

ODISEA POR EL MUNDO DE LAS BURBUJAS

BERNARDO FIGUEROA ESPINOZA
Y ALICIA AGUILAR CORONA

1. Introducción

¿Sabías que las burbujas tienen aplicaciones en ingeniería?

Efectivamente, lejos de ser simples “juguetes” o “curiosidades científicas”, existen tantas aplicaciones científicas y de ingeniería que involucran a la ciencia de las burbujas, que se podrían dedicar varios manuscritos únicamente a listar algunas. De hecho, una simple búsqueda en una base de datos científica (PubMed©) de la palabra clave “bubbles” muestra que a partir de los años 20 y 30 del siglo pasado, este número ha ido aumentando de manera exponencial, llegando a cifras entre 1000 y 2000 artículos por año en 2020. Uno podría pensar que un par de miles al año no es mucho, pero existen muchas otras palabras clave relacionadas, y el crecimiento exponencial es testigo de la importancia del tema.

Desde tiempos inmemoriales la increíble física de las burbujas nos ha fascinado. En particular, las extrañas propiedades del agua (Leighton *et al.* 1998; Czernski *et al.* 2010) y la física de los fluidos se traducen en inestabilidades hidrodinámicas que causan efectos visualmente impactantes, como se muestra en la Figura 1 (Meuel, 2013); estas inestabilidades generan todo un repertorio de “efectos especiales” que vale la pena mirar (Zetina *et al.* 2015).

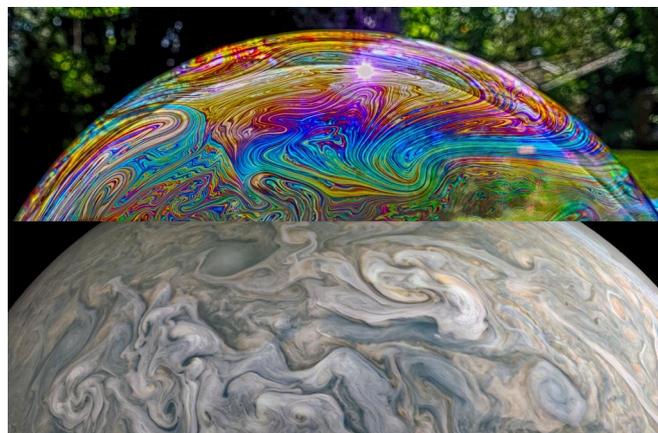


Figura 1. Arriba una burbuja de jabón. La iridiscencia es resultado de la delgadísima piel de la burbuja (del orden de unas cuantas moléculas), que permite visualizar los remolinos, que recuerdan una atmósfera planetaria, como la que se muestra abajo (Fuente: Pexels.com, royalty free images)

Entre las propiedades antes referidas están la flotabilidad, la inercia (del líquido, del gas), la viscosidad y la tensión superficial. Esta última es de particular relevancia para las burbujas, pues la molécula de agua al ser ligeramente asimétrica, crea fuerzas de atracción entre moléculas del mismo líquido, que se manifiestan como una especie de “piel” o “membrana elástica” en la interfase aire-líquido (fuerza por unidad de longitud o energía por unidad de área). Es por ello que la superficie de las burbujas es una especie de “optimizador” natural que resuelve el difícil problema matemático de minimizar el área, por tanto, la energía (Moffat *et al.* 2016). Ésta también es la razón de que las burbujas suelen ser esféricas (la forma con mínima área para un volumen dado), y aunque podemos hacer burbujas de muchas formas, éstas siempre tendrán una forma óptima en el sentido de minimizar el área o energía superficial. Más aún, esto es un problema muy interesante para los matemáticos, que también estudian las transiciones de la topología de las burbujas, como cuando creamos láminas de burbuja con un alambre y lo deformamos. Estos cambios de forma son muy difíciles de analizar por medio de ecuaciones matemáticas (Moffatt *et al.* 2016) y son casi instantáneos. Solamente para cerrar esta introducción al mundo de las burbujas, se hará mención de algunas aplicaciones y estudios de gran importancia que involucran física de burbujas:

- Transporte de gases en interface océano atmósfera (Czernski, 2017).
- Generación de sonido en el agua, modos de vibración, uso de ultrasonido para procesos industriales y de limpieza (Leighton *et al.* 2017; Leighton, 1998).
- Aplicaciones navales, militares estela de embarcaciones (Caillé *et al.* 2006).
- Diagnóstico médico usando microburbujas y ultrasonido (Cosgrove, D., 2006), microburbujas como agentes transportadores de medicina a un blanco específico (Bull, 2007).
- Generación de aerosoles marinos, impacto en el clima, formación de nubes (Cornwell *et al.* 2020; Ladino *et al.* 2021).
- Aplicaciones ópticas, simulación de atmósferas planetarias (Meuel, 2013).
- Disminución de arrastre (industria naval, militar, (ver Ceccio, 2010)).
- Cortinas de burbujas para reducir impactos de ruido (Lucke *et al.*, 2011), para evitar el paso de algunas especies (Zielinski y Sorensen, 2016; Haberlin, *et al.* 2021), limpieza de canales/ríos, manejo de sedimentos, etc. (investigaciones en curso).
- Aplicaciones en la industria de las bebidas como el Champagne (Liger-Belair *et al.* 2008) y otras bebidas burbujeantes (Zenit y Rodríguez-Rodríguez, 2018).

- Aireación de tanques y reactores, transporte de masa (Figuroa y Legendre, 2010).
- Transporte de momentum, masa y calor en aplicaciones como bombeo de líquidos usando inyección de aire (Gutiérrez *et al.* 2021), aplicaciones petroleras (downcomers) y en la industria nucleoelectrónica (Taylor, 1950; Collins, 1978; Fabre y Figuroa, 2014; Figuroa y Fabre, 2010).

2. Un ejemplo: Burbujas de Taylor

Volviendo a la optimización de superficie (por tanto de energía), describiremos brevemente un ejemplo de investigación sobre cierto tipo de burbujas de particular interés en ingeniería: se trata de un estudio sobre la velocidad de ascenso y caracterización de burbujas en tuberías (Figuroa y Fabre, 2011; Fabre y Figuroa, 2014). Cuando se forman burbujas grandes dentro de un tubo que ocupan casi la totalidad de la sección del mismo, tomando una forma similar a una bala (ver Figura 2a), se trata de *burbujas de Dumitrescu-Taylor* (Dumitrescu, 1943; Taylor, 1950), que se han estudiado desde los años 40 a la fecha, con aplicaciones en submarinos, reactores nucleares, transferencia de masa, calor, extracción de petróleo, bombeo *Airlift* (Colebrook, 1939; Griffith y Wallis, 1961; Gutiérrez-Martínez *et al.* 2021), vulcanología y flujos geofísicos, entre otros. Una particularidad de las burbujas de Taylor es que para burbujas largas (longitud mayor a dos diámetros de tubo), la velocidad es independiente de la longitud de la burbuja (y de su volumen, cosa que no ocurre con ningún otro tipo de burbuja). En muchos casos la velocidad de ascenso es un parámetro muy importante, mismo que depende de las propiedades de los fluidos y del flujo mismo, cuya física se puede caracterizar por medio de un conjunto pequeño de números adimensionales como el número de Reynolds Re (relación de fuerzas inerciales y fuerzas viscosas), el número de Bond o Eötvös Eo (fuerzas de flotación/tensión superficial) y las velocidades adimensionales de los fluidos (número de Froude V^* y U^* para la burbuja y el líquido, respectivamente). La solución analítica del flujo de una burbuja aislada es un problema matemático difícil, que se ha abordado para el caso de baja viscosidad y tensión superficial (Re grande, Eo grande), por medio del uso de la teoría del flujo potencial axisimétrico (Collins *et al.* 1978; Bendiksen, 1985) y 2D (Garabedian, 1957; Collins, 1965; Couët y Strumulo, 1987 Ha-Ngoc *et al.* 2003) con cierto éxito. Sin embargo, las soluciones teóricas no se ajustaban a las primeras observaciones a contraflujo (el agua moviéndose hacia abajo, mientras la burbuja asciende (ver Collins *et al.* 1978). Es por eso que en el Instituto de Mecánica de Fluidos de Toulouse (IMFT) se llevaron a cabo una serie de cuidadosos experimentos y simulaciones, que se continuaron

