

# Disminución del chapoteo en la superficie de líquidos: la espuma de cerveza como caso experimental

EDVCATIO PHYSICORVM



QVO NON ASCENDAM?

ISSN 1870-9095

**Jorge A. Rubio-Iñiguez, Raúl C. Cruz-Gómez,**

**César O. Monzón, José L. Romero**

*Departamento de Física, Universidad de Guadalajara,  
Blvd. Marcelino García Barragán 1421. Col. Olímpica,  
CP 44430, México Guadalajara, Jalisco.*

**E-mail:** raul.cruz@academicos.udg.mx

(Recibido el 11 de marzo de 2023, aceptado el 7 de mayo de 2024)

## Resumen

En este trabajo se presentan resultados experimentales sobre el efecto de la oscilación, o chapoteo, de una superficie líquida con y sin espuma. Cuando un recipiente está en movimiento, la superficie libre del líquido comienza a oscilar, chapotear. Éste efecto puede observarse cuando un vaso de agua se manipula descuidadamente y el líquido chapotea o, incluso, se derrama por los bordes del recipiente. Sin embargo, la cerveza no chapotea tan fácilmente como el agua, lo que sugiere que la espuma lo amortigua.

**Palabras clave:** Espuma, Amortiguamiento forzado, Segunda ley de Newton.

## Abstract

This paper presents experimental results on the effect of oscillation, or sloshing, of a liquid surface with and without foam. When a recipient is in motion, the free surface of the liquid starts to oscillate, or slosh. This effect can be observed when a glass of water is handled carelessly and the liquid sloshes or even spills over the edges of the container. However, beer does not slosh as easily as water, suggesting that the foam cushions it.

**Keywords:** Foam, Forced damping, Newton's second law.

## I. INTRODUCCIÓN

El control de las oscilaciones en la superficie libre de un líquido (chapoteo) ha sido objeto de estudios científicos con la finalidad de evitar daños en las paredes del contenedor. Por ejemplo: buques de carga líquida en navegación semivacíos, vagones cisterna llenos de petróleo en movimiento, torres de agua elevadas bajo movimiento de tierra, depósitos de combustible en vehículos en carretera y contenedores de combustible en aviones tanto bajo turbulencias como al aterrizar [1, 2, 3, 4]. También hay ejemplos en situaciones cotidianas, tales como cuando al caminar con una taza de café, de repente salpica e, incluso, se derrama. Pero, la situación es diferente con un vaso de cerveza con espuma, incluso tras agitarlo un poco no se tira. Es claro sugerir, entonces, que la espuma suaviza la superficie libre y evita el chapoteo [5, 6].

En el presente trabajo presentamos la diferencia en el tiempo de decaimiento (amortiguamiento) de la interfaz de un líquido tanto con presencia de espuma como sin ella a partir de un forzamiento externo oscilatorio con frecuencia determinada. Al mismo tiempo, comparamos cuatro diferentes cervezas, en donde sabemos que su elaboración es a través de distintos procesos, y demostramos que el

tiempo de decaimiento de la interfaz líquido-espuma depende de qué tipo es. De acuerdo con [7, 8, 9, 10] la demostración aquí descrita tiene la ventaja de ser barata, clara y motivadora, porque investiga un fenómeno cotidiano. Esto facilita que los estudiantes puedan repetirla en cualquier lugar y extender la práctica con cualquier otro tipo de espuma.

### A. La espuma de cerveza

En la actualidad la cerveza es considerada como una bebida *socialmente* importante y su elaboración ha evolucionado en gran medida a lo largo de siglos. De manera general, se pueden encontrar dos tipos de cerveza que varían en el método de elaboración. Por un lado, la *cerveza artesanal*: donde los procesos como la maceración del mosto o la fermentación, se realizan de manera "natural". Por otro lado, la *cerveza industrial*: donde se sigue un proceso económicamente sustentable, con el uso de elementos que automaticen el proceso. Además, en este caso, se agregan elementos artificiales que aceleran procesos naturales y ayudan a la elaboración de cerveza más barata y rápida, como el caso de lúpulo de mala calidad, proteínas añadidas o la sustitución de la cebada por trigo, maíz o arroz.

