

**Generación controlada de  
microburbujas y microemulsiones.  
Estabilidad de burbujas en  
interfases.**



**Álvaro Evangelio Sánchez**

Departamento de Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos  
Universidad de Sevilla

*Tesis Doctoral*

Director:

José Manuel Gordillo Arias de  
Saavedra

1 de Diciembre de 2016



A mis abuelos . . .



## Agradecimientos

La primera persona a la que tengo que expresar mi más sincero agradecimiento es José Manuel Gordillo Arias de Saavedra. Además de ser tutor y director de esta Tesis, fue mi profesor en la carrera y tutor tanto de mi proyecto fin de carrera como de mi proyecto fin de máster. Aunque es posible que con el paso del tiempo olvide alguna de la infinitud de cosas que me ha enseñado sobre Mecánica de Fluidos, estoy seguro de que los valores personales que me ha trasmitido irán conmigo para siempre. La segunda persona sin la que podría imaginarme el desarrollo de esta Tesis es Francisco del Campo-Cortes. Tengo que agradecerle, además de su inestimable ayuda en toda la parte experimental, todo su apoyo y todos los ratos de conversación que hemos compartido.

No puedo dejar pasar la ocasión de agradecer al resto del grupo del investigación, Guillaume Riboux, Juan Fernández, Enrique Sánchez y Ramón Abella por todo su apoyo, colaboración y buenos ratos que hemos pasado.

De igual manera me gustaría extender este agradecimiento a todo el Departamento de Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos de la ETSI por haberme hecho sentir como en casa estos últimos años. Especial mención a Manuel González y José Tejada por estar siempre dispuestos a resolver los problemas que surgían en el laboratorio.

Por último y no menos importante, agradecer a mi familia y amigos por estar siempre ahí, dispuestos a escuchar y a ayudarme a desconectar en los momentos más difíciles.



# Índice general

<b>Resumen</b>	<b>9</b>
<b>1. Pressure gradient induced generation of microbubbles</b>	<b>11</b>
1.1. Introduction . . . . .	11
1.2. Phenomenology . . . . .	12
1.3. Analysis . . . . .	19
1.3.1. Necessary conditions for bubble production within the MBR . . . . .	19
1.3.2. Description of bubble generation within the MBR . . . . .	23
1.4. Conclusions . . . . .	28
<b>2. Simple and double microemulsions via the capillary breakup of highly stretched liquid jets</b>	<b>31</b>
2.1. Introduction . . . . .	31
2.2. Phenomenology . . . . .	34
2.2.1. Simple emulsions . . . . .	36
2.2.2. Double emulsions . . . . .	41
2.3. Slender-body theories describing the steady shapes of the liquid ligaments	43
2.3.1. Equations for $r_j(x)$ and $r_i(x)$ in the limit $Re_o \ll 1$ . . . . .	47
2.3.2. Equation for $r_j(x)$ in the limit $Re_o \gg 1$ . . . . .	52
2.4. Scaling the drop diameters and the drop formation frequencies . . . . .	54
2.5. Stability Analysis in the limit of small Reynolds numbers . . . . .	59
2.6. Conclusions . . . . .	61
Appendix: Local stability analysis of steady jets at low values of the Reynolds number . . . . .	62
<b>3. Estabilidad de burbujas en interfases</b>	<b>65</b>
3.1. Introducción . . . . .	65
3.1.1. Motivación . . . . .	65

3.1.2. Estado del arte . . . . .	67
3.2. Experimentación . . . . .	71
3.2.1. Descripción montaje experimental . . . . .	71
3.2.2. Resultados experimentales . . . . .	74
3.2.3. Análisis . . . . .	78
3.3. Conclusiones . . . . .	89
<b>Bibliografía</b>	<b>91</b>
<b>Conclusiones</b>	<b>99</b>



## Resumen

A lo largo de esta Tesis se exponen tres proyectos de investigación asociados a tres problemas de índole fundamental y tecnológico que pertenecen a la rama científica de la Mecánica de Fluidos. Aunque estos proyectos presentan importantes diferencias en cuanto a los objetivos que persiguen, todos tienen en común que surgen del estudio de los procesos de desintegración de láminas o meniscos líquidos o gaseosos que dan lugar a la formación de gotas o burbujas.

