

# Los Ultrasonidos: sus riesgos y normas de prevención (\*)



MIGUEL ÁNGEL BARCELÓ RADO  
*Licenciado en Ciencias Químicas*

JERONI MOREY SALVA  
*Doctor en Ciencias Químicas.  
Profesor titular de la Universidad  
de Palma de Mallorca*

## SUMARIO

*Con el creciente uso de sistemas generadores de ultrasonidos en los laboratorios de química, se hace prioritario alertar de los posibles riesgos que comporta el manejo de dichos sistemas. En este artículo se recomiendan ciertas pautas de comportamiento para evitar peligros potenciales. Y se describen los riesgos más importantes que se encuentra el operario al utilizar un sistema por ultrasonido. Finalmente se hace especial referencia a una serie de recomendaciones para garantizar la utilización segura de dichos generadores.*

**Palabras clave:** Ultrasonidos, laboratorios, exposición, riesgos, medidas de seguridad.

## INTRODUCCIÓN

Aunque el principio del uso de ultrasonidos por el hombre se puede establecer con el descubrimiento de los efectos de los materiales piezoeléctricos por Curie en 1880 y de las ondas ultrasónicas por Galton en 1893, su primera aplicación comercial no aparece hasta 1917. En dicho año, Langevin inventó el sonar.

Precisamente es en el siglo xx donde nos encontramos con el desarrollo de numerosas técnicas fundamentadas en los ultrasonidos. Este impulso coincide con la mayor disponibilidad

\* Este artículo es el resumen del trabajo presentado a la Fundación MAPFRE como resultado final de la investigación desarrollada durante el año 2001 a raíz de una beca concedida por la Fundación en la Convocatoria 2000-2001.

de materiales piezoeléctricos y electrónicos que hacen posible la fabricación de emisores capaces de generar ultrasonidos de alta amplitud. Dichas ondas son capaces de propagarse a largas distancias en agua, aceite y en otros líquidos. Numerosos experimentos de laboratorio demuestran que los ultrasonidos son capaces de producir una asombrosa cantidad de efectos químicos, físicos y biológicos.

Debido a las innovaciones tecnológicas, el uso de los ultrasonidos ha aumentado considerablemente. Así, nos encontramos numerosas aplicaciones en campos tan dispares como la industria química, la navegación, la medicina, la física y también en usos de índole militar.

## EL SONIDO Y LOS ULTRASONIDOS

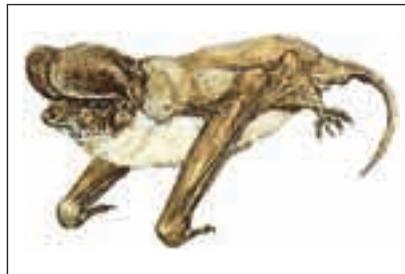
Tras la vista, el oído es el sentido que más información procedente del exterior proporciona al cerebro. Cuando escuchamos algo, las ondas de sonido atmosféricas se introducen a través del canal auditivo y golpean contra el tímpano, provocando que éste vibre. Esta vibración pasa a través de tres minúsculos huesos situados en el oído medio, que vibran a su vez. Acto seguido, este movimiento hace oscilar unos pelos microscópicos en las células de la membrana coclear, responsables de generar una señal nerviosa que se transmite al cerebro (Fig. 1).

El oído humano es capaz de detectar sonidos comprendidos en un margen de frecuencias entre 20 y 20.000 Hz. Los sonidos emitidos en un rango superior a los 20.000 Hz y que no son detectados por el oído humano son conocidos con el nombre de ultrasonidos.

A diferencia del ser humano, ciertos animales –ballenas, delfines, perros–

son capaces de emitir y/o captar ultrasonidos. Un claro ejemplo lo tenemos en los murciélagos, que utilizan los ultrasonidos para ubicar objetos y guiarse en el espacio. Estos animales emiten una señal de ultrasonidos que es propagada por el aire hasta que choca con un objeto. La onda rebota en dicho objeto y vuelve hacia el oído del murciélago. En función del tiempo que tarda la onda en retornar al murciélago, éste es capaz de calcular exactamente la distancia a dicho objeto (Fig. 2).

