

Sonido, Ultrasonido y Cavitación



**J. Calderón, A. Marroquin, L. Luviano, V. Maqueda,
E. Marín and A. Calderón**

*Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada del
Instituto Politécnico Nacional. Unidad Legaria. Legaria 694
Colonia Irrigación, 11500 Ciudad de México.*

E-mail: calder62@hotmail.com

(Recibido el 9 de septiembre de 2019, aceptado el 4 de diciembre de 2019)

Resumen

Presentamos en una forma accesible y evitando el lenguaje matemático las principales características del fenómeno de la cavitación. Pretendemos proporcionar los conceptos para entender las condiciones de generación, desarrollo e implosión de las burbujas creadas al paso de una onda sonora de determinada frecuencia e intensidad en un medio acuoso. Se comenta sobre el efecto de la cavitación en la estructura superficial de las hojas de las plantas de lirio acuático expuestas a irradiación sónica o ultrasónica.

Palabras clave: Cavitación, sonido, ultrasonido, onda acústica, lirio acuático.

Abstract

We present in an accessible way and avoiding the mathematical language the main characteristics of the phenomenon of cavitation. We intend to provide the concepts to understand the conditions of generation, development and implosion of the bubbles created by the passage of a sound wave of a certain frequency and intensity in an aqueous medium. The effect of cavitation on the surface structure of the leaves of aquatic lirim plants exposed to sonic or ultrasonic irradiation is discussed.

Keywords: Cavitation, sound, ultrasound, acoustic wave, aquatic lirim.

PACS: 01.30.Os, 01.40.-d, 01.50.-i

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

La acústica es la ciencia del sonido. Consiste en la generación, propagación y detección de energía vibracional en la materia. Conforme los átomos o moléculas de un fluido o sólido se desplazan de sus posiciones de equilibrio, surge una fuerza elástica restauradora, acoplada con la inercia del sistema. Esta fuerza permite que la materia participe en vibraciones oscilatorias y, por tanto, genere y transmita ondas acústicas. En un fluido, las ondas acústicas son ondas longitudinales, el cambio de presión que toma lugar cuando un fluido se expande o se comprime es la única fuerza elástica restauradora capaz de propagar la onda. Las moléculas se desplazan de uno a otro lado en la dirección de propagación de la onda, generando ondas adyacentes de compresión y expansión. El objetivo de este trabajo es presentar en forma sencilla y concisa las principales características del fenómeno de la cavitación que permitan entender su efecto en la estructura superficial de las hojas de las plantas de lirio acuático expuestas a irradiación sónica o ultrasónica. Por lo anterior, se limita la extensión de los temas del sonido y ultrasonido solo a los conceptos indispensables para un mejor entendimiento del fenómeno de la cavitación.

II. SONIDO

Las personas jóvenes interpretan una perturbación vibracional como un sonido si su frecuencia está en la llamada gamma audible, el intervalo de 20 a 20,000 Hz (1 Hz = 1 hertz = 1 ciclo / segundo). Sin embargo, en un sentido más amplio la acústica también incluye las frecuencias ultrasónicas superiores a 20,000 Hz y las frecuencias infrasónicas inferiores a 20 Hz. Está bien documentada la habilidad de un elefante para detectar frecuencias infrasónicas [1]. Los perros tienen una gran habilidad para escuchar ultrasonido. Los murciélagos usan ultrasonido para localizar su comida en un proceso de localización de eco, que es un proceso similar al que usan los mamíferos marinos [2].

Las ondas acústicas que producen la sensación de sonido son parte de una variedad de perturbaciones de presión que se pueden propagar a través de un fluido compresible. La velocidad de propagación de una onda sonora viene dada como la razón entre la densidad del medio ρ y el módulo volumétrico de compresión β [3]:

$$v = \sqrt{\frac{\beta}{\rho}} \quad (1)$$

Para campos de presión esféricamente simétricos, la ecuación de onda se expresa como una ecuación diferencial de segundo orden no homogénea de la presión, p , con respecto a la distancia radial, r , y el tiempo:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}. \quad (2)$$