En el capítulo 1 se presenta un estudio teórico y experimental sobre un nuevo tipo de procedimiento de generación de microburbujas que tiene la peculiaridad de que permite controlar con gran precisión los gradientes de presión del líquido que confina a un menisco gaseoso. En el capítulo 2 se utiliza el dispositivo presentado en el capítulo anterior con el propósito de generar, en esta ocasión, microemulsiones tanto simples como compuestas a partir de la desintegración en gotas de ligamentos líquidos, simples o compuestos, que presentan un gran estrechamiento aguas abajo. A pesar de la aparente similitud de los procesos de generación tratados en estos dos capítulos, los mecanismos físicos que subyacen a la desintegración de meniscos gaseosos o líquidos son radicalmente diferentes entre sí. En efecto, en el primer caso, la expansión y colapso de las burbujas está gobernada por los gradientes de presión impuestos por el flujo de líquido exterior, mientras que en la generación de microemulsiones el motor de la rotura del ligamento es el crecimiento de una inestabilidad capilar.

El contenido de estos dos primeros capítulos posee una enorme relevancia en aplicaciones tecnológicas en campos tan diversos como la farmacología, la medicina, la cosmética, la industria alimentaria o la ciencia de los materiales puesto que muchos de los procesos de producción en estas industrias dependen de la generación de microburbujas y microemulsiones simples o compuestas con diámetros y frecuencias controlables. En esta Tesis se ha optado por proporcionar una perspectiva sobre el estado del arte científico y tecnológico de los procesos de generación de microburbujas y microemulsiones en los capítulos correspondientes. Asimismo, los conocimientos adquiridos al describir en detalle

los mecanismos físicos responsables de la generación de burbujas y gotas, han permitido diseñar y patentar dos dispositivos orientados a la generación masiva de microburbujas y microemulsiones momonodispersas que dan solución a la abundante demanda tecnológica enumerada con anterioridad.

El capítulo 3 está dedicado a describir, desde el punto de vista fundamental, la causa por la que se desintegran las burbujas situadas en una interfase aire-agua. Este es un proceso que a todos nos es muy familiar puesto que ocurre continuamente, por ejemplo, al desaparecer tanto la espuma blanca generada tras la rotura de una ola como las burbujas que se forman sobre estanques o charcos cuando llueve. Este proceso, que por cotidiano podría pensarse que ya estaba perfectamente entendido y descrito en su totalidad de manera precisa, todavía presentaba una incógnita de especial relevancia: ¿cuál es la causa por la que se nuclea el primer hueco en la lámina de líquido que delimita a la burbuja por su parte superior? En efecto, una vez que se forma el primer hueco antes referido, las fuerzas de tensión superficial se encargan de retraer la lámina a la velocidad de Taylor-Culick, y de su posterior desintegración en gotas micrométricas que se eyectan a velocidades que pueden ser del orden o superiores a los diez metros por segundo. Este proceso fundamental tiene enormes implicaciones climáticas puesto que es crítico para la generación de partículas salinas que terminan constituyendo el aerosol a partir del cual se nuclean las gotas de lluvia.

Los dos primeros capítulos están escritos en inglés y contienen los resultados de los artículos científicos, *Pressure gradient induced generation of microbubbles* (2015, [25]) y *Simple and double microemulsions via the capillary breakup of highly stretched liquid jets* (2016, [26]), publicados en la revista de referencia internacional en el ámbito de la Mecánica de Fluidos: *Journal of Fluid Mechanics*. Por otro lado, tanto el tercer capítulo, cuyos resultados no han sido aún publicados, como las conclusiones, están escritas en español.

