

# ULTRASONIDOS: RIESGOS PARA LA SALUD EN LA EXPOSICION LABORAL

Isabel Lanchas Alfonso: *Médico especialista en medicina nuclear*  
Javier Maldonado González: *Médico del Trabajo*  
Manuel Gómez Cano: *Ingeniero Industrial*  
C.N.N.T. MADRID - I.N.S.H.T.

## INTRODUCCION

El interés acerca de los posibles riesgos debido a exposición por ultrasonidos se remonta a la época del desarrollo del reactor de propulsión a chorro. El término de «malestar ultrasónico» fue introducido para abarcar una serie de síntomas como son: cefaleas, fatiga excesiva, náuseas, vómitos, y cuando la exposición al ruido es intensa, alteración del sentido del equilibrio y ligeros mareos.

Posteriormente estos síntomas fueron atribuidos a disturbios vestibulares (Dickson y Chadwick, 1951). Davis et al (1949) declaran que no existe evidencia de que los ultrasonidos constituyan un riesgo para la audición, y Parrack (1952) manifiesta que en laboratorio con fuentes de ultrasonidos no existe riesgo de exposición por vía aérea.

El panorama cambió con el desarrollo de los ultrasonidos en aplicaciones industriales. Crawford (1955) manifestó que los trabajadores de laboratorios en el Reino Unido presentaron pérdida de audición en el rango de frecuencias agudas; y una serie de síntomas como: náuseas, vómitos, cefaleas, acúfenos, pérdida de equilibrio y fatiga, que persisten después del cese de la exposición.

Acton, Carson y otros autores (1967) refieren asimismo, cefaleas, náuseas, acúfenos y fatiga en los trabajadores expuestos a ultrasonidos en la producción industrial.

Investigaciones posteriores amplían el campo de estudio a exposición, tanto por contacto como por vía aérea, y se llegó al desarrollo de diferentes criterios de valoración para dichas exposiciones.

## FUNDAMENTOS BIOFISICOS

Los ultrasonidos se definen como un fenómeno de vibración mecánica que se propaga en un rango de frecuencias mayor al límite superior de percepción auditiva del oído humano. El oído humano es capaz de interpretar sonidos o vibraciones mecánicas comprendidas en el rango de frecuencia entre 20 y 20.000 Hz, los sonidos emitidos en un rango superior al citado y que no son perceptibles por el oído humano se conocen como ultrasonidos.

En la práctica a veces no se puede utilizar como límite inferior de generación el de 20 KHZ debido principalmente a dos casusas:

Primera: El límite superior de audición del oído humano varía considerablemente de un individuo a otro. A raíz de la aparición del Audiómetro de Altas Frecuencias diversos autores: Tondford, Domenech, Maldonado, aportan estu-

dios coincidentes en los que se demuestra que el límite de audición máximo para altas frecuencias, disminuye desde los 20 KHz por década de vida. De acuerdo con esto podríamos decir, que a una determinada alta frecuencia habrá individuos que lo perciban como sonido y otros para los que se trate de un ultrasonido.

La segunda causa es que ocasionalmente el término de ultrasonido es usado para designar altas frecuencias en el rango de audición del oído humano.

Los ultrasonidos para su propagación necesitan un medio material: sólido, líquido o gaseoso, no pudiéndose propagar en el vacío.

Los ultrasonidos como movimiento ondulatorio que son; tienen básicamente las mismas propiedades físicas que las ondas sonoras; pero debido a que tienen una mayor frecuencia y por tanto una menor longitud de onda, (aproximadamente 17 mm a 20 KHz), están menos sujetas a la difracción en su recorrido por filos u orificios; así mismo pueden ser reflejados fácilmente por superficies planas y tiene la particularidad de ser absorbidos rápidamente por el aire, por tanto no pueden propagarse a largas distancias aunque estén focalizadas en un haz.

La velocidad de los ultrasonidos en el aire a temperatura ambiente es aproximadamente igual que la del sonido audible 343 m/seg., y en un medio líquido como el agua la velocidad es aproximadamente 1.500 m/seg.