En base a lo anterior, es de esperarse que el sabor y características propias (físicas y/o químicas) cambien dependiendo del método de elaboración. Una característica física muy importante, y que puede sugerir el método de elaboración, es el análisis dinámico de la interfaz entre el líquido y la espuma. En general, de la espuma se puede inferir el proceso de elaboración por la forma de sus burbujas, tamaño y densidad. O, como es el caso en el presente trabajo, por su tiempo de amortiguamiento después de haberla “batido”. Aunque se sabe que existe una relación del proceso con el tipo de espuma (en este trabajo relacionamos el término *proceso* con el tiempo de amortiguamiento). Además, la espuma es el resultado de varios componentes de la cerveza, que necesitan estar en equilibrio para una correcta estructura de sus burbujas [8].

Para entender qué se quiere decir por *tipo* de espuma, seguimos los conceptos fundamentales de acuerdo con [8]. *Drenaje*: cuando se forma espuma al momento de verter la cerveza se considera húmeda, sin embargo, por efectos de la aceleración de la gravedad, el líquido alrededor de ella baja, dejando así una espuma seca. Existen variables que ofrecen resistencia al drenaje, como la viscosidad y el efecto capilar, por lo que “la espuma es más estable a temperaturas bajas”. *Fusión*: se define como la unión de dos burbujas, donde la película entre las burbujas se rompe para dar lugar a una burbuja de mayor tamaño, se dice que en cervezas de alta calidad este factor tiene importancia limitada. *Desproporción*: se define como el engrosamiento de la espuma y su “acomodo” o estructura, donde burbujas pequeñas con mayor presión se difunden en burbujas más grandes con menor presión creando una estructura estable.

Como se mencionó anteriormente, presentamos un experimento sencillo y de fácil realización. El objetivo es estudiar el comportamiento de la interfaz de un líquido con espuma para determinar su influencia en el amortiguamiento de la oscilación. Seguimos la metodología propuesta por [7, 8, 9, 10, 12, 13], con experimentos sencillos y de bajo costo para el aprendizaje de la Física en situaciones ordinarias de la vida cotidiana. La finalidad principal del presente trabajo es demostrar que después de perturbar la interfaz líquido-espuma de cuatro diferentes tipos de cerveza, el tiempo de amortiguamiento caracteriza su método de elaboración y evita el chapoteo. Finalmente, se confirma la hipótesis al contaminar dos cervezas artesanales con alcohol etílico en pequeña proporción.

## II. TEORÍA

### A. El oscilador armónico amortiguado

Un oscilador amortiguado es aquel en que una partícula de masa  $m$  se va frenando progresivamente hasta llegar a detenerse en su posición de equilibrio. La disminución de la amplitud en las oscilaciones es debida a la presencia de fuerzas externas o internas. Se pueden describir las fuerzas que actúan sobre una partícula forzada por medio de

$$\sum f = -kx - bv. \quad (1)$$

siendo  $kx$  la fuerza de restitución y  $bv$  la fuerza de amortiguamiento. Aquí  $b$  es una constante positiva que depende de las propiedades de la espuma, en nuestro caso. Las variables  $x$  y  $v$  son la elevación/disminución de la superficie libre a partir del equilibrio y la velocidad con la que se desplaza, respectivamente. Aplicando la segunda ley de Newton se obtiene la siguiente ecuación diferencial:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = 0. \quad (2)$$

