

# ATOMIZACIÓN ULTRASÓNICA DE COMBUSTIBLES

RUBÉN C. ESQUIVEL,

JOSÉ E. RAMÍREZ Y WILLIAM VICENTE

Durante 2018, 85% de la energía consumida a nivel global se obtuvo de la quema de combustibles fósiles, del cual, 30% provino de la quema de petróleo y sus derivados (B. P., 2019). De acuerdo con los pronósticos de B. P. (Energy Outlook, 2019), para 2040 el consumo de combustibles no disminuirá, no obstante, en el caso de la gasolina y el diésel, éstos serán mayoritariamente sustituidos por biocombustibles. Para facilitar esta transición y obtener energía de una combustión más limpia y eficiente, uno de los proyectos de investigación del UNICE (Unidad de Investigación y Control de Emisiones), es mejorar la quema de combustibles líquidos a través de la producción de aerosoles más finos. Durante la combustión se quema una mezcla de aire-combustible; si el combustible se encuentra en fase líquida, el tamaño y la concentración de las gotas afectarán: la velocidad de propagación del frente de flama, el porcentaje de combustible quemado y las emisiones resultantes. Para producir tal mezcla, el combustible debe ser atomizado; en la actualidad, dicha tarea la realizan inyectores que generan aerosoles de tamaños

dispersos no óptimos para la combustión, esto debido a su principio de funcionamiento: alta velocidad.

En este proyecto participan investigadores y estudiantes tanto del Instituto de Ingeniería como de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

## Atomización ultrasónica

Al dirigir ondas acústicas de alta frecuencia e intensidad a una superficie líquida, en ella crecen ondas capilares que desprenden partículas de sus crestas cuando alcanzan una amplitud crítica. La tasa de generación de aerosol es proporcional a la intensidad acústica aplicada mientras que el tamaño de las partículas depende de la frecuencia de la onda y las propiedades del fluido excitado. Este fenómeno se conoce como atomización ultrasónica, el cual, permite obtener aerosoles de partículas pequeñas y homogéneas eyectadas a baja velocidad. Aproximadamente, se obtienen diámetros medios de Sauter (la media de la razón volumen-superficie del aerosol) de cinco micras para el agua en frecuencias del orden de los megahertz y velocidades de un metro por segundo (Lozano, 2014).

Para desarrollar atomizadores que aprovechen el ultrasonido como principio de funcionamiento es indispensable obtener un modelo que permita conocer las características del aerosol en función de las propiedades del fluido y los parámetros de atomización.

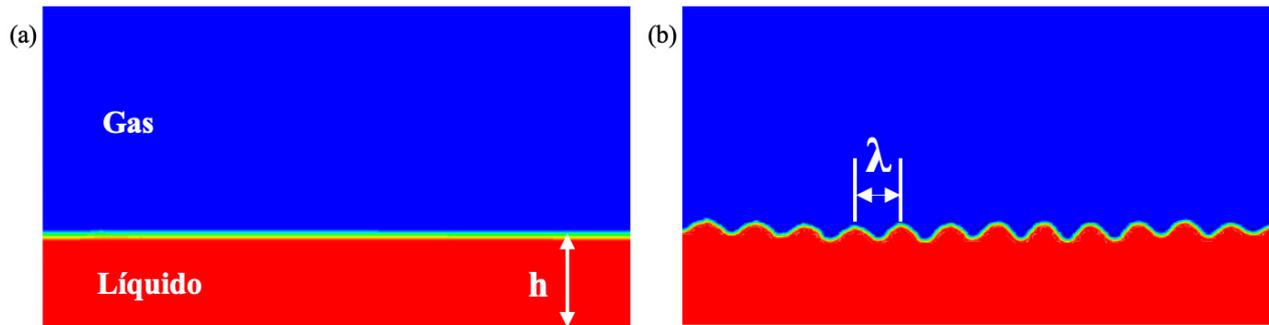


Figura 1. a) fracción de volumen; b) longitud de ondas capilares

## Metodología

Un aerosol se describe mediante su distribución numérica o volumétrica, es decir, funciones que expresan el porcentaje de gotas o de volumen contenido en partículas de un cierto diámetro. Para calcular una distribución representativa se emplea el formalismo de máxima entropía. Dicha herramienta consiste en obtener una distribución a partir de la maximización de una entropía sujeta a restricciones; estas restricciones conllevan la información física del fenómeno y toman la forma de los diámetros medios volumétrico y superficial, los cuales son el segundo y tercer momento de la distribución numérica del aerosol. Los diámetros medios fueron obtenidos de correlaciones desarrolladas mediante análisis dimensionales de datos experimentales, así como de una simulación numérica que permitió una mejor comprensión de la física del fenómeno.