# Bibliografía

- [1] Aitken, J. [1881], ‘Dust, fog and clouds’, *Nature* **23**, 387–385.
- [2] Ambravaneswaran, B., Subramani, H., Philips, S. and Basaran, O. [2004], ‘Dripping-jetting transitions in a dripping faucet’, *Phys. Rev. Lett.* **93**, 034501.
- [3] Andreas, E., Edson, J., Monahan, E., Rouault, M. and Smith, S. [1995], ‘The spray contribution to net evaporation from the sea: a review of recent progress.’, *Boundary-Layer Meteorol* **72**, 3–52.
- [4] Anna, S. [2016], ‘Droplets and bubbles in microfluidic devices’, *Ann. Rev. Fluid Mech.* **48**, 285–309.
- [5] Anna, S., Bontoux, N. and Stone, H. [2003], ‘Formation of dispersions using flow focusing in microchannels’, *Appl. Phys. Lett.* **82**, 364–366.
- [6] Aziz, A., Hailes, H. C., Ward, J. M. and Evans, J. R. G. [2014], ‘Long-term stabilization of reflective foams in sea water.’, *RSC Adv* **4**, 53028.
- [7] Barrero, A. and Loscertales, I. G. [2007], ‘Micro- and nanoparticles via capillary flows’, *Ann. Rev. Fluid Mech.* **39**, 89–106.
- [8] Basaran, O., Gao, H. and Bhat, P. [2013], ‘Nonstandard inkjets’, *Ann. Rev. Fluid Mech.* **45**, 85–113.
- [9] Bolaños-Jiménez, R., Sevilla, A., Martínez-Bazán, C. and Gordillo, J. M. [2008], ‘Axisymmetric bubble collapse in a quiescent liquid pool. Part II: Experimental study’, *Phys. Fluids* **20**, 112104.
- [10] Castro-Hernández, E., Campo-Cortés, F. and Gordillo, J. M. [2012], ‘Slender-body theory for the generation of micrometre-sized emulsions through tip streaming’, *J. Fluid Mech.* **698**, 423–445.

- [11] Chauhan, A., Maldarelli, C., Papageorgiou, D. and Rumschitzki, D. [2000], ‘Temporal instability of compound threads and jets’, *J. Fluid Mech.* **420**, 1–25.
- [12] Chong, D., Liu, X., Ma, H., Huang, G., Han, Y., Cui, X., Yan, J. and Xu, F. [2015], ‘Advances in fabricating double-emulsion droplets and their biomedical applications’, *Microfluids and Nanofluids* **19**, 1071–1090.
- [13] Chuang, S. C. and Goldschmidt, V. W. [1970], ‘Bubble formation due to a submerged capillary tube in quiescent and coflowing streams’, *ASME J. Basic Eng.* **92**, 705–711.
- [14] Cohen, I., Li, H., Houglund, J. L., Mrksich, M. and Nagel, S. [2001], ‘Using selective withdrawal to coat microparticles’, *Science* **292**, 265–267.
- [15] Collins, R. T., Sambath, K., Harris, M. and Basaran, O. [2013], ‘Universal scaling laws for the disintegration of electrified drops’, *PNAS*. **110**, 4905–4910.
- [16] Culick, F. E. C. [1960], ‘Comments on a ruptured soap film.’, *J. Appl. Phys* **31**, 1128.
- [17] Damodaran, S. [2005], ‘Protein stabilization of emulsions and foams’, *J. Food Science* **70**, R54–R66.
- [18] de la Mora, J. [2007], ‘The fluid dynamics of taylor cones.’, *Ann. Rev. Fluid Mech.* **39**, 217–423.
- [19] Denkov, N. and Marinova, K. [2006], Antifoam effects of solid particles, oil drops and oil-solid compounds in aqueous foams, *in* ‘Colloidal particles at liquid interfaces’, Cambridge University Press, chapter 10, pp. 383–444.
- [20] Dickinson, E. [2011], ‘Food colloids research: historical perspective and outlook’, *Adv. Colloid Interface Science* **165**, 7–13.
- [21] Driessen, T., Sleutel, P., Dijksman, F., Jeurissen, R. and Lohse, D. [2014], ‘Control of jet breakup by a superposition of two rayleigh-plateau-unstable modes’, *J. Fluid Mech.* **749**, 275–296.
- [22] Eggers, J. and Dupont, T. [1994], ‘Drop formation in a one-dimensional approximation of the navier-stokes equation’, *J. Fluid Mech.* **262**, 205–221.
- [23] Eggers, J. and Villermaux, E. [2008], ‘Physics of liquid jets’, *Rep. Prog. Phys.* **71**(3), 036601/1–79.