en el Instituto de Ingeniería de la UNAM. Se diseñaron y construyeron dos sofisticados circuitos experimentales, uno de más de 10 metros de alto. También, se verificó meticulosamente el perfil de velocidades del líquido que enfrenta a la burbuja usando la técnica de velocimetría láser (PIV). Se mostró que la burbuja conserva su simetría a contraflujo gracias al efecto de la tensión superficial. Sin embargo, si se aumenta la rapidez del fluido, se llega a un punto donde hay una transición: la burbuja optimiza su forma a modo de minimizar la energía de superficie y maximizar la velocidad de ascenso enfrentando la corriente descendente de líquido. La burbuja toma entonces una forma aerodinámica asimétrica similar a la de un tren de alta velocidad (TGV), como se muestra en la Figura 2, donde la primera imagen a) representa la burbuja de Taylor en líquido inmóvil, mientras b) y c) muestran burbujas asimétricas a distintas velocidades de líquido (flujo laminar). Además, se hicieron pruebas con flujo turbulento (variando el diámetro de tubería y los líquidos a probar), como en el caso c), donde se observan incluso ondas capilares viajando aguas abajo en la superficie de la burbuja, causadas por las fluctuaciones turbulentas.

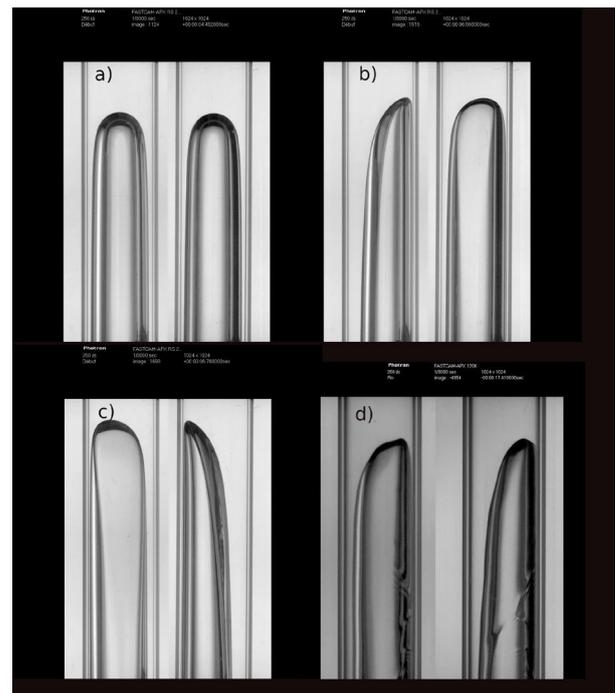


Figura 2. Burbujas de Taylor a distintas velocidades de líquido a contraflujo; a) líquido inmóvil $U^*=0$, b) $U^*=0.280$, flujo laminar, se pierde simetría, c) $U^*=0.452$, flujo laminar. La superficie libre se torna convexa, y d) $U^*=0.5$, flujo turbulento, se aprecian ondas que son barridas por el flujo hacia abajo. Todas las imágenes muestran dos vistas de las burbujas, una frontal y una lateral