Por otro lado, la intensidad de la onda de sonido es la razón media a la cual la onda transporta energía por unidad de área a través de una superficie perpendicular a la dirección de propagación, con unidades de watt por metro cuadrado (W/m^2):

$$I = \frac{P}{4\pi r^2}. \quad (3)$$

Las intensidades audibles van desde aproximadamente 10^{-12} a 10 W/m^2 . El uso de escalas logarítmicas comprime la gama de números requeridos para describir este gran intervalo de intensidades. La escala logarítmica de uso más general para describir niveles de sonido es la escala de decibeles (DB). El nivel de intensidad NI de un sonido de intensidad I está definido como:

$$NI = 10 \log\left(\frac{I}{I_{ref}}\right). \quad (4)$$

I_{ref} es la intensidad de referencia, NI viene expresado en decibeles con referencia a I_{ref} y \log representa el logaritmo de base 10. En la referencia 3 se demuestra que la intensidad y la presión efectiva de las ondas planas y esféricas están relacionadas por

$$I = \frac{P_e^2}{\rho_0 c}. \quad (5)$$

Donde P_e es la presión efectiva medida de la onda sonora, ρ_0 la densidad del medio y c la velocidad del sonido. La presión sonora en un medio se simplifica a:

$$NPS = 20 \log\left(\frac{P_e}{P_{ref}}\right). \quad (6)$$

NPS está expresado en dB, P_{ref} es la presión sonora efectiva de la referencia.

A. Ultrasonido

El ultrasonido (US) son ondas de sonido que, debido a su tono muy alto, con frecuencias superiores a 16 kHz, no pueden ser captadas por el oído humano. El estudio y aplicaciones de estas vibraciones reciben el nombre de *Ultrasonica*. Se clasifican en dos grandes grupos:

Ultrasonido de alta frecuencia (0.1-10 MHz). No modifica el medio. Se utiliza para obtener imágenes en medicina, equipos de fisioterapia, diagnosis, cirugía, ecografías, sonar, y análisis no destructivos en materiales.

Ultrasonido potente (16-100 kHz). Produce ondas de alta energía que pueden provocar cambios físicos y químicos en el medio. Se utiliza en limpieza de superficies, soldadura de plásticos y metales, etc.

B. Cavitación

En la propagación de una onda acústica en un medio líquido la presión total en el líquido está dada por:

$$P = P_h \pm P_a,$$

donde P_h representa la presión hidrostática y P_a la Presión acústica. Debido a que una onda acústica consiste en variaciones de presión periódicas existen ciclos de compresión y de expansión en la región donde se propaga la onda. Durante un ciclo de compresión la distancia promedio entre las moléculas disminuye y la presión está dada por:

$$P = P_h + P_a.$$

Durante el ciclo de expansión la distancia promedio entre las moléculas se incrementa y la presión es:

$$P = P_h - P_a.$$

Si la distancia promedio entre las moléculas excede la distancia molecular crítica \otimes necesaria para mantener al líquido inalterado, el líquido se romperá dando lugar a vacíos o cavidades, es decir, se formarán burbujas de cavitación. Al continuar con los ciclos de compresión y expansión las burbujas irán incrementando su tamaño hasta llegar a la implosión, Fig. 1.

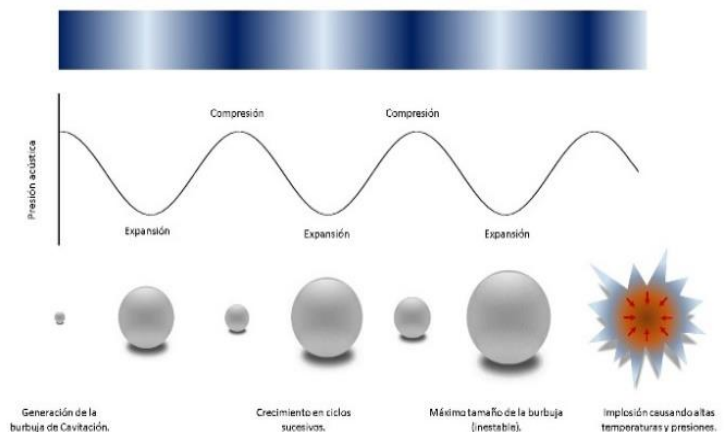


FIGURA 1. Desarrollo e implosión de una burbuja formada por la propagación de una onda acústica en un medio líquido.