La atenuación de los ultrasonidos al atravesar material sólido es elevada; esta propiedad resulta de gran utilidad en el control y prevención de la exposición industrial mediante las medidas de encerramiento de la fuente.

Un factor importante en cuanto a la exposición humana a ultrasonidos, es la cantidad de energía transferida en una interfase que separa dos medios continuos pero de diferente constitución. Cuando las densidades son distintas generalmente existe un desacople acústico de impedancias produciendo que gran parte de la energía incidente sea reflejada o dispersada en vez de ser transmitida por la interfase.

Por ejemplo, solo el 1% de la energía incidente es transmitida del aire al tejido humano.

El oído es un órgano muy eficaz transfiriendo energía del aire a líquido. La sensación de oír depende de células nerviosas que detectan vibraciones en un medio líquido como en el oído interno. El tejido humano se comporta como un material casi líquido para los ultrasonidos, e interfases de líquido a tejido proporcionan un buen acoplamiento que tiene como resultado una buena transferencia de energía.

## MECANISMOS DE INTERACCION CON TEJIDOS BIOLÓGICOS

Los mecanismos de interacción de los ultrasonidos con el tejido biológico se deben principalmente a efectos de tipo térmico, mecánico y de cavitación.

### Efecto Térmico

Exposiciones a intensidades mayores que 100 mw/cm<sup>2</sup> y de varios seg. de duración producen lesiones, como resultado de la absorción de la energía acústica que van seguidos de elevación de la temperatura. Experimentalmente se ha demostrado que lesiones idénticas pueden producirse directamente por calentamiento de una resistencia implantada cuando pasa una corriente eléctrica. Se debe sobrepasar un umbral de temperatura para que se produzca daño irreversible.

### Efecto de cavitación

Se produce por la existencia de campos ultrasónicos en un líquido que bajo ciertas condiciones puede producir un posible efecto de cavitación en los tejidos. Este fenómeno implica la formación de burbujas de gas que van creciendo hasta alcanzar un tamaño resonante cuando están oscilando con una amplitud creciente hasta que finalmente implotan. Este mecanismo puede ocurrir en tejidos y fluidos biológicos originando un daño mecánico para los constituyentes de las células. No obstante existe en la actualidad serias deficiencias sobre cuales son las condiciones bajo las que se puede producir la cavitación.

### Efecto de tipo mecánico

Cuando un campo ultrasónico incide sobre un objeto con una densidad diferente a la del medio, ejerce sobre el objeto una fuerza de torsión; por ejemplo: Un ultrasonido con una onda de frecuencia de 1 MHz puede producir desplazamiento de tejido entre 18-1800 Å y una aceleración entre 1400-740000 g; como resultado de esta interacción sobre el tejido biológico los ultrasonidos pueden inducir cambio del tipo de: Cizallamiento, torsión y ruptura de las membranas biológicas.

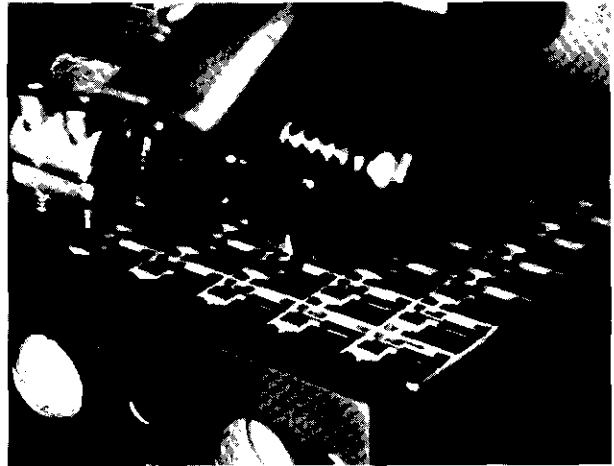
## APLICACIONES INDUSTRIALES

Como consecuencia del desarrollo industrial el hombre ha concebido una serie de sistemas que producen ultrasonidos que cada día van teniendo un mayor campo de aplicación. La generación de ultrasonidos se produce en un rango de frecuencias que van desde 10 KHz a más de 100 MHz y con unas intensidades comprendidas entre 10<sup>-3</sup> y 10<sup>5</sup> w/cm<sup>2</sup>.