- [24] Evangelio, A., Campo-Cortés, F. and Gordillo, J. M. [2014], ‘Procedimiento y dispositivo de generación de emulsiones micrométricas simples y compuestas’, *Patente española con solicitud internacional. Número de publicación: WO2016030551 A1. Número de solicitud: PCT/ES2015/000113*.
- [25] Evangelio, A., Campo-Cortés, F. and Gordillo, J. M. [2015], ‘Pressure gradient induced generation of microbubbles’, *J. Fluid Mech.* **778**, 653–668.
- [26] Evangelio, A., Campo-Cortés, F. and Gordillo, J. M. [2016], ‘Simple and double microemulsions via the capillary breakup of highly stretched liquid jets’, *J. Fluid Mech.* **804**, 550–577.
- [27] Evangelio, A., Sánchez, E. and Gordillo, J. M. [2016], ‘Dispositivo aerodinámico generador masivo de microburbujas’, *Solicitud de patente española con número P201600854*.
- [28] Feng, J., Roché, M., Vigolo, D., Arnaudov, L., Stoyanov, S., Gurkov, T., Tsutsumanova, G. and Stone, H. [2014], ‘Nanoemulsions obtained via bubble-bursting at a compound interface’, *Nature Physics* **10**, 606–612.
- [29] Fernández-Nieves, A., Vitelli, V., Utada, A., Link, D., Márquez, M., Nelson, D. R. and Weitz, D. [2007], ‘Novel defect structures in nematic liquid crystal shells’, *Phys. Rev. Lett.* **99**, 157801.
- [30] Ferrara, K., Pollard, R. and Borden, M. [2007], ‘Ultrasound microbubble contrast agents: Fundamentals and application to gene and drug delivery’, *Ann. Rev. Biomed. Eng.* **9**, 415–447.
- [31] Gañán Calvo, A. [1998], ‘Generation of steady liquid microthreads and micron-sized monodisperse sprays in gas streams’, *Phys. Rev. Lett.* **80**, 285–288.
- [32] Gañán Calvo, A. [2008], ‘Unconditional jetting’, *Phys. Rev. E* **78**, 026304.
- [33] Gañán Calvo, A., Herrada, M. and Garstecki, P. [2006], ‘Bubbling in unbounded coflowing liquids’, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 124504.
- [34] Gañán-Calvo, A. M. [2004], ‘Perfectly monodisperse microbubbling by capillary flow focusing: An alternate physical description and universal scaling’, *Phys. Rev. E* **69**, 027301.
- [35] Gañán-Calvo, A. M. and Gordillo, J. M. [2001], ‘Perfectly monodisperse microbubbling by capillary flow focusing’, *Phys. Rev. Lett.* **87**, 274501.