**FIGURA 2. Los murciélagos utilizan los ultrasonidos para guiarse.**



Los ultrasonidos llevan aparejados una serie de armónicos de frecuencias comprendidas dentro del rango de audición. Es por ello que, al estudiar los efectos sobre la salud producidos por los ultrasonidos, también se debe incluir este conjunto de sonidos agudos y muy agudos (generalmente a partir de una frecuencia superior a 10 kHz).

Los ultrasonidos presentan fundamentalmente las mismas propiedades físicas que las ondas sonoras, pero en base a su mayor frecuencia y, por tanto, menor longitud de onda se difractan en menor medida que las ondas sonoras audibles. Se transmiten a través de sustancias que manifiestan

propiedades elásticas, ya sean sólidas, líquidas o gaseosas. Son más fácilmente reflejadas por superficies planas y mejor absorbidas por el aire; en consecuencia, no se transmiten a larga distancia.

La velocidad de propagación de los ultrasonidos en el aire a la temperatura ambiental es igual a la de los sonidos audibles (343 m/s), mientras que la velocidad de propagación en un medio líquido, como el agua, es mayor, pudiéndose alcanzar un valor aproximado de 1500 m/s.

Las fuentes de generación de ultrasonidos se clasifican de forma apropiada en función de su frecuencia, así se pueden establecer tres grandes grupos:

- Baja frecuencia (comprendidos entre 10 y 100 kHz). Utilizados en la limpieza, perforación, soldaduras, procesos químicos, etc.
- Media frecuencia (su rango abarca de 100 kHz a 10 MHz). Para usos terapéuticos.
- Alta frecuencia (desde 1 a 10 MHz). Sus aplicaciones principales se encuentran en medicina y aparatos de control no destructivos (por ejemplo, medida del flujo de líquidos o gases en tuberías).

## EL FENÓMENO DE CAVITACIÓN.

Al propagarse una onda acústica a través de un líquido, en su seno se crean zonas de compresión y de rarefacción, debido a que el movimiento vibratorio producido por la fuente emisora es comunicado a las moléculas del medio, cada una de las cuales transmite este movimiento a las partículas adyacentes antes de retornar, aproximadamente, a su posición inicial. Este continuo movimiento de partículas genera en ciertas zonas del líquido cambios en la presión (donde se da un cambio de presión positivo se denomina zona de compresión, y al contrario, donde se da un cambio de presión negativo se denomina zona de rarefacción). Si una presión negativa  $P_c$  (calculada como  $P_c = P_{acústica} - P_{hidrostática}$ ) es lo suficientemente grande como para que la distancia entre moléculas exceda a la distancia molecular crítica, necesaria para mantener intacto el líquido, en el interior de éste se generaran vacíos; esto es, se formarán burbujas de cavitación (Fig. 3). Expresado de otro modo, se producen burbujas de cavitación en el seno de un líquido cuando la  $P_c$  iguala a la presión de vapor ( $P_v$ ) del líquido. Estas burbujas, llenas con vapor del disolvente en estado gas, son

**FIGURA 1. El oído humano no es capaz de detectar los ultrasonidos.**



inestables y desaparecen en un instante, aproximadamente a los  $10^{-6}$  s, debido al semiperíodo de compresión. El colapso que sufren las burbujas, causado por el período de compresión de las ondas ultrasónicas, forma poderosas ondas de choque, llamadas microcorrientes. Sin embargo, la consecuencia más importante es la liberación de energía en la zona de colapso de la burbuja, donde se alcanzan temperaturas máximas del orden de varios miles de grados K y presiones máximas del orden de los kilobares durante períodos de tiempo muy cortos. Debido a la gran magnitud de estos valores, la interpretación de los fenómenos sonoquímicos se conoce como la Teoría del Punto Caliente.

ción en líquidos, la dispersión del mercurio, la explosión del trioduro de nitrógeno, la hidrólisis del dimetilsulfato, etc.

Así pues, en el laboratorio, los ultrasonidos se utilizan básicamente en dos procesos :

- Sonoquímica.
- Limpieza de material de vidrio.

### SONOQUÍMICA

La aplicación de los ultrasonidos en química se conoce con el nombre de sonoquímica. Así, en ciertos procesos químicos los ultrasonidos son utilizados para acelerar algunas reacciones químicas, ya sea en estado sólido co-

mediata vecindad, cuando ésta colapsa y libera gran cantidad de energía en forma de calor y presión.

