura 3.11 TdF decano -10 mm y 30 voltios

Observando las formas de onda y las transformadas de Fourier, se aprecia que el agua es el fluido donde mayores amplitudes y por tanto mayores presiones se detectan y el hexano donde más bajas son.

Este fenómeno, está ligado con la densidad de los fluidos, ya que es mucho mayor en el agua, disminuye considerablemente en el decano y todavía más para el caso del heptano y el hexano, los cuales presentan unas presiones con un alto grado de similitud, al igual que sus densidades.

La explicación de por qué aumenta la amplitud en fluidos menos densos está ligada a la siguiente ecuación.

$$\dot{W} = \frac{p^2}{\rho v_s}$$

*Ecuación 3.1 Energía transmitida a un fluido ( $v_s$  = velocidad de propagación)*

De esta expresión, se puede sacar la siguiente conclusión. Si estamos aportando la misma energía a dos fluidos distintos, siendo excitados con el piezoelectrónico a una misma tensión, en el fluido que presente menor densidad, la presión tendrá que ser mayor, para cumplir igualar la energía aportada. Es por esto, por lo que en fluidos menos densos, como el hexano, se están registrando valores de presión más elevados que en el resto de líquidos.

En cuanto a la forma que tienen las ondas, en el agua se aprecia una onda sinusoidal, prácticamente perfecta, sin embargo, en el caso de los alcanos, las ondas tienen unas formas peculiares y distorsionadas. Esto guarda relación con la aparición de los armónicos que se aprecian en las transformadas de Fourier, los cuales distorsionan la onda que observamos.

En el caso del heptano y el hexano, nos encontramos con unas ondas prácticamente similares en amplitud, pero con alguna diferencia en su forma, siendo más parecidas, en cuanto a su forma se refiere, son las del hexano y el decano.

## Influencia de las propiedades del fluido en la tasa de nebulización en atomizadores ultrasónicos

---

Lo que más llama la atención, es la diferencia del rango de amplitudes entre los alcanos y el agua, siendo mucho mayor en el caso del agua, sobre todo si nos fijamos en el armónico fundamental.

Si nos fijamos en las transformadas obtenidas para el hexano, podemos observar que las amplitudes alcanzadas en el primer armónico, son menores que en cualquiera de los otros líquidos ensayados.

También resulta interesante comentar la gráfica obtenida con la transformada del decano para ese punto de 30 voltios, en la que se puede ver que los valores de amplitud alcanzados, sin llegar hasta los que presenta el agua, sí que son mayores que los otros dos hidrocarburos estudiados, lo cual guarda relación, con la densidad de este fluido, que está más cerca de la que tiene el agua.

Una de los aspectos que saltan a la vista en estas gráficas, exceptuando el caso especial del agua, es la aparición de varios armónicos, de amplitudes considerables con respecto al armónico fundamental. La aparición de estos armónicos, probablemente sea debida a la reflexión de las ondas en la superficie del líquido, debido a la diferencia de densidades entre el líquido que estamos ensayando y el aire.

Igualmente, la intensidad con la que se registran estos armónicos, variará con la proximidad al punto de reflexión, es decir, a la superficie del líquido, por tanto, en zonas más próximas al piezo y más alejadas de la superficie, estos armónicos se registran con menor amplitud, como puede observarse en la siguiente figura, en la que se muestra la transformada de Fourier de la amplitud de la señal captada por el hidrófono en el decano, a 30 voltios y la onda captada, a una altura en z de -30 mm, es decir, la más próximo al fondo de la cubeta y al piezoelectrónico.

## Influencia de las propiedades del fluido en la tasa de nebulización en atomizadores ultrasónicos

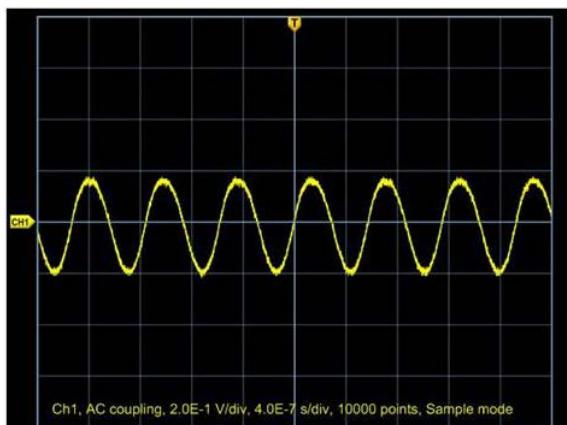


Figura 3.12 Decano 30 V y -30 mm

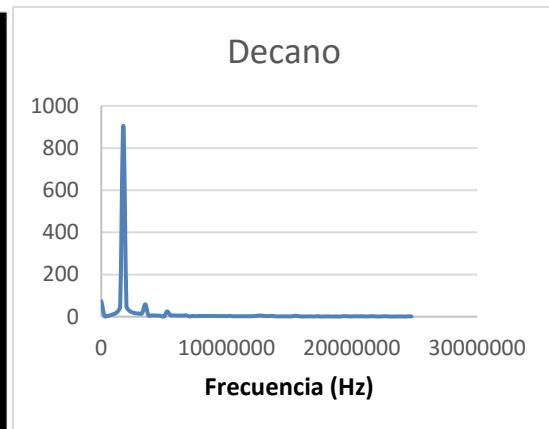


Figura 3.13 TdF decano 30 V y -30 mm

Como se aprecia, en este caso en el que no aparecen más armónicos que el fundamental, la onda captada por el hidrófono, no aparece distorsionada, sino que es una sinusoid perfecta.

Resulta interesante también, visualizar cómo varían las amplitudes en un mismo líquido y a una altura constante, aumentando la tensión.

En esta ocasión, se van a emplear los datos del hexano, a una altura de -10 mm, zona de gran incidencia de las ondas del piezoelectrónico.

## Influencia de las propiedades del fluido en la tasa de nebulización en atomizadores ultrasónicos

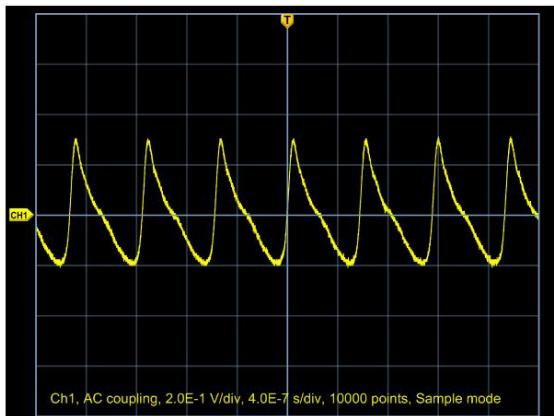


Figura 3.14 Hexano -10 mm y 20 voltios

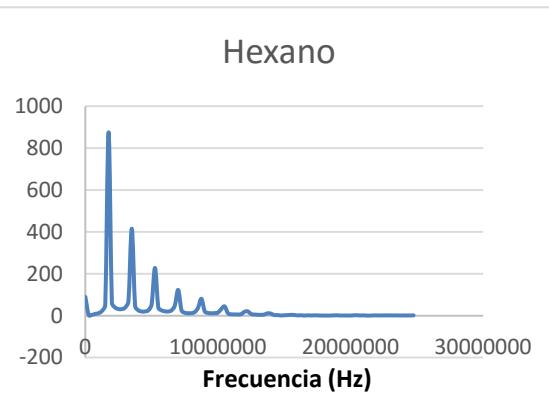


Figura 3.15 TdF hexano -10mm y 20 voltios

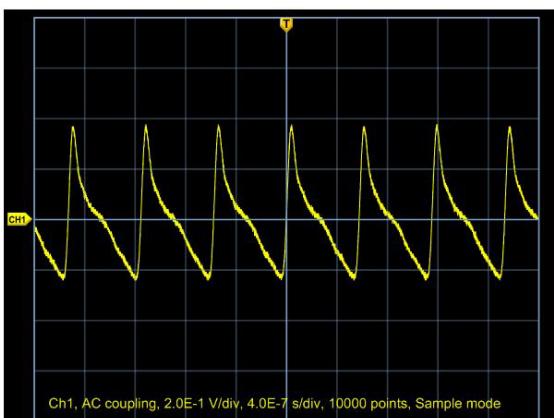


Figura 3.16 Hexano -10 mm y 30 voltios

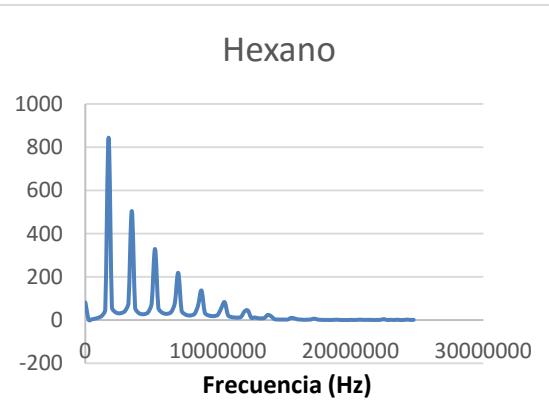


Figura 3.17 TdF hexano -10 mm y 30 voltios

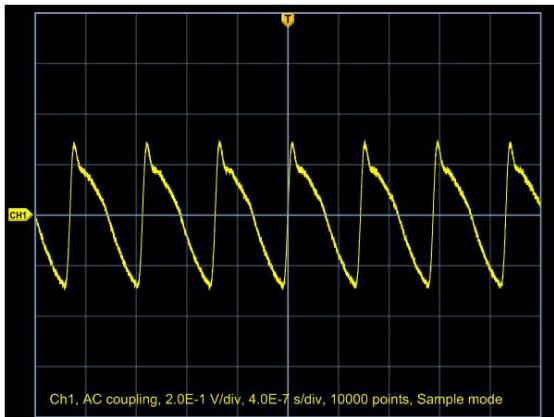


Figura 3.18 Hexano -10 mm y 50 voltios

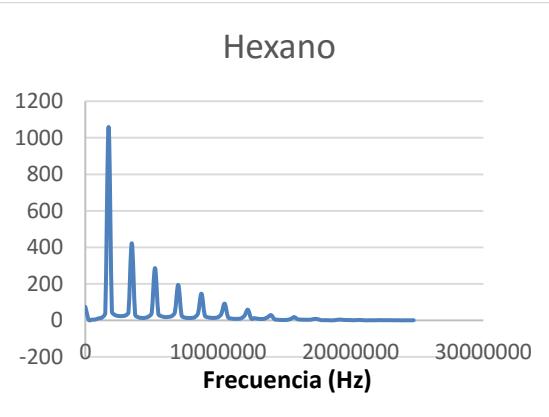


Figura 3.19 TdF hexano -10 mm y 50 voltios

Aunque la forma de onda es bastante parecida en los tres casos, como se puede ver fácilmente, a 30 voltios, es el punto en el cual encontramos mayor amplitud alcanzada por la onda y es por eso por lo que la atomización es mayor en torno a esa tensión, ya que a mayor amplitud de la onda, mayor incidencia tendrá en la superficie

## Influencia de las propiedades del fluido en la tasa de nebulización en atomizadores ultrasónicos

---

libre del líquido. Aunque el primer armónico de la transformada tenga menor magnitud que a 50 voltios, esto puede ser debido a la suma de armónicos de misma frecuencia, sin embargo se puede apreciar que el nivel general de magnitud de los armónicos también ha descendido, por tanto, los niveles de amplitud alcanzados son menores.

Al contrario que está ocurriendo a valores bajos de tensión, que ya se ha comentado en apartados anteriores, a partir de los 45 voltios, en los alcaños, la atomización desciende notablemente. Si tras esta afirmación, se visualiza la evolución de las ondas en los alcaños a medida que se aumenta la tensión, se puede comprobar que, la amplitud alcanzada, es menor también conforme se rebasan los 45 voltios, por tanto, si existe hay la presión es menor, mayor dificultad existirá para que ocurra el proceso de atomización.

Para recabar más información, se realizan a continuación otras comparativas.

## Influencia de las propiedades del fluido en la tasa de nebulización en atomizadores ultrasónicos

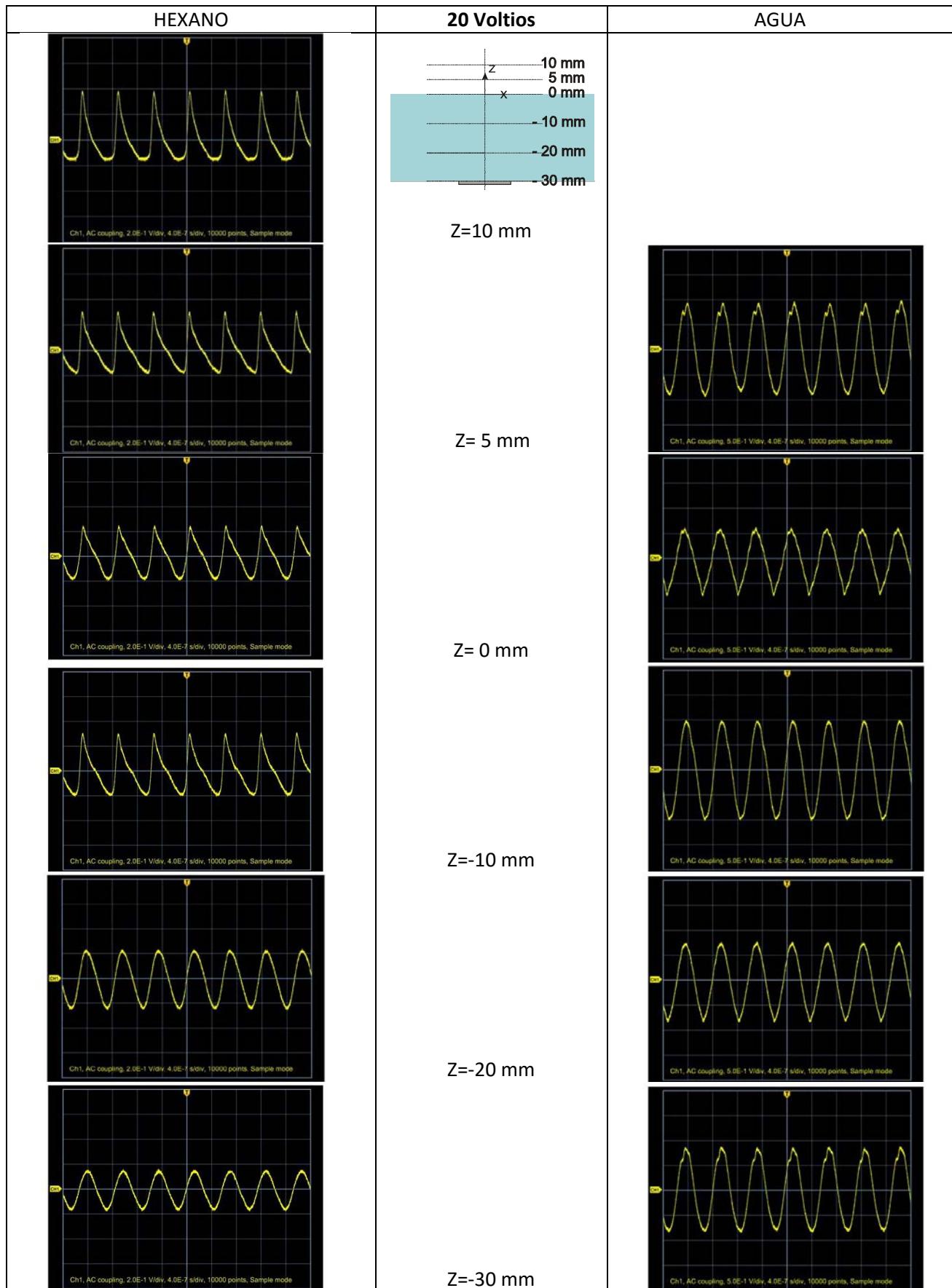


Tabla 3.9 Hexano Vs agua 20 V

## Influencia de las propiedades del fluido en la tasa de nebulización en atomizadores ultrasónicos

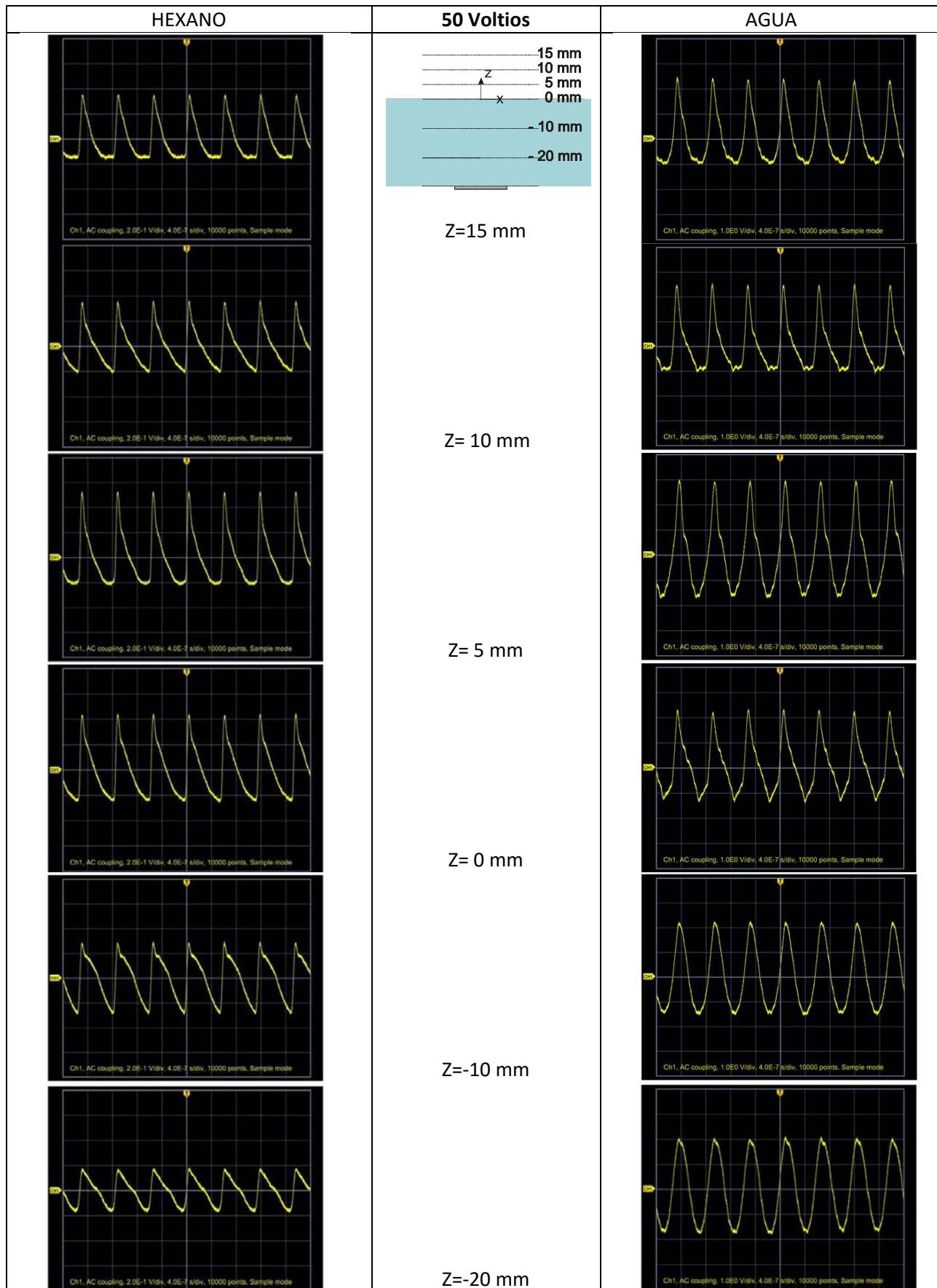


Tabla 3.10 Hexano Vs agua 50 V

## Influencia de las propiedades del fluido en la tasa de nebulización en atomizadores ultrasónicos

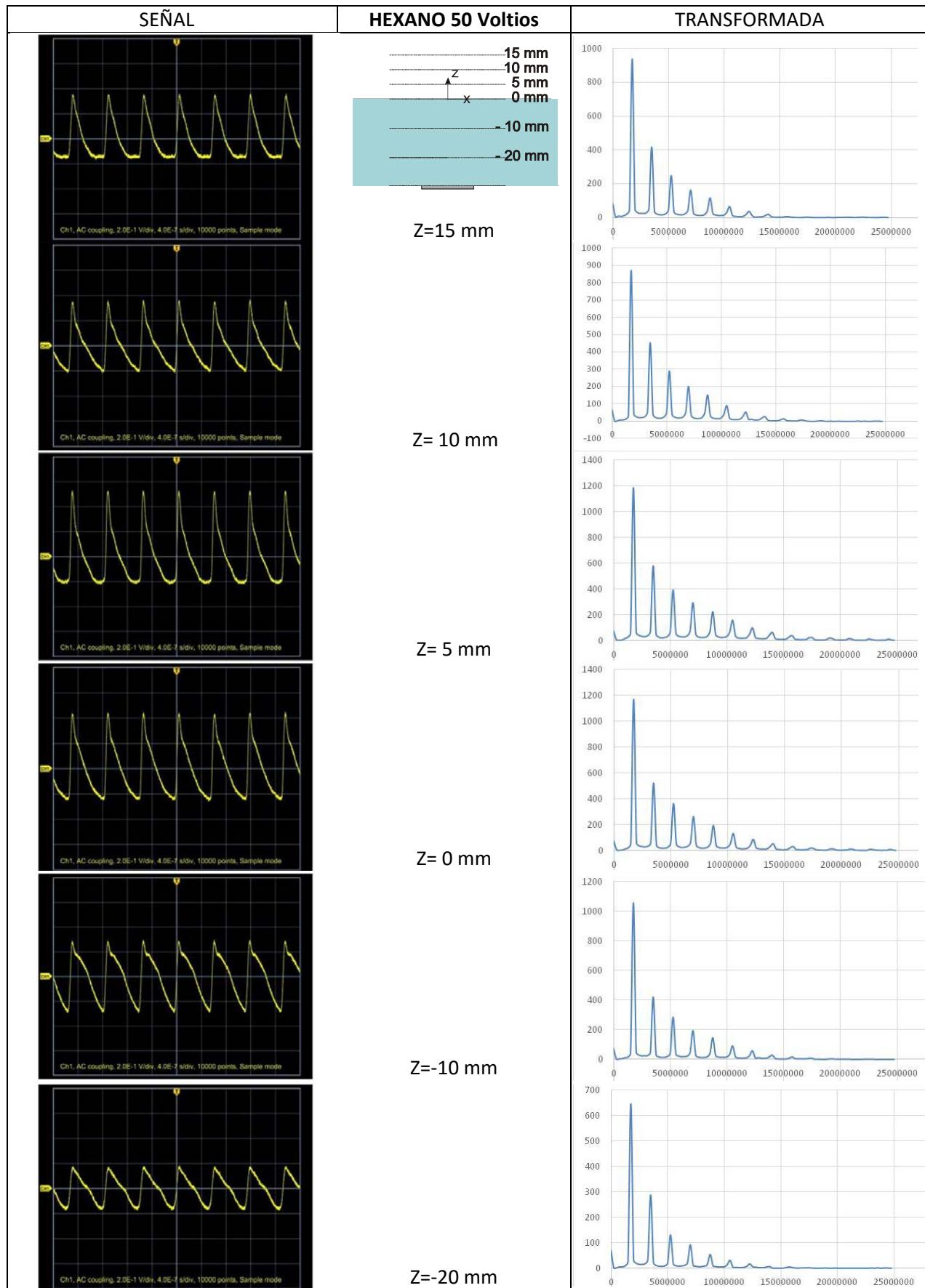


Tabla 3.11 Señal y transformada de Fourier en hexano a 50 V

## Influencia de las propiedades del fluido en la tasa de nebulización en atomizadores ultrasónicos

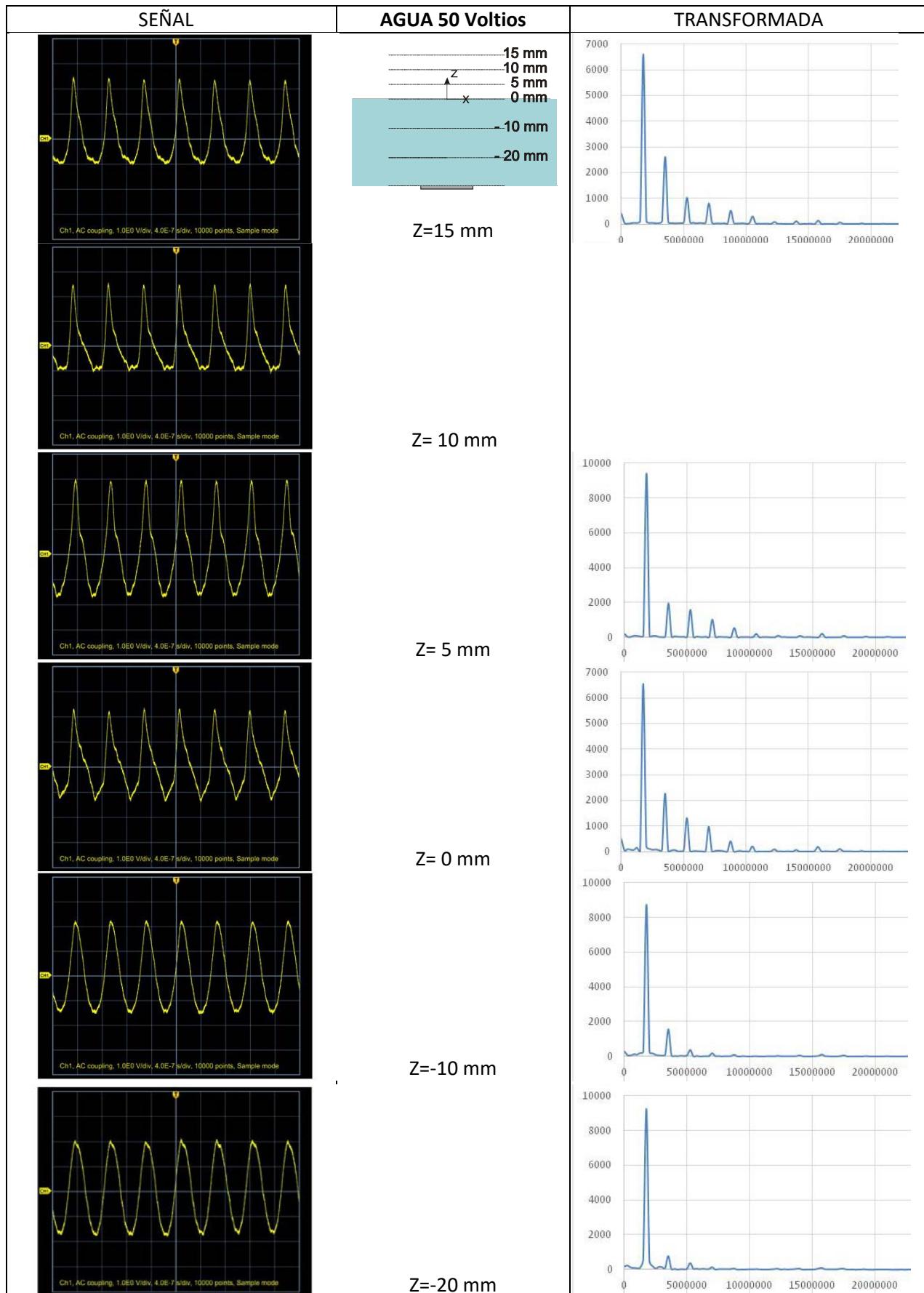


Tabla 3.12 Señal y transformada de Fourier en agua a 50 V

## Influencia de las propiedades del fluido en la tasa de nebulización en atomizadores ultrasónicos

---

Con respecto a los resultados de las tablas arriba expuestas, en el caso a 20 voltios, tensión a la cual el agua no atomiza pero el hexano sí que lo hace de una manera, aunque no muy elevada, pero sí para tenerla en cuenta, se puede ver que mientras la onda captada en el agua, se mantiene considerablemente sinusoidal, la onda en el hexano, conforme asciende hacia la superficie del líquido, rápidamente se deforma y su amplitud se va elevando poco a poco, hasta el punto superior del cono, donde se están concentrando las ondas y aparte de experimentar la mayor deformación, también es donde mayor amplitud se capta.