En un intento de clasificación de los diferentes usos y aplicaciones industriales de los ultrasonidos, entendemos que los dos criterios que resultan más operativos son en base a su frecuencia y potencia de generación.

— Según su frecuencia se pueden distinguir:

- Aplicaciones de baja frecuencia (va desde 10 KHz a 100 KHz) entre las que se encuentran la mayoría de las máquinas (soldadura, limpieza, etc.)



- Aplicaciones de media frecuencia (abarca desde 100 KHz a 1 MHz) entre estas se encuentran las utilizadas en algunas aplicaciones terapéuticas como hipertermia.

- Aplicaciones de alta frecuencia (1 MHz a 10 MHz y superiores) entre las que se encuentran los aparatos de uso médico (ecografía, velocimetría, etc.) y aparatos de control no destructivo.

— Según su potencia de generación, se pueden clasificar en:

- Aplicaciones de baja potencia: Equipos generalmente utilizados en aplicaciones en medicina, ingeniería, y en general en todos los procesos que se utilizan los ultrasonidos para ensayos de tipo no destructivo.

- Aplicaciones de alta potencia: De uso en procesos de limpieza y desengrase, soldadura, mecanización, extracción, atomización, etc. La mayoría de las aplicaciones industriales de ultrasonidos de alta potencia se dan en el rango de frecuencias de 20-60 KHz, utilizando modo de onda continuo, siendo a su vez los procesos más utilizados los siguientes:

— Limpieza de piezas. Su fundamento estriba en la generación de vibraciones ultrasónicas a través de un transductor que se coloca en una cuba que contiene un líquido (generalmente disolvente). La limpieza de las piezas se obtiene por efecto de cavitación (implosión de microburbujas sobre la superficie de contacto).

— Soldadura de piezas de plástico. Su fundamento estriba en que las piezas a soldar se presionan fuertemente unas contra otras con la ayuda de un sonotrodo que genera vibraciones ultrasónicas intensas que aporta la energía ultrasónica. Se produce entonces un calentamiento local de las piezas, permitiendo la soldadura.

— Aceleración de procesos físico-químicos. Ciertas operaciones mecánicas como pulido, decapado, etc., se pueden realizar fundamentalmente por la utilización de ultrasonidos.

En la *tabla 1* se resume las aplicaciones industriales de ultrasonidos de alta potencia en función de su rango de frecuencias e intensidades usadas.

**TABLA I**  
**APLICACIONES INDUSTRIALES DE ULTRASONIDOS DE ALTA POTENCIA EN FUNCION DE SU RANGO DE FRECUENCIAS E INTENSIDAD USADAS**

Aplicación	Frecuencia (KHZ)	Rango int. en W/cm <sup>2</sup>
Señales submarinas de baja frecuencia	16-20	—
Reacciones en aerosoles y agitación	16-20	—
Aparatos de control ultrasonoro	—	—
Apertura de puerta	25	—
Limpieza y desengrase	20-50	< 6
Soldadura	—	3-32
Soldadura de plásticos	≈ 20	< 1.000
Soldadura de metales	10-60	≈ 10.000
Mecanización	≈ 20	Variable
Extracción	≈ 10	≈ 500
Atomización	20-300	Variable
Medidas de espesores trabajos biológicos experimentales	300-750	—

## EFFECTOS FISIOLÓGICOS: ULTRASONIDOS VIA AEREA

Las máquinas industriales generadoras de ultrasonidos pueden presentar un componente de ruido aleatorio como consecuencia de los subarmónicos de la frecuencia fundamental de emisión.

Este ruido puede llegar a producir desplazamiento transitorio del umbral auditivo, pérdida permanente de la audición, sensación de presión en oídos, acúfenos... y efectos subjetivos como: cefaleas, náuseas, vómitos y fatiga.