El fenómeno de la cavitación (latín *cavus* = cavidad) se refiere a la aparición de micro cavidades de vapor que se nuclean en la superficie de una estructura que contiene una sustancia líquida bajo la influencia de variaciones de presión de determinada frecuencia e intensidad. La aparición de este fenómeno depende de aspectos como la viscosidad del líquido, las propiedades físicas, así como de las propiedades químicas del líquido. La cavitación ocurre en agua, solventes orgánicos, fluidos biológicos, helio líquido, y metales fundidos, así como en muchos otros fluidos. La cavitación se clasifica en los siguientes tipos [4]:

- Por suministro de energía: Cavitación óptica y molecular.
- Por fuerzas de estiramiento: Cavitación acústica e hidráulica.

Desde un punto de vista físico, hay tres formas en las que se pueden crear las burbujas de cavitación, tomando como ejemplo que el líquido es agua:

1. *Burbujas de cavitación de vapor.* Ocurre cuando hay una serie de cambios transitorios en la fase: de líquido a vapor y de vapor a líquido. En este caso, la cavitación está formada por vapor húmedo saturado, el cual está en contacto con el líquido a partir del cual se originó. El crecimiento de la burbuja depende del aumento de la presión parcial del vapor interno.

2. *Burbujas de Cavitación de gas-vapor.* El gas que contiene la burbuja es el resultado de la evaporación del líquido y la difusión de gases que ocurre en el umbral de la transición de fase. Aquí el agua se encuentra sometida a cambios de transición de fases: líquido – vapor húmedo saturado – líquido.

3. *Burbujas de Cavitación gaseosas.* En el líquido existen condiciones favorables para que se libere la concentración de gas y exista difusión en las regiones de cavitación. Esta burbuja se caracteriza principalmente por el llenado debido a los gases liberados por el líquido.

La formación de la burbuja puede ocurrir de dos formas: ya sea por el aumento de la temperatura por encima de la condición de equilibrio para la transición de fase en condiciones isobáricas (Punto de ebullición) o a través de la disminución de la presión por debajo de la misma condición de punto de equilibrio, en condiciones isotérmicas. En la figura 2, se muestra el diagrama de fases del agua. La curva que se inicia en el punto triple T_r y finaliza en el punto C, representa la separación del estado líquido y vapor. Cruzando esta curva se manifiestan transformaciones reversibles bajo condiciones estáticas (o equilibrio) tales como la evaporación o condensación del fluido en el punto de presión p_v , o presión de vapor que está en dependencia con la temperatura (T). Sin embargo, es importante considerar que la curva $p_v(T)$ no es un límite absoluto entre el estado líquido y vapor. Esta curva puede desviarse con un cambio drástico de fase.

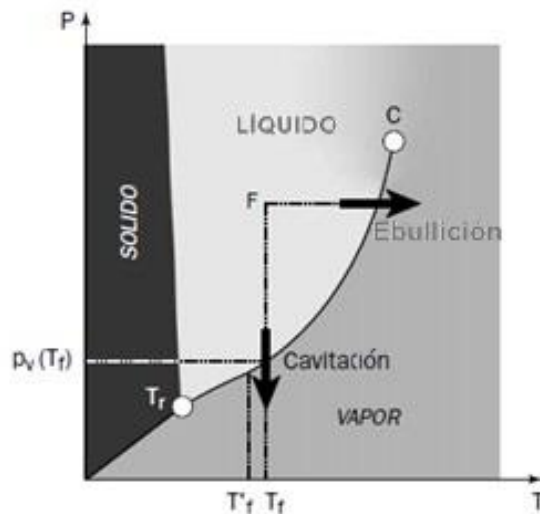


FIGURA 2. Diagrama de fases del agua.

Si las burbujas se localizan 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 (aspiración en vacío), dan lugar a presiones localizadas tan altas que ocasionan daños en la superficie sólida. La cavitación puede dañar casi cualquier material. Esta situación se ilustra en la Fig. 3.