En cuanto a las tablas a 50 voltios, punto en el cual el agua se aproxima a su máximo, en cuanto a lo que a la forma de la onda atañe, en el agua, cuando comienza a la menor altura, -20 mm, es prácticamente sinusoidal y si se observa de manera paralela la transformada de Fourier en ese punto, destaca la ausencia de otros armónicos al de frecuencia fundamental, de ahí que no se esté deformando. En el caso del hexano, en el punto más profundo, ya están apareciendo armónicos de amplitud considerable, por lo que no es de extrañar que la onda aparezca ya deformada y continua haciéndolo con forme se asciende en el eje Z.

Fijándonos ahora en las amplitudes a 50 voltios, en un primera observación ya se puede determinar que, el máximo aparece a una altura de 5 mm, coincidiendo con el comienzo del cono formado y tiene toda el sentido, ya que una gran cantidad de las ondas que están rebotando en la superficie del líquido, se concentran en esta zona, donde están apareciendo mayores presiones.

Se ha comprobado, que, las medidas de presión guardan relación con la densidad del líquido. El fluido en el cual se dan las presiones más altas es el agua, seguida por el decano y los últimos son el heptano y el hexano, que presentan una menor densidad y amplitud. Si comparamos las presiones que aparecen en el hexano con las que nos encontramos en el agua, salta a la vista la gran diferencia, al igual que la existente entre sus densidades.

## Influencia de las propiedades del fluido en la tasa de nebulización en atomizadores ultrasónicos

---

Para realizar la transformación a los valores de presión desde la amplitud que nos proporciona el hidrófono, se realiza el siguiente procedimiento, gracias a los datos proporcionados por el fabricante.

El hidrófono da una señal en voltaje proporcional a la presión. Para estos dispositivos se define la sensibilidad. Cuando se expresa en decibelios:

$$S_{dB} = 20 \log \frac{S}{S_{ref}}$$

*Ecuación 3.2 Cálculo de la sensibilidad*

Bueno, en nuestro hidrófono para 1.7 MHz ( $S_{ref}=1 \text{ V/uPa}$ ):

$$-255.97 = 20 \log \frac{S}{1}$$

$$-255.97 = 20 \log \frac{S}{1} \rightarrow S = 1.59 \cdot 10^{-13} \text{ V/uPa}$$

Pasando a V/Pa:

$$S = 1.59 \cdot 10^{-7} \text{ V/Pa}$$

Como se puede observar en la tabla de calibración.

Para (datos de calibración) 1.67 MHz se tiene:

$$P = \frac{V}{1.5654E - 07}$$

*Ecuación 3.3 Relación de la presión con el voltaje*

Pero el voltaje que lee el osciloscopio es el que se obtiene amplificando el del osciloscopio con el preamplificador AH-1100. Según la documentación: da una ganancia de 20 dB en una resistencia de 50 ohmios. Una ganancia de 20 dB implica:

$$V_{osciloscopio} = 10V$$

$$20 = 20 \log \frac{V_{osc}}{V_{hid}}$$

$$10 = \frac{V_{osc}}{V_{hid}}$$

## 4. Conclusiones y trabajo futuro

### 4.1. Conclusiones

Cuando se somete a una perturbación ultrasónica a cada uno de los líquidos ensayados, sobre la superficie libre se forma una estructura en forma de cono, de la cual se desprenden gotas muy pequeñas. El tamaño de estructura de líquido proyectada es proporcional a la tensión aplicada al dispositivo piezoelectrónico. La altura guarda relación con las presiones que aparecen en el seno del fluido, de manera que en el decano y el agua, se genera un cono que alcanza una mayor altitud que en el caso del hexano y el heptano.

La evolución de la tasa de atomización con el voltaje depende del líquido de ensayo. En el agua es totalmente distinta a la que aparece en los alkanos. Si en el agua la tasa atomizada crece cuando lo hace el voltaje, en el caso de los alkanos, la eficiencia del proceso de atomización disminuye a partir de un voltaje determinado.

Se ha comprobado que, en el caso de los alkanos, la eficiencia del proceso de atomización, disminuye conforme aumenta el voltaje, al contrario que ocurre con el agua.

La atomización en los hidrocarburos, es mayor que la del agua a voltajes bajos e incluso con los mínimos valores ensayados de tensión, los hidrocarburos comienzan a atomizar mientras que para conseguirlo en el agua, hay que aumentar hasta los 30 voltios. Esto es debido a la influencia de la viscosidad y la tensión superficial, que presenta valores más bajos en estos líquidos. Cuando se superan los 45-30-35 voltios, en el caso de los alkanos, la tasa de atomización desciende y se comprueba que la presión que se mide en el líquido a partir de estos voltajes, también disminuye.

Destacar que la presión de vapor ha tenido una influencia bastante pequeña en la atomización a pesar de que los líquidos ensayados presentan valores muy diferentes de esta propiedad. La evolución con el voltaje de la tasa atomizada en el hexano, presenta gran similitud con la del heptano, excepto en los últimos puntos, y sin embargo tiene una presión de vapor tres veces menor que este último.

La disminución de la temperatura en algunos puntos, está propiciada por el fenómeno de la evaporación. La evolución de la temperatura en la masa líquida está debida por una parte, por la energía disipada por el piezoelectrónico, efecto que provoca un aumento de la temperatura del líquido; y por otra por el efecto refrigerador de la evaporación. Cuanto mayor es la tasa de atomización, mayor es la superficie líquido-aire y por tanto mayor es la evaporación. Esto explica que para voltajes altos la mayor disminución de temperatura se produzca para el hexano puesto que es líquido que presenta la mayor tasa de atomización entre los alkanos. En este aspecto hay algunas incertidumbres puesto que la masa evaporada por la superficie libre y por el cono o fuente no ha podido diferenciarse durante las medidas de masa atomizada.

## 4.2. Trabajo futuro

En el desarrollo de este proyecto ha aparecido un fenómeno inesperado, la disminución a partir de 30-35 voltios de la masa atomizada con el aumento del voltaje. La explicación de este comportamiento es de interés tanto científico como tecnológico. Por ello nos ha parecido interesante intentar obtener información adicional a partir del registro de la amplitud de las ondas ultrasónicas y de visualizaciones. Sin embargo, y a pesar de los datos añadidos y sus interpretaciones, no se ha encontrado una razón clara que dilucide este comportamiento. Por ello se prevén futuros experimentos para:

- Caracterizar el comportamiento de la masa atomizada en otros líquidos.
- Hacer ensayos con control de temperatura y disponer de datos en función de esta.
- Realizar visualizaciones con mayor resolución con objeto de apreciar las inestabilidades superficiales.
- Cambiar el nivel de líquido con respecto al piezoelectrónico y estudiar la evolución de la onda en función de este.

También está previsto realizar experimentos similares en una cubeta con dos piezoelectrónicos para generar la interferencia de las ondas producidas por estos.

## 5. 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. LITEC, 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.

## Influencia de las propiedades del fluido en la tasa de nebulización en atomizadores ultrasónicos

---

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. & Eisenkranz, 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.

McCallion, Onm; Taylor, Kmg Thomas, M; 1995; Nebulization of fluids of different physicochemical properties with air-jet and ultrasonic nebulizers; Pharmaceutical Research; Vol.: 12 Nº: 11 Pp: 1682-1688.

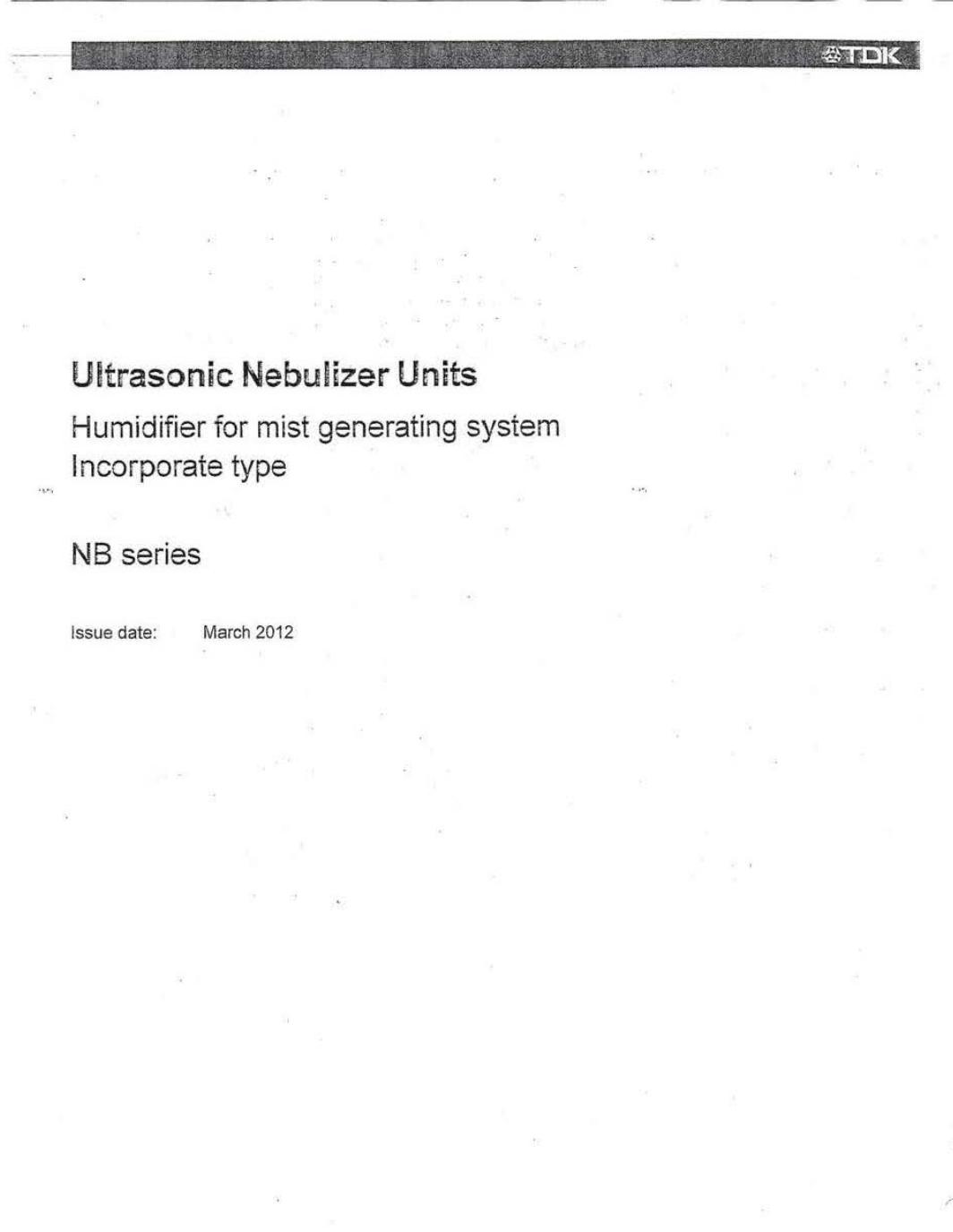
## Anexos

**ANEXO I – ELEMENTOS MÁS RESEÑABLES DE LA INSTALACIÓN  
EXPERIMENTAL**

1. TRANSDUCTOR ULTRASÓNICO
2. HIDRÓFONO
3. RECIPIENTE
4. GUÍAS
5. FUENTE DE ALIMENTACIÓN

# Influencia de las propiedades del fluido en la tasa de nebulización en atomizadores ultrasónicos

## 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.

# Influencia de las propiedades del fluido en la tasa de nebulización en atomizadores ultrasónicos

(1)



## 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.

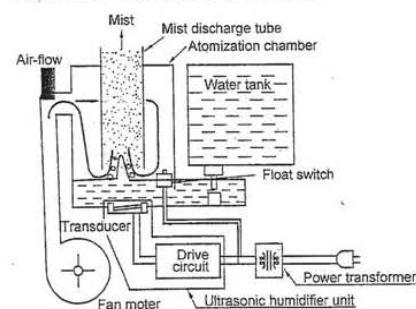
In addition to such home uses, these ultrasonic humidifier units have numerous advantages for humidification of vegetable showcases, preservation and growth of agricultural products, industrial applications, etc. A wide variety of standard units are available from TDK.

#### ELECTRICAL CHARACTERISTICS

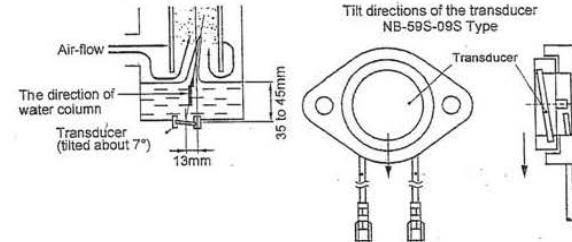
Part No.	NB-59S-09S-0	NB-80E-01-H
Rated input voltage Eac(V)	48±10%	
Edc(V)		12±10%
Power consumption (W)	30±5	13.2max. (150+100,-50)×10 <sup>-3</sup>
Mist output ratio (l/h)	450×10 <sup>-3</sup> min.	
Ultrasonic frequency (kHz)	1600 to 1750	2350 to 2600
Normal water level (mm)	40	35
External potentiometer (kΩ)	—	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 TRANSDUCER INSTALLATION

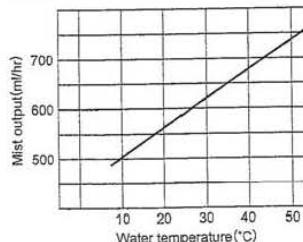
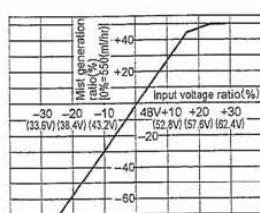


The arrows indicate the tilt direction of the transducer.

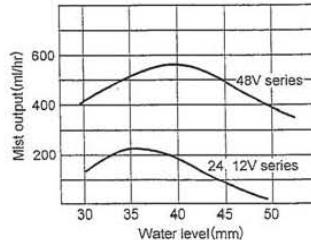
\* The tilt direction of transducer will be the same as the direction of water column.

#### TYPICAL CHARACTERISTICS OF HUMIDIFIER UNITS

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



##### WATER LEVEL CHARACTERISTICS



\* All specifications are subject to change without notice.

# Influencia de las propiedades del fluido en la tasa de nebulización en atomizadores ultrasónicos

(2)

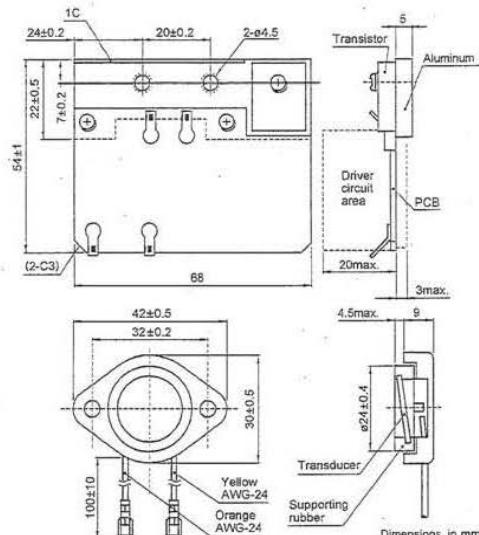


## NB-59S-09S TYPE

### FEATURES

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

### SHAPES AND DIMENSIONS

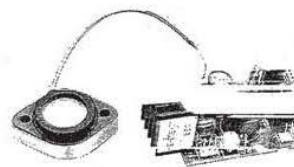
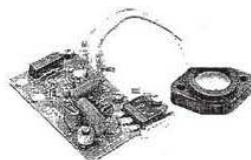
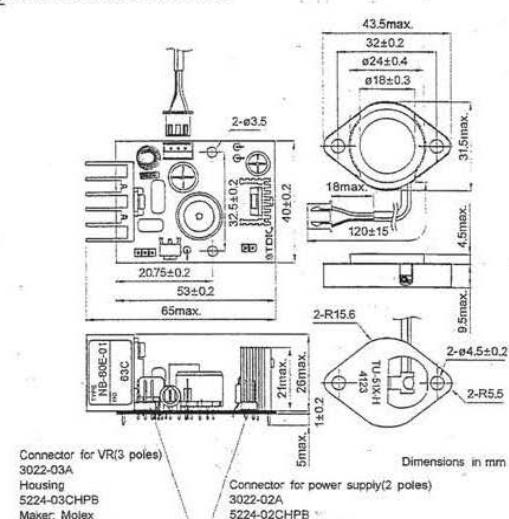


## NB-80E-01 TYPE

### 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



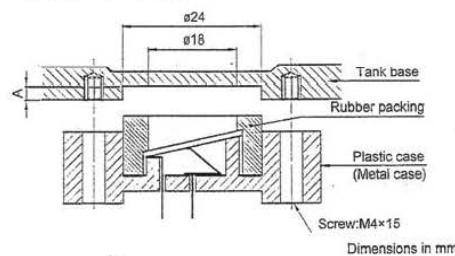
# Influencia de las propiedades del fluido en la tasa de nebulización en atomizadores ultrasónicos

(3)



## MOUNTINGS (Reference)

### 1.NB59S, NB-80E TYPES

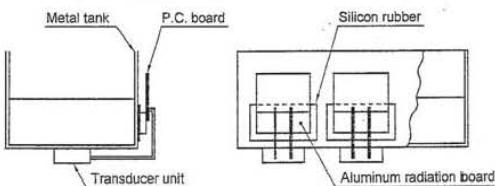


The transducer can break off if the A dimension depth is shallow. TDK recommends a 2mm A-dimension depth and a screw tightening torque of 0.6N·m.

## 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 head 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.

## Influencia de las propiedades del fluido en la tasa de nebulización en atomizadores ultrasónicos

### 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 ( $\pm 6\text{dB}$ )		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.

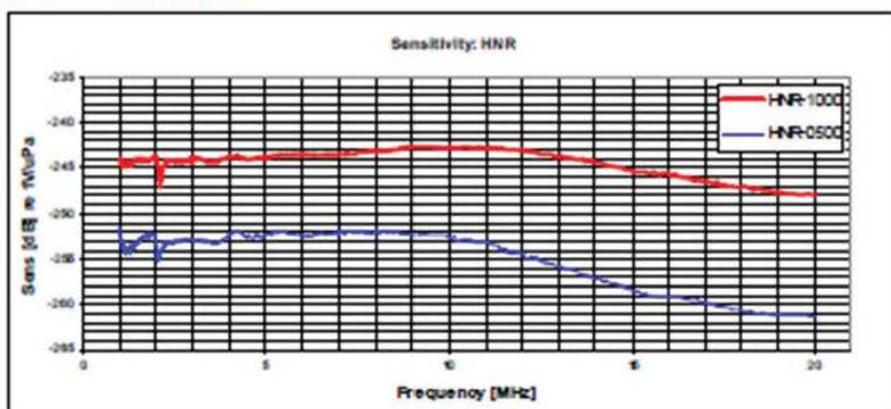
Provided with traceable calibration 1-20 MHz at 50 kHz intervals. For other calibrations available visit our web site.



HNR Hydrophone

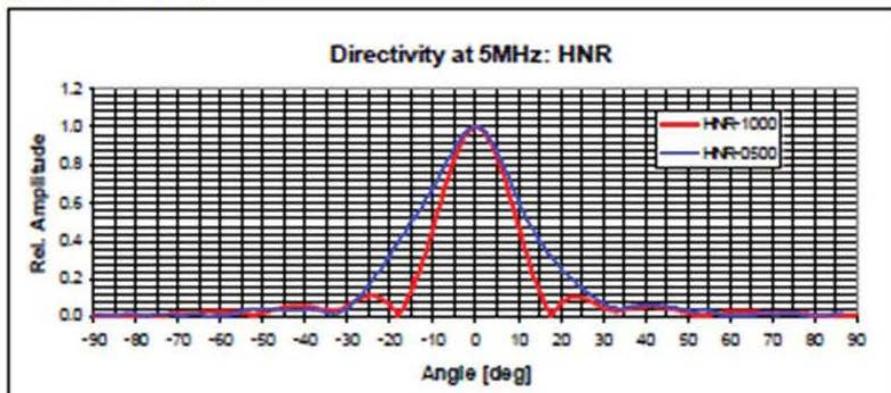
# Influencia de las propiedades del fluido en la tasa de nebulización en atomizadores ultrasónicos

## Typical Sensitivity Plot

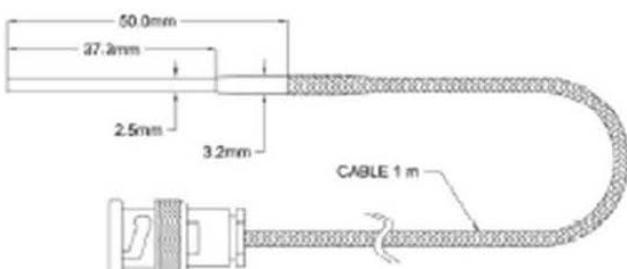


Note that intrinsic to this design is a resonance (notch) at 2 MHz typical , whose amplitude may vary.

## Typical Directivity Plot



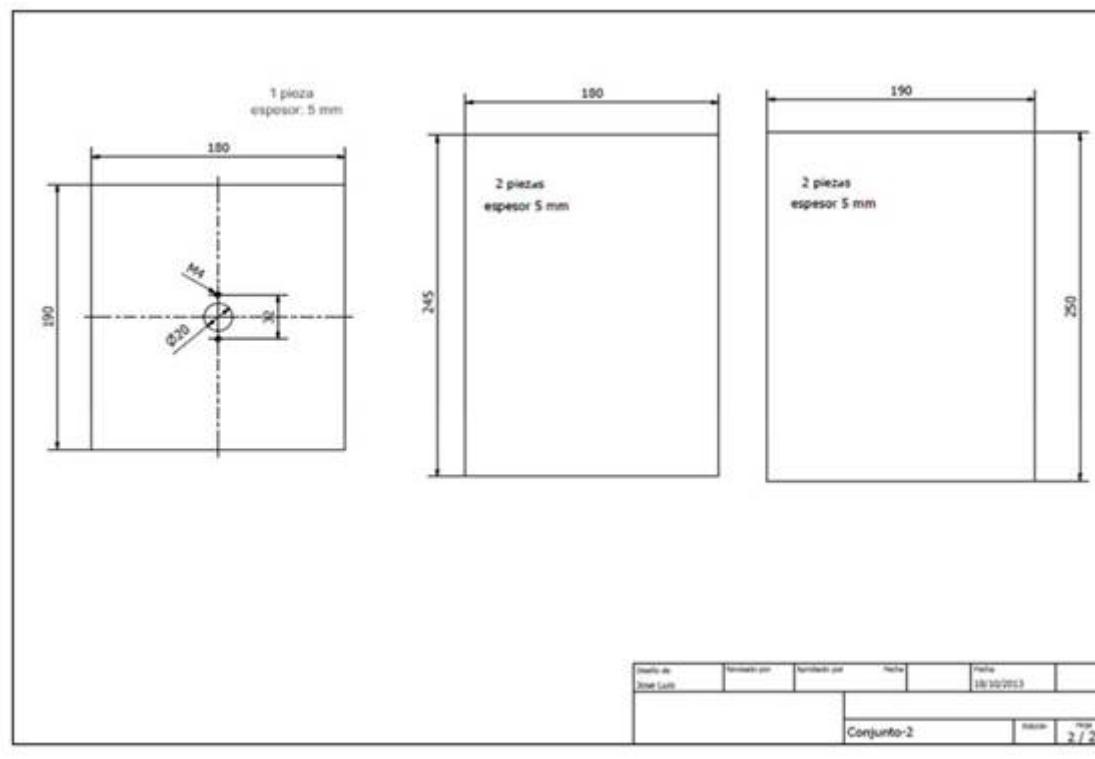
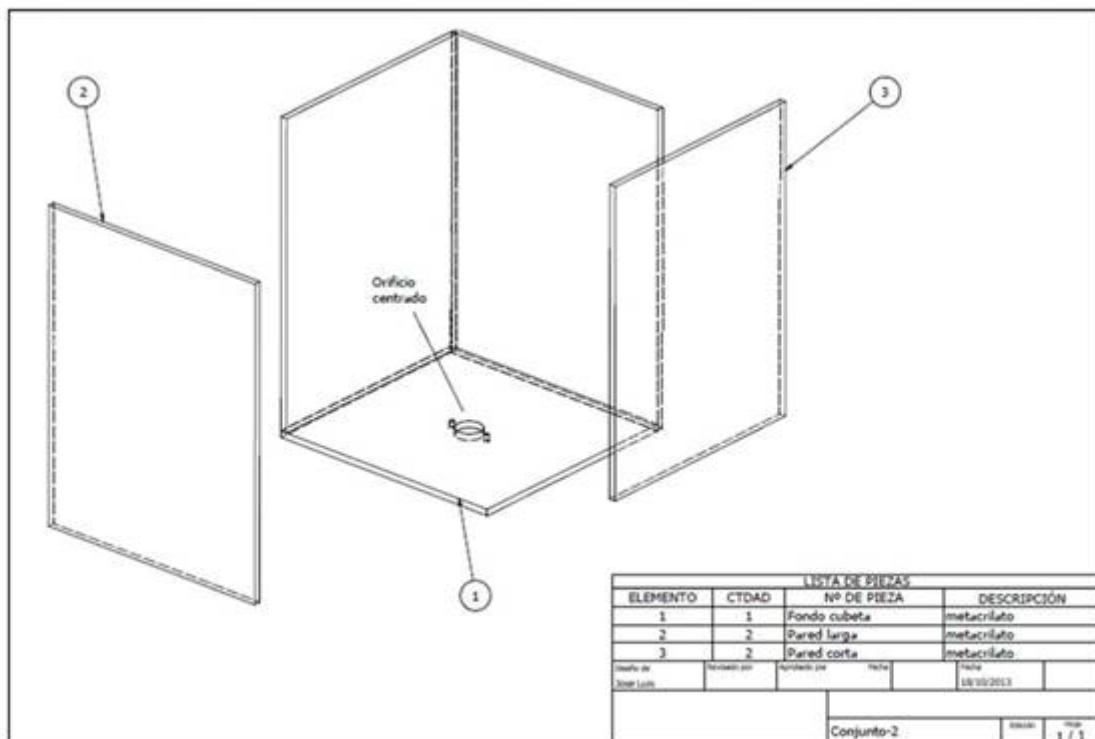
## Mechanical Specifications



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

# Influencia de las propiedades del fluido en la tasa de nebulización en atomizadores ultrasónicos

## 3. Recipiente



# Influencia de las propiedades del fluido en la tasa de nebulización en atomizadores ultrasónicos

## 4. Guías del hidrófono

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

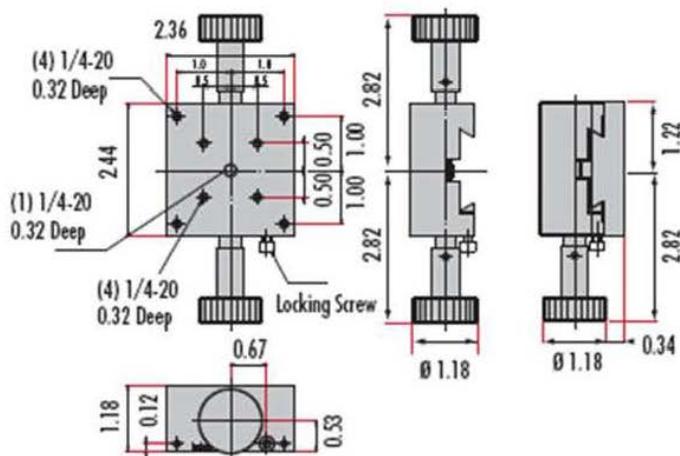
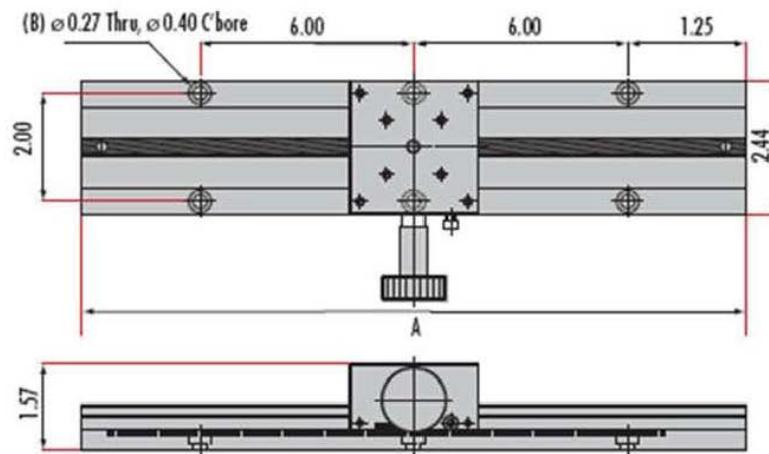


[View More Images](#)

One Knob Stage and Track Combination

- Stage Features  $\frac{1}{4}$ -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  $\frac{1}{4}$ -20 tapped holes while the track has C'bored holes for  $\frac{1}{4}$ -20 socket head cap screws. Each stage includes Allen wrenches for both the tension and locking screws. Each track includes  $\frac{1}{4}$ -20 socket head cap screws for mounting to an English breadboard, using the 6" spaced counterbores.