Parrack en 1966 informó que los subarmónicos de frecuencia entre 17-37 KHz a niveles de 148-154 dB producen desplazamientos transitorios del umbral auditivo.

Grigor'eva en 1966 no consiguió encontrar ningún cambio fisiológico significativo como resultado de una hora de exposición entre 110-115 dB a 20 KHz.

Batolska et al 1969, señala que muchos de estos efectos pueden ser debidos a contaminantes físicos y otros tóxicos presentes en el ambiente laboral y que no se pueden llegar a conclusiones sin comparar los resultados con un grupo control.

Otros autores concluyen que exposiciones a fuentes de ultrasonidos puras, para niveles menores de 140 dB no producen desplazamiento temporal del umbral auditivo.

Acton revisó los efectos fisiológicos de los ultrasonidos vía aérea en el hombre y animales, cuyos efectos se resumen en la *tabla II*.

El mismo autor considera que en el caso de ultrasonidos por vía aérea el desacoplo acústico que se produce entre aire-tejido trae como resultado una menor transferencia de energía.

Los efectos en los animales es más dramático debido a que el pelo actúa como un sistema de acoplamiento de impedancias; tienen un índice de superficie/masa corporal mayor, y además los ultrasonidos de bajas frecuencias pueden que sean audibles para estos animales, así mismo las exposiciones se efectuaron a niveles de presión sonora elevadas. En consecuencia los efectos observados en la experimentación animal no se pueden extrapolar directamente a la especie humana.

**TABLA II**  
**EFFECTOS FISIOLÓGICOS PRODUCIDOS POR LOS ULTRASONIDOS TRANSMITIDOS POR VIA AEREA.**

Seres humanos	Pequeños animales
Muerte (cálculo) (Parrack 1966)	
180	Muerte (conejos) (Davis. 1954 Romani. 1957)
Pérdida de equilibrio (Allen. 1948)	Aumento de la temperatura del cuerpo (ratones) (Davis 1954).
Aturdimiento (Allen-1948)	
Ligero calentamiento (superficial) (Parrack. 1951)	Muerte (ratones, ratas, cobayas) (Eldridge. 1949. Dickson. 1949)
Ligero recalentamiento (pliegues de la piel) (Parrack. 1962)	
140	Aumento de la temperatura del cuerpo (Danner. 1954)
120	Ligeros cambios biológicos (ratas, conejos) (Acton. 1974)
Ningún cambio fisiológico (Grigoreva. 1966)	
Exposición industrial. Ninguna pérdida de oído (Acton. 1967)	
100	

En el campo de la experimentación con biomoléculas, cultivo celulares, células aisladas y experimentación animal se ha demostrado una serie de efectos biológicos que se pueden resumir en: Alteraciones genéticas, cambios somáticos, efectos teratógenos, alteraciones hematológicas, alteraciones del sistema nervioso central y periférico y



cambios en el comportamiento. Dado que no existe una uniformidad entre los hallazgos experimentales obtenidos entre los diferentes autores y siendo además los modelos biológicos diferentes al organismo humano, no es posible extrapolar al hombre dichos resultados.

La sintomatología que refieren las personas sometidas a exposición de ultrasonidos en el ambiente industrial son del tipo de: cefaleas, náuseas, fatiga y acúfenos, alteraciones en el equilibrio no se han podido atribuir a exposiciones ordinarias a ultrasonidos industriales.

El comienzo de estos efectos no está estrechamente relacionado con la duración de la exposición o la energía del sonido, aunque la tolerancia de las personas en estas condiciones disminuye cuando aumenta el período de exposición, estos efectos normalmente desaparecen cuando cesa la exposición o al poco tiempo después.

Se ha señalado que estos efectos subjetivos son debidos a niveles muy altos de ruido audible para frecuencias elevadas, normalmente producidas en procesos industriales que utilizan ultrasonidos; y especialmente los implicados en la cavitación.