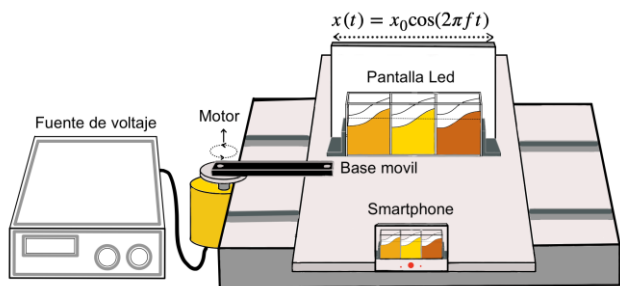
La solución para un oscilador sub-amortiguado, donde la amplitud decrece con el tiempo es:

$$x(t) = X_m e^{-\frac{t}{\tau}} \cos(2\pi f t + \phi). \quad (3)$$

En donde  $X_m$  es la amplitud inicial máxima,  $\tau$  el tiempo de decaimiento de la interfaz,  $2\pi f$  la frecuencia y  $\phi$  la fase. El valor de la constante de amortiguamiento  $b$  está relacionada con el tiempo de decaimiento de acuerdo a  $\tau = 2m/b$ .

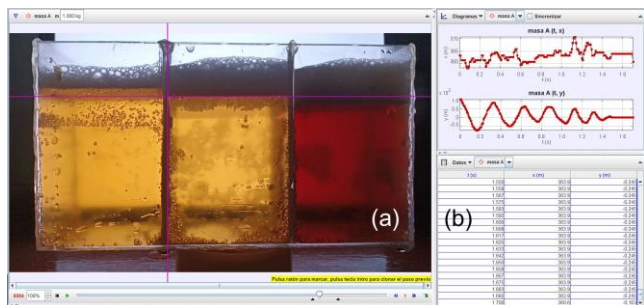
## III. METODOLOGIA Y DESARROLLO EXPERIMENTAL

Dado el objetivo y la teoría mencionada, se considera la estabilidad de la espuma como esencia del experimento. De manera general, basándonos en [7], se ideó el plan con la siguiente metodología: tres recipientes unidos entre sí, con dimensiones individuales de 3 cm de ancho, 5 de largo y 7 de alto, de acrílico transparente, se colocan sobre una base que es impulsada por un motor de corriente directa como se muestra en el esquema de la figura 1. La base se desliza sobre rieles con poca fricción para asegurar que el movimiento de la plataforma sea en una dirección. A cada recipiente se le vacía cerveza fría a la misma temperatura (6.4°C). Es importante que el espesor de la espuma en los tres recipientes y el grado de alcohol sean iguales. Posteriormente, se enciende el motor y la plataforma se hace oscilar de manera horizontal con una frecuencia y una amplitud determinada, generando un movimiento armónico descrito por la siguiente ecuación  $x(t) = x_0 \cos(2\pi f t)$  donde  $x_0$  es la amplitud de la oscilación de la plataforma. Después de que la interfaz alcanzó la misma frecuencia en los tres recipientes se apagó el motor. Con este sistema de oscilación fue posible controlar la amplitud en todos los experimentos para las cuatro cervezas. Durante el forzamiento un smartphone grabó el movimiento de la superficie libre de la cerveza y la espuma a 240 fps (fotoramas por segundo). Para una óptima iluminación durante la grabación, se colocó la pantalla Led de un iPad y/o Tablet frente al celular como se observa en la Figura 1. El smartphone y la pantalla Led se colocaron sobre la plataforma móvil. Los videos tuvieron una duración promedio de 20 s, sin embargo, solo analizamos el momento que se apagó el forzamiento (aproximadamente 2 s).



**FIGURA 1.** Esquema del experimento, en donde se muestra el motor, la base móvil, el smartphone y la pantalla de luz Led.