- [36] Gañán Calvo, A. and Riesco-Chueca, P. [2006], ‘Jetting-dripping transition of a liquid jet in a lower viscosity co-flowing immiscible liquid: the minimum flow rate in flow focusing’, *J. Fluid Mech.* **553**, 75–84.
- [37] Gañán Calvo, A.M. González, R., Riesco-Chueca, P. and Herrada, M. [2007], ‘Focusing capillary jets close to the continuum limit’, *Nature Physics* **3**, 737–742.
- [38] García, F. and Castellanos, A. [1994], ‘One-dimensional models for slender axisymmetric viscous liquid jets’, *Phys. Fluids* **6(8)**, 2676–2689.
- [39] Garstecki, P., Fuerstman, M. J., Stone, H. A. and M., W. G. [2006], ‘Formation of droplets in a microfluidic T-junction - scaling and mechanism of break-up’, *Lab On a Chip* **6**, 437–446.
- [40] Garstecki, P., Gitlin, I., DiLuzio, W., Whitesides, G. M., Kumacheva, E. and Stone, H. A. [2004], ‘Formation of monodisperse bubbles in a microfluidic flow-focusing device’, *Appl. Phys. Lett.* **85**, 2649–2651.
- [41] Garti, N. [1997], ‘Double emulsions: scope, limitations and new achievements’, *Colloids and Surfaces.* **123-124**, 233–246.
- [42] Gekle, S. and Gordillo, J. M. [2010], ‘Generation and breakup of worthington jets after cavity collapse. part 1. jet formation’, *J. Fluid Mech.* **663**, 293–330.
- [43] Gordillo, J., Lhuissier, H. and Villiermaux, E. [2014], ‘On the cusps bordering liquid sheets’, *J. Fluid Mech.* **754**, R1.
- [44] Gordillo, J. M. [2008], ‘Axisymmetric bubble collapse in a quiescent liquid pool. Part I: Theory and numerical simulations’, *Phys. Fluids* **20**, 112103.
- [45] Gordillo, J. M., Sevilla, A. and Campo-Cortés, F. [2014], ‘Global stability of stretched jets: conditions for the generation of monodisperse micro-emulsions using coflows’, *J. Fluid Mech.* **738**, 335–357.
- [46] Guerrero, J., González, H. and García, F. [2012], ‘Spatial modes of capillary jets, with application to surface stimulation’, *J. Fluid Mech.* **702**, 354–377.
- [47] Hariadi, R. F., Winfree, E. and Yurke, B. [2014], ‘Determining hydrodynamic forces in bursting bubbles using dna nanotube mechanics.’, *PNAS* **112**, 6086–6095.
- [48] Herrada, M., Montanero, J., Ferrera, C. and Gañán Calvo, A. [2010], ‘Analysis of the dripping-jetting transition in compound capillary jets’, *J. Fluid Mech.* **649**, 523–536.

- [49] Hertz, B. and Hermanrud, B. [1983], ‘A liquid compound jet’, *J. Fluid Mech.* **131**, 271–287.
- [50] Keim, N. C., Moller, P., Zhang, W. W. and Nagel, S. R. [2006], ‘Breakup of air bubbles in water: Memory and breakdown of cylindrical symmetry’, *Phys. Rev. Lett.* **97**, 144503.
- [51] Lhuissier, H. and Villermaux, E. [2012], ‘Bursting bubble aerosol’, *J. Fluid Mech.* **696**, 5–44.
- [52] Lopez-Leon, T., Koning, V., Devaiah, K. B. S., Vitelli, V. and Fernández-Nieves, A. [2011], ‘Frustrated nematic order in spherical geometries’, *Nature Physics* **7**, 391–394.
- [53] Loscertales, I. G., Barrero, A., Guerrero, I., Cortijo, R., Márquez, M. and Gañán Calvo, A. [2002], ‘Micro/nano encapsulation via electrified coaxial liquid jets’, *Science*. **295**, 1695–1698.
- [54] Loscertales, I. G., Barrero, A., Márquez, M., Spretz, R., Velarde-Ortiz, R. and Larsen, G. [2004], ‘Electrically forced coaxial nanojets for one-step hollow nanofiber design’, *J. Am. Chem. Soc.* **126**, 5376–5377.
- [55] Marín, A., Loscertales, I. G., Márquez, M. and Barrero, A. [2007], ‘Simple and double emulsions via coaxial jet electrosprays’, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 014502.
- [56] Modini, R. L., Russell, L. M., Deane, G. B. and Stokes, M. D. [2013], ‘Effect of soluble surfactant on bubble persistence and bubble-produced aerosol particles’, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **118**, 1388–1400.
- [57] Nabavi, S., Vladisavljević, G., Gu, S. and Ekanem, E. [2015], ‘Double emulsion production in glass capillary microfluidic device: Parametric investigation of droplet generation behaviour’, *Chem. Eng. Science* **130**, 183–196.
- [58] Oğuz, H. N. and Prosperetti, A. [1993], ‘Dynamics of bubble growth and detachment from a needle’, *JFM* **257**, 111–145.
- [59] Oh, H., Kim, S., Baek, J., Seong, G. and Lee, S. [2006], ‘Hydrodynamic micro-encapsulation of aqueous fluids and cells via ‘on the fly’ photopolymerization.’, *J. Micromech. Microeng* **16**, 285–291.
- [60] Prud’homme, R. and Khan, S. [1996], *Foams: theory, measurements and applications*, Surfactant science series volume 57.