El fenómeno de cavitación, y, por consiguiente, la eficacia de la reacción sonoquímica, dependerá principalmente de cuatro factores:

#### La frecuencia de la onda

En principio, cualquier frecuencia suministrada capaz de inducir cavitación puede ser químicamente activa. Ahora bien, un incremento en la frecuencia de la onda disminuye la producción de cavitación. En consecuencia, a mayor frecuencia hay que suministrar una mayor potencia.

#### El disolvente

Al ser el disolvente el portador de la energía, sus propiedades físicas van a jugar un papel muy importante. Disolventes con una presión de vapor elevada,  $P_v$ , producen efectos cavitacionales menores. En la misma dirección, en líquidos muy viscosos será difícil que se produzca una cavitación óptima debido a las altas fuerzas de cohesión entre moléculas del disolvente. Por otro lado, el rendimiento de la cavitación puede ser aumentado si el líquido es desgasificado o ultrafiltrado, ya que la presencia de núcleos de gas (aire) o impurezas inducen la formación de burbujas estables.

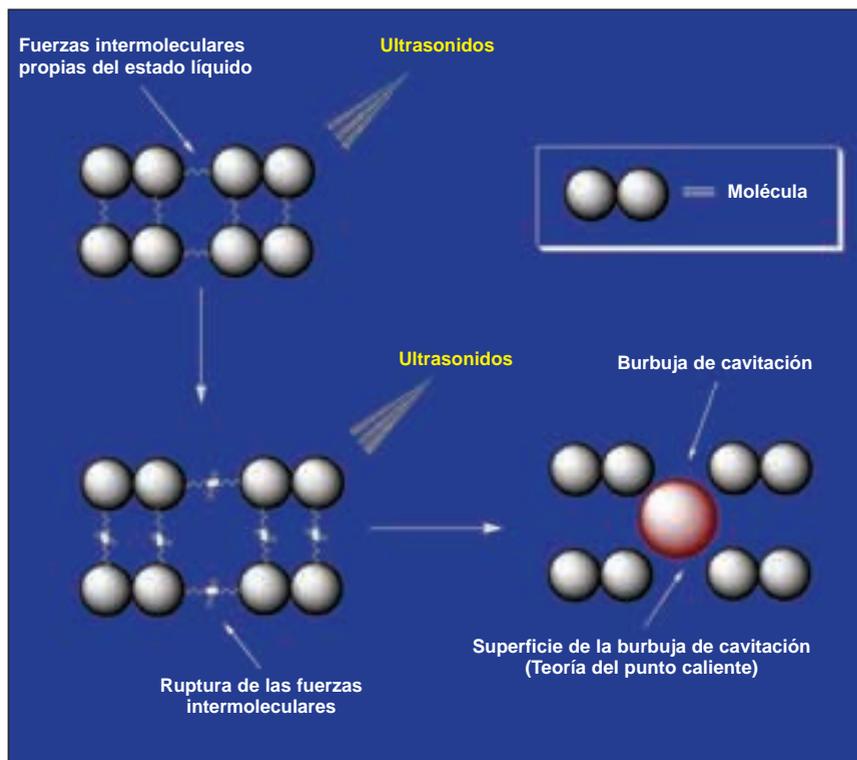
#### La temperatura

Al aumentar la temperatura de la reacción, la  $P_v$  del disolvente aumenta y el efecto cavitacional disminuye. Por ello, para acelerar el proceso sonoquímico es aconsejable mantener una temperatura baja.

#### Emplazamiento del reactor respecto al generador de ultrasonidos

El reparto de la energía en un baño de ultrasonidos es desigual. Por el contrario, en generadores de ultrasonidos del tipo de sonda rompedora y de silbido, el reparto de energía es uniforme. Por este motivo, en un baño de ultrasonidos se hace muy difícil cuantificar exactamente la cantidad de potencia suministrada al reactor, ya que ésta depende de las dimensiones y forma del baño, y en sobremana, del grosor y posición del reactor dentro del baño de ultrasonidos.

FIGURA 3. Esquema representativo del fenómeno de cavitación.