Las correlaciones de los diámetros medios fueron planteadas asumiendo que los diámetros son proporcionales a la longitud de onda capilar (Rajan y Pandit, 2001). Tanto la expresión de la longitud de onda como los coeficientes de proporcionalidad fueron obtenidos empíricamente mediante un análisis de regresión de los parámetros involucrados en el fenómeno (frecuencia, gasto e intensidad) adimensionalizados con las propiedades del fluido. Los datos para el análisis de regresión se obtuvieron de artículos experimentales.

Para estudiar a detalle la física involucrada en el fenómeno se realizó una simulación numérica de la atomización, la cual se representó con un modelo bifásico (Figura 1a) en un dominio bidimensional cartesiano. En la parte superior del dominio se definió la fracción de gas (aire) y en la parte inferior la fracción

líquida (una película de altura “h” de agua destilada). La pared inferior se excitó a través de una función sinusoidal variable en el tiempo (y) para proporcionar el movimiento que da el origen a las ondas capilares en la interfase.

## Resultados

Las expresiones empíricas de los diámetros medios se utilizaron en conjunto con el formalismo de máxima entropía para calcular las distribuciones volumétricas de casos documentados experimentalmente. La Figura 2 compara la distribución de la densidad de probabilidad contra la distribución experimental para cuatro casos realizados con agua (Mizutani *et al.*, 1970). Se utilizó la prueba de semejanza entre distribuciones de Kolmogorov-Smirnov para determinar la confiabilidad con que las distribuciones calculadas representan a las experimentales. Para el primer caso (Fig. 2a) la confiabilidad es de 43%, para el segundo caso (Fig. 2b) es de 20%, para el tercer caso (Fig. 2c) de 51%, y para el cuarto (Fig. 2d) de 54%.

La simulación numérica se resolvió usando el *software* Ansys Fluent 19.0. En la Figura 1b, se observa que para un tiempo final se forman las ondas capilares de longitud de onda “λ” en la interfase. Las crestas de cada onda se pueden representar por medio de vectores de velocidad, como se presenta en la Figura 3. Se aprecia como el fluido líquido sube y va tomando la forma de crestas, hasta el punto máximo donde su velocidad es cero, posteriormente descendiendo en forma de fuente. Los resultados numéricos fueron validados con los datos experimentales de las longitudes de onda capilares para diferentes casos (Eisenmenger, 1959 y Ramisetty *et al.*, 2013), como se muestra en la Figura 4.