- [61] Rayleigh, W. S. [1878], ‘On the instability of jets’, *Proc. of the London Math. Soc.* **10**, 4–13.
- [62] Richter, D. and Veron, F. [2016], ‘Ocean spray: An outsized influence on weather and climate’, *Physics Today* **69**, 34.
- [63] Rodríguez-Rodríguez, J., Gordillo, J. M. and Martínez-Bazán, C. [2006], ‘Breakup time and morphology of drops and bubbles in a high Reynolds number flow’, *J. Fluid Mech.* **548**, 69–86.
- [64] Rodríguez-Rodríguez, J., Sevilla, A., Martínez-Bazán, C. and Gordillo, J. M. [2015], ‘Generation of microbubbles with applications to industry and medicine’, *Ann. Rev. Fluid Mech.* **47**, 405–429.
- [65] Rubio-Rubio, M., Sevilla, A. and Gordillo, J. M. [2013], ‘On the thinnest steady threads obtained by gravitational stretching of capillary jets’, *J. Fluid Mech.* **729**, 471–483.
- [66] Sanz, A. and Meseguer, J. [1985], ‘One-dimensional linear analysis of the compound jet’, *J. Fluid Mech.* **159**, 55–68.
- [67] Shah, R., Shum, H., Rowat, A., Lee, D., Agresti, J., Utada, A., Chu, L., Kim, J., Fernández-Nieves, A. and Martinez, C. and Weitz, D. [2008], ‘Designer emulsions using microfluidics’, *Materialstoday* **11** (4), 18–27.
- [68] Smith, C. S. [1949], ‘On blowing bubbles for Bragg’s dynamic crystal model’, *Jour. Appl. Phys.* **20**, 631.
- [69] Somasundaran, P. and Krishnakumar, S. [1977], ‘Adsorption of surfactants and polymers at the solid-liquid interface’, *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects* **123**, 491–513.
- [70] Spiel, D. E. [1998], ‘In the births of film drops from bubbles bursting on seawater surfaces’, *Journal of Geophysical Research* **103**, 24,907–24, 918.
- [71] Suryo, R. and Basaran, O. [2006], ‘Tip streaming from a liquid drop forming from a tube in a co-flowing outer fluid’, *Physics of Fluids* **18**, 082102.
- [72] Suryo, R., Doshi, P. and Basaran, O. [2006], ‘Nonlinear dynamics and breakup of compound jets’, *Physics of Fluids* **18**, 082107.