### LA UTILIZACIÓN DE ULTRASONIDOS EN LOS LABORATORIOS DE QUÍMICA

La aplicación de ultrasonidos en química de forma cotidiana se remonta a los años veinte, con las primeras experiencias de W. Richards y A. Loomis sobre los efectos de ondas sónicas de alta frecuencia en sólidos y líquidos. Dichos estudios demostraron que los ultrasonidos aceleraban un amplio rango de transformaciones, físicas y químicas, tales como la desgasificación y el descenso del punto de ebullición

mo en disolución. Ejemplos de transformaciones químicas, como polimerizaciones y alquilaciones, de gran interés industrial, son aceleradas por la irradiación ultrasónica. El punto clave se encuentra, otra vez, en el fenómeno de cavitación.

Como ya se ha explicado, el fenómeno de cavitación se produce cuando, debido a la propagación de una onda sónica de alta frecuencia, se crean burbujas inestables en el seno de un líquido. Las reacciones sonoquímicas tienen lugar en la cavidad de la burbuja de cavitación, o en su in-

## LIMPIEZA DEL MATERIAL DE VIDRIO

Es a partir de los años sesenta cuando se empezaron a utilizar los baños de ultrasonidos para la limpieza de objetos metálicos –en metalurgia, bisutería, joyería– y de vidrio. Los ultrasonidos provocan dos efectos sinérgicos: desprender la suciedad del material de vidrio y mejorar la dispersión de disolventes orgánicos en los detergentes acuosos, logrando así una mayor limpieza.

El proceso de limpieza del material de vidrio se consigue, por una parte, debido al colapso de las burbujas de cavitación durante el período de compresión de las ondas ultrasónicas, y por otra, a la formación de ondas de choque que favorecen el proceso de limpieza, dispersión y erosión de sustancias sólidas.

## EL BAÑO DE ULTRASONIDOS

Como ya se ha mencionado, en un laboratorio de química podemos encontrar alguno de estos tres tipos de generadores de ultrasonidos (Fig. 4): el generador de silbido, la sonda rompedora y el baño de ultrasonidos.

**FIGURA 4. Generador de ultrasonidos.**



De estos tres generadores, el más utilizado es el baño de ultrasonidos, al ser el más económico y sencillo de manejo (Fig. 5).

En la actualidad, la oferta comercial es amplia; así existen modelos de baños de ultrasonidos complejos, de diferente capacidad y con posibilidad de regulación de temperatura y de tiempo, y modelos más sencillos, de menor capacidad y sin posibilidad de control de temperatura.

El mecanismo generador de ultrasonidos en un baño de este tipo con-

**FIGURA 5. Baño de ultrasonidos.**



siste en un disco cilíndrico metálico con una lámina de cerámica piezoeléctrica en su interior, la cual vibra gracias a un transformador de alta frecuencia. La longitud de la onda sónica emitida va en función del grosor del disco emisor, y, por tanto, es fija e invariable (Fig. 6).

Al aplicar un campo eléctrico a las superficies del disco de material piezoeléctrico, tal y como se indica en la figura 6, el disco vibra debido al efecto piezoeléctrico. Dicho efecto es propio de ciertos materiales, que son capaces de convertir la energía eléctrica en energía mecánica, y viceversa. Las vibraciones producidas por el disco se traducen en la emisión de ultrasonidos, que son transmitidas al disolvente del baño, que generalmente es agua.

## RIESGOS DEBIDOS A LA UTILIZACIÓN DE ULTRASONIDOS EN EL LABORATORIO

Los riesgos debidos a la utilización de sistemas generadores de ultrasonidos se pueden dividir en tres tipos:

- Riesgos debidos a la exposición por contacto directo.
- Riesgos debidos a la exposición indirecta por vía aérea.
- Riesgos debidos a las operaciones realizadas con ultrasonidos en el laboratorio.