Las mediciones de velocidad de ascenso de burbuja adimensional $V^* = V/(gD)^{1/2}$ (donde V es la velocidad de la burbuja, g es la gravedad y D es el diámetro del tubo), se muestran en la Figura 3, en función de la velocidad del fluido $U^* = U/(gD)^{1/2}$, donde U es la velocidad promedio del fluido. En la figura se muestran recuadros y flechas que indican el tipo de burbuja observado, así como la longitud de burbuja adimensional L/D , con marcadores de colores. Distintas longitudes de burbujas siguen la misma ley de velocidad, como se esperaba. Se muestra exclusivamente el caso laminar, aunque también se obtuvo la ley de velocidad del caso turbulento (se probaron además varios valores de Eu , aunque las figuras correspondientes no se muestran aquí por brevedad). Estas leyes de velocidad difieren sustancialmente de las obtenidas para flujo de líquido ascendente (co-current flow), que son muy similares a las aproximaciones teóricas.

Una sorpresa

Es de remarcar que hay algunos puntos que parecen no obedecer la ley de velocidad para el caso laminar; en el rango comprendido entre $U^* = -0.45$ y $U^* = -0.6$ se observan tres puntos con velocidades de burbuja V^* inesperadamente altas. ¡Son incluso más altas que la velocidad de ascenso de una burbuja en

líquido inmóvil! ¿Cómo puede ser esto si el líquido desciende a gran velocidad? ¿Se trata de algún error experimental?

Sucede que la burbuja de Taylor no viajaba sola; a veces la burbuja encuentra pequeñas burbujas en su camino, que normalmente son barridas por el mismo líquido alrededor de la burbuja de Taylor, a través de la delgada capa de fluido que pasa entre la burbuja y el tubo, donde la velocidad es altísima (reducción de sección). Existen casos rarísimos en que la burbuja encuentra una pequeña burbuja milimétrica frente a ella y en que las condiciones hidrodinámicas permiten que la pequeña burbuja se mantenga delante de la burbuja de Taylor de manera estable (tuvimos que modificar el experimento para reproducir el fenómeno dos veces más). La perturbación de la estela de la pequeña burbuja causa un reajuste en la forma de la burbuja de Taylor, que es muy sensible a las condiciones aguas arriba. Esta nueva forma es muy aerodinámica (como un cohete), permitiendo que ésta viaje a velocidades muy altas, empujando a la pequeña burbuja sin rebasarla, como muestra la Figura 3. En la Figura 4 se muestra un detalle de uno de estos casos rarísimos de interacción entre burbujas. Las condiciones de esta configuración (burbuja pequeña adelante y de Taylor atrás) son muy inestables, sin embargo, es posible encontrar casos estables. Este efecto sigue siendo tema de investigación y no se comprende bien todavía.