- [73] Taylor, G. I. [1959], ‘The dynamics of thin sheets of fluid. iii. desintegration of fluid sheets.’, *Proc. R. Soc. A* **253**, 1274.
- [74] Thorsen, T., Roberts, R. W., Arnold, F. H. and Quake, S. R. [2001], ‘Dynamic pattern formation in a vesicle-generating microfluidic device’, *Phys. Rev. Lett.* **86**(18), 4163–4166.
- [75] Tomotika, S. [1935], ‘On the instability of a cylindrical thread of a viscous liquid surrounded by another viscous fluid’, *Proc. Roy. Soc.* **150**, 322–337.
- [76] Utada, A., Fernández-Nieves, A., Gordillo, J. M. and Weitz, D. [2008], ‘Absolute instability of a liquid jet in a coflowing stream’, *Phys. Rev. Lett.* **100**, 014502.
- [77] Utada, A., Fernández-Nieves, A., Stone, H. and Weitz, D. [2007], ‘Dripping to jetting transitions in co-flowing liquid streams’, *Phys. Rev. Lett.* **99**, 094502.
- [78] Utada, A., Lorenceau, E., Link, D., Kaplan, P., Stone, H. and Weitz, D. [2005], ‘Monodisperse double emulsions generated from a microcapillary device’, *Science*. **308**, 537–541.
- [79] Vernay, C., Ramos, L. and Ligoure, C. [2015], ‘Bursting of dilute emulsion-based liquid sheets driven by a marangoni effect’, *Phys. Rev. Lett.* **115**, 198302.
- [80] Veron, F. [2015], ‘Ocean spray’, *Ann. Rev. Fluid Mech.* **47**, 507–538.
- [81] Villiermaux, E. [2007], ‘Fragmentation’, *Ann. Rev. Fluid Mech.* **39**, 419–446.
- [82] Vu, T. V., Homma, S., Tryggvason, G., Wells, J. C. and Takakura, H. [2013], ‘Computations of breakup modes in laminar compound liquid jets in a coflowing fluid’, *International Journal of Multiphase Flow*. **49**, 58–69.
- [83] Zarzar, D., Sresht, V., Sletten, E., Kalow, J., Blankschtein, D. and Swager, T. [2015], ‘Dynamically reconfigurable complex emulsions via tunable interfacial tensions’, *Nature* **518**, 520–524.
- [84] Zheng, Q. A., Klemas, V. and Hsu, Y. H. L. [1983], ‘Laboratory measurement of water surface bubble life time’, *Journal of Geophysical Research* **88**, 701–706.



## Conclusiones

Haciendo uso de la observación experimental, del modelado teórico y del cálculo numérico, en esta Tesis se han aportado soluciones de relevancia tecnológica relacionadas con la generación controlada de microburbujas y microemulsiones. Esto ha sido posible gracias al conocimiento adquirido de la descripción fundamental de los fenómenos que subyacen a la desintegración de meniscos gaseosos y líquidos confinados por un flujo exterior en el que tanto el gradiente de presión como el estiramiento axial pueden ser controlados de manera muy precisa. Asimismo, en esta Tesis se ha contribuido a dilucidar la causa última de la disgregación de burbujas situadas en interfases en gotas de menor tamaño, fenómeno que ocurre continuamente en la Naturaleza.

En el capítulo 1 se ha presentado un nuevo tipo de dispositivo orientado a la generación periódica de burbujas con diámetros muy similares entre sí y sensiblemente inferiores a sus dimensiones geométricas. La ventaja de este dispositivo frente a otros similares, es que permite controlar de manera muy precisa los gradientes de presión del líquido que rodea a un menisco gaseoso estabilizado gracias a las fuerzas de confinamiento de tensión superficial. A diferencia de lo que ocurre con los ligamentos líquidos, que se desintegran en gotas más pequeñas gracias al crecimiento de inestabilidades capilares, en este caso, el ligamento de gas se disgrega de forma periódica en burbujas que crecen y colapsan por el efecto del valor del gradiente de presión local en aquel punto en el que los esfuerzos normales de origen capilar no son capaces de compensar la diferencia de presión entre el líquido y el gas. Haciendo uso de esta idea y de las ecuaciones de continuidad y de Rayleigh-Plesset, se han proporcionado las leyes de escala que permiten expresar, en función de los parámetros de control, tanto las frecuencias de producción como los diámetros de las burbujas generadas. Los escalados deducidos de esta forma están en muy buen acuerdo con los resultados experimentales obtenidos en un amplio rango de valores del número de Reynolds.