No se conoce ningún estudio que informe que los efectos subjetivos hayan ocurrido sin ningún componente audible del ruido, debido a la dificultad de encontrar fuentes individuales de ultrasonidos que no se acompañen de emisión de sonidos en el rango de frecuencias audibles. Este hecho ha conducido a que en algunos de estos estudios han atribuido erróneamente los efectos de la exposición exclusivamente a las frecuencias de los ultrasonidos.

En relación con la variable sexo (Acton y Carson, 1967), manifiestan que dentro del ámbito laboral esos efectos subjetivos se presentan con mayor frecuencia en mujeres jóvenes, y dichos autores lo atribuyen a las posibles diferencias en el umbral auditivo para altas frecuencias.



### EFFECTOS FISIOLÓGICOS: ULTRASONIDOS POR CONTACTO

La transferencia óptima de energía al cuerpo humano ocurre cuando existe un acoplamiento entre líquido y fuente. En la industria esto ocurre en las cubas de limpieza o al manipular objetos vibratorios con manos mojadas o cubiertas de grasa.

Se puede considerar que cuando hay una exposición por contacto, el daño puede producirse por dos vías:

- Primero: Calentamiento local o daño mecánico que es posible debido al desacoplamiento acústico. La primera interfase ocurre en la piel entre el medio líquido y el tejido; y la segunda entre el tejido y el hueso; debido a que el tejido se comporta como casi-líquido, este segundo desacoplamiento puede que sea más importante. Esto podría conducir a una necrosis o degeneración de la superficie del hueso como consecuencia de la exposición persistente al líquido acoplado a los ultrasonidos.

- Segundo: Por la existencia de campos ultrasónicos en un líquido que bajo ciertas condiciones puede producir un posible efecto de cavitación. Este proceso puede ocurrir en tejidos blandos y fluidos biológicos originando un daño mecánico para los constituyentes de las células.

Un caso de sobreexposición humana (Wittenzellner, 1976) a ultrasonidos acoplado a un líquido, tuvo como resultado daños localizados en la piel, similares a daños de tipo mecánico. La radiología ósea no mostró alteraciones, 25 años después el estudio histológico de la piel y la radiografía ósea no mostraron alteraciones significativas.

Con carácter general, se puede decir que los ultrasonidos pueden manifestar la siguiente sintomatología:

- Alteraciones vasculares periféricas: como consecuencia de turbulaciones vasomotoras se produce palidez y edemas de la porción distal de los dedos, decoloración de uñas, desecación de piel, cianosis de los dedos y alteración de capilares.

- Modificación de reflejos; como puede ser inhibición de reflejos cutáneos y corneales, aumento de reflejos tendinosos.

- Alteraciones funcionales del sistema nervioso: Generalmente de carácter subjetivo e inespecífico.



## CONCLUSIONES

La mayoría de las investigaciones acerca de los efectos biológicos son para los ultrasonidos diagnósticos o de baja potencia. Varios informes concluyen que los ultrasonidos de baja potencia son relativamente inofensivos cuando se aplican con discreción. Fry, F.J. et al (1978). Sikov, M.R. et al (1976). Livett, A.J. et al (1981). Brent, R.L. (1980). Stewart, H.F. et al (1982).

El panorama para ultrasonidos de altas potencias es menos claro. Se ha investigado muy poco acerca de los ultrasonidos por contacto y en el caso de ultrasonidos por vía aérea, la mayoría de las investigaciones fueron realizadas en los años 1940, 50 y 60 cuando las fuentes industriales eran de menor potencia que los ultrasonidos utilizados en la actualidad. Hasta que se obtengan datos acerca de ultrasonidos para altas potencias, se debe asumir que los efectos biológicos de los ultrasonidos de alta frecuencia y alta intensidad pueden ser extrapolados a los de baja frecuencia utilizados en la industria.

Sin embargo, la frecuencia puede estar relacionada con la penetración en los tejidos biológicos y esto puede cambiar los efectos significativamente. El peligro del contacto directo entre fuente y tejidos biológicos es debido a que existe una eficaz transferencia de energía. La mayor preocupación en la industria de cara al contacto directo es manos y brazos; en otros órganos como ojos u oído el riesgo por contacto es improbable.