Units: Inches

## Influencia de las propiedades del fluido en la tasa de nebulización en atomizadores ultrasónicos

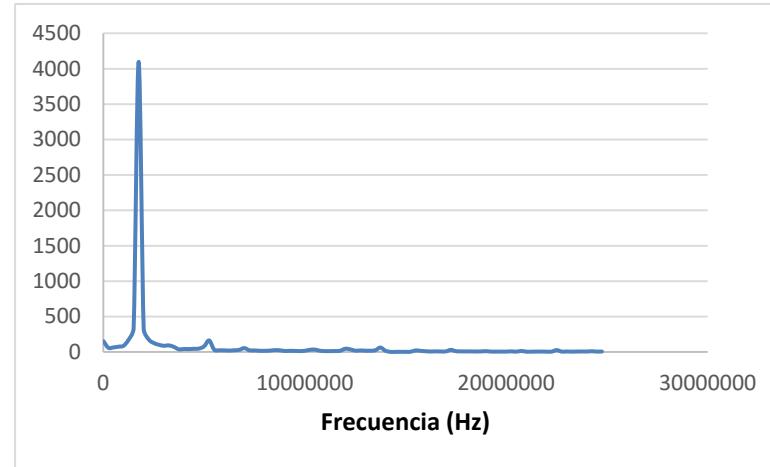
### 5. Fuente de alimentación

DC OUTPUT		
	Output Volts (V)	Output Amps (A)
GPR-1810HD	0 ~ 18	0 ~ 10
GPR-3060D	0 ~ 30	0 ~ 6
<b>GPR-6030D</b>	0 ~ 60	0 ~ 3
CONSTANT VOLTAGE OPERATION		
Regulation	Line regulation $\leq 0.01\% + 3mV$ Load regulation $\leq 0.01\% + 5mV (<10A)$ Load regulation $\leq 0.02\% + 5mV (\geq 10A)$	
Ripple & Noise	$\leq 1mVrms (5Hz \sim 1MHz)$	
Recovery Time	$\leq 100\mu s$ ( 50% load change, minimum load 0.5A )	
Output range	0 to rating voltage continuously adjustable	
CONSTANT CURRENT OPERATION		
Regulation	Line regulation $\leq 0.2\% + 3mA$ Load regulation $\leq 0.2\% + 3mA$	
Ripple Current	$\leq 3mA_{rms}$	
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	20MΩ or above (DC 500V)	
Chassis and AC Cord	30MΩ or above (DC 500V)	
POWER SOURCE		
	AC 100V/120V/220V/240V±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	

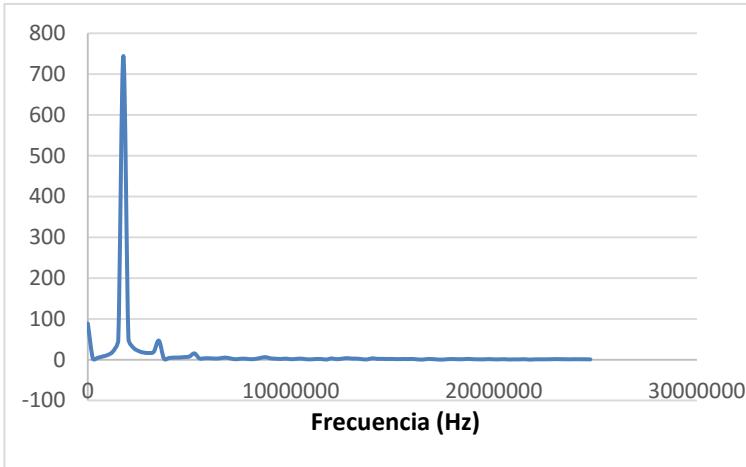
**ANEXO II – TRANSFORMADAS DE FOURIER DE LAS MEDIDAS  
OBTENIDAS CON EL HIDRÓFONO**

**V=20 V; Z=-30 mm**

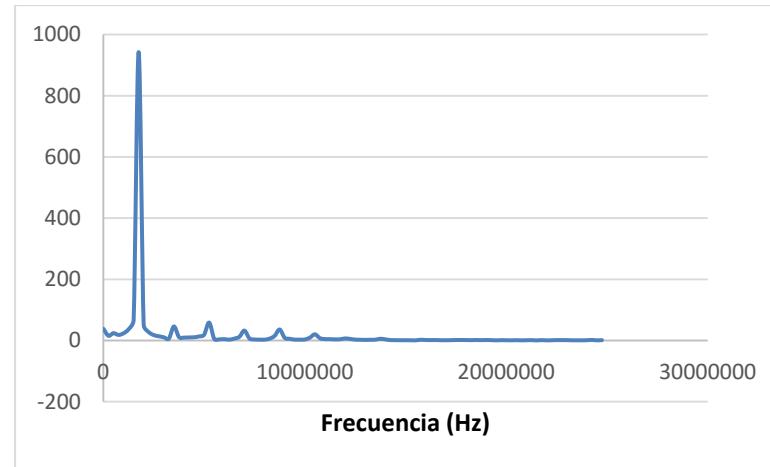
**AGUA**



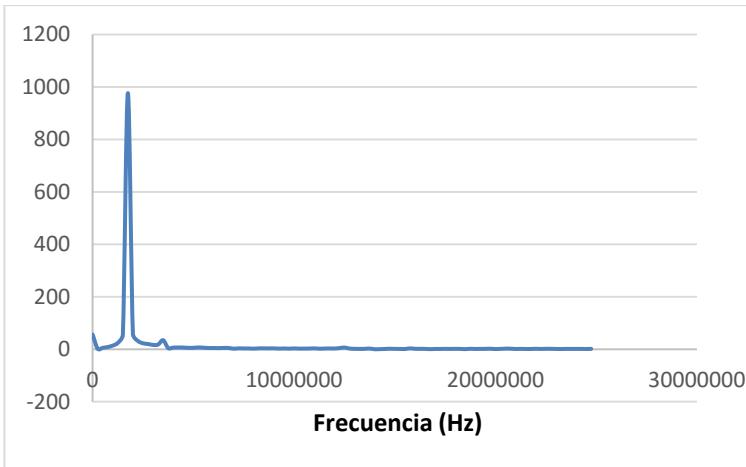
**HEXANO**



**HEPTANO**

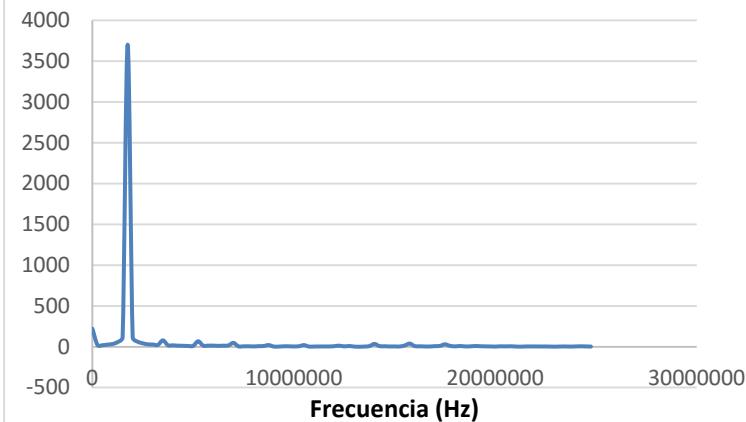


**DECANO**

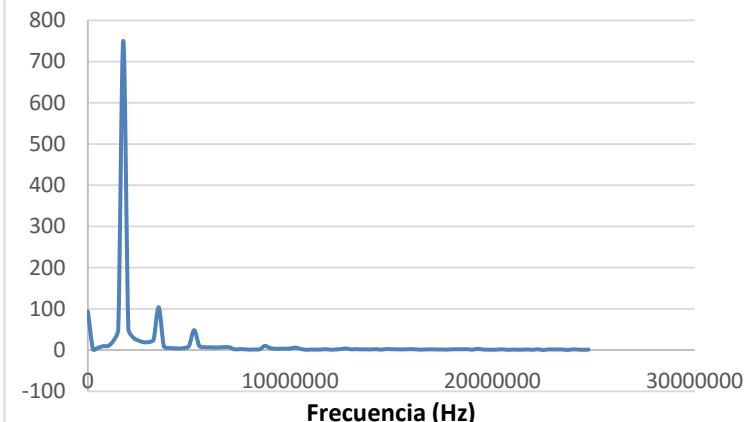


V=20 V; Z=-20 mm

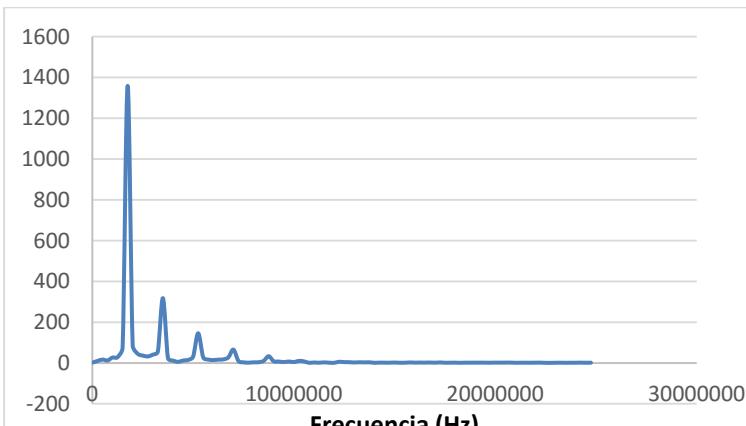
AGUA



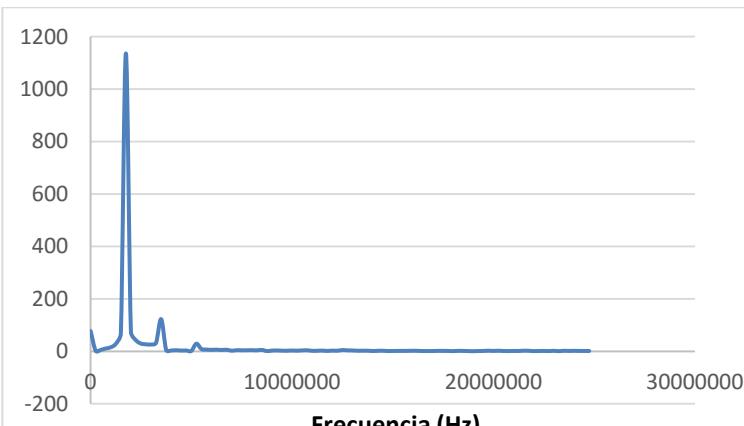
HEXANO



HEPTANO

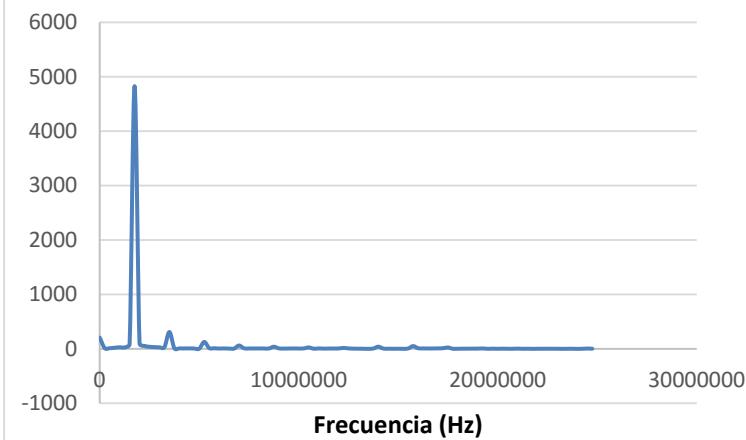


DECANO

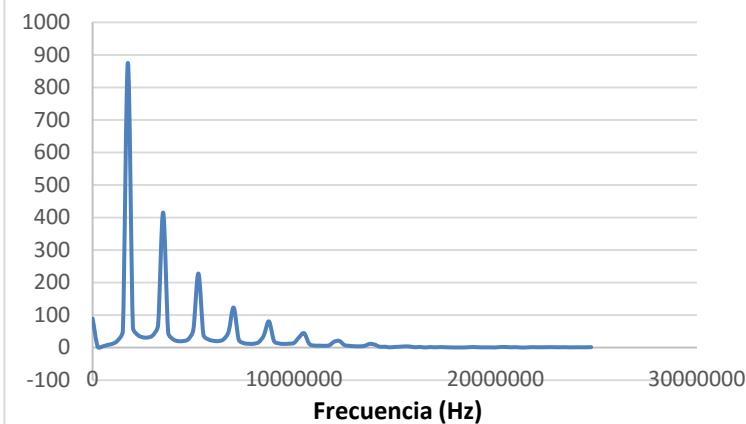


**V=20 V; Z=-10 mm**

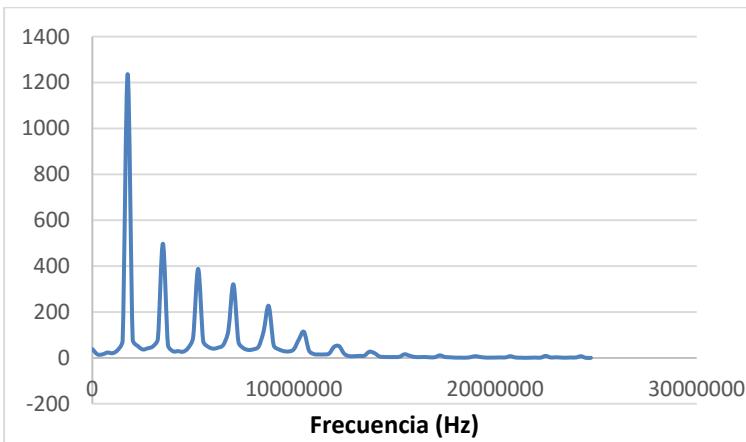
**AGUA**



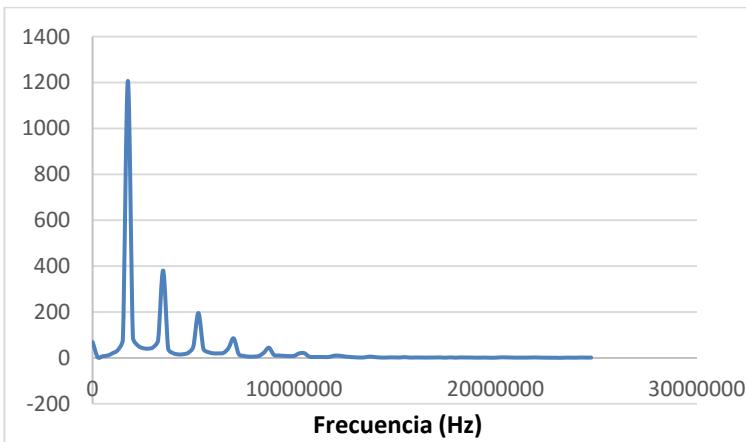
**HEXANO**



**HEPTANO**

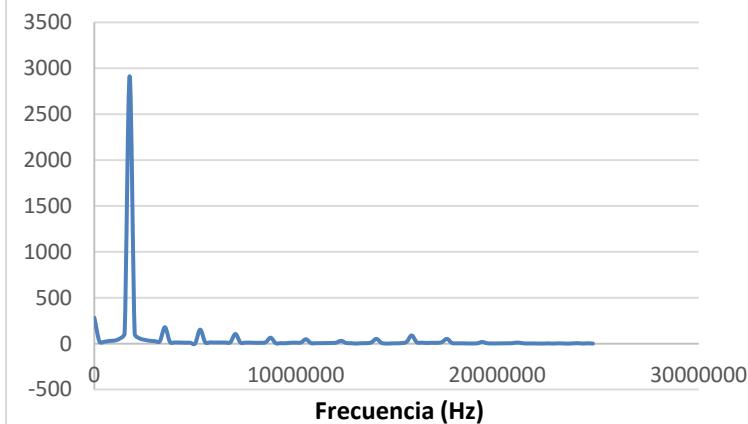


**DECANO**

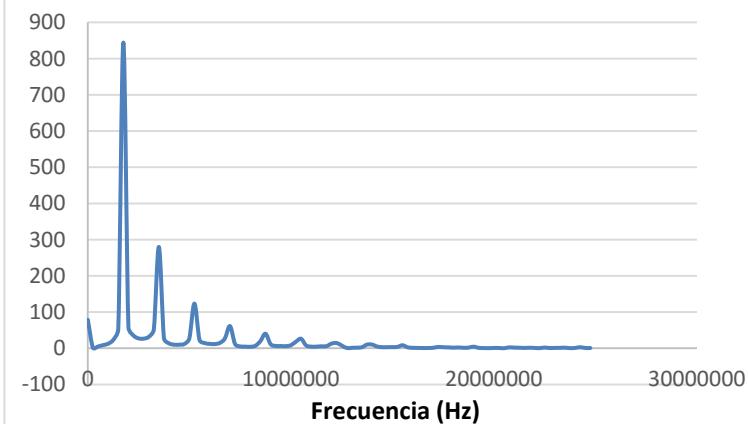


**V=20 V; Z=0 mm**

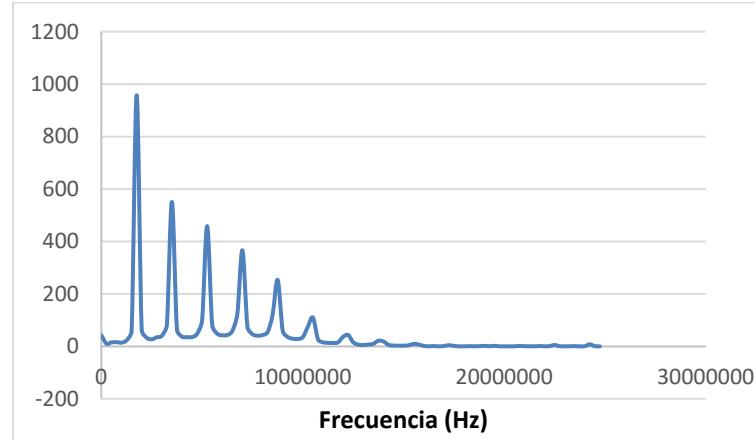
**AGUA**



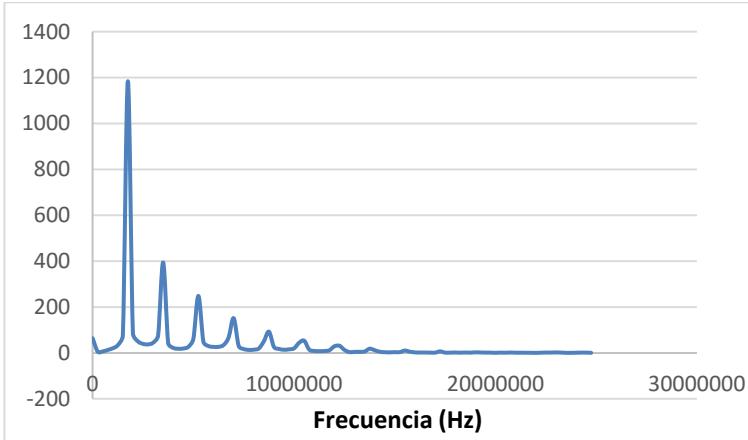
**HEXANO**



**HEPTANO**

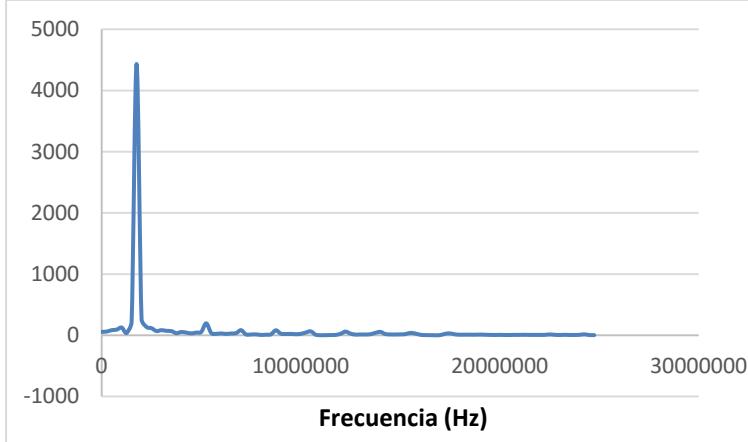


**DECANO**

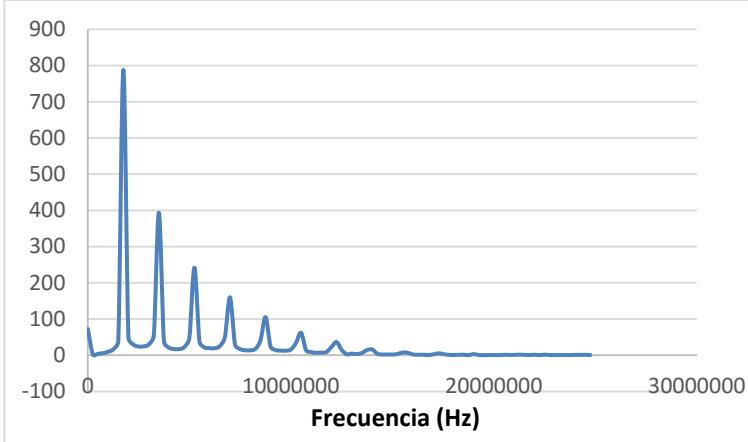


**V=20 V; Z=5 mm**

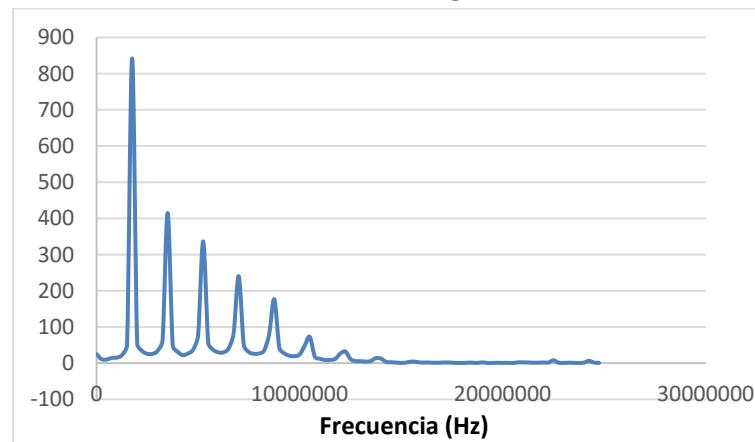
**AGUA**



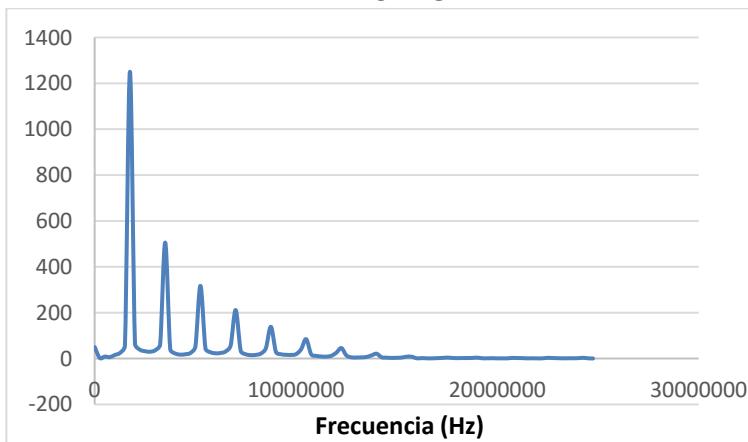
**HEXANO**



**HEPTANO**



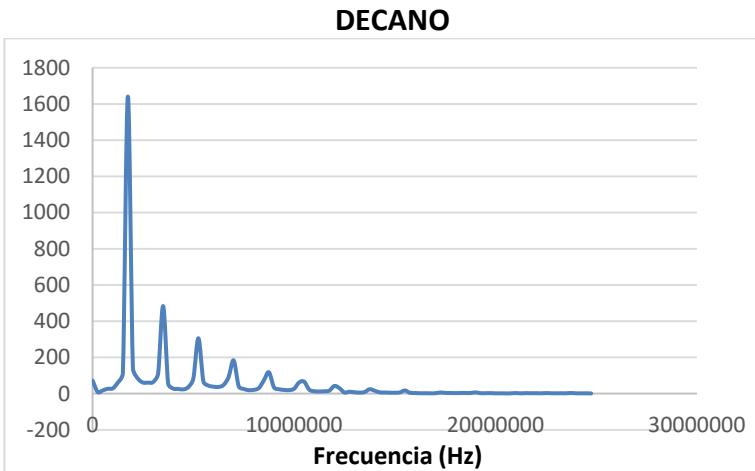
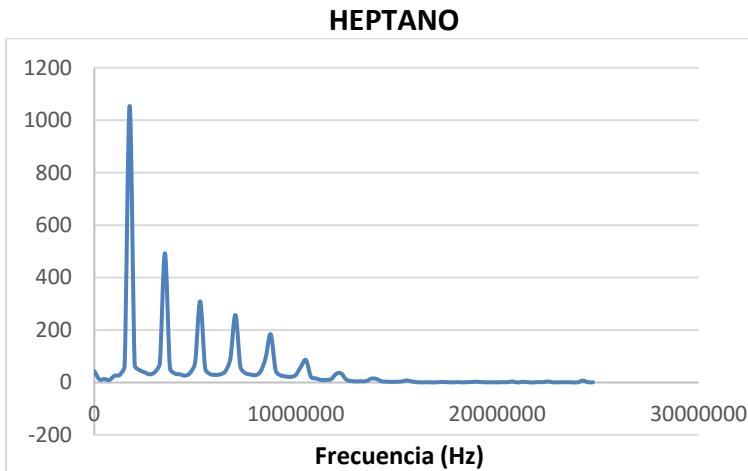
**DECANO**