## RIESGOS DEBIDOS A UNA EXPOSICIÓN A ULTRASONIDOS POR CONTACTO DIRECTO

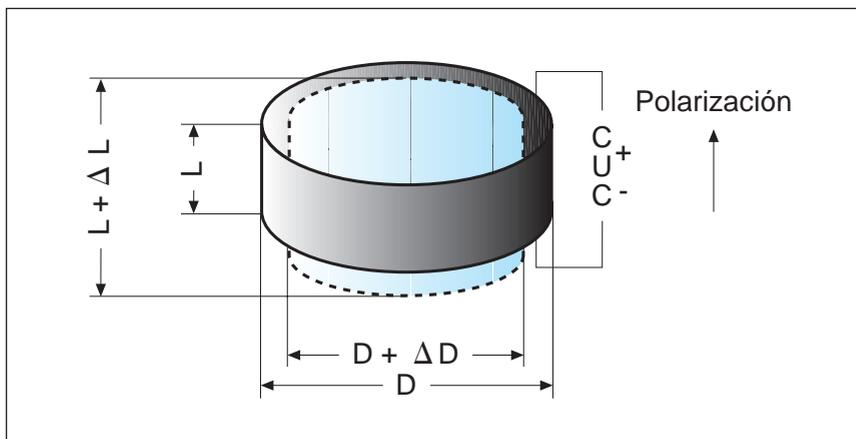
Este tipo de exposición se manifiesta principalmente en las manos. Es debido a un contacto directo entre el transductor –dispositivo que transforma el efecto de una causa física, como la presión, la temperatura, la dilatación, etc., en otro tipo de señal, normalmente eléctrica, y viceversa– y el operario, pudiendo mediar entre ellos un sólido o un líquido. En este tipo de exposición se transmite la casi totalidad de energía de la onda al tejido expuesto. Causando daño por calentamiento de la piel, e incluso del hueso. A tiempos más largos provoca daños celulares, así como la destrucción de las propias células por el fenómeno de cavitación.

En el organismo, este tipo de sobreexposición directa se manifiesta como: alteraciones funcionales del sistema nervioso, dolores de cabeza, vértigo, fatiga, modificaciones del reflejo y periféricas.

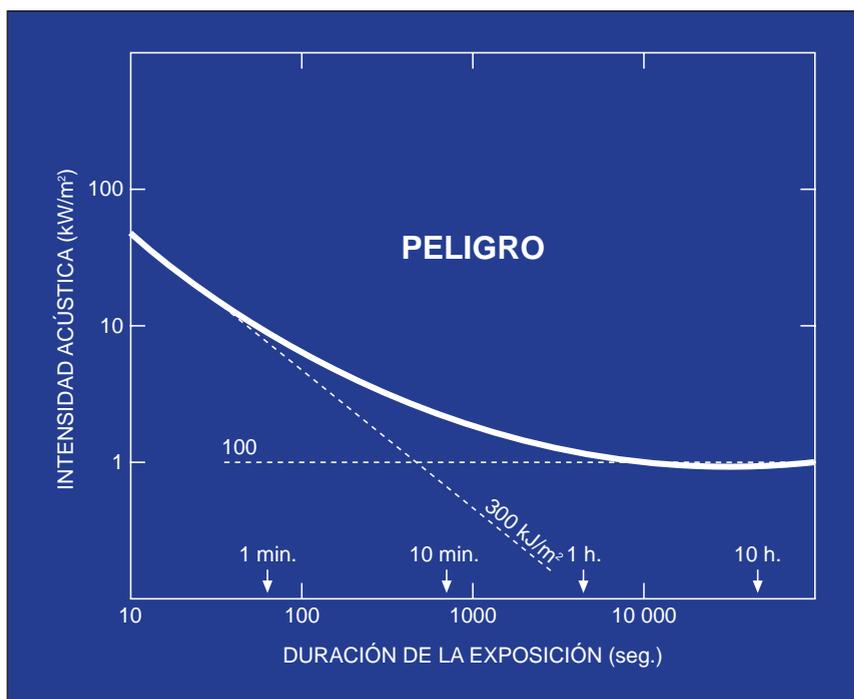
Los límites de exposición por contacto se muestran en la figura 7. Por debajo de un  $\text{kW/m}^2$  no se aprecian efectos biológicos, independientemente del tiempo de exposición. Por el contrario, se considera peligroso y se deben evitar siempre las exposiciones que superen intensidades mayores de  $100 \text{ kW/m}^2$  (Fig. 7).