Los ultrasonidos por vía aérea parecen ser menos peligrosos debido a la baja transferencia de energía por el aire. Sin embargo potentes aparatos de ultrasonidos industriales pueden producir intensidades de ultrasonidos relativamente muy altas a su alrededor, por ejemplo: Un avión despegando desde un porta-aviones puede producir niveles de casi 150 dB en el personal de abordaje, aparatos capaces de generar 160 dB podrán exponer al personal a 10 w/cm<sup>2</sup> siendo esta una intensidad capaz de producir efectos biológicos por contacto. Algunos de los peligros gene-

ralmente asociados con los ultrasonidos vía aérea pueden que sean resultado de frecuencias de subarmónicos audibles.

Como resumen, se puede decir que:

- La literatura documenta un número de efectos como resultado de exposición a ultrasonidos de alta intensidad (vía contacto y aérea), sin embargo, no existen suficientes datos que nos permitan cuantificar el riesgo en los diferentes niveles de exposición; ni tampoco se puede establecer una relación dosis-respuesta.

- La mayoría de los datos obtenidos se basan en estudios «in vitro» y en «experimentación con animales», lo que hace que los resultados, sean difícilmente extrapolables al hombre, especialmente en las condiciones en las que se produce la exposición laboral a ultrasonidos.

- Algunos de los estudios revisados sobre exposición laboral aportan algunos efectos observados que no pueden ser atribuidos exclusivamente a los ultrasonidos, sin tener en cuenta la posibilidad de otros factores asociados: Efectos de tipo psicológico, características del ambiente físico y otros tóxicos presentes en el medio laboral.

Se hace necesario por ello el controlar metodológicamente y a ser posible en el diseño del estudio, la existencia de posibles factores de confusión, que se asocien tanto a la exposición como a los efectos. Por ejemplo: La exposición al ruido en los puestos de trabajo con ultrasonidos.

- Se necesitan un mayor número de estudios epidemiológicos que considerando todas estas variables y controlando los posibles factores de confusión nos permitan concluir acerca de los riesgos potenciales de los ultrasonidos dentro del campo industrial.

## BIBLIOGRAFIA

- W.I. Acton: *Exposure to industrial ultrasound: hazards, appraisal and control*. J. Soc. Occup. Med. (1983) 33, 107-113.
- Christopher Wiernick, and William J. Karoly: *Ultrasound: Biological Effects and Industrial Hygiene Concerns*. Am. Ind. Hyg. Assoc. J 46 (9): 488-496 (1985)
- Gallardo E., Gómez-Gano M., Maldonado J., Ruperez M.J., San Martín D.
- Radiaciones no ionizantes. Prevención de Riesgos*. Ed. I.N.S.H.T. 1989.
- H.D. Stewart, et al.; *compilation of Reported Biological Effects. Data and Ultrasound Exposure Levels*. J. Clin Ultrasound 13: 167-168, March/April 1985.
- Marvin C. Ziskin and Diana B. Petitti: *Epidemiology of human exposure to ultrasound: a critical Review*. Ultrasound in Med. and Biol. vol 14, No 2, pp 91-96. 1988.
- Deborah A. et al. *Effects of steady-state noise upon human hearing sensitivity from 8000 to 20.000 H*. Am. Ind. Hyg. Assoc. J(41). 1980
- Hil C.R. y Haar, G. Hill. C.r. y Haar, G. «Non-ionizing radiation protection, Chapter 6, Ultrasound», Who. Regional Publications, European series núm. 10.1982.
- Raccomandazioni in tema di sorveglianza medica per zischi da radiazioni elettromagnetica non ionizzante a bassa frequenza e da ultrasuoni*. Med. Dei Lavoratori vol. 10, N° 2, pp 197-201. 1983.
- Maldonado J., Chicano N.: *Audiometría de altas frecuencias: Estudio piloto*. Libro de ponencias. Jornadas Nacionales de Acústica, Zaragoza 1989, pp 517-520.