V=20 V; Z=10 mm

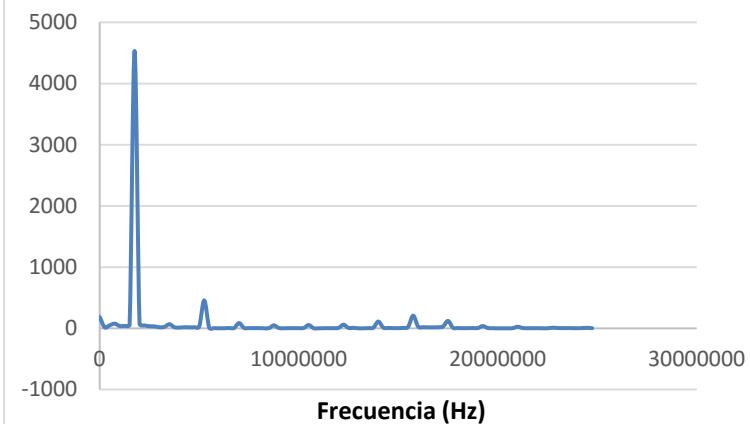
AGUA

HEXANO

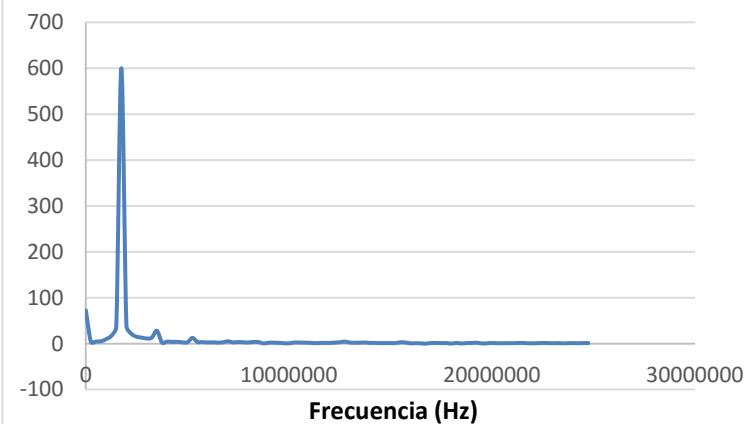


**V=30 V; Z=-30 mm**

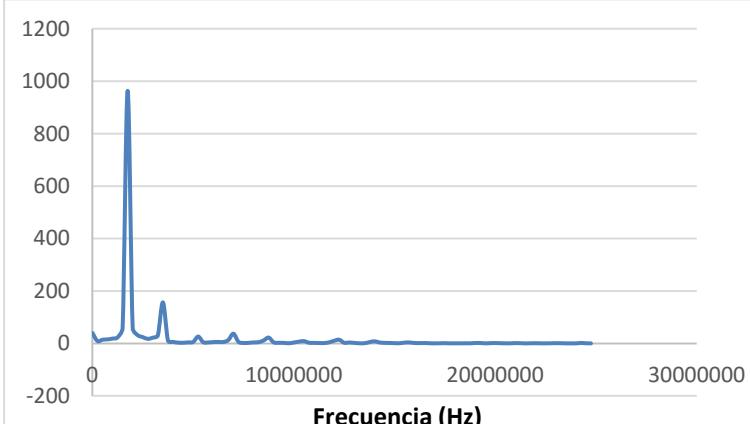
**AGUA**



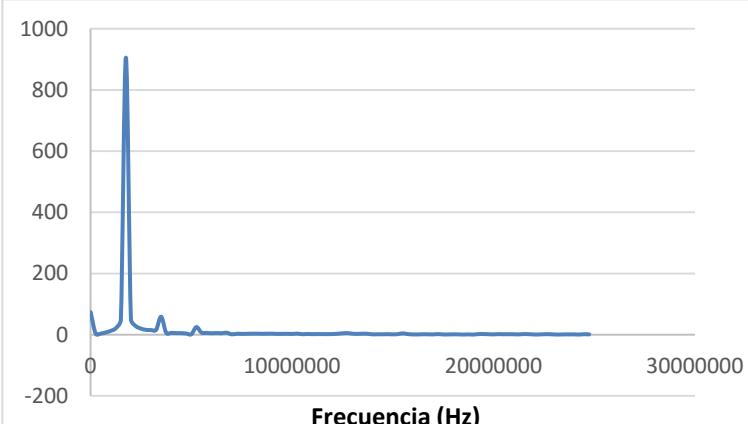
**HEXANO**



**HEPTANO**

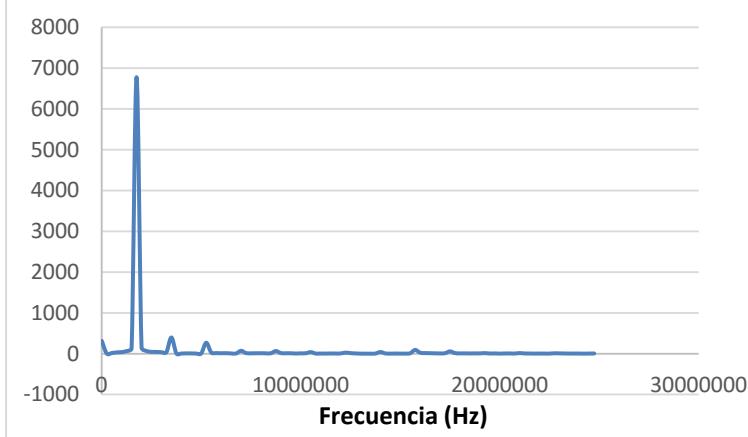


**DECANO**

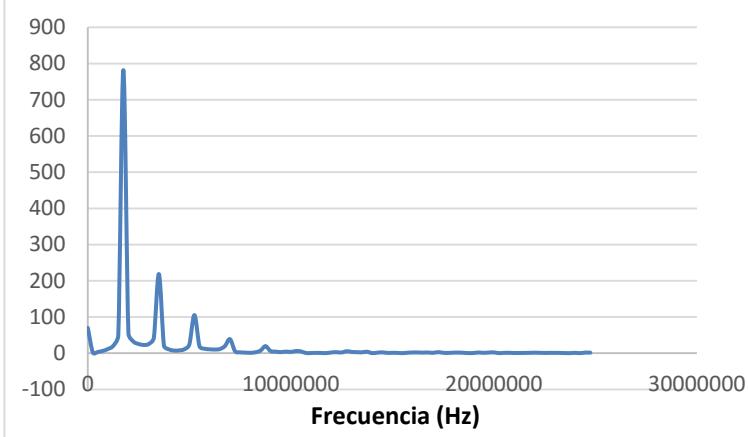


**V=30 V; Z=-20 mm**

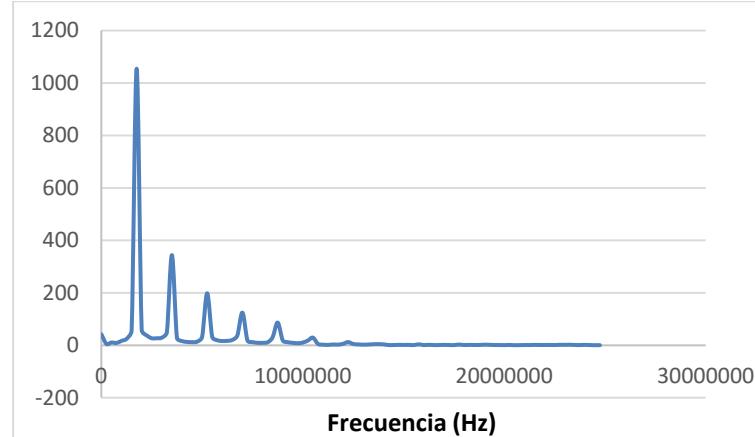
**AGUA**



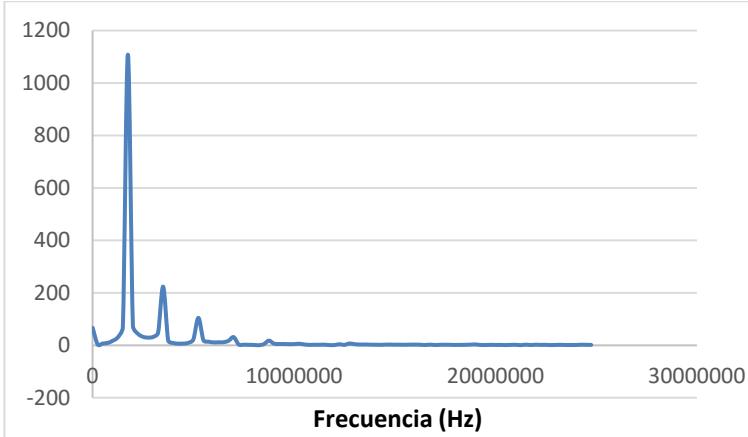
**HEXANO**



**HEPTANO**

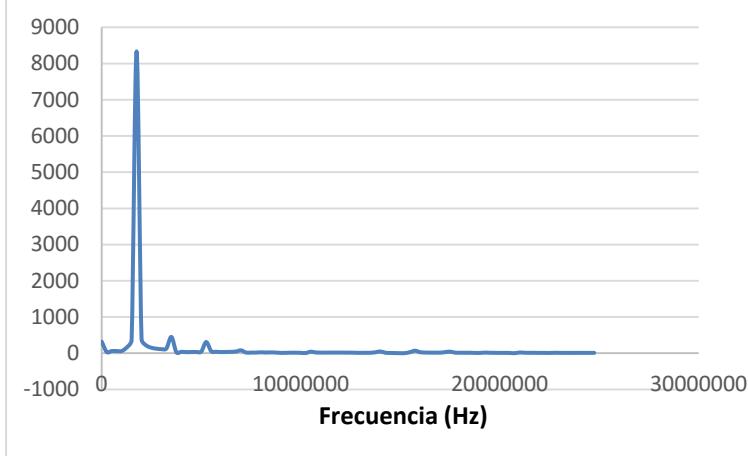


**DECANO**

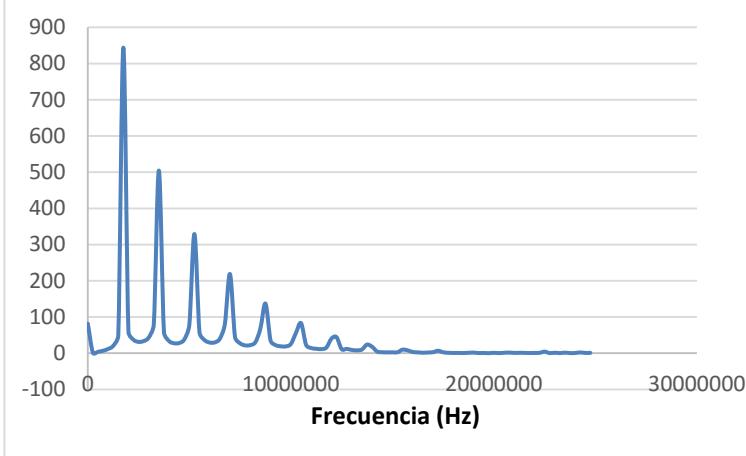


**V=30 V; Z=-10 mm**

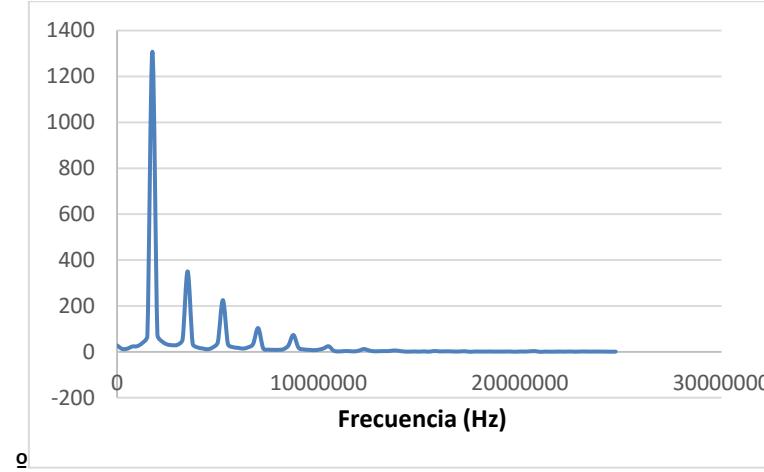
**AGUA**



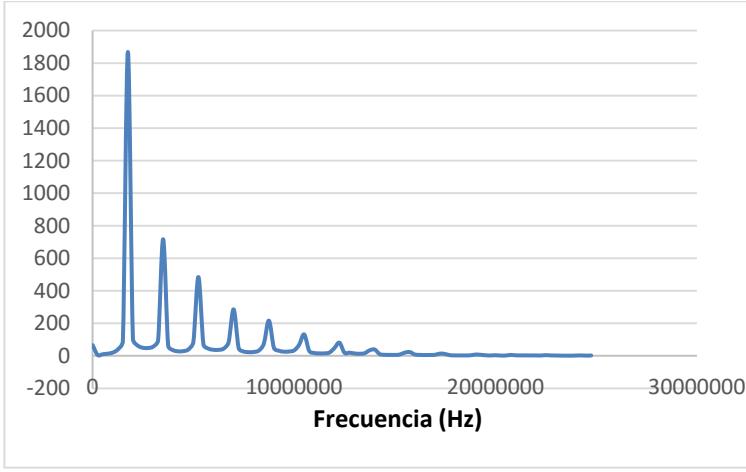
**HEXANO**



**HEPTANO**

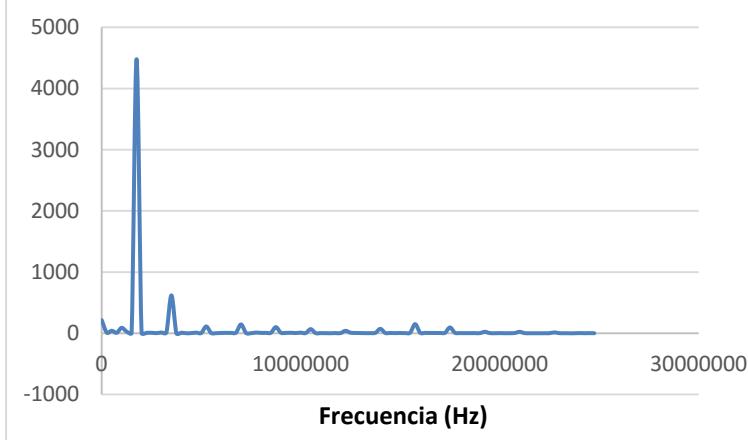


**DECANO**

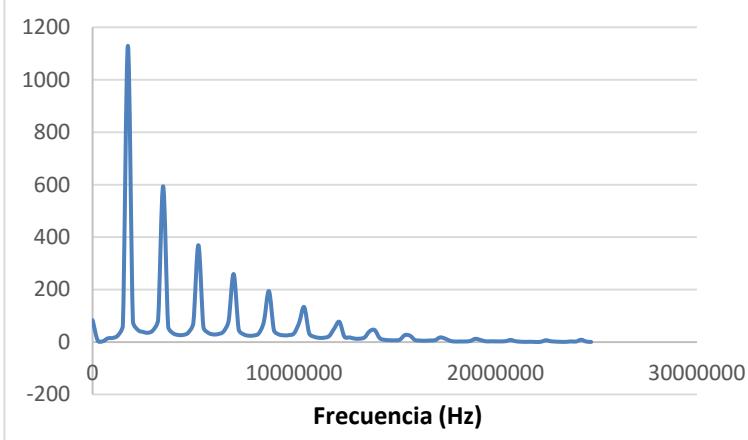


**V=30 V; Z=0 mm**

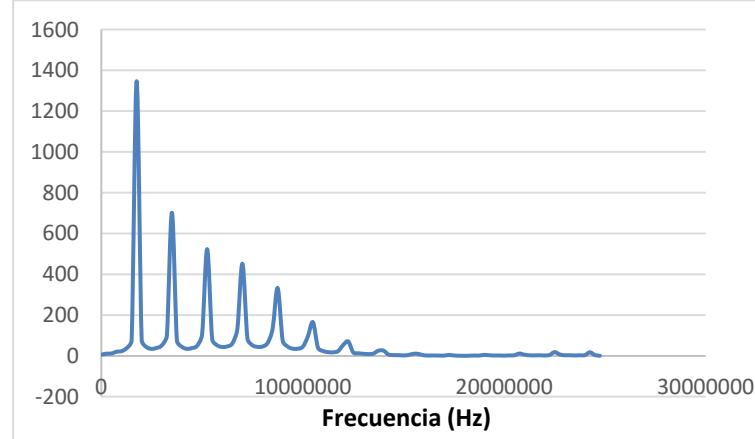
**AGUA**



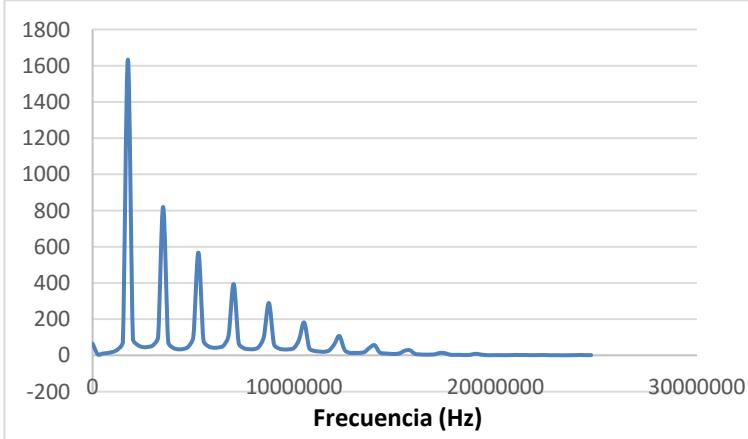
**HEXANO**



**HEPTANO**

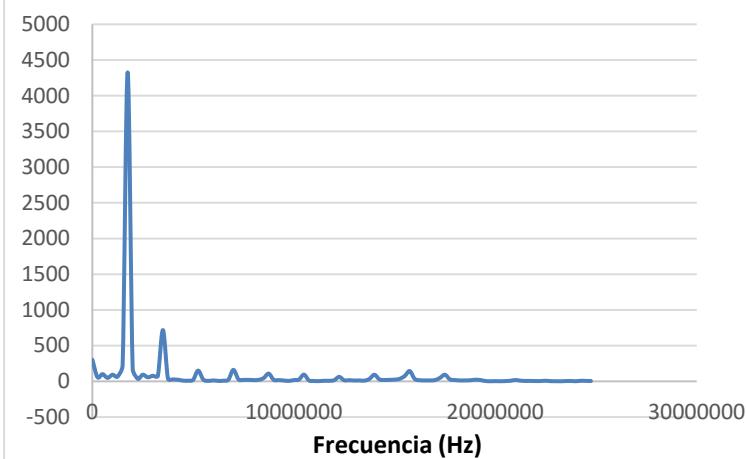


**DECANO**

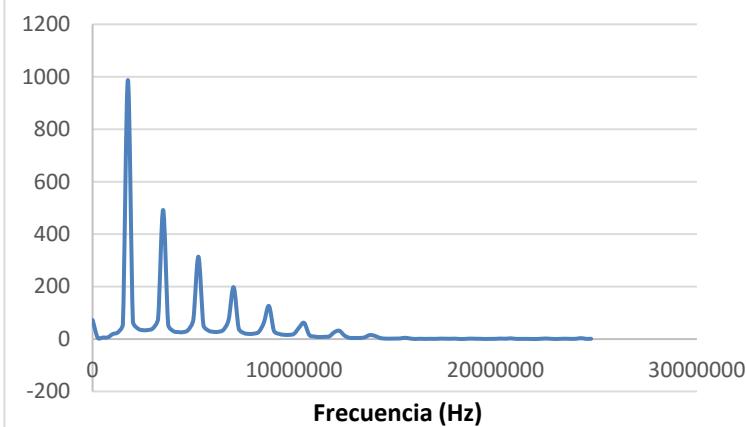


**V=30 V; Z=5 mm**

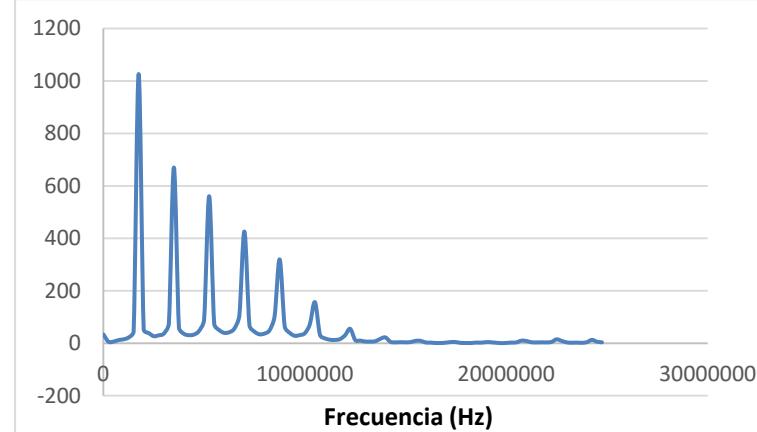
**AGUA**



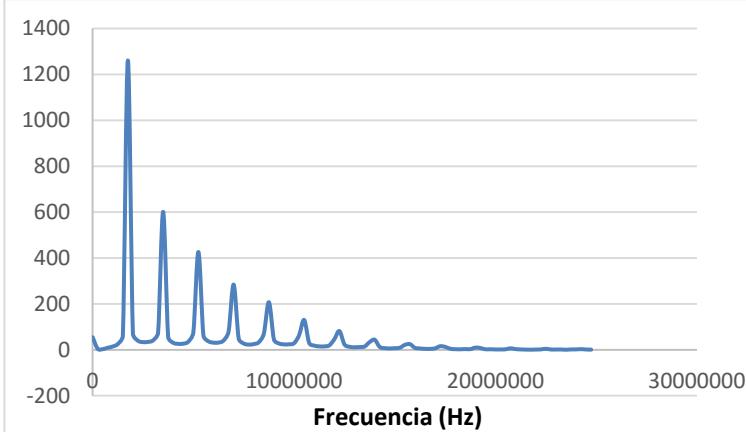
**HEXANO**



**HEPTANO**

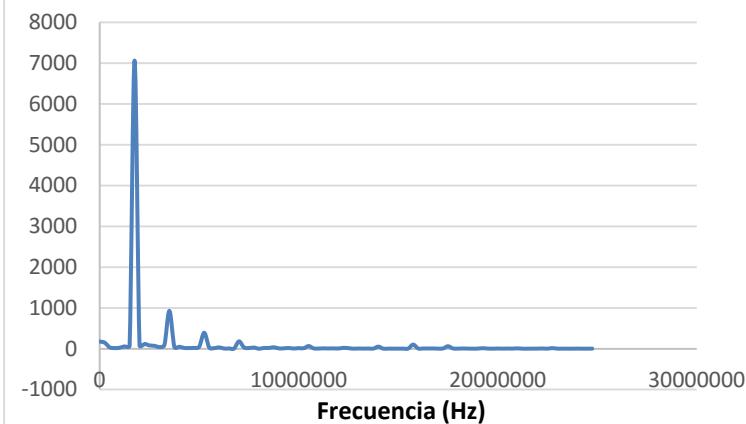


**DECANO**

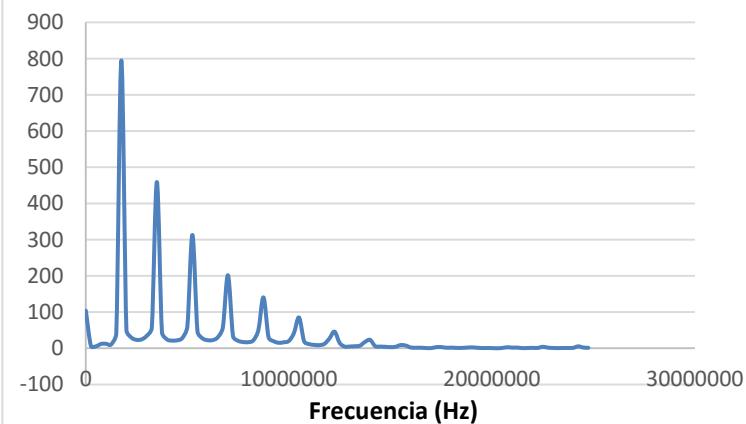


**V=30 V; Z=10 mm**

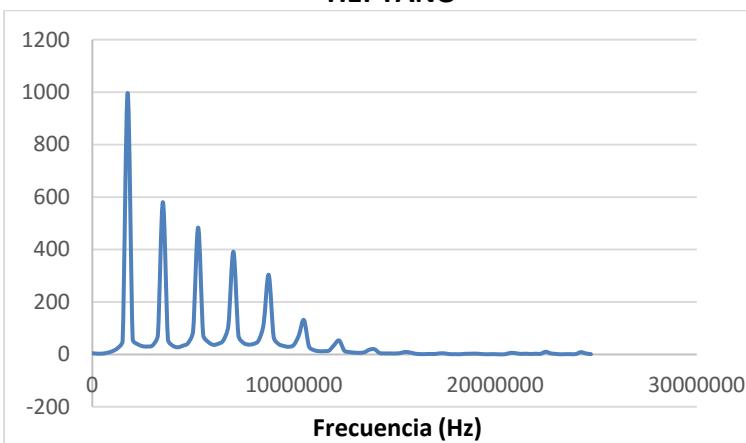
**AGUA**



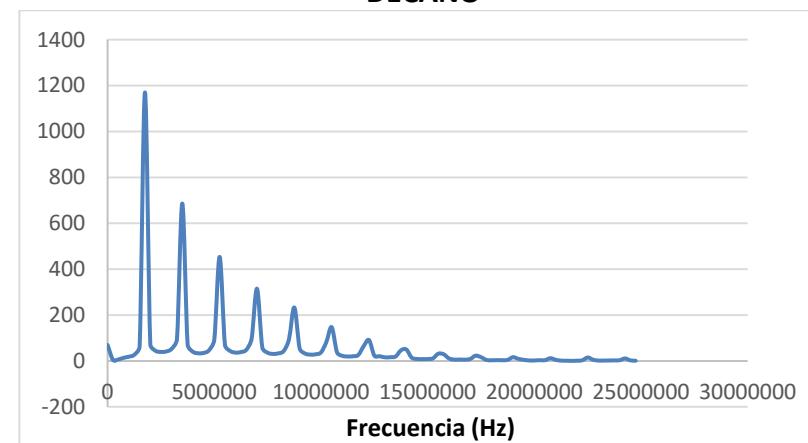
**HEXANO**



**HEPTANO**

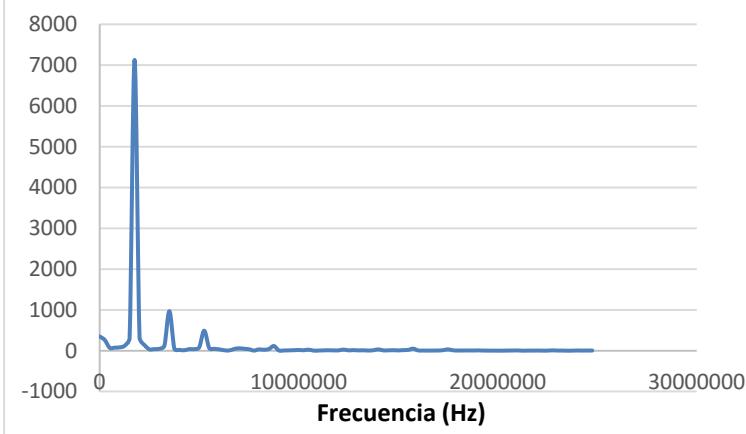


**DECANO**

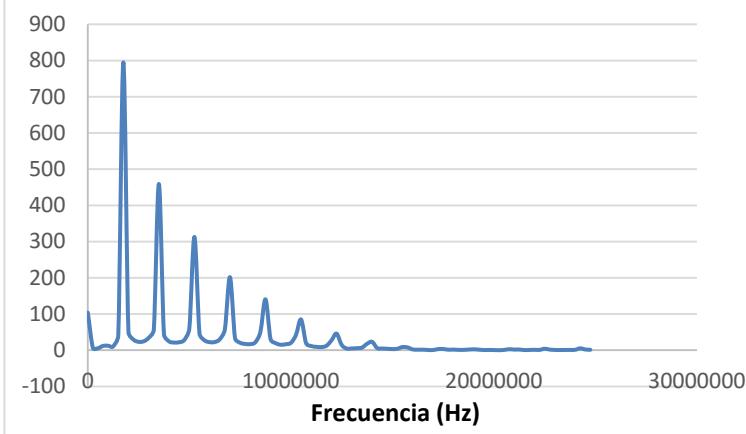


**V=30 V; Z=15 mm**

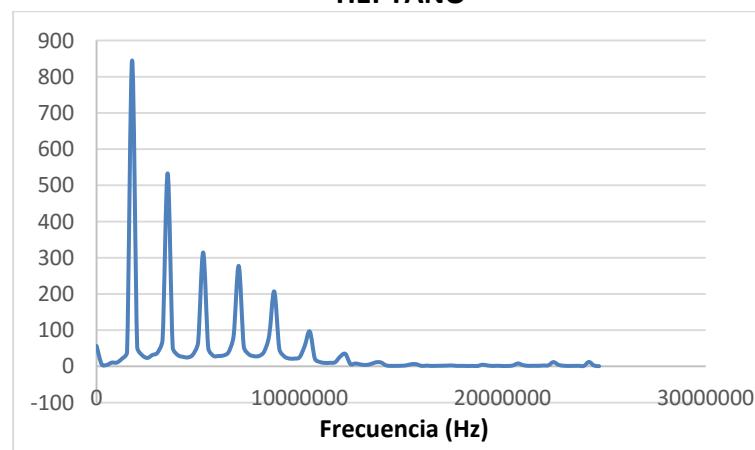
**AGUA**



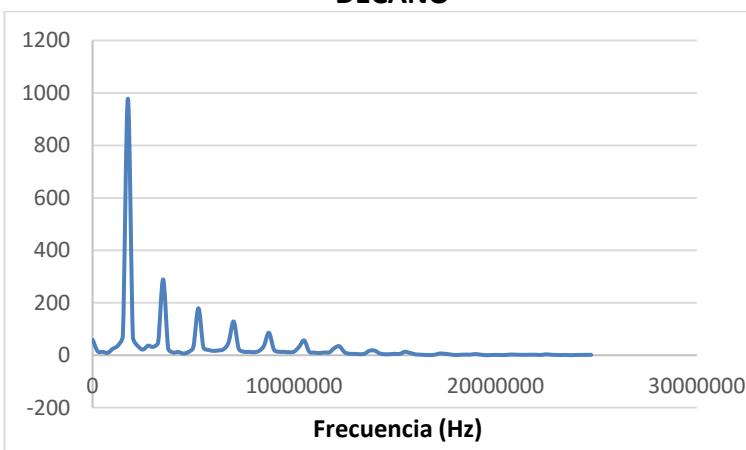
**HEXANO**



**HEPTANO**

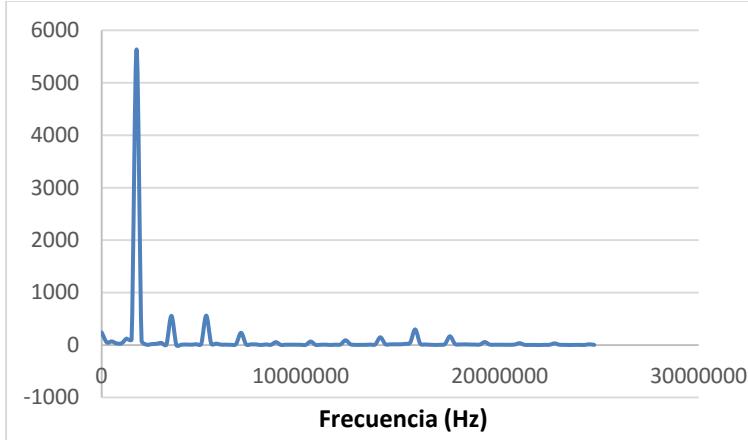


**DECANO**

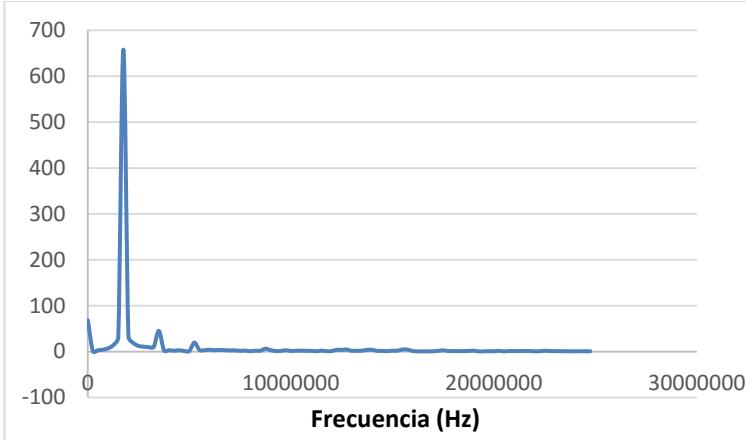