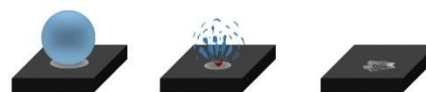


FIGURA 3. Erosión de una superficie cercana o en contacto a una burbuja de cavitación.

La cavitación es un fenómeno similar a la ebullición, excepto que el mecanismo que la dispara no es un cambio en la temperatura, sino un cambio en la presión. Por otro lado, desde un punto de vista teórico, se pueden distinguir varios pasos en los primeros instantes de la cavitación: Nucleación o formación de la burbuja, llenado de este vacío con vapor, saturación del vapor en la burbuja, y finalmente, la implosión. La Fig. 4 ilustra este fenómeno.

Además de la densidad de potencia de la onda que se propaga en el medio líquido, la frecuencia es un parámetro crítico para la generación de cavitación. En la Fig. 5 se muestra una gráfica de la densidad de potencia vs frecuencia en la que se muestran las curvas que separan las regiones donde ocurre la cavitación (por encima de la curva) y donde no ocurre (por debajo de la curva) para dos diferentes líquidos, agua aireada y agua libre de aire [5].

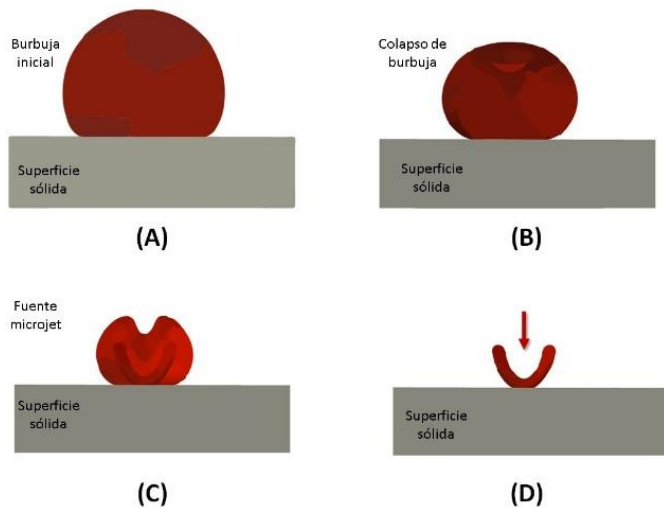


FIGURA 4. Nacimiento, desarrollo e implosión de una burbuja de cavitación sobre una superficie.

Al incrementar la frecuencia, el tiempo para crear la burbuja decrece y se dificulta la cavitación. Se hace necesario incrementar la intensidad del sonido para vencer las fuerzas de cohesión del líquido. Recíprocamente, a menor frecuencia se dispone de un mayor tiempo para crear la burbuja y no se requieren valores elevados de intensidad sonora.

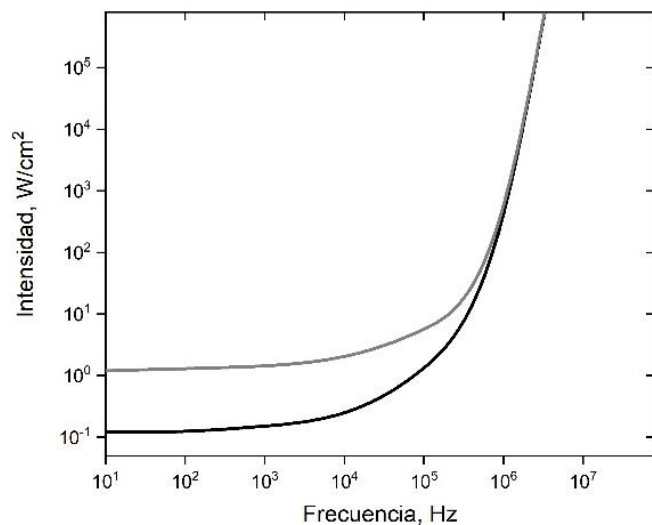


FIGURA 5. Variación del umbral de la intensidad con f ; (a) agua aereada; (b) agua libre de aire.