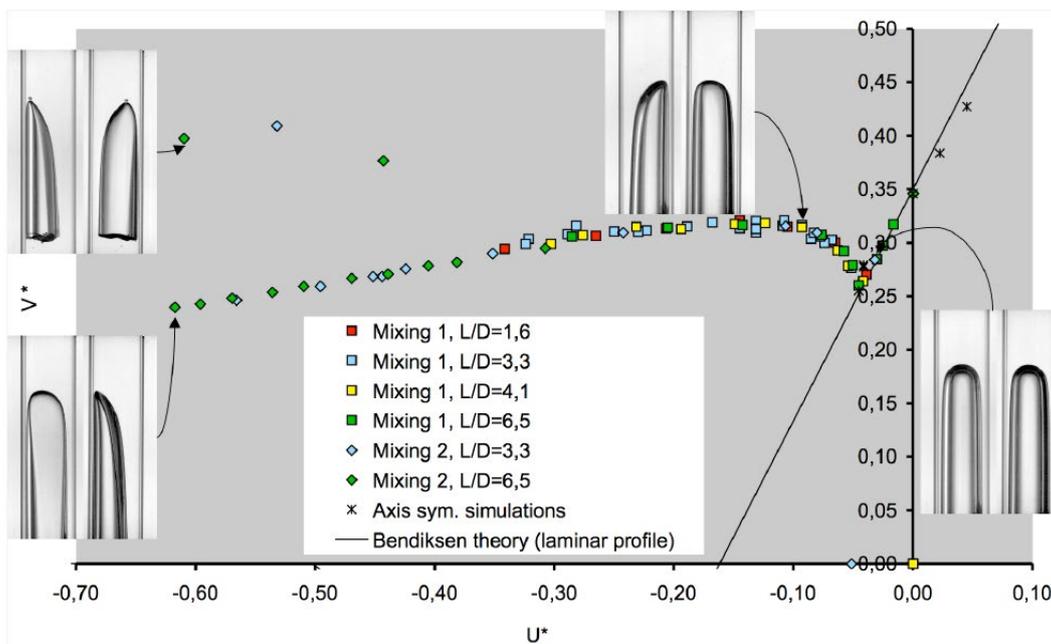


Figura 3. Velocidad adimensional de la burbuja V^* , en función de aquella del fluido U^* . Los colores representan distintas longitudes de burbuja. Las líneas continuas son soluciones teóricas de flujo potencial, mientras los asteriscos son simulaciones numéricas axisimétricas



Figura 4. Detalle de la burbuja que no viaja sola. Se observa la pequeña burbuja milimétrica frente a la burbuja de Taylor, ambas viajando de manera estable a gran velocidad

En este estudio se llevaron a cabo también simulaciones numéricas para probar las leyes de velocidad en 2D (Figuroa y Fabre, 2010), pero no se muestran por brevedad, el lector interesado puede consultar las referencias correspondientes (las simulaciones directas se hacen en 2D debido al tiempo de cómputo que implica hacerlo en 3D, pero las leyes de velocidad tienen la misma forma matemática y comportamiento cualitativo; de ahí la utilidad de las simulaciones 2D). Adicionalmente, en las simulaciones se mostró también que existen ciclos de histéresis* en situaciones no estacionarias, muy difíciles de estudiar experimentalmente.

Nota: la histéresis significa que el sistema (no lineal) puede recorrer una trayectoria (en el plano V^ vs. U^* en nuestro caso) para llegar a un punto, y regresa por una trayectoria distinta, es decir, su respuesta depende de su estado actual y de la historia de estados anteriores. Es una característica de los sistemas complejos y requiere estudiar la evolución del sistema en el tiempo (condiciones no estacionarias).

Es muy importante contar con estudios meticulosos de la física de los flujos burbujeantes, como este caso de las burbujas de Taylor, ya que la ciencia fundamental permite desarrollar técnicas para predecir el comportamiento de flujos multifásicos en una gran cantidad de situaciones de interés científico y aplicado. Estudiar la velocidad de una sola burbuja en condiciones controladas permite desarrollar modelos de flujos multifásicos aplicados, como el usado por Gutiérrez-Martínez *et al.* (2021), para caracterizar bombeo por inyección de aire (Airlift), o los experimentos de Franco-Gutiérrez *et al.* (2014 y 2022) con generadores de microburbujas, llevados a cabo en colaboración entre el Instituto de Ingeniería Unidad Sisal y la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, con aplicaciones en ingeniería química, mecánica, energía, geotermia y petrolera (entre otras). Actualmente, se siguen haciendo investigaciones con flujos burbujeantes en nuestra sede de Sisal (en colaboración con otras instituciones académicas) y cada año surgen nuevas aplicaciones de las burbujas, pues la imaginación no tiene límites. Es interesante ver que, como en casi todas las disciplinas científicas (experimentales, numéricas y teóricas), se pueden presentar divertidas sorpresas que originan nuevas ideas y aplicaciones.

Agradecimientos

Se agradece al proyecto PAPIIT IB100513, así como al Prof. Jean Fabre por su guía y su paciencia. Gracias también al T. A. Ing. Gonzalo U. Martín Ruiz. |

Referencias

<https://lipcloud.iingen.unam.mx/index.php/s/3cY2ypBp7zigoM>