**V=50 V; Z=-30 mm**

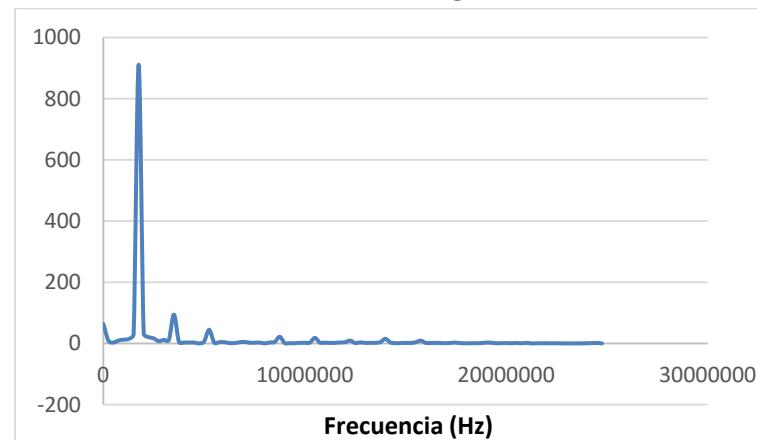
**AGUA**



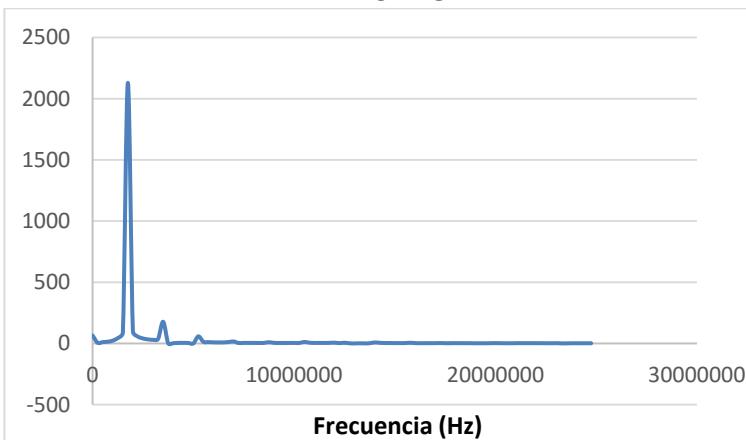
**HEXANO**



**HEPTANO**

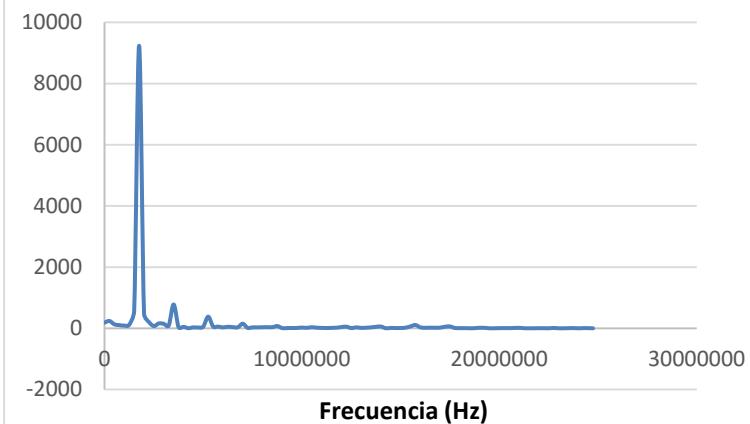


**DECANO**

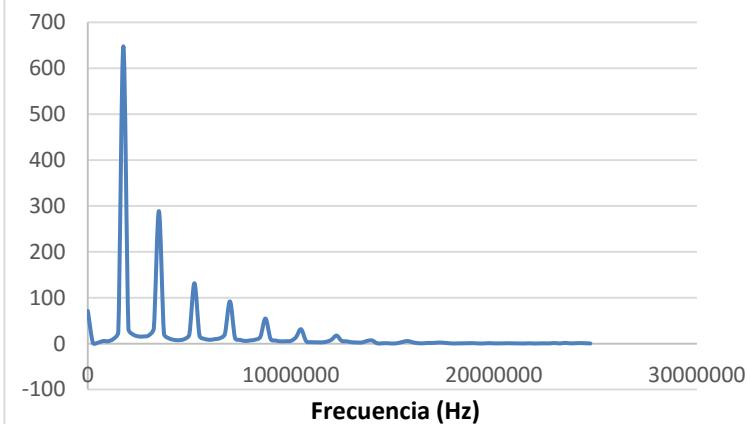


V=50 V; Z=-20 mm

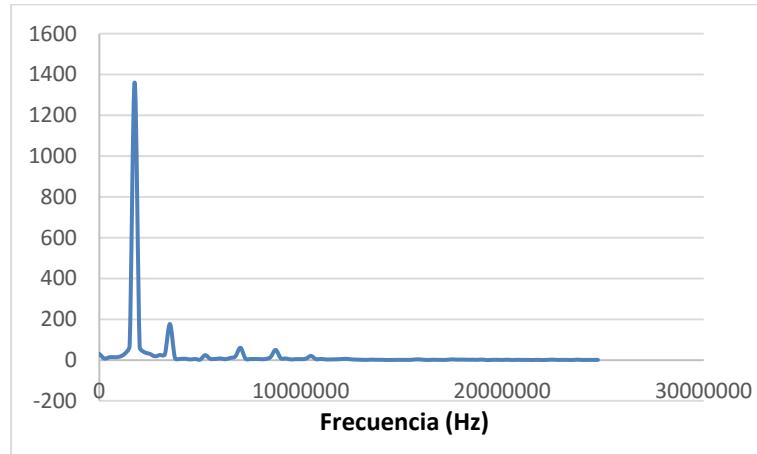
AGUA



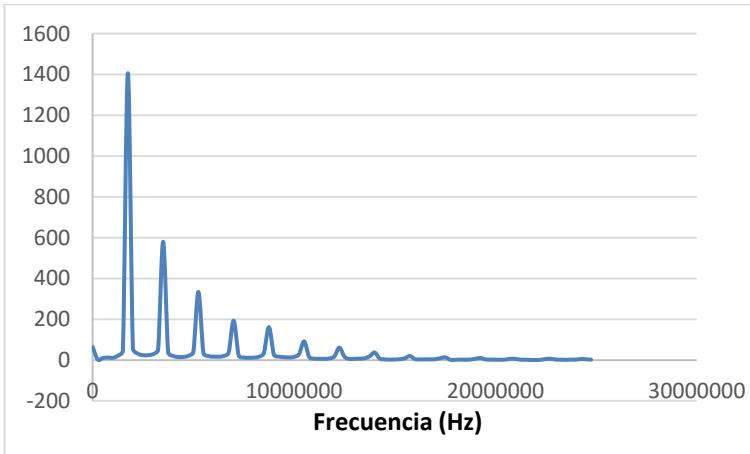
HEXANO



HEPTANO

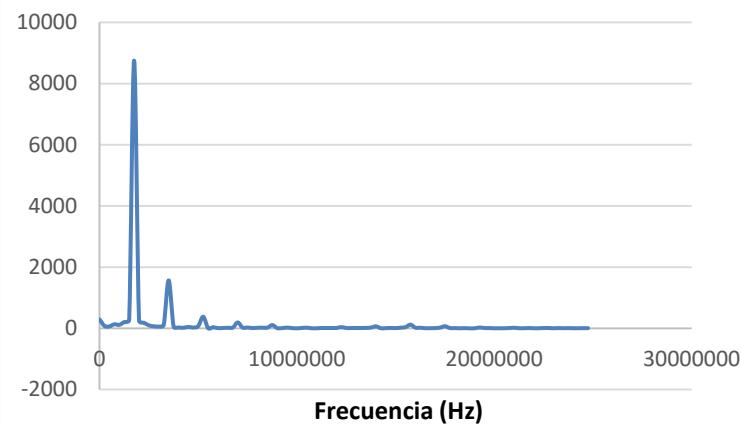


DECANO

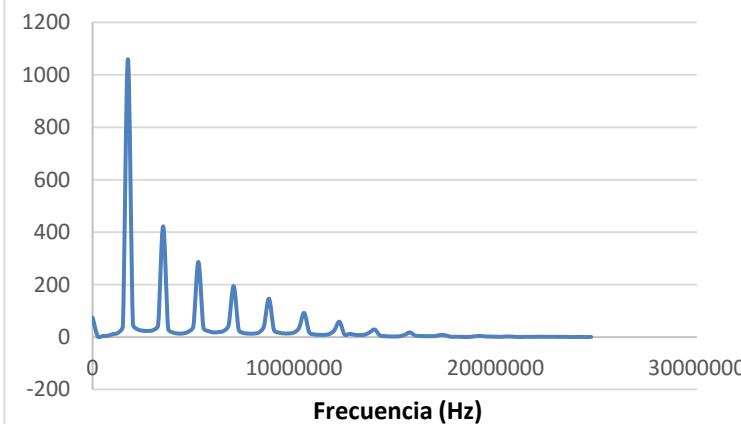


**V=50 V; Z=-10 mm**

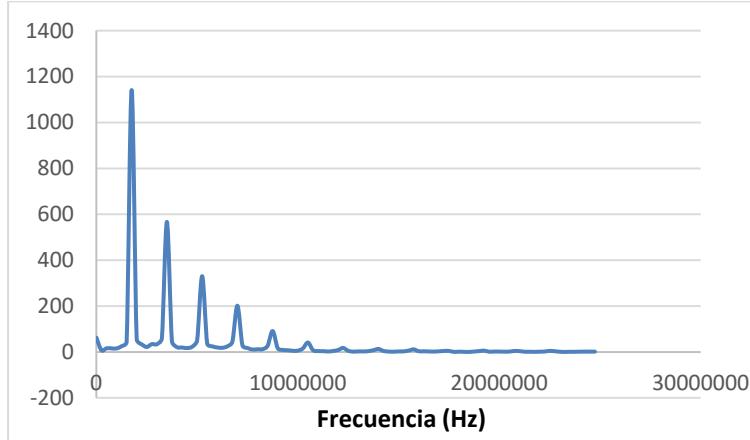
**AGUA**



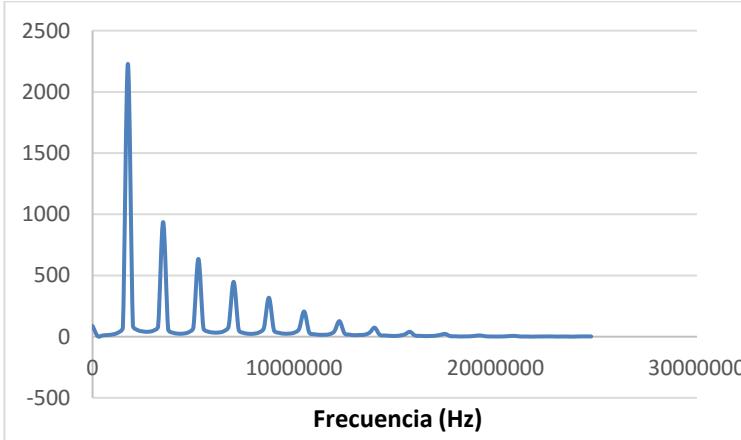
**HEXANO**



**HEPTANO**

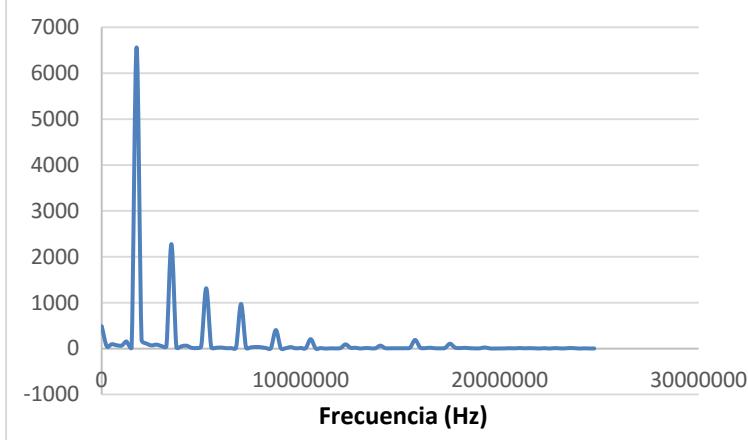


**DECANO**

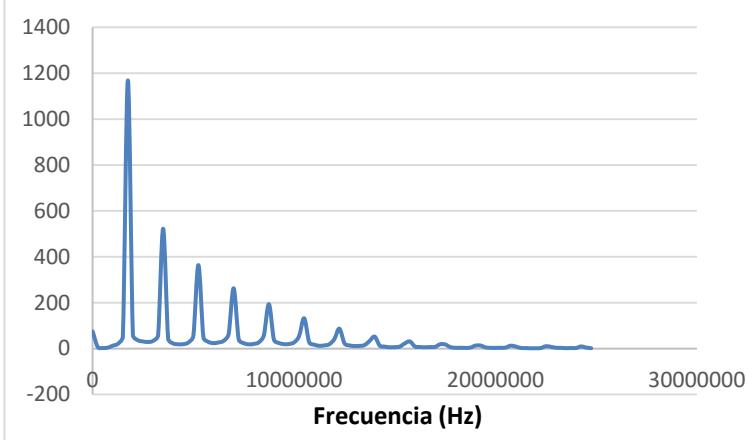


**V=50 V; Z= 0 mm**

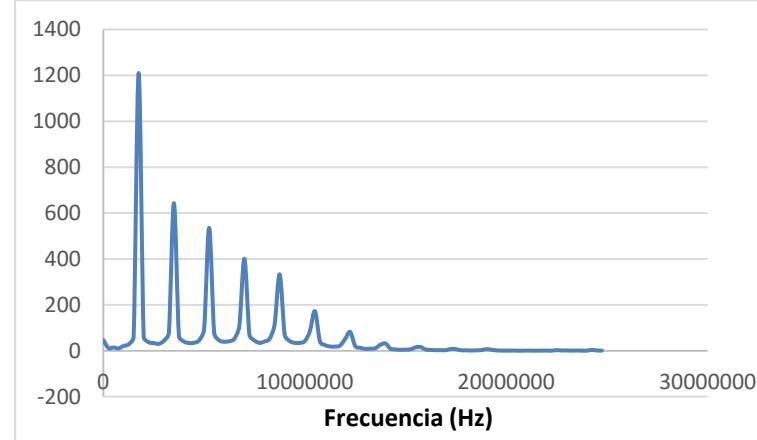
**AGUA**



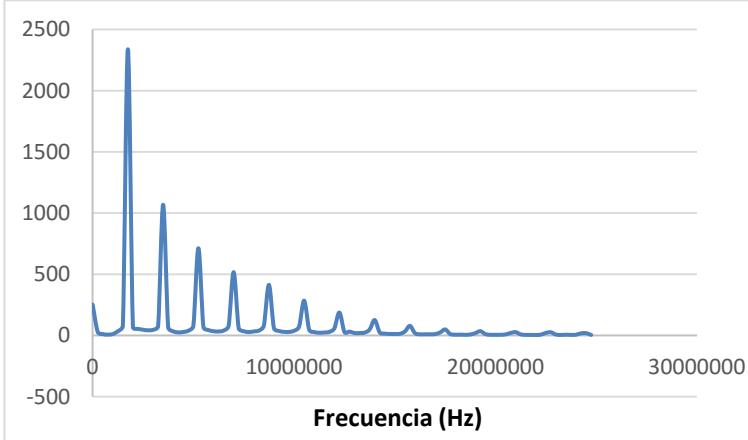
**HEXANO**



**HEPTANO**

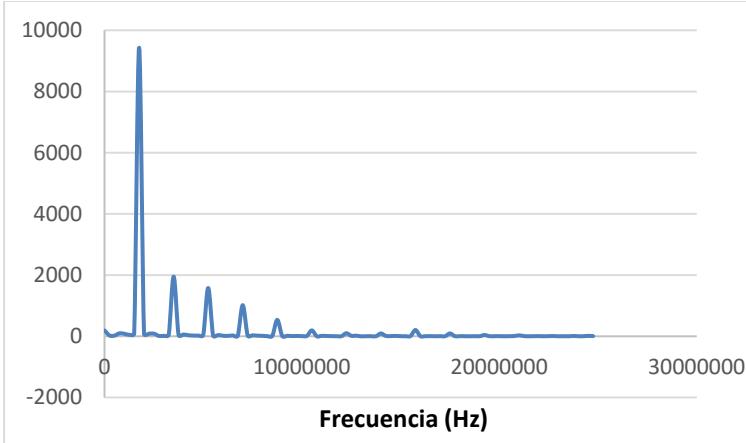


**DECANO**

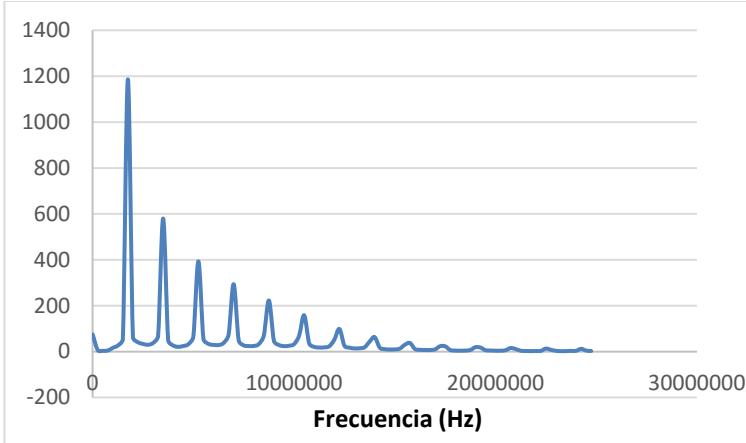


**V=50 V; Z= 5 mm**

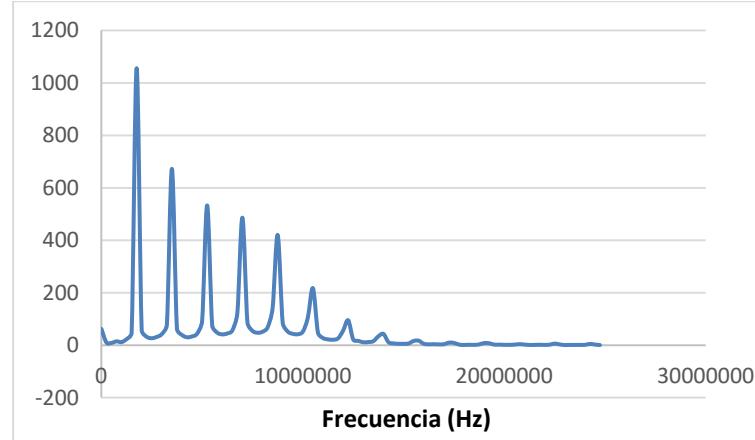
**AGUA**



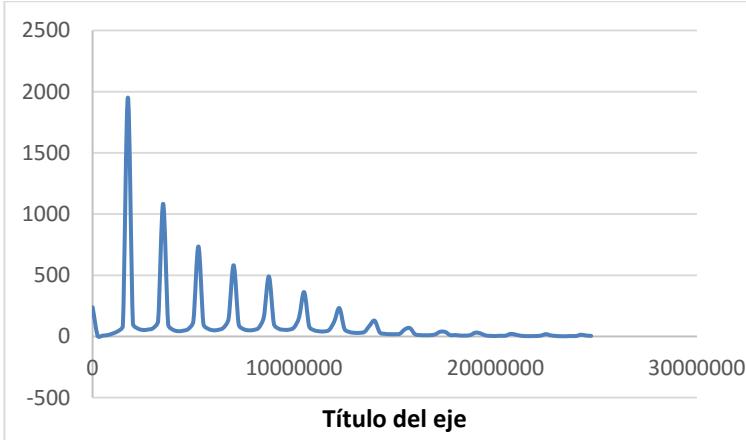
**HEXANO**



**HEPTANO**

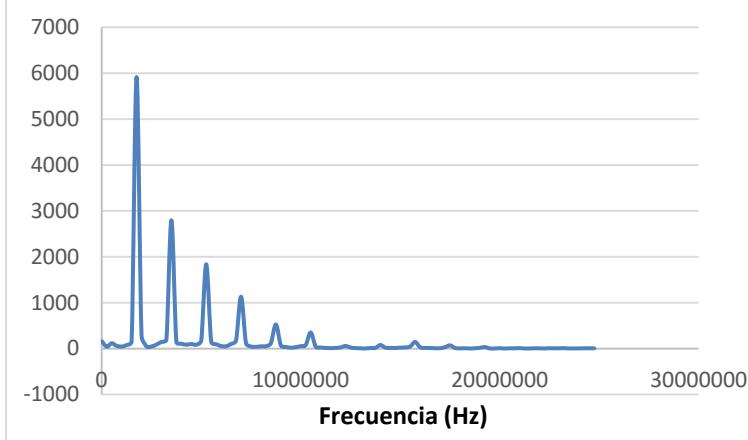


**DECANO**

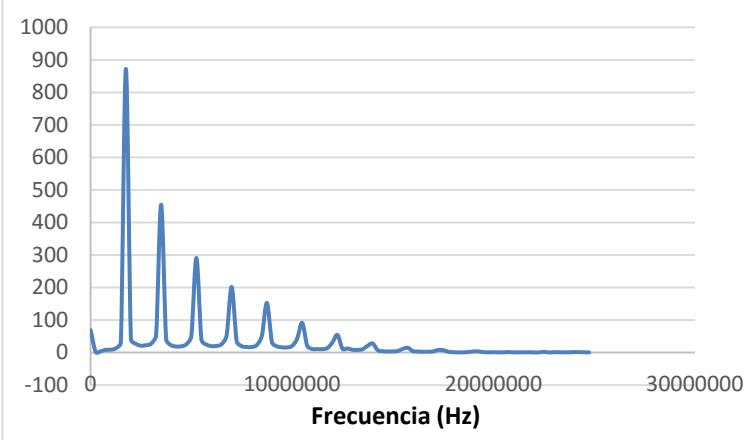


**V=50 V; Z= 10 mm**

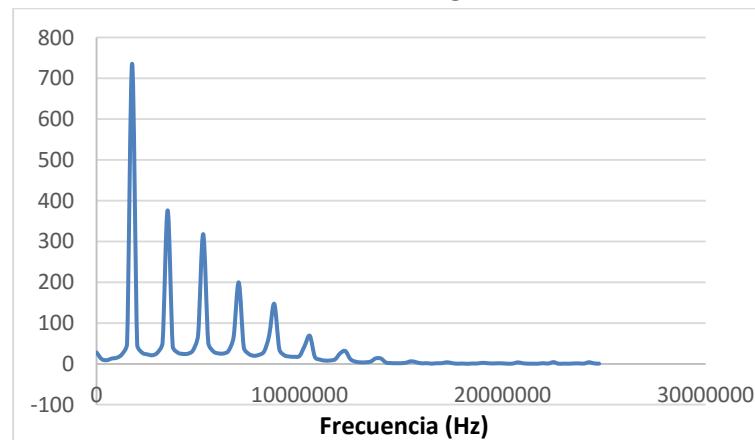
**AGUA**



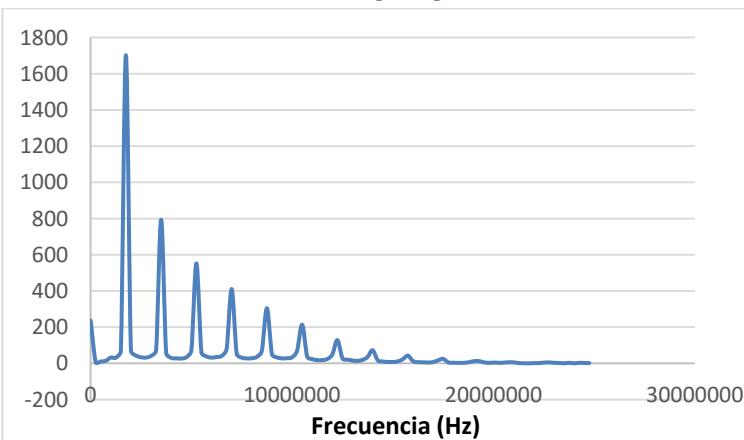
**HEXANO**



**HEPTANO**

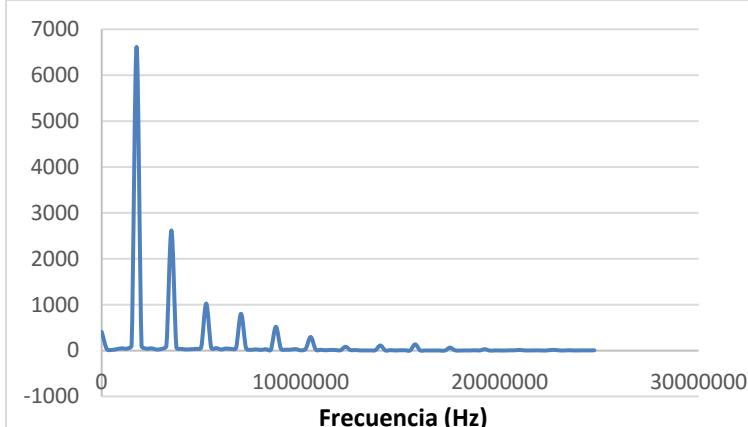


**DECANO**

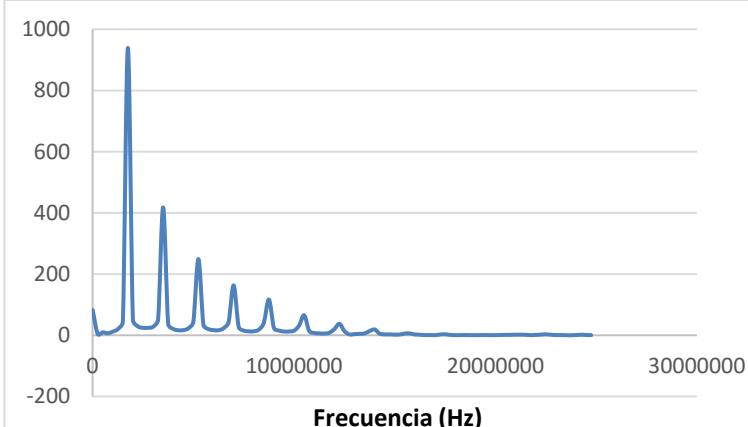


**V=50 V; Z= 15 mm**

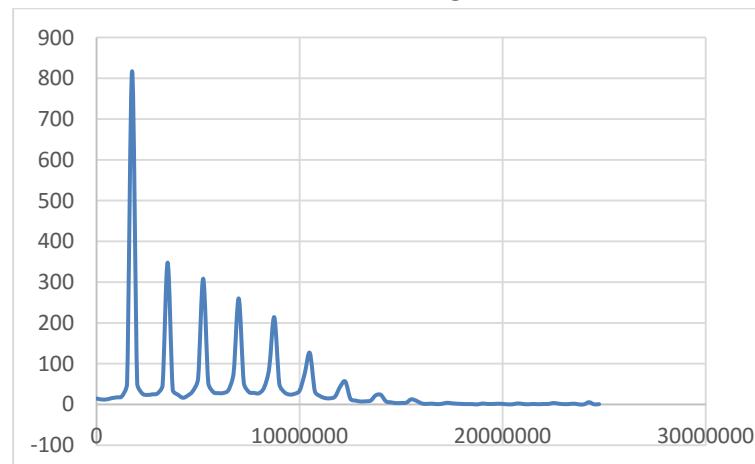
**AGUA**



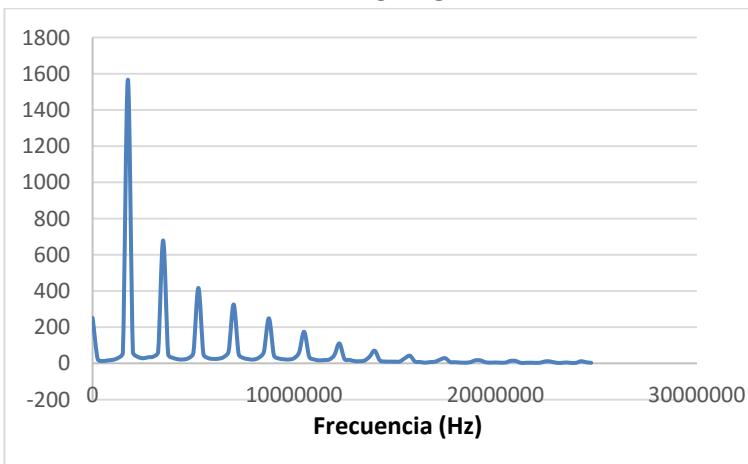
**HEXANO**



**HEPTANO**



**DECANO**

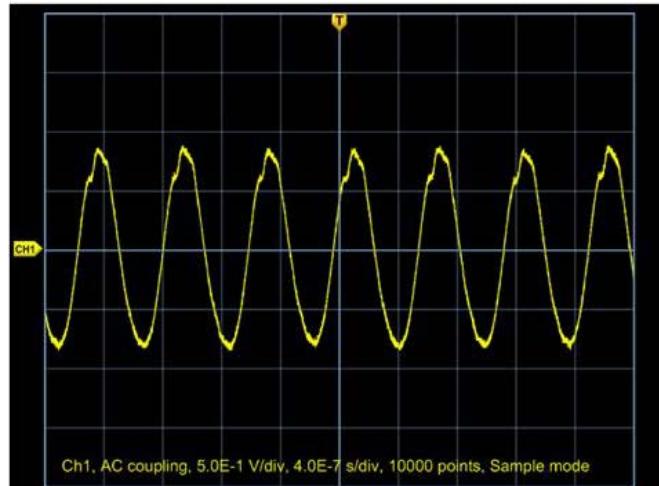


---

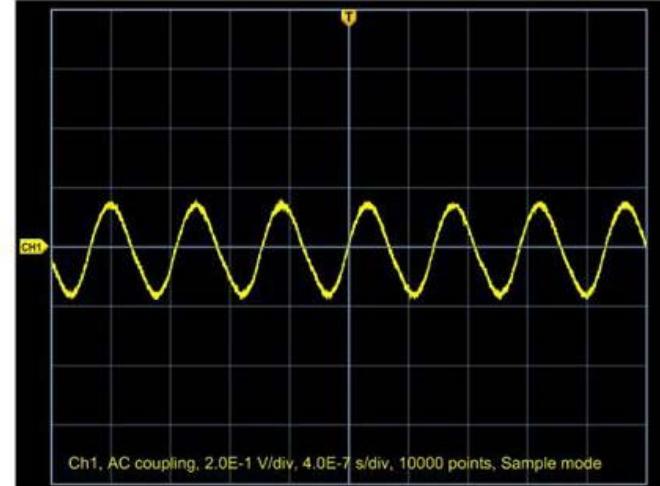
**Anexo III – Ondas obtenidas por el hidrófono en los distintos líquidos**