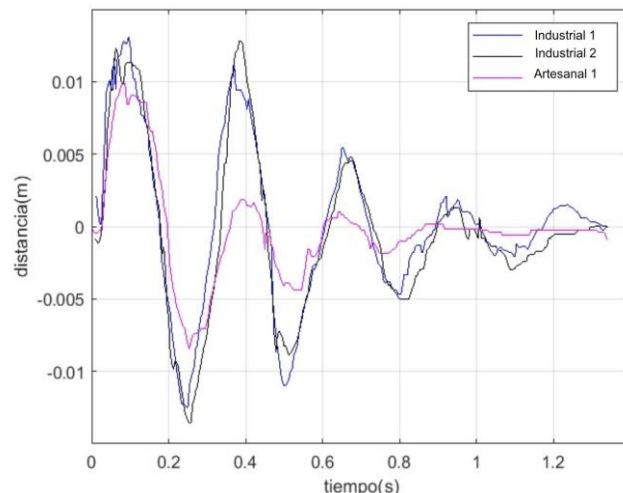
Después de obtener los videos, el siguiente paso fue defragmentarlos en fotoramas para analizar la historia de la amplitud en cada experimento. Este análisis fue hecho con el software *Tracker* [11]. La figura 2(a) presenta una captura de pantalla tomada del *Tracker* con el objetivo de mostrar el procesamiento y obtención de los datos. La amplitud máxima/mínima de un punto en el extremo entre el líquido-espuma para cada fotorama se muestra en (b) después de hacer la calibración inicial. El procesamiento se repitió para cada tipo de espuma. Después de obtener la serie de tiempo en los tres casos, los datos se exportaron al software *MATLAB* para su posterior análisis.



**FIGURA 2.** Captura de pantalla del software *Tracker* (a). Valores de la amplitud máxima/mínima encontrados para cada fotorama después de la calibración (b). La línea roja en los recipientes de acrílico representa el estado de equilibrio antes de iniciar el forzamiento.

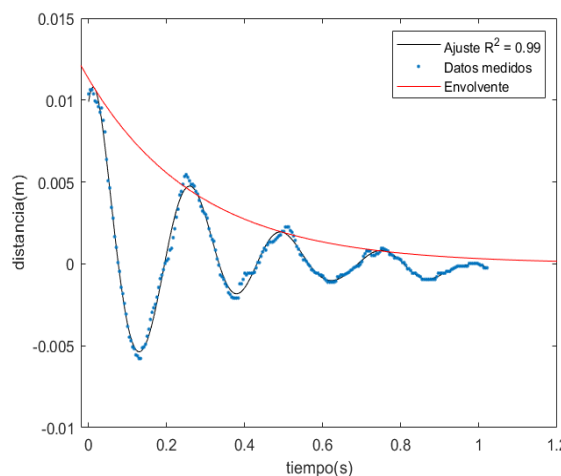
#### IV. RESULTADOS

La Figura 3 muestra los resultados obtenidos por el software *Tracker* de un experimento particular para los tres tipos de espuma justo cuando se apagó el forzamiento. Las líneas color azul y negro representan la amplitud de la interfaz líquido-espuma de las cervezas industriales y de color rojo la artesanal. Se observa que las tres interfaces inician al mismo tiempo. Es evidente la diferencia de amplitud y tiempo de amortiguamiento en los tres casos, incluso el desfase entre las industriales y la artesanal. El tiempo  $\tau$  fue de  $1.43 \pm 0.01s$  y  $0.98 \pm 0.01s$  para las industriales y la artesanal, respectivamente.



**FIGURA 3.** Historia de la amplitud de las tres diferentes interfaces después de apagar el forzamiento. Las líneas azul y negra muestran un comportamiento similar (cerveza industrial), contrario para la línea roja (cerveza artesanal).

El siguiente paso fue ajustar por mínimos cuadrados la ecuación 3 a los valores de la amplitud medidos para cada serie de tiempo. La función fue ajustada con el software *MATLAB* y la rutina *nlinfit*. Como ejemplo, la Figura 4 muestra la historia de la interfaz de la cerveza artesanal con los puntos obtenidos experimentalmente y en línea continua el ajuste por mínimos cuadrados de la ecuación 3. Se puede observar que la teoría se ajusta muy bien a los datos como lo explica el coeficiente de correlación  $R^2 = 0.99$ . En este experimento el valor de  $\tau = 1.05 \pm 0.01 s$ . En la misma figura, la línea color rojo muestra la envolvente  $X_m e^{-t/\tau}$  de la ecuación 3.