III. CAVITACIÓN EN PLANTAS ACUÁTICAS

Son pocos los estudios que reportan el estudio del efecto acústico sobre tejido vegetal. Sin embargo, desde 1928 Harvey y Loomis [6] observaron desorden y rupturas de estructuras celulares en la planta acuática *Egeria Densa* sometida a una irradiación sónica de 4Khz. Ellos consideraron su efecto a mecanismos no térmicos ya que la temperatura de la hoja nunca excedió 30 °C durante la

sonificación. En esa época no se conocía el fenómeno de la cavitación. Tiempo después Goldman y Lepeschkin en 1952 [7] evidenciaron la rotación de cloroplastos y piezas de protoplasma, así como el inflado del núcleo a bajas amplitudes y la desintegración a altas amplitudes con irradiaciones ultrasónicas de 85Khz en *Egeria Densa*. Dos décadas después, en 1979 Miller [8] reportó el rango de frecuencias (450 khz – 10 Mhz) para la muerte celular en *Egeria Densa*, para irradiaciones ultrasónicas continuas por 100 segundos e intensidades de 75 mW/cm² a 180 mW/cm² [1]. Recientemente [9] se reportó la aplicación de ultrasonido para inhibir la actividad fotosintética en el Lirio Acuático (*Eichhornia crassipes*) considerado como una maleza acuática por sus daños ambientales, industriales que generan un riesgo a la salud; usaron la frecuencia del umbral inferior ultrasónica de 17 Khz, y potencias de irradiación a 60 W. Además, estudios de tasa de transpiración en las plantas de lirio acuático muestran una drástica disminución después de la irradiación ultrasónica. Estos resultados en combinación con análisis por microscopía demuestran un daño estructural en las estomas producto de la cavitación de las plantas irradiadas, con una consecuente alteración del mecanismo de intercambio de gases, que toma lugar a través de estos importantes organelos [10].

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecemos al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y a la Secretaría de Investigación y Posgrado (SIP) del Instituto Politécnico Nacional (IPN) de México por el financiamiento a través de los proyectos de investigación, las becas a los estudiantes y los estímulos a los investigadores. También, agradecemos a los programas SIBE y BEIFI de la COFAA-IPN.

REFERENCIAS

- [1] Nielsen, B. L., *Making sense of it all: The importance of taking into account the sensory abilities of animals in their housing and management*, Applied Animal Behaviour Science **205**, 175-180 (2018).
- [2] Garstang, M. J., *Long-distance, low-frequency elephant communication*, J. Comp. Physiol. A **190**, 791-805 (2004).
- [3] Kinsler, L. E., Fren, A. R., Coppens, A. B., Sanders, J. V., *Fundamentals of Acoustics* Fourth Edition, (John Wiley & Sons, New York, 2000).
- [4] Mason, W., Thurston, R., *Physical Acoustics Quality Technology Handbook*, (Academic Press, London, 1981), p. 282.
- [5] Timothy J. Mason, John P. Lorimer, *Applied Sonochemistry*, (Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim UK, 2002) p. 303.
- [6] Harvey, E. & Loomis, L., *Biological Bulletin*, Published by: Marine Biological Laboratory Stable **55**, 459-46 (1928).

- [7] Goldman, D. E. and Lepeschkin, W. W., J. *Cellular Physiology, Journal of Cellular and Comparative Physiology* **40**, 255-268 (1952).
- [8] Miller, D. L., J. *Ultrasonics International* **91**, Acoust. Soc. Am. **65**, 1313-1321 (1979).
- [9] Calderón, A., Cardona, A., Nogal, U., Juárez Gracia, A. G., Marín, E. and Muñoz Hernández, R. A., *Instrumentación*

- Sonido, Ultrasonido y Cavitación y Caracterización*, Applied Radiation and Isotopes, Instituto Politécnico Nacional **83**, 268- 275 (2014).
- [10] Calderón, J., *Aplicación de la técnica de espectroscopía fotoacústica y el sistema LiCOR en el estudio del efecto de la irradiación ultrasónica en pigmentos fotosensibles y transpiración en plantas verdes*, PhD Thesis, Instituto Politécnico Nacional, CICATA Unidad Legaria, México (2019).