V=20 V; Z=-30 mm

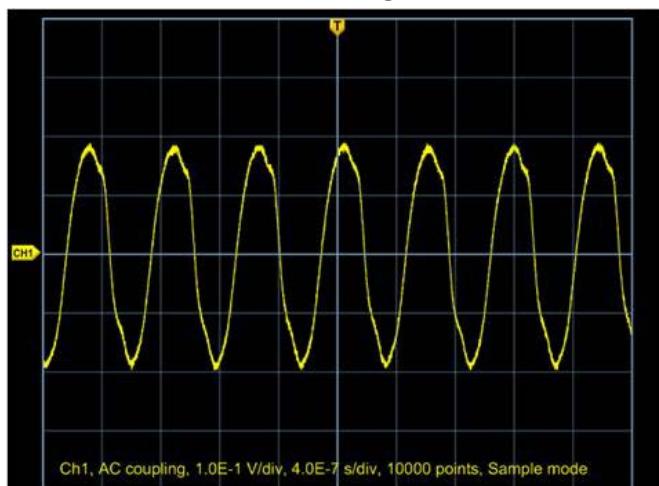
AGUA



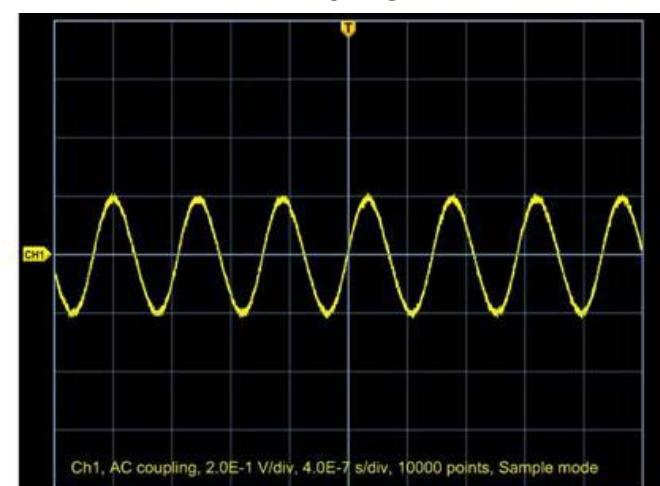
HEXANO



HEPTANO

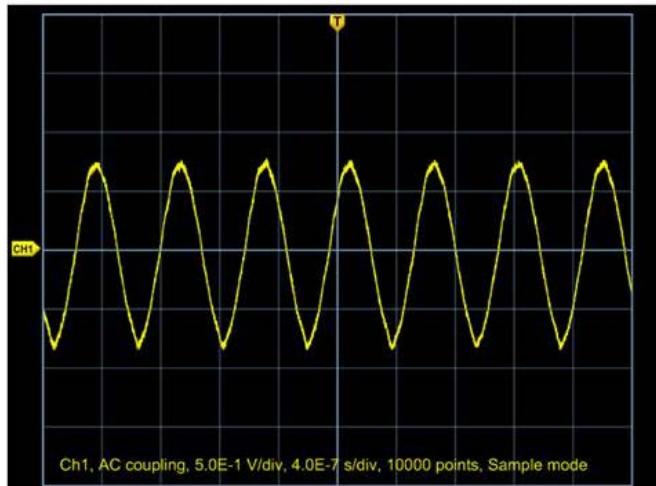


DECANO

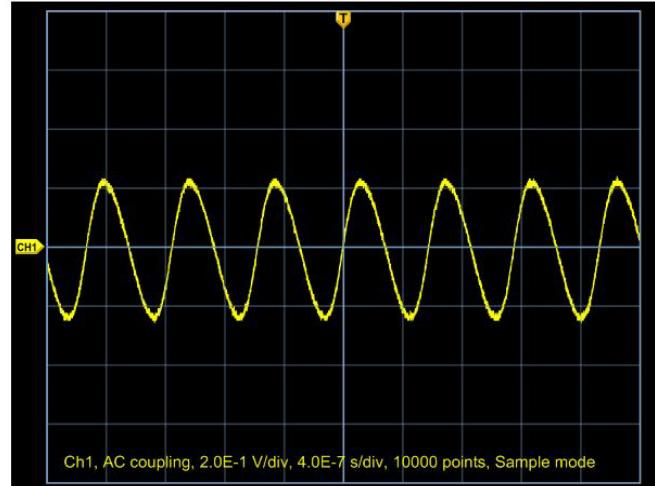


V=20 V; Z=-20 mm

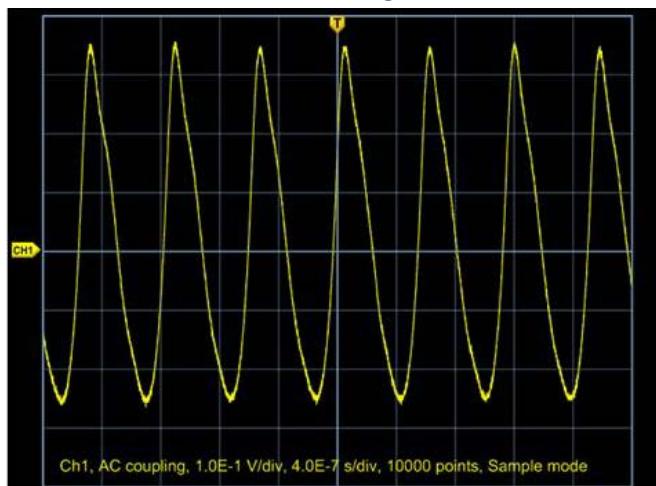
AGUA



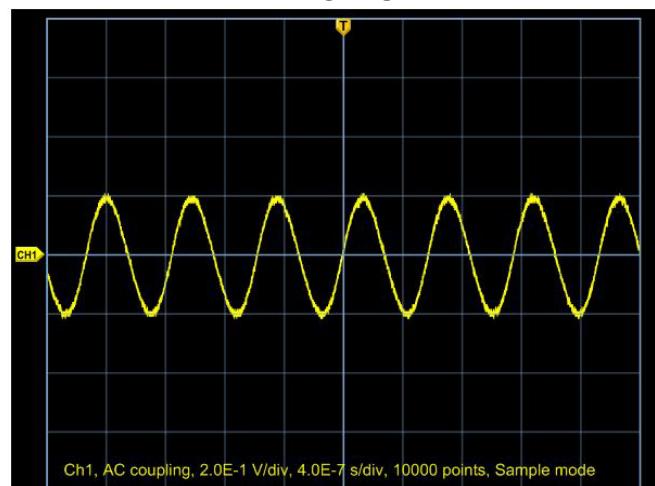
HEXANO



HEPTANO

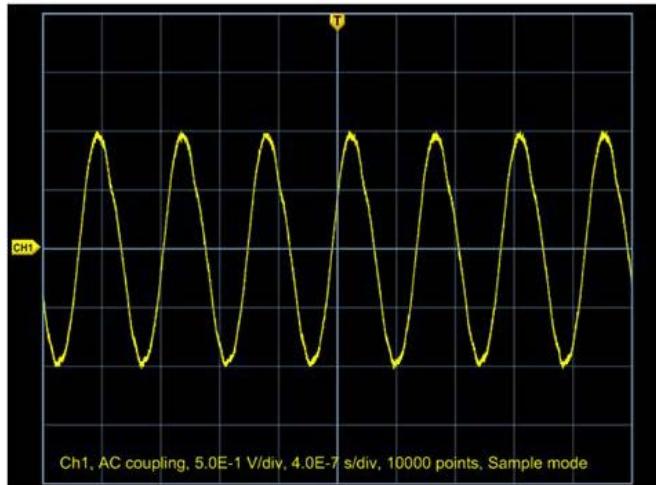


DECANO

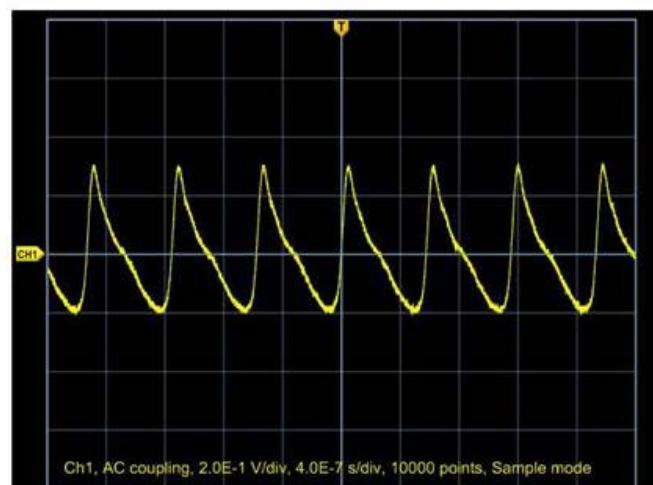


V=20 V; Z=-10 mm

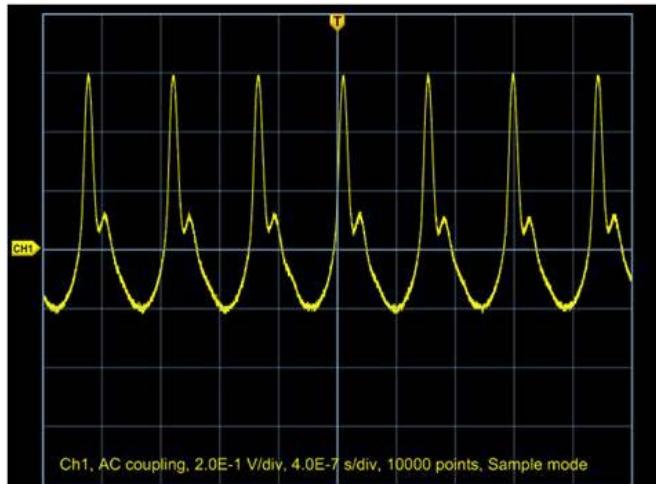
AGUA



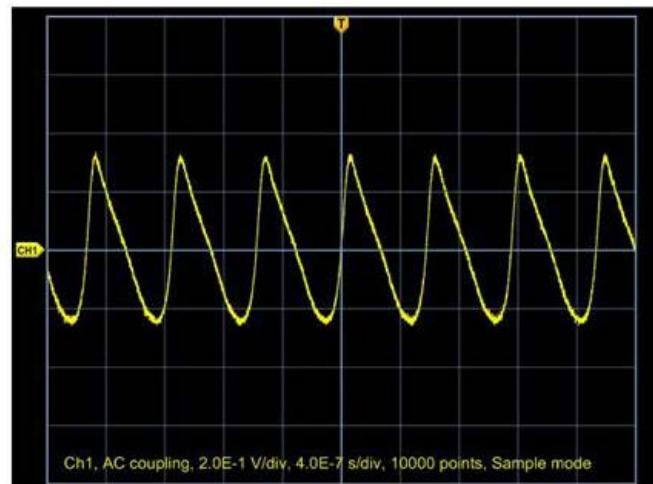
HEXANO



HEPTANO

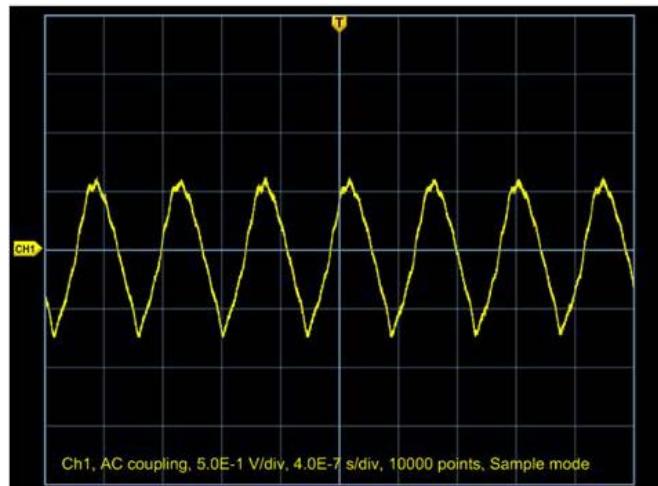


DECANO

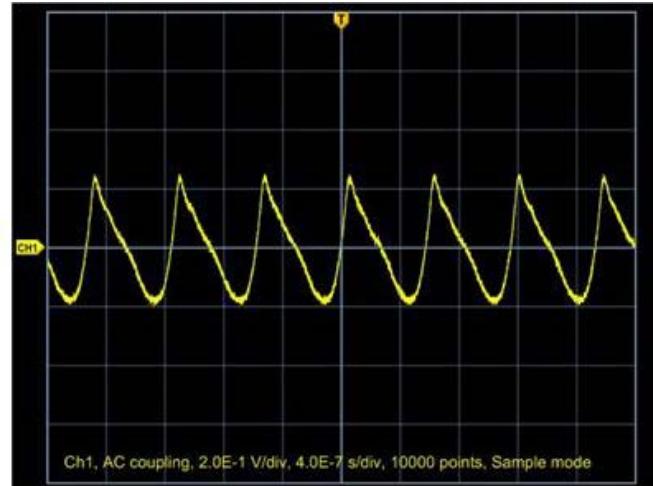


V=20 V; Z=0 mm

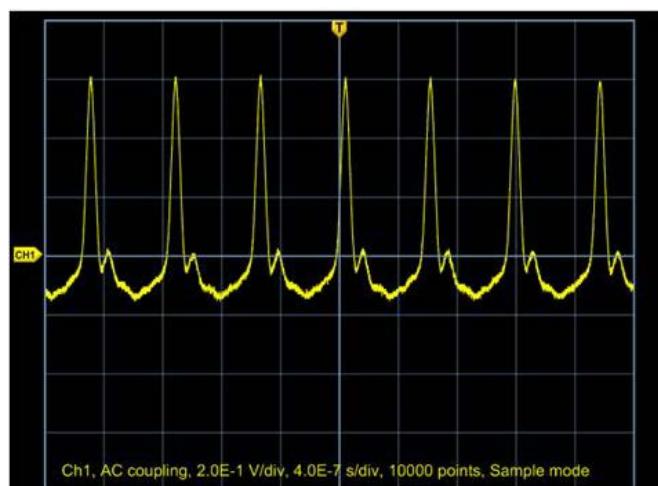
AGUA



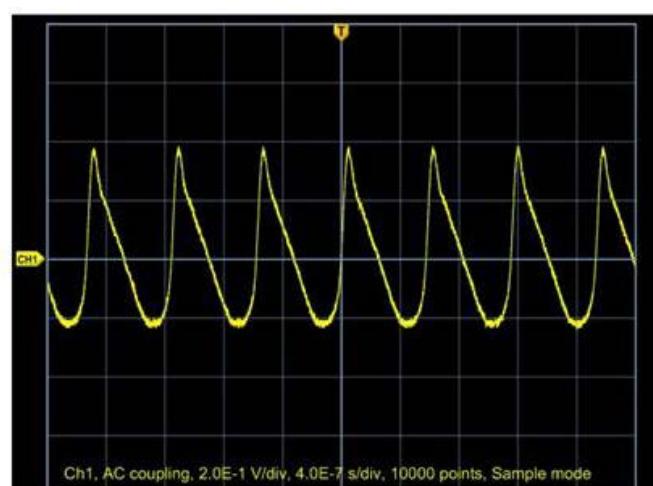
HEXANO



HEPTANO

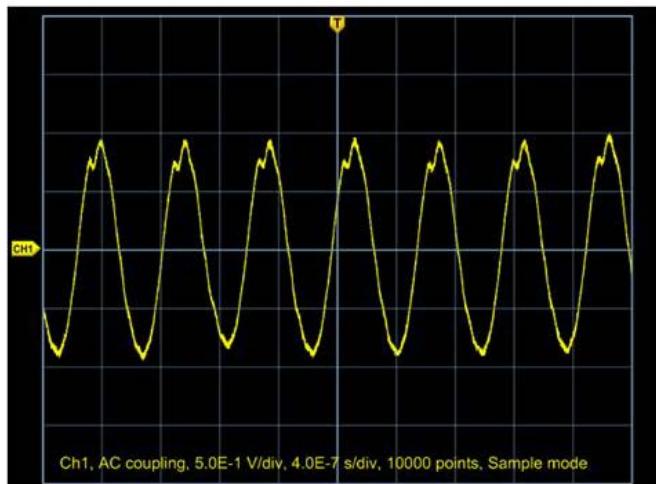


DECANO

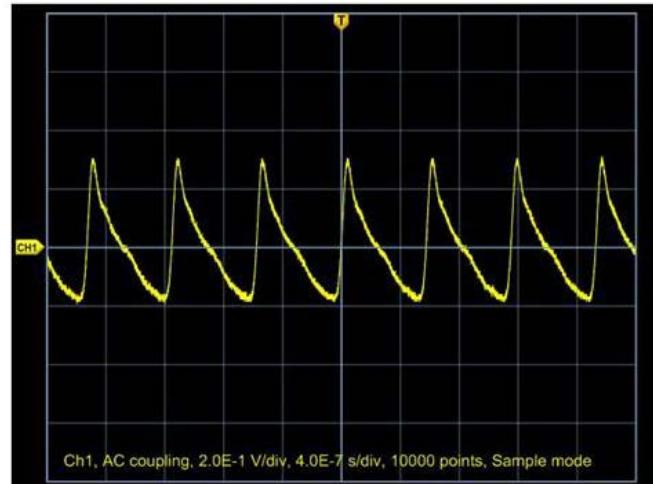


V=20 V; Z=5 mm

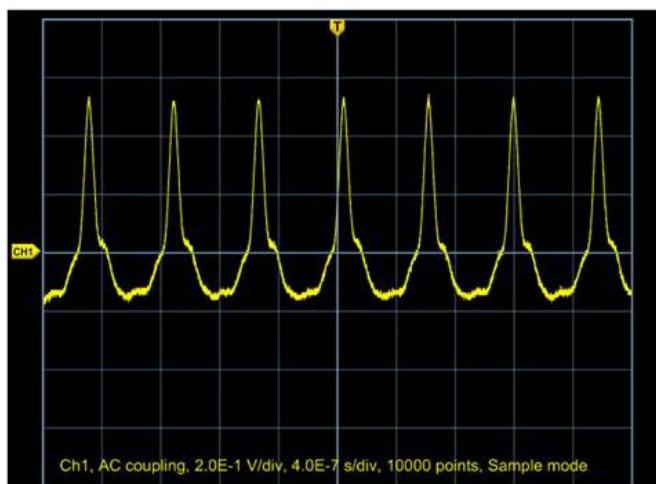
AGUA



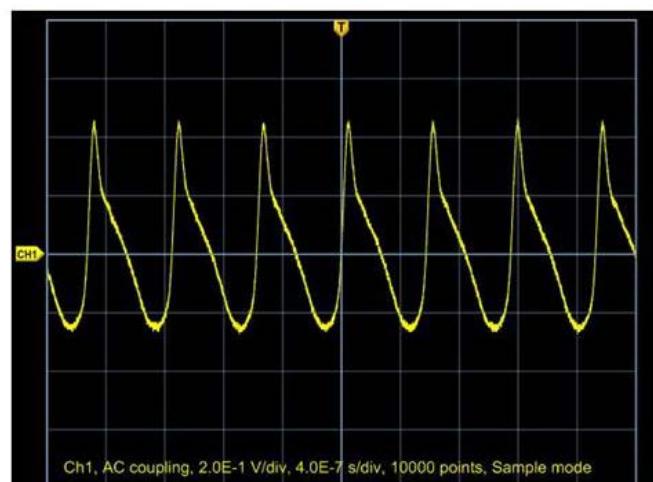
HEXANO



HEPTANO

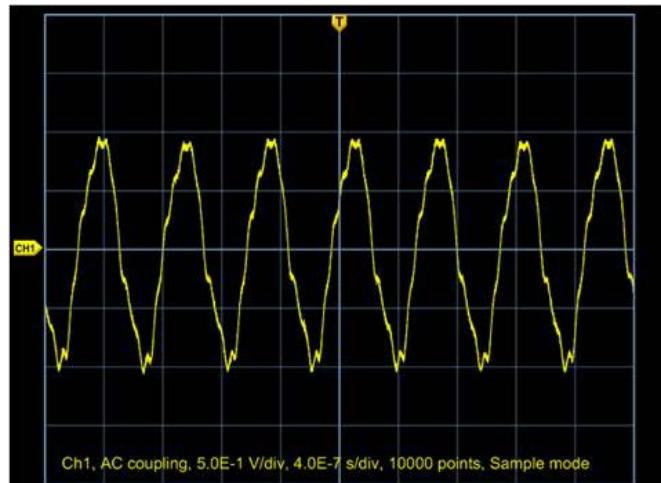


DECANO

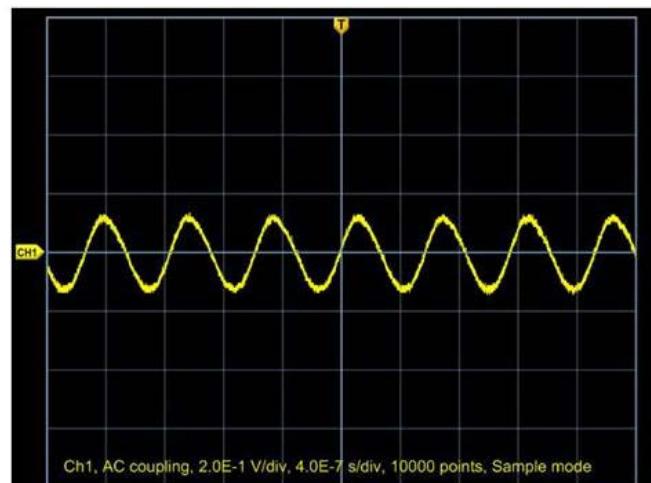


V=30 V; Z=-30 mm

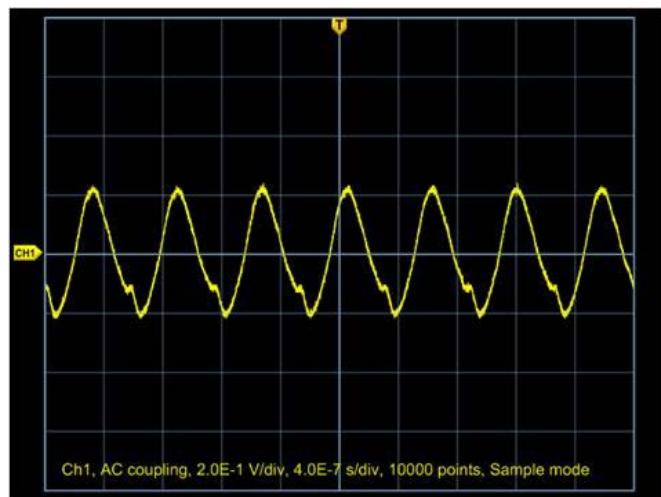
AGUA



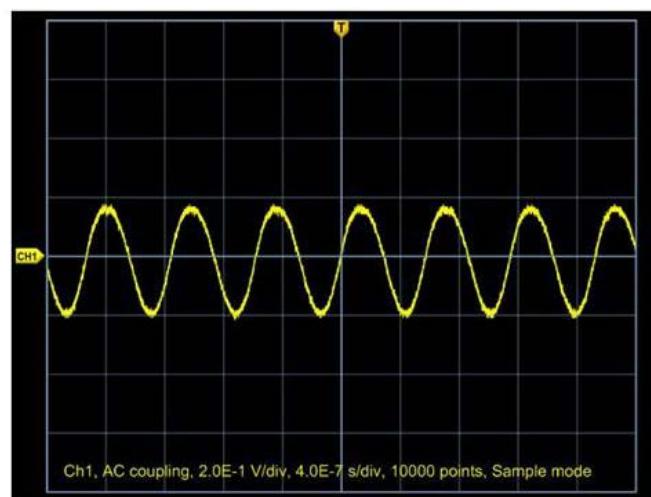
HEXANO



HEPTANO

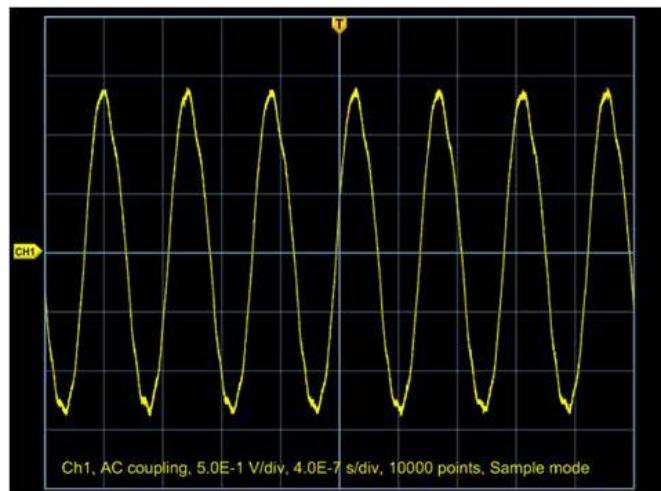


DECANO