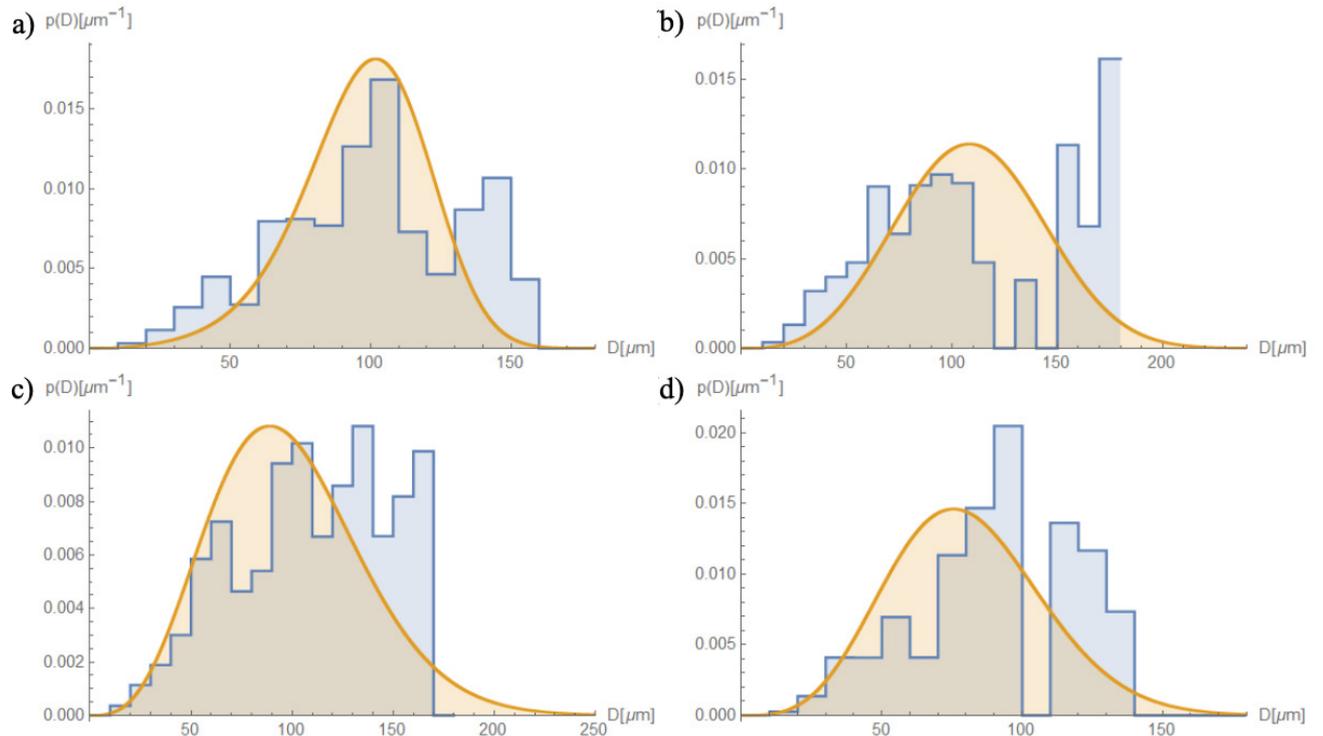


Figura 2. Comparación de las distribuciones calculadas, de color naranja, con las experimentales, de color azul para atomización de agua a) frecuencia de 40 kHz, desplazamiento de 4.5  $\mu\text{m}$  y gasto de 10 cc/min, b) 40 kHz, 7  $\mu\text{m}$  y 30 cc/min, c) 60 kHz, 4.7  $\mu\text{m}$  y 20 cc/min, d) 70 kHz, 3.9  $\mu\text{m}$  y 20 cc/min