Los generadores de ultrasonidos utilizados en el laboratorio emiten on-

**FIGURA 6. Elongación y contracción de un disco de material piezoeléctrico cuando se le aplica un voltaje.**



**FIGURA 7. Límites de exposición por contacto propuestos por Nyborg.**



das de baja frecuencia (20-50 kHz) y de intensidades comprendidas en el rango de 10-60 kW/m<sup>2</sup>. Por tanto, se puede asumir la presunción de peligro, por contacto directo, a los pocos minutos de ser iniciada la radiación ultrasónica. De hecho, si introdujéramos un dedo en un baño de ultrasonidos en funcionamiento, a los pocos segundos percibiríamos un dolor intenso, probablemente debido al recalentamiento del hueso.

#### **RIESGOS DEBIDOS A UNA EXPOSICIÓN INDIRECTA A ULTRASONIDOS POR VÍA AÉREA**

En este tipo de exposición la onda ultrasónica viaja a través del aire, incidiendo sobre el oído del operario, pudiendo causar así una pérdida de oído y una serie de efectos subjetivos sobre el sistema nervioso central. La energía transmitida al operario en este caso se ve sensiblemente reducida en varios órdenes de magnitud. En consecuencia, en las condiciones habituales de trabajo en el laboratorio o en la industria la radiación ultrasónica indirecta puede considerarse inofensiva. Si bien es cierto que pueden darse ciertas molestias causadas por la componente sonora asociada a la radiación ultrasónica y que dependen de la susceptibilidad individual de la persona expuesta. Entre dichos síntomas se encuentran: náuseas, dolor de cabeza, mareos y fatiga.

Un estudio detallado, realizado por Acton y Carson, reveló que dichos efectos subjetivos debidos a la componente sonora no se manifestaban si el límite

*Las reacciones sonoquímicas tienen lugar en la cavidad de la burbuja de cavitación, o en su inmediata vecindad, cuando ésta colapsa y libera gran cantidad de energía en forma de calor y presión.*

de presión (SPL) era menor de 75 dB para centros de banda de frecuencias de 1/3 de octava comprendidos entre 16 y 20 kHz, y menor de 110 dB para centros de banda iguales o por encima de 20 kHz. Acton sugirió dicho criterio como límite de exposición. En 1975, Acton revisó dicho criterio, incluyendo el límite de 75 dB para centros de banda de frecuencia de 1/3 de octava iguales a 20 kHz.

Resumiendo: la exposición a la radiación ultrasónica por vía aérea, cuando ésta es lo suficientemente intensa, parece tener como resultado la aparición de síntomas, como náuseas, dolor de cabeza, mareos y fatiga. Dichos síntomas y su grado de severidad parecen variar, dependiendo del verdadero espectro de la radiación ultrasónica y de la susceptibilidad individual de las personas expuestas.

En la figura 8 se recogen los efectos fisiológicos producidos por los ultrasonidos sobre el ser humano y animales de laboratorio por exposición aérea a determinadas frecuencias. (Fig. 8).

#### **RIESGOS DEBIDO A LAS OPERACIONES REALIZADAS CON ULTRASONIDOS EN EL LABORATORIO**

Como ya hemos mencionado, el uso de ultrasonidos en el laboratorio se reduce básicamente a dos actividades: la sonoquímica y la limpieza de material de laboratorio.

Por lo que se refiere a la utilización de ultrasonidos para la mejora de procesos químicos –sonoquímica–, además de los riesgos provenientes del empleo de ultrasonidos, cabe mencionar los riesgos propios de la reacción que se esté desarrollando en el reactor. Algunos de estos riesgos a comentar son:

##### **Utilización de productos que reaccionan violentamente con el agua o el aire**

Ciertas sustancias –sustancias pirofóricas, compuestos organometálicos, metales alcalinos, bases organometálicas, etc.– sólo son estables en un medio seco y en una atmósfera inerte. Así pues, la ruptura accidental del reactor en el seno del baño de ultrasonidos puede provocar un incendio, y en el peor de los casos, una explosión.

##### **Utilización de productos de alto riesgo para la salud humana**

La ruptura accidental del reactor puede provocar en este caso la for-

mación de gases tóxicos (HCN, CO), irritantes (HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, Br<sub>2</sub>) o sofocantes (fosgeno, difosgeno, cloropicrina).

### Aumento descontrolado de la temperatura de la reacción

Debido a un calentamiento excesivo del baño de ultrasonidos generado por el efecto de cavitación, puede generar graves problemas. Como la evaporación del disolvente de la reacción, o bien, la proyección del contenido del reactor al exterior.