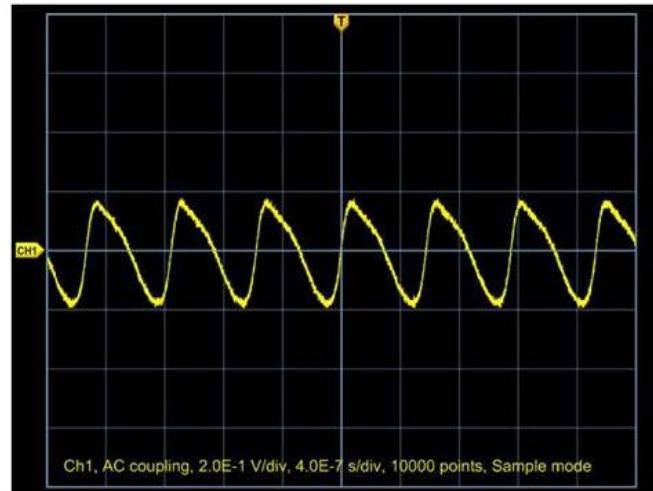


V=30 V; Z=-20 mm

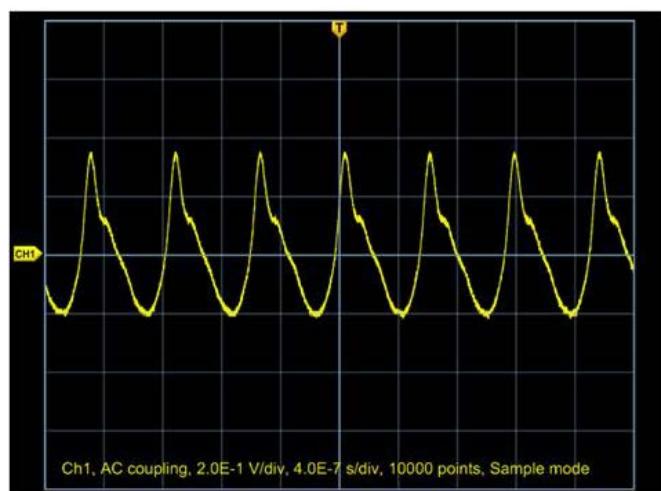
AGUA



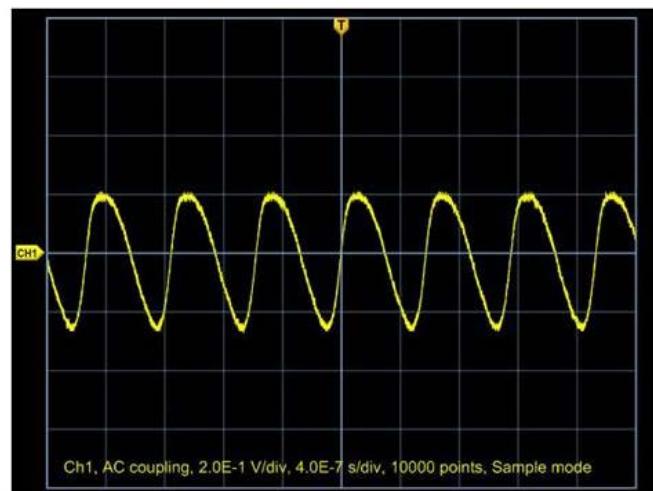
HEXANO



HEPTANO

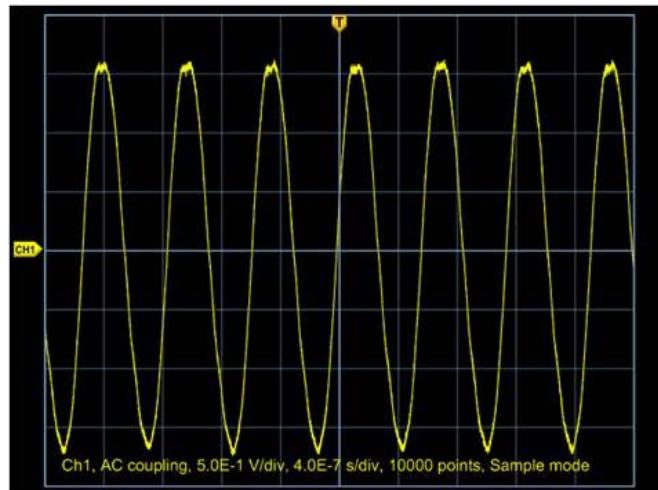


DECANO

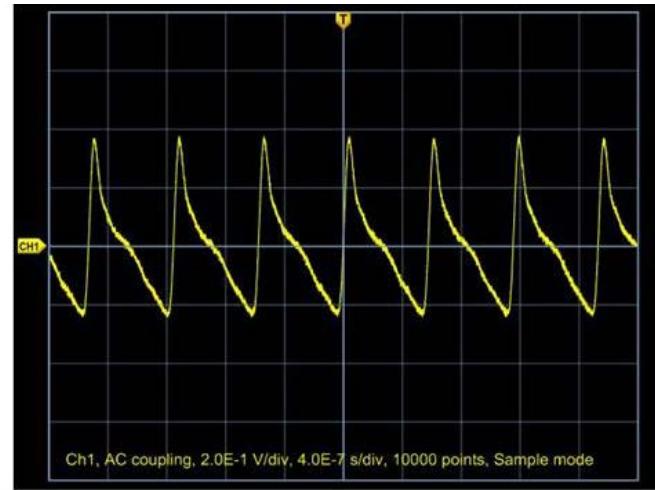


V=30 V; Z=-10 mm

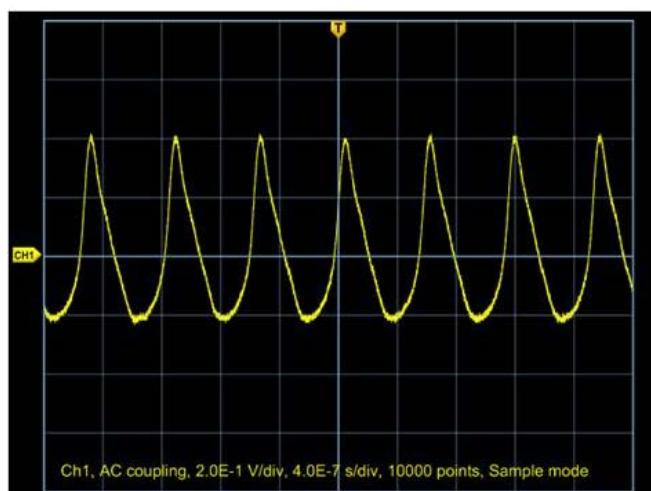
AGUA



HEXANO

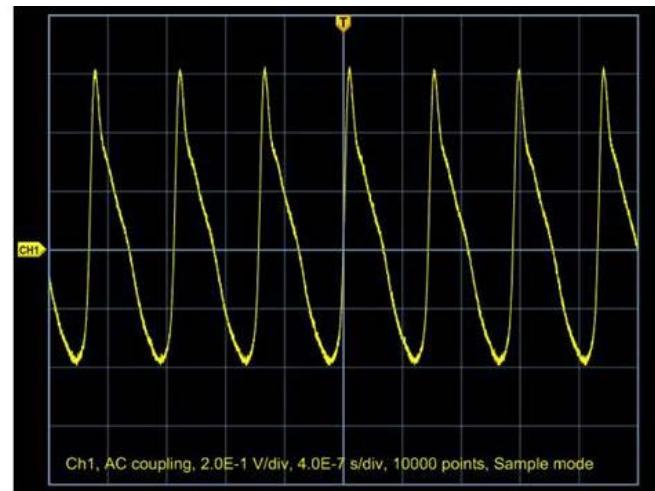


HEPTANO



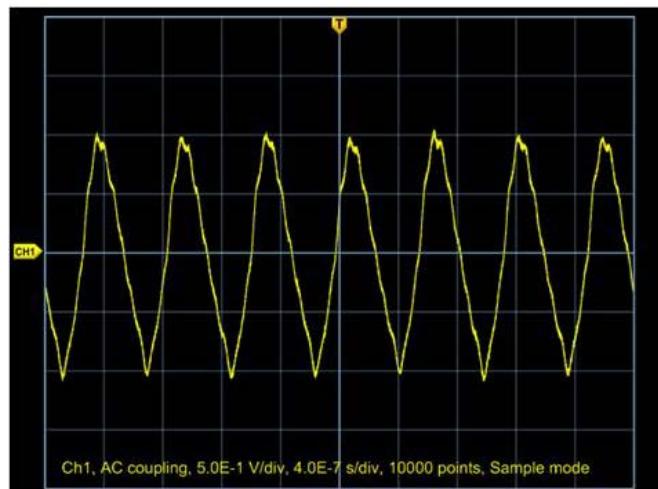
o

DECANO

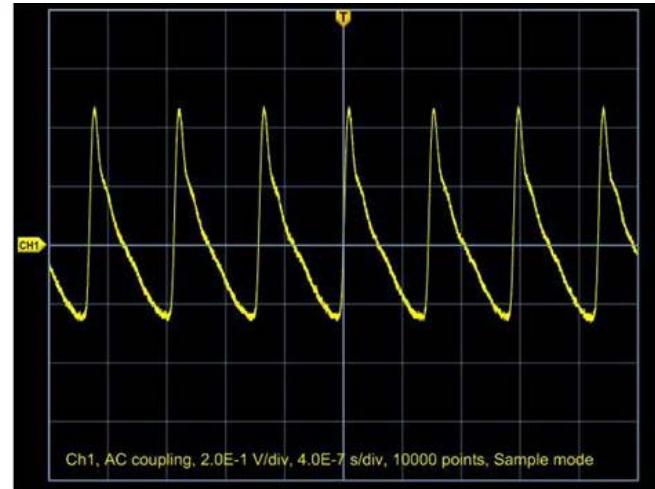


V=30 V; Z=0 mm

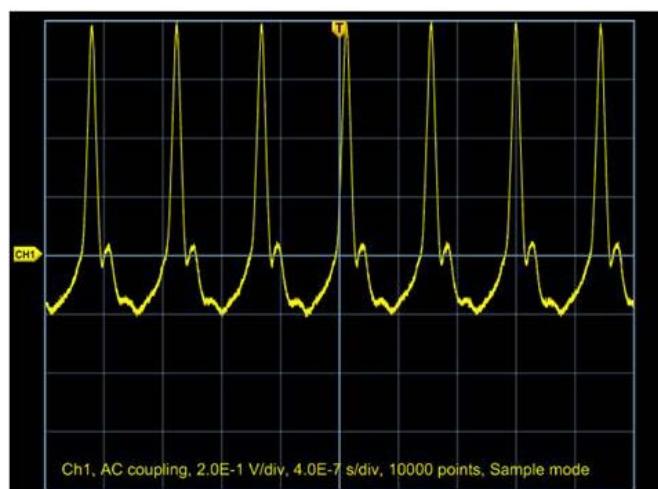
AGUA



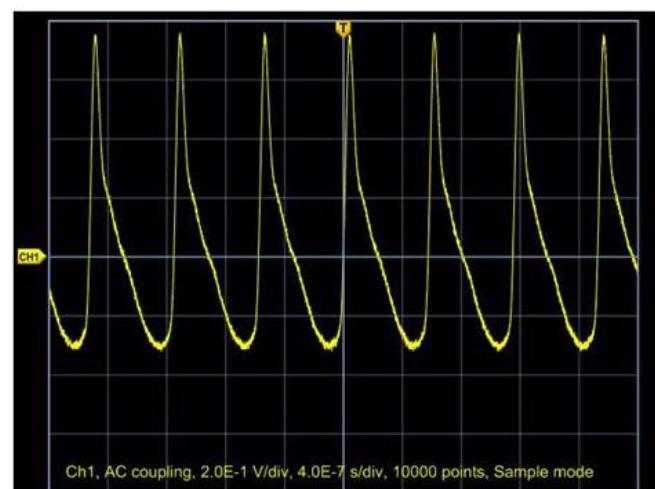
HEXANO



HEPTANO

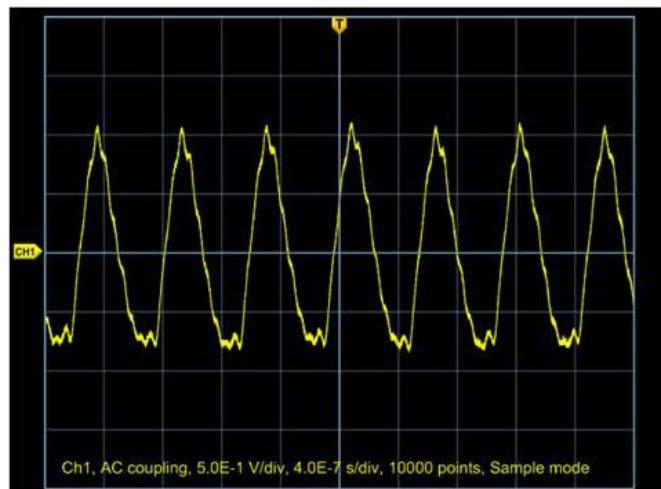


DECANO

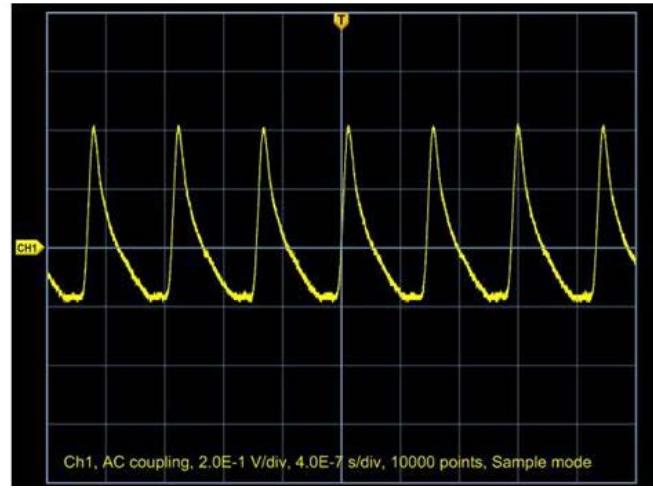


V=30 V; Z=5 mm

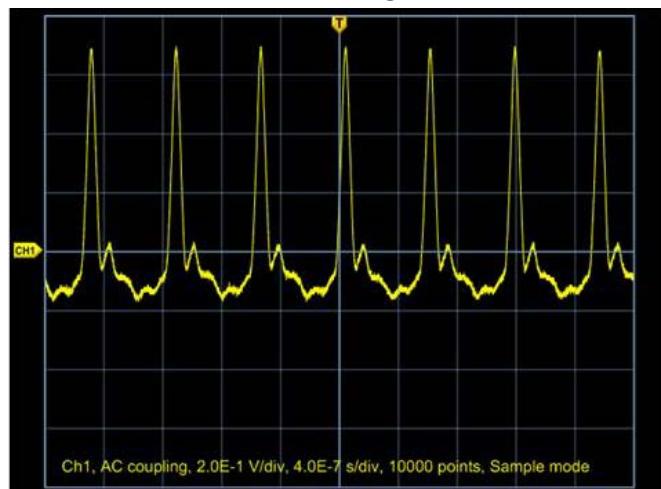
AGUA



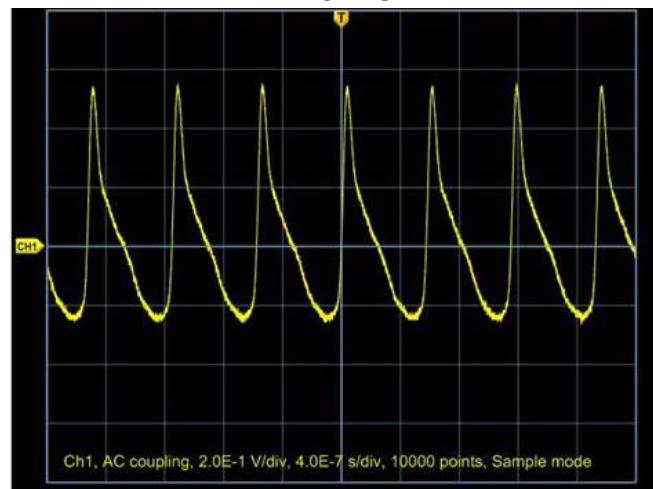
HEXANO



HEPTANO

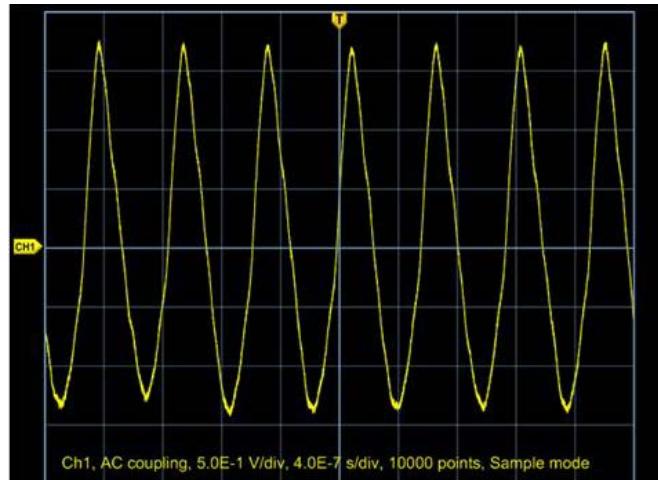


DECANO

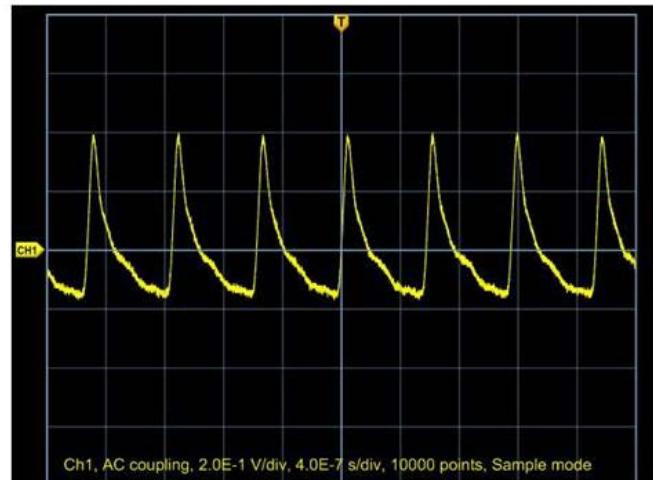


V=30 V; Z=10 mm

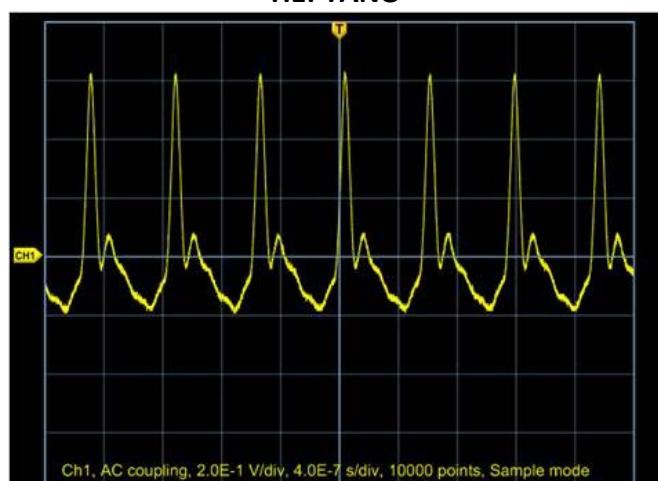
AGUA



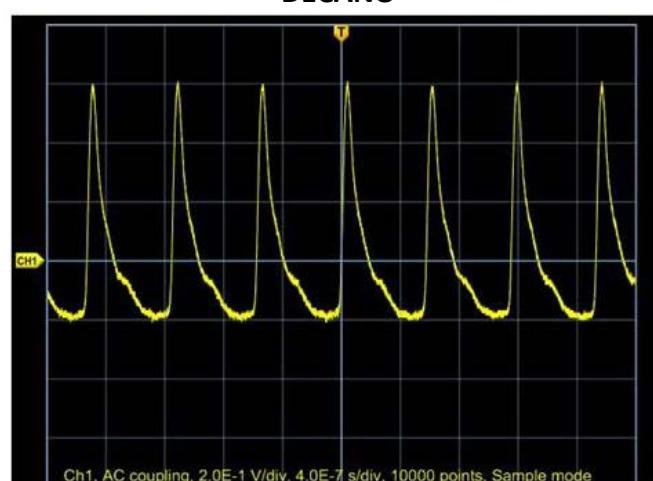
HEXANO



HEPTANO

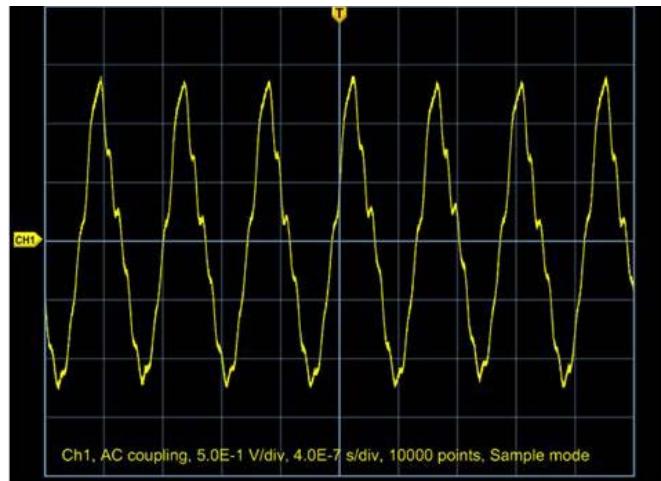


DECANO

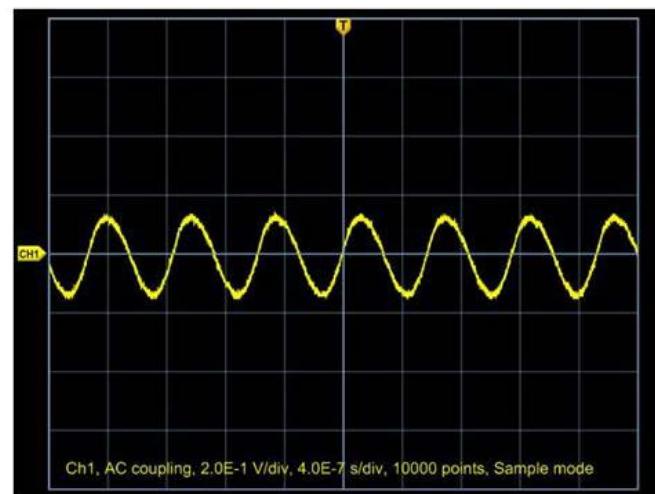


V=50 V; Z=-30 mm

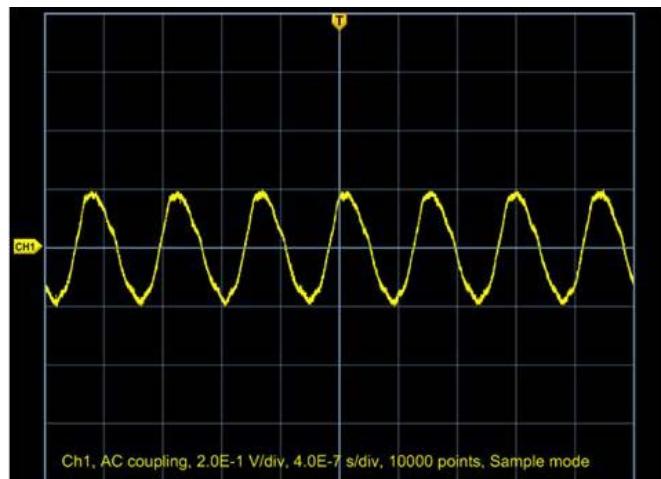
AGUA



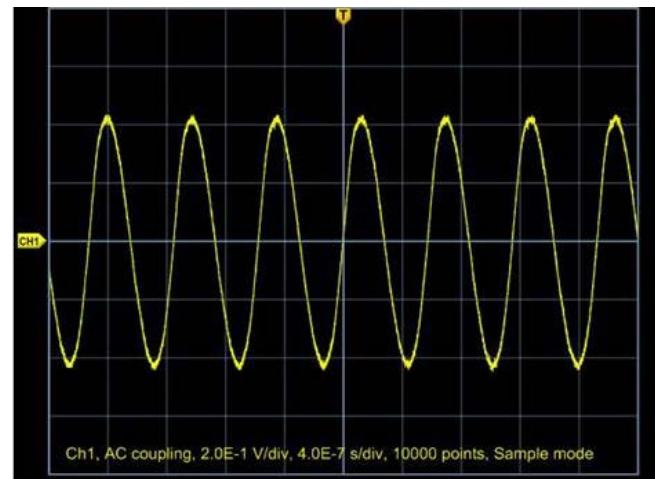
HEXANO



HEPTANO