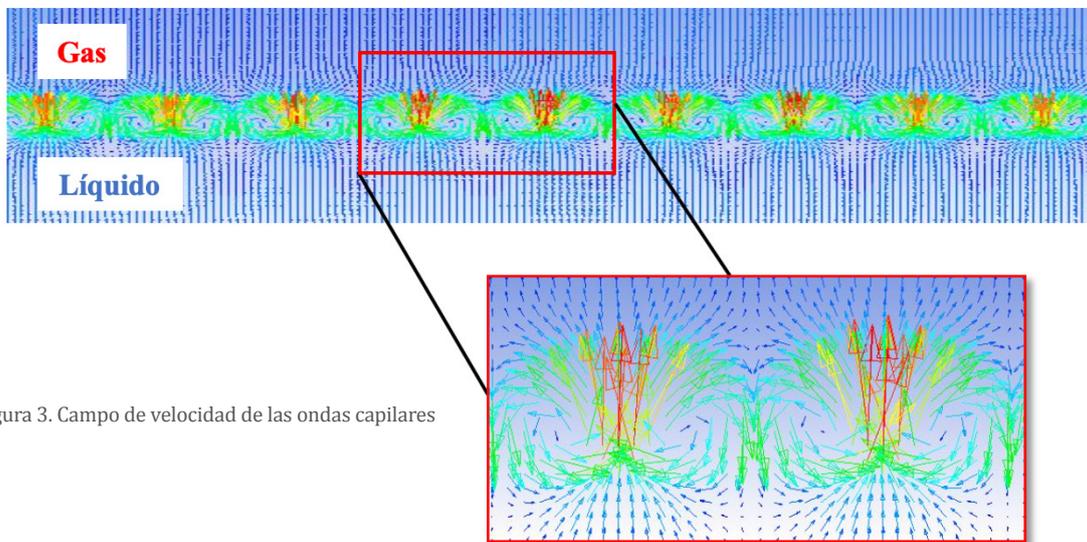


Figura 3. Campo de velocidad de las ondas capilares

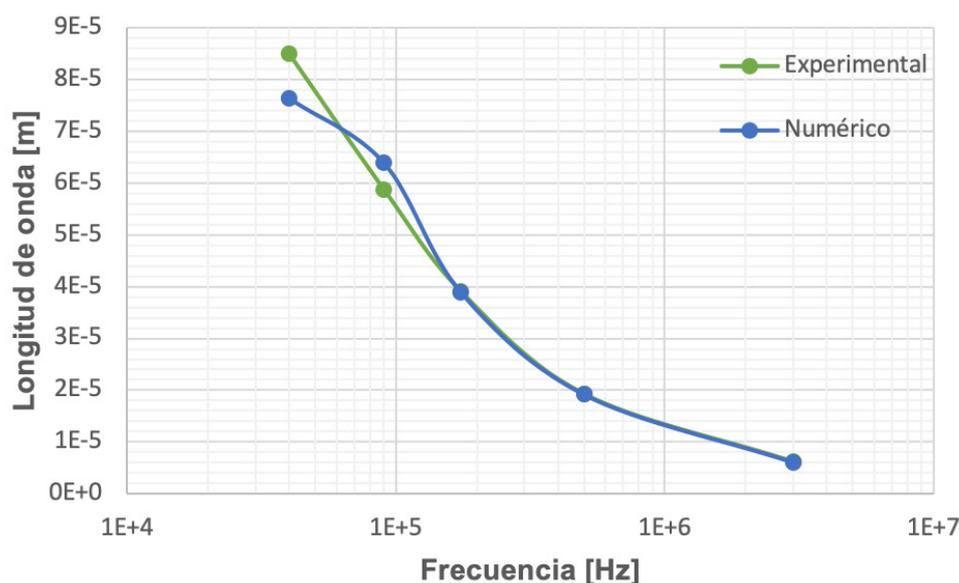


Figura 4. Comparación de las longitudes de onda calculadas con las experimentales

## Conclusiones

La metodología establecida puede estimar las distribuciones de los aerosoles, demostrando ser una herramienta útil para el desarrollo de atomizadores en aplicaciones de combustión, médicas e industriales. La simulación numérica ha quedado validada a través de comparar las longitudes de onda calculadas con las experimentales.

El trabajo que se realiza actualmente es la validación experimental en altas frecuencias (megahertz), al igual que el cálculo de los diámetros medios de las partículas atomizadas en la simulación numérica.

Posteriormente se plantea llevar la tecnología a aplicaciones de atomización de combustibles fósiles y biocombustibles. |

## Referencias

1. BP. 2019. *Energy Outlook: 2019 edition*.
2. BP. 2019. *Statistical Review of World Energy 2019*.
3. Eisenmenger, W. 1959. « Dynamic properties of the surface tension of water and aqueous solutions of surface active agents with standing capillary waves in the frequency range from 10 kcs to 1.5 Mcs.» *Acustica* 9: 327-340.
4. Lozano, A., A. González-Espinosa, J. A. García, E. Calvo, J. Barroso y F. Barreras. «High flow-rate ultrasonic seeder.» *Flow Measurement and Instrumentation* 38: 62-66.
5. Mizutani, Yukio, Yasutake Uga y Takeo Nishimoto. 1972. «An investigation on ultrasonic atomization.» *Bulletin of JSME* 15 (83): 620-627.
6. Rajan, Raghavachari, y Aniruddha B. Pandit. 2001. «Correlations to Predict Droplet Size in Ultrasonic Atomisation.» *Ultrasonics* 39 (4): 235-255.
7. Ramisetty, Kiran. A., Aniruddha. B. Pandit y Parag. R. Gogate. 2013. « Investigations into Ultrasound Induced Atomization.» *Ultrasonics Sonochemistry* 20 (1): 254-264.