**FIGURA 4.** Historia de la amplitud de una serie de tiempo para un experimento particular (puntos azules). El ajuste por mínimos cuadrados de la ecuación 3 se muestra con línea continua de color azul. La línea de color rojo es la envolvente.

Después de demostrar la significativa diferencia de tiempo en el amortiguamiento de las cervezas industriales contra la artesanal, debido a las características físicas de la espuma arriba descritas. Una prueba fundamental para verificar si, efectivamente, el cambio es significativo entre una espuma “pura” y una “contaminada”, aplicamos el test llamado “Doble-Ciego”. En esta prueba, se contaminó la cerveza artesanal añadiéndole 5% de alcohol etílico. Los resultados fueron como se esperaba. En la Figura 5 se muestra la historia de la interface de dos diferentes tipos de cerveza artesanal “pura” y “contaminada”. En este experimento se puede observar que el tiempo de amortiguamiento de la cerveza “contaminada” se incrementó más del 200%.

Después de analizar todos los experimentos mostrados en las Figuras 3 y 5, encontramos el valor de  $\tau$  para cada tipo de interfaz líquido-espuma. La Tabla 1 muestra los resultados de cada cerveza. Es evidente la diferencia en el amortiguamiento en cada interfaz en donde la cerveza artesanal “pura” se equilibra en mucho menor tiempo.

**TABLA 1.** Tiempo de amortiguamiento de cada interfaz líquido-espuma.

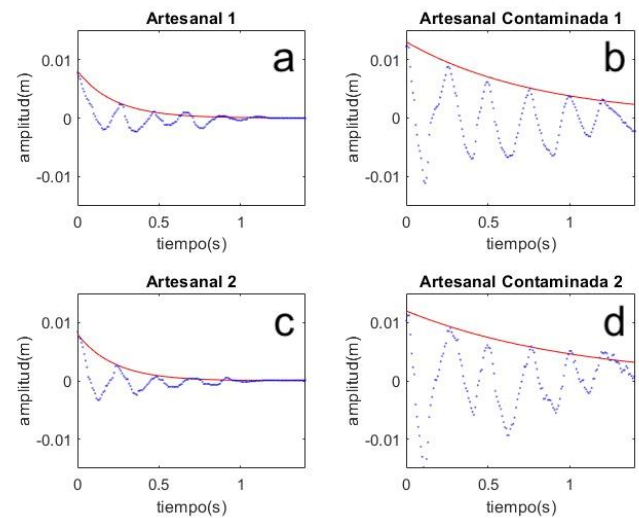
Tipo de cerveza	$\tau$ (s)	$\tau$ (s)
	“pura”	“Contaminada”
Industrial 1 (figura 3)	1.43±0.01	
Industrial 2 (figura 3)	1.53±0.01	
Artesanal 1 (figura 3)	0.96±0.01	
Artesanal 1 (figura 5)	0.95±0.01	3.56±0.01
Artesanal 2 (figura 5)	0.96±0.01	3.58±0.01

Al analizar los resultados arriba mostrados, claramente se observó que las propiedades físicas de la espuma cambian al añadir productos de baja calidad a la cerveza. En el presente análisis sólo dedujimos que el tiempo de amortiguamiento depende del tipo de espuma, que a la vez, depende de la estructura química debida a las propiedades de la cerveza. Al añadir productos de baja calidad pueden modificar la densidad, drenaje, fusión y desproporción de la espuma. Sin embargo, los resultados muestran claramente que al añadir espuma a la superficie libre de un líquido en movimiento amortiguan el batido significativamente. El mayor amortiguamiento depende de una espuma más densa.

## V. DISCUSION Y CONCLUSIONES

En este trabajo, presentamos la respuesta de la interfaz líquido-espuma a un forzamiento externo. El objetivo principal fue demostrar mediante un experimento muy

sencillo, no intrusivo, reproducible en cualquier lugar y de bajo costo que al colocar espuma en la superficie libre de un líquido, el chapoteo se reduce significativamente.