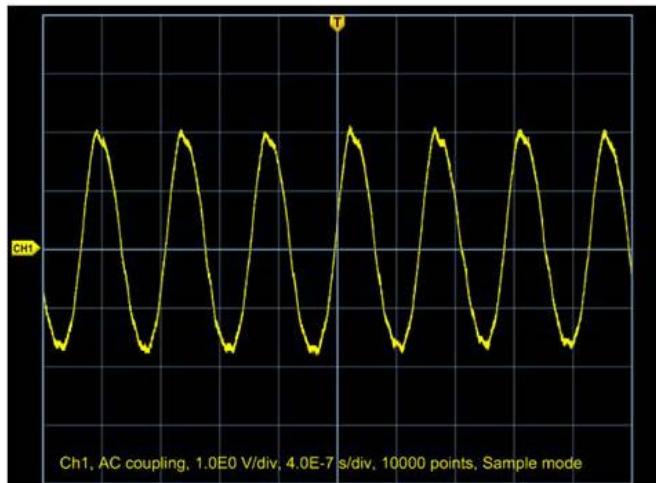


DECANO

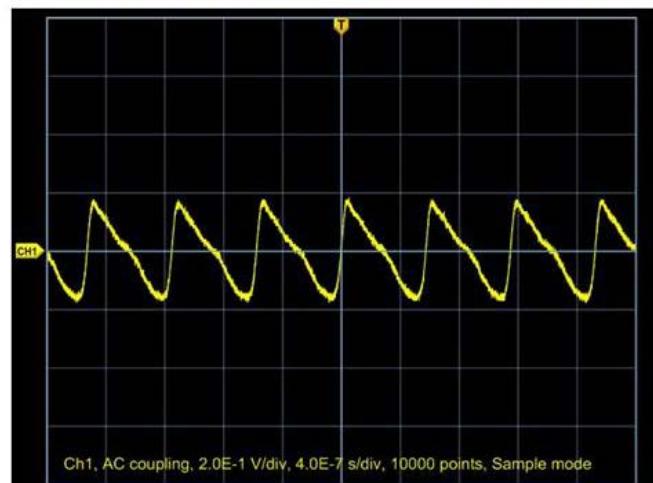


V=50 V; Z=-20 mm

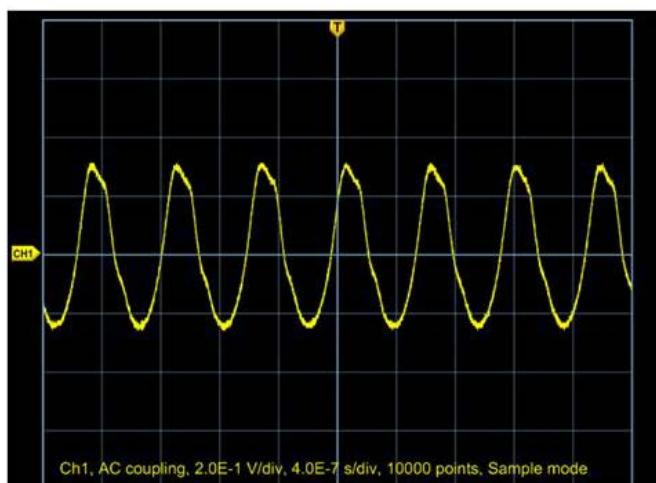
AGUA



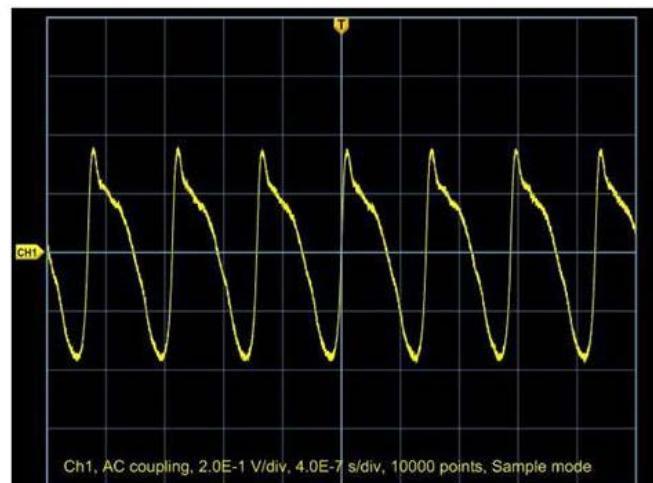
HEXANO



HEPTANO

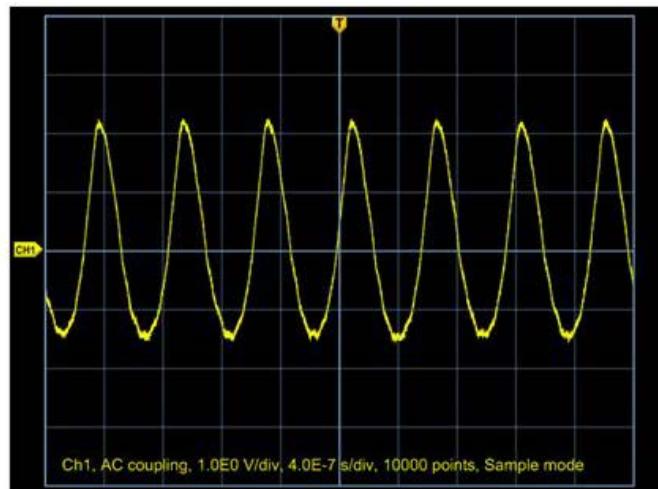


DECANO

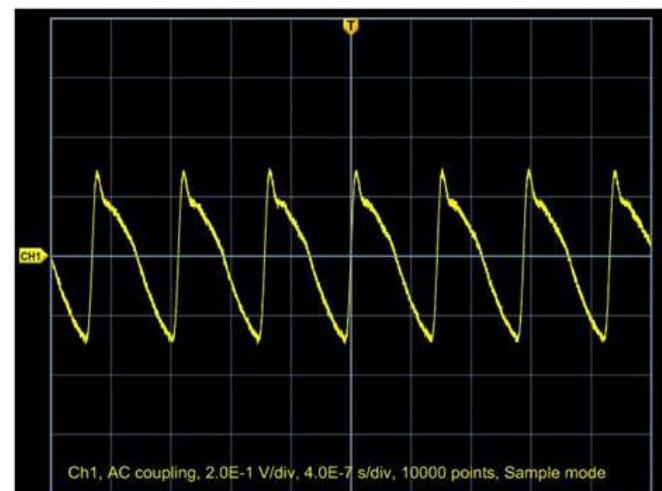


V=50 V; Z=-10 mm

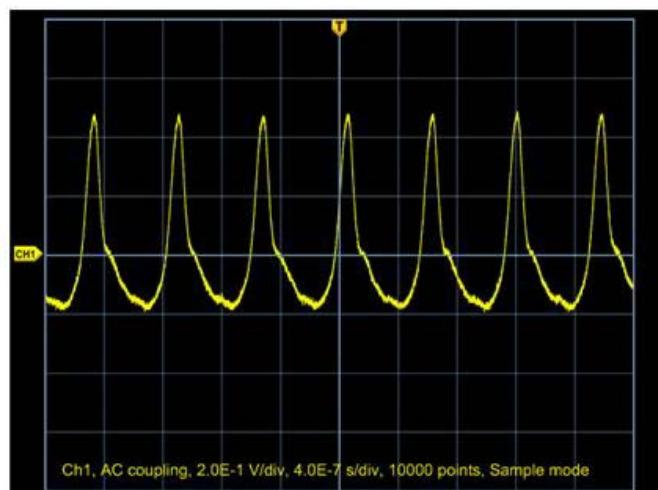
AGUA



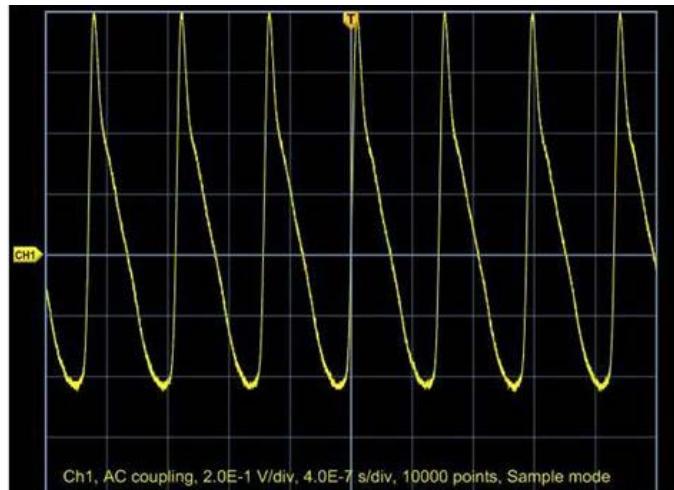
HEXANO



HEPTANO

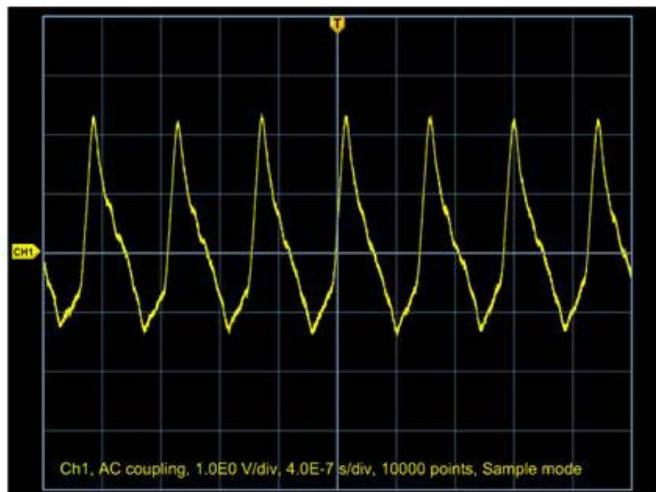


DECANO

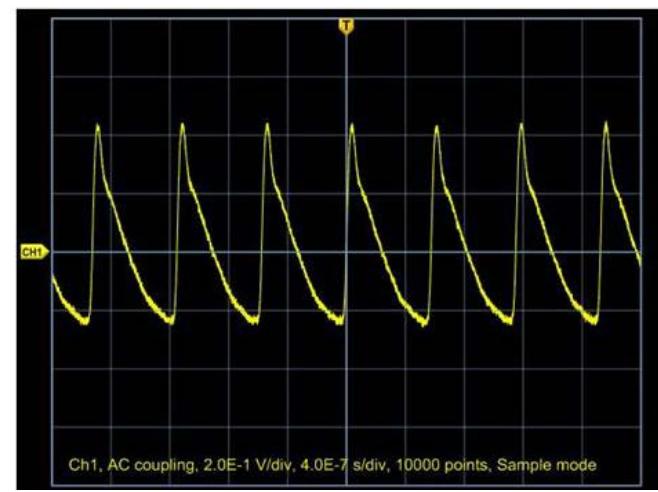


V=50 V; Z= 0 mm

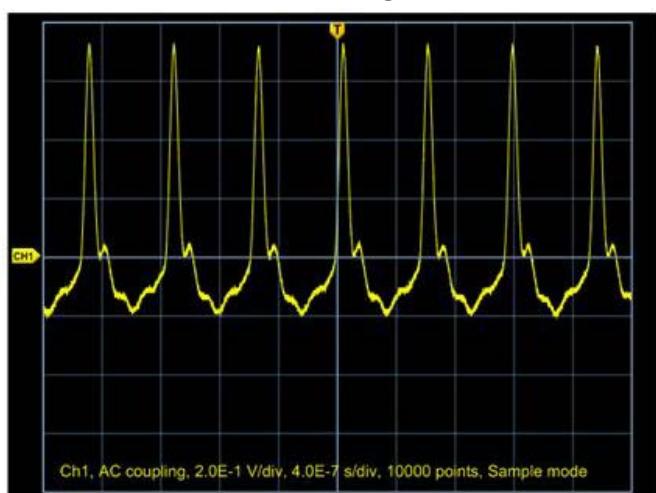
AGUA



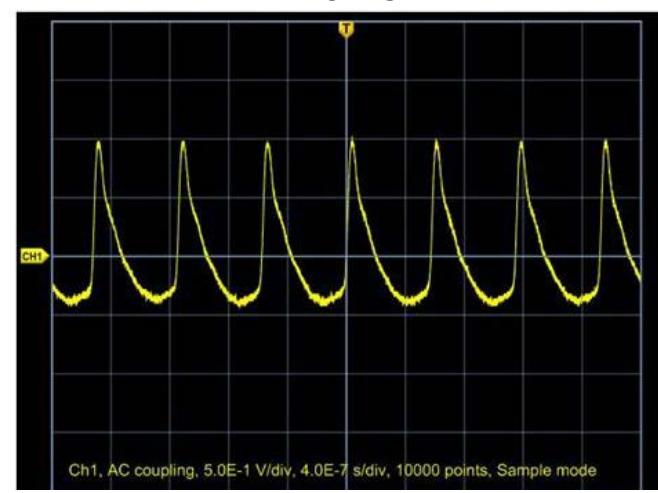
HEXANO



HEPTANO

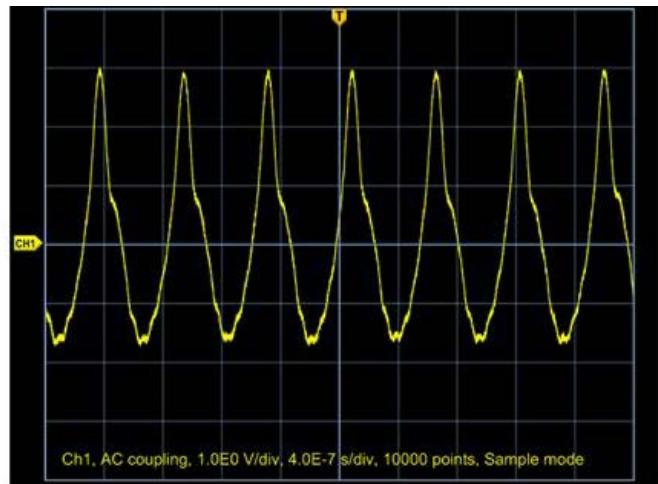


DECANO

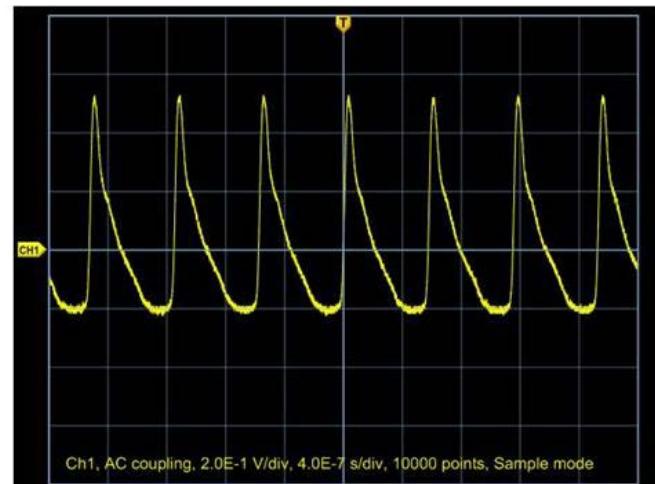


V=50 V; Z= 5 mm

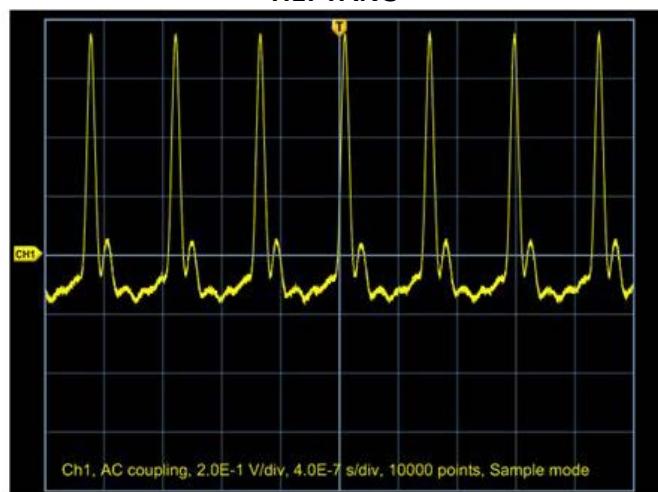
AGUA



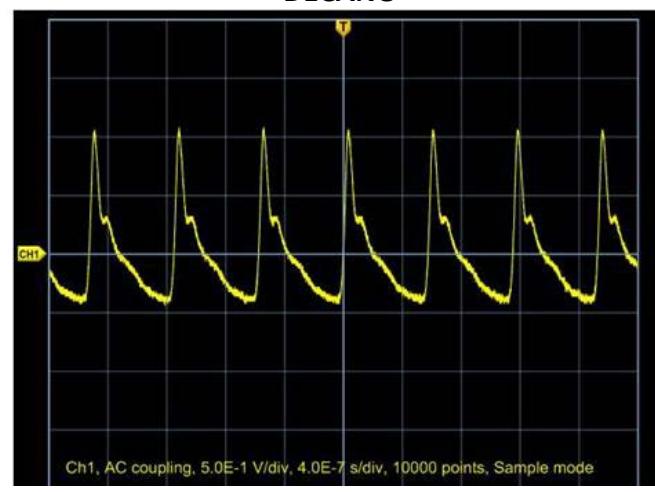
HEXANO



HEPTANO

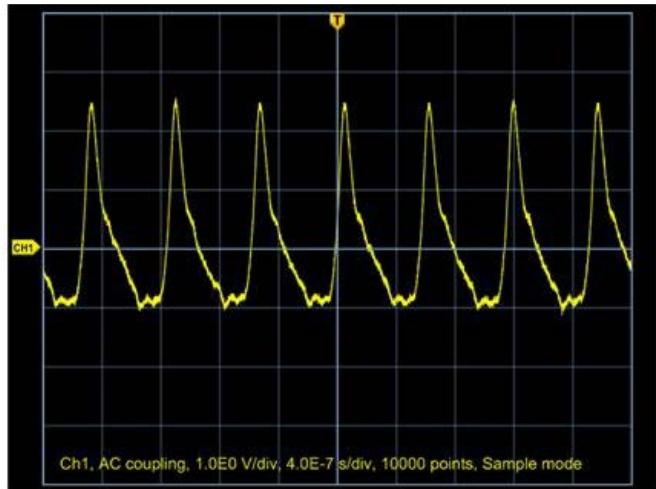


DECANO

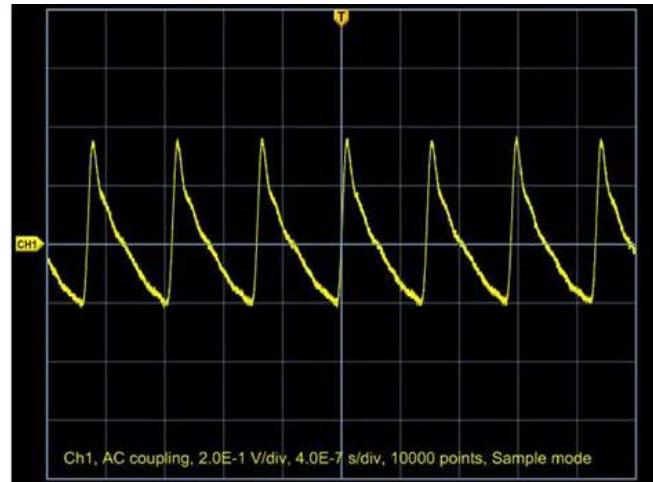


V=50 V; Z= 10 mm

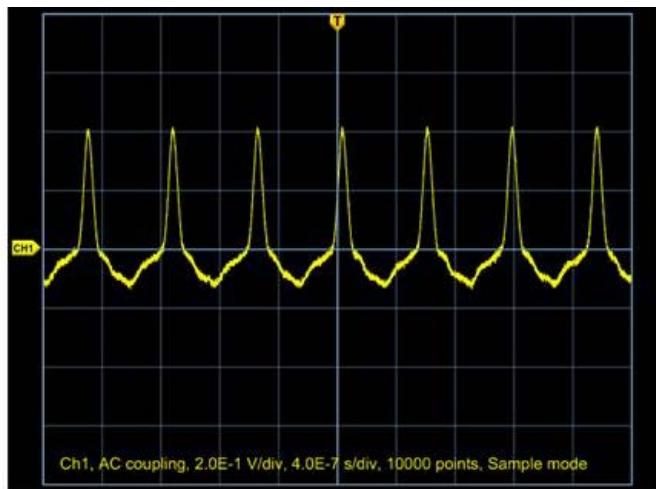
AGUA



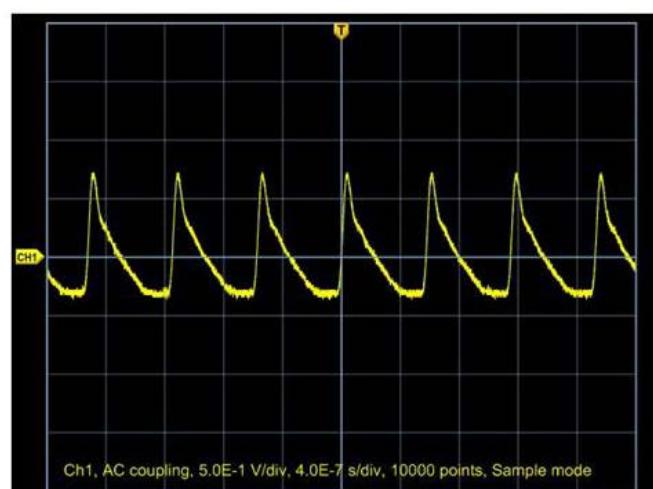
HEXANO



HEPTANO

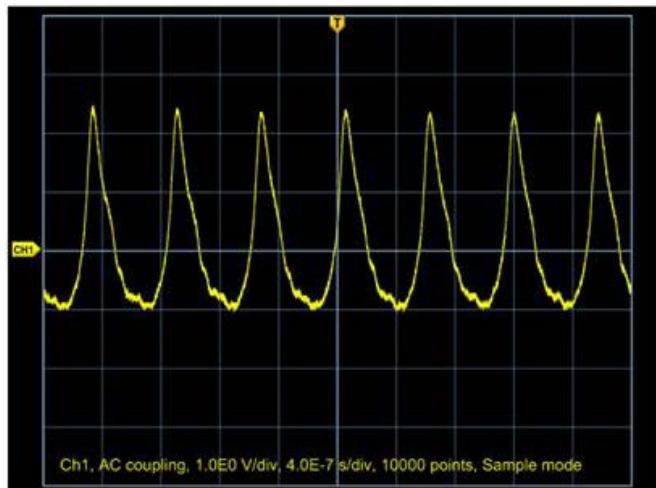


DECANO

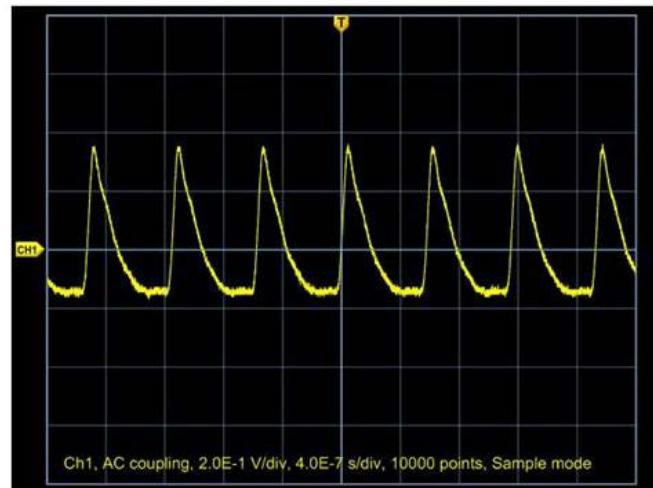


V=50 V; Z= 15 mm

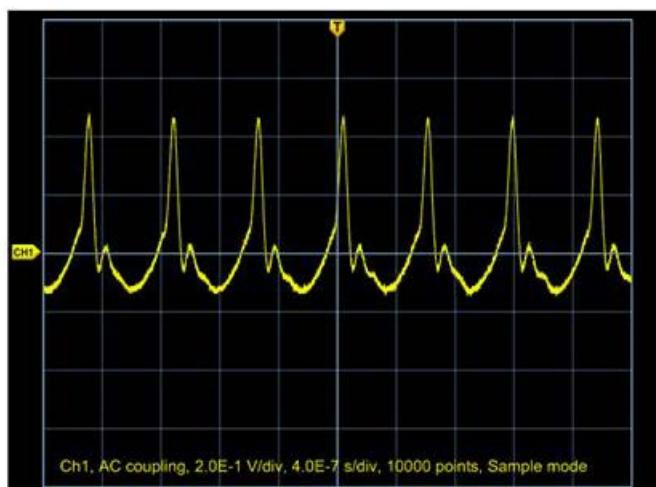
AGUA



HEXANO



HEPTANO



DECANO