En el proceso de limpieza, además de los riesgos anteriormente ya citados, son específicos de esta actividad:

- La dilución, en el baño de ultrasonidos, de sustancias de alto riesgo para la salud humana contenidas en el material de vidrio sucio. Estas sustancias pueden clasificarse como sustancias tóxicas, muy tóxicas, nocivas, sensibilizantes, irritantes, corrosivas, etc.
- Riesgo de cortes en la piel debidos a la ruptura accidental del material de vidrio en el baño de ultrasonidos.

Además de todos estos riesgos vinculados a la utilización de ultrasonidos en procesos sonoquímicos y de limpieza, existe el riesgo intrínseco de formación de vapores o aerosoles nocivos. Estos aerosoles se forman a partir del agua del baño de ultrasonidos, junto con minúsculas partículas de suciedad, sólidas o líquidas, arrastradas durante el proceso de cavitación

*Los ultrasonidos provocan dos efectos sinérgicos: desprender la suciedad del material de vidrio y mejorar la dispersión de disolventes orgánicos en los detergentes acuosos, logrando así una mayor limpieza.*

ción y que al ser inhaladas afectan a la salud del operario.

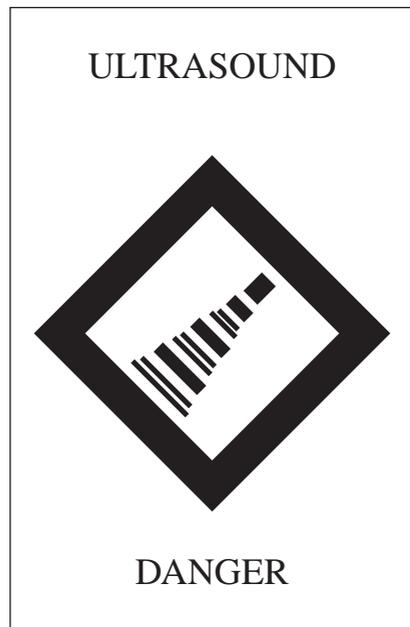
### Prevención de riesgos en el manejo de generadores de ultrasonidos

A la hora de utilizar un generador de ultrasonidos se deberán tomar ciertas

medidas de protección que garanticen la seguridad de los trabajadores.

Como primera medida de prevención se debe señalar convenientemente el área donde se encuentra el generador de ultrasonidos. Para ello se utilizará el símbolo de Peligro por exposición a ultrasonidos. Dicho símbolo se muestra en la figura 9.

**FIGURA 9. Símbolo de Peligro por exposición a ultrasonidos.**



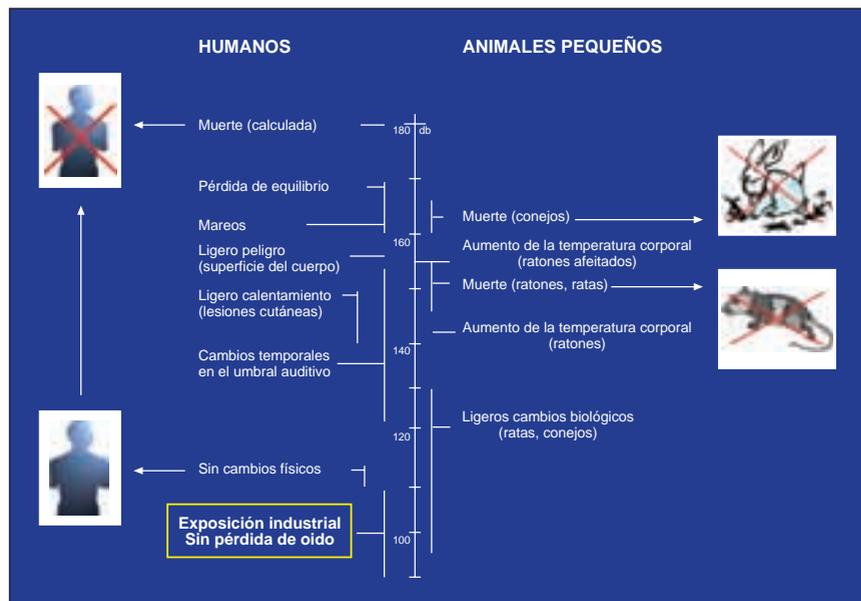
Junto con este símbolo se situarán las medidas de protección a tomar mientras el sistema generador de ultrasonidos esté en funcionamiento.