**FIGURA 5.** Historia de la amplitud de las cuatro series de tiempo. El ajuste por mínimos cuadrados de la envolvente de la ecuación 3 se muestra con línea roja continua; en a-c las cervezas artesanales “puras”, en b-d “contaminadas”.

Para demostrarlo, se analizaron cuatro tipos de cerveza, dos industriales y dos artesanales. La hipótesis principal fue que la consistencia (forma de la burbuja, tamaño y densidad) de la espuma está asociada a la materia prima utilizada para su elaboración. Como consecuencia, el tipo de espuma generada por cada cerveza tiene propiedades físicas particulares. Estas particularidades generan un amortiguamiento en la superficie libre del líquido debido a la fricción con el recipiente. Los resultados mostraron que efectivamente, después de frenar el forzamiento, el tiempo de amortiguamiento de la cerveza artesanal fue mucho menor que las industriales, debido a que su espuma es más densa. Para comprobar los resultados, el test Doble-Ciego fue aplicado asumiendo que la cerveza artesanal fue hecha con componentes de baja calidad (5% de alcohol etílico, en este caso). Los resultados mostraron claramente que el tiempo de amortiguamiento aumentó más del 200% respecto cuando no fue contaminada. En conclusión, en acuerdo con [7, 12, 13], después de leer el presente trabajo los estudiantes podrán aplicar el modelo teórico del movimiento armónico amortiguado a la vida cotidiana desde un punto de vista cuantitativo y cualitativo.

## REFERENCIAS

[1] Faltinsen, O. M., Timokha, A. N., *Sloshing* (www.cambridge.org/9780521881111, 2009).  
 [2] Bronfort, A., Caps, H., *Faraday instability at foam-water interface*. Physical Review E, **86**, 066313 (2012).

- [3] Korkmaz, F. C., *Damping of sloshing impact on bottom-layer fluid by adding a viscous top-layer fluid*, *Ocean Engineering* **254**, 111357 (2022).
- [4] Zhang, Ch., Su, P., Ning, D., *Hydrodynamic study of an anti-sloshing technique using floating foams*, *Ocean Engineering* **175**, 62–70 (2019).
- [5] Mayer, H. C., Krechetnikov, R., *Walking with coffee: Why does it spill?*, *Physical Review E* **85**, 046117 (2012).
- [6] Capello, J., Sauret, A., Boulogne, F., Dressaire, E., Stone, H. A., *Damping of liquid sloshing by foams: from everyday observations to liquid transport*, *J. Vis.* **18**, 269-271 (2015).
- [7] Martínez-Vargas, Z. C., Cruz-Gómez, R. C., *Cálculo de la composición de masa en una aleación binaria para prácticas de laboratorio docente*, *Lat. Am. J. Phys. Educ.* **16**, 2307 (2021).
- [8] Kellershohn, J., Russell, I., Stewart, G. *Beer: A Quality Perspective* (Elsevier Gezondheidszorg, (2011).
- [9] Garcia-Molina, R., *Cinco experiencias sencillas de física moderna*, *Revista Alambique [Didáctica de las Ciencias Experimentales]* **75**, 30-35 (2013).
- [10] Gil, S., Di Laccio, J. L., *Smartphone una herramienta de laboratorio y aprendizaje: laboratorios de bajo costo para el aprendizaje de las ciencias*, *Lat. Am. J. Phys. Educ.* **11**, 1305 (2017).
- [11] Tracker Video Analysis and Modeling Tool for Physics Education, <https://www.physlets.org/tracker/>
- [12] Riveros, H. G., *Enseñanza de la Física experimental*, *Lat. Am. J. Phys. Educ.* **13**, 1304 (2019).
- [13] Villarreal Rodríguez, C. A., Segarra Alberú, P. *La experimentación para detonar el interés en la física*, *Lat. Am. J. Phys. Educ.* **11**, 2311 (2019).