Se limitará la ocupación del laboratorio, permitiendo la entrada únicamente al personal cualificado. Dicho personal será informado de los efectos perjudiciales de la exposición a ultrasonidos y de las medidas protectoras necesarias.

Entre dichas medidas se encuentra la prohibición de introducir las manos en el baño de ultrasonidos cuando éste se halle en funcionamiento. Además, siempre utilizaremos guantes y gafas de protección a la hora de introducir o retirar cualquier objeto del baño, siempre que éste se encuentre apagado.

Si el baño de ultrasonidos se utiliza con frecuencia y durante largos períodos de tiempo deberá ser aislado y se utilizarán protecciones para los oídos en su área de influencia. Una forma sencilla y eficaz consiste en ubicar el baño de ultrasonidos en una campana de humos. Eliminando también la contaminación por gases, vapores o aerosoles.

**FIGURA 8. Efectos fisiológicos producidos por la exposición a ultrasonidos por vía aérea.**





Por lo que concierne a los procesos de limpieza, el material de vidrio sucio se someterá a un prelavado antes de su introducción en el baño de ultrasonidos. El agua del baño deberá estar limpia. Evitar lavar con agua sucia, sustituyéndola siempre que sea necesario; así minimizaremos en gran medida la formación de aerosoles perjudiciales.

Y por último, siempre que se utilicen generadores de ultrasonidos en procesos sonoquímicos se debe asegurar el perfecto estado de conservación del material de vidrio utilizado, desechando recipientes con pequeñas fracturas o golpes, y asegurando correctamente el aislamiento del sistema, con el fin de evitar el contacto con el agua exterior del baño. Ante la posibilidad de desprendimiento de gases o vapores, éstos se deben recoger o neutralizar debidamente.

## CONCLUSIONES

Los generadores de ultrasonidos se han convertido en aparatos de uso cotidiano en los laboratorios de química. Dichos generadores se utilizan fundamentalmente para acelerar ciertas reacciones y para la limpieza del material de laboratorio. Debido a su fácil manejo y accesibilidad, podríamos deducir que dichos aparatos no son

*La exposición a la radiación ultrasónica por vía aérea, cuando ésta es lo suficientemente intensa, parece tener como resultado la aparición de síntomas como náuseas, dolor de cabeza, mareos y fatiga. Dichos síntomas y su grado de severidad parecen variar, dependiendo del verdadero espectro de la radiación ultrasónica y de la susceptibilidad individual de las personas expuestas.*

peligrosos, descuidando así las medidas de seguridad. Precisamente éste puede ser su principal riesgo.

No debemos olvidar que, aunque el baño de ultrasonidos no es uno de los aparatos de mayor peligro, su uso entraña ciertos riesgos que debemos conocer y evitar.

## BIBLIOGRAFÍA

- 1.- Norma técnica de Prevención, núm. 205, sobre «Ultrasonidos: exposición laboral» (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el trabajo).
- 2.- A. PICOT y PH. GRENOUILLET (1995): *Safety in the chemistry and biochemistry laboratory*, Ed. Wiley-VCH.
- 3.- *Guidelines for the safe use of a ultrasonidos; la ultrasound: Part II – Industrial and Commercial Applications*, Safety Code 24. Minister of Supply and Services Canada, 1991.
- 4.- W. L. NYBORG (2001): «Biological effects of ultrasound: Development of safety guidelines. Part II: General review». *Ultrasound in Med. & Biol.*, Vol. 27, Nº. 3, pp. 301-333.
- 5.- PH. BOUDJOUK (1986): «Synthesis with Ultrasonic Waves», *J. of Chemical Education*, vol. 63, Nº 5, pp. 427-429.
- 6.- J. P. LORIMER y T. J. MASON (1987): «Sonochemistry. Part I – The physical aspects», *Chem. Soc. Rev.*, vol. 16, pp. 239-274.
- 7.- J. LINDLEY y T. J. MASON (1987): «Sonochemistry. Part II – Synthetic Applications». *Chem. Soc. Rev.*, vol. 16, pp. 275-311.