A pesar de no haber sido incluida en el texto de esta memoria, en [27] se puede consultar la solicitud de patente en la que, aprovechando el hecho de que el mecanis-

mo de generación de microburbujas descrito en el capítulo 1 no depende de como se genera el gradiente de presión en el líquido, se describe el diseño de un dispositivo de producción masiva de microburbujas que hace uso de los intensos gradientes de presión que se producen cuando una corriente de líquido rebordea el borde de ataque de un perfil aerodinámico. Este dispositivo contribuirá a mejorar los procesos de aireación y agitación que son utilizados en diversas aplicaciones como el tratamiento de aguas residuales o residenciales, la mezcla de líquidos, la homogeneización de líquidos almacenados en depósitos, los procesos químicos, la piscicultura, la fabricación de bebidas alcohólicas y de refrescos y los procesos de suspensión, dispersión, o transferencia de calor.

En el capítulo 2 se ha empleado el dispositivo ya descrito en el capítulo 1 para producir microemulsiones simples o compuestas. En este caso, la corriente exterior confina a un ligamento de líquido, simple o compuesto, sometiéndolo a un intenso estrechamiento aguas abajo. A diferencia de lo que ocurre en el caso de ligamentos gaseosos, en estos experimentos, el motor de la desintegración del chorro en gotas más pequeñas es el crecimiento de una inestabilidad capilar. Haciendo uso de la teoría de cuerpos esbeltos, se ha proporcionado un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias que permiten predecir con gran exactitud la forma estacionaria que adoptan los ligamentos líquidos generados en un amplio rango de valores del número de Reynolds.

Los experimentos también revelan que, en aquellos casos en los que el flujo está dominado por esfuerzos viscosos, las gotas se generan de forma periódica. Al ser constantes los caudales de los líquidos a emulsionar, los diámetros de las gotas obtenidas son, pues, muy similares entre sí. Motivados por estas observaciones, se ha empleado la teoría de cuerpos esbeltos reteniendo los términos no estacionarios presentes en la ecuación de continuidad y en la condición cinemática de interfase libre, para deducir una relación de dispersión que permite calcular de manera muy sencilla la longitud de onda de las perturbaciones capilares que poseen un mayor factor de crecimiento. Utilizando la hipótesis habitual de que son precisamente estas perturbaciones las responsables de la disgregación del chorro del líquido en gotas, se ha proporcionado un sistema de ecuaciones algebraicas que permite predecir con gran precisión tanto la frecuencia de producción como los diámetros de las gotas obtenidas, sean simples o compuestas. Asimismo, esta relación de dispersión ha sido empleada para calcular los valores del número capilar crítico por encima de los cuales se generan los chorros estacionarios que dan lugar a una generación periódica de gotas monodispersas, estando los valores obtenidos en muy buen acuerdo con los datos experimentales cuando se retienen en el análisis de estabilidad global los términos no

paralelos. Los valores del número capilar crítico inherentes a nuestro dispositivo son inferiores a los encontrados en otras tecnologías similares, lo que supone un ahorro de materia prima y de energía. Es por esta razón, y por los innumerables procesos tecnológicos que demandan la generación controlada de emulsiones simples y compuestas en las industrias alimentaria (encapsulación de aditivos), fitosanitaria, cosmética, farmacéutica (transporte selectivo de principios activos), química (fabricación de detergentes), o de los materiales (fabricación de dispositivos ópticos mediante cristales líquidos), por lo que esta tecnología ha sido patentada ([24]).

Por último, el capítulo 3 está dedicado a analizar la causa última responsable de la desintegración de las burbujas situadas en una interfase agua-aire, situación física que forma parte de nuestra experiencia cotidiana. Esta parte de la Tesis esta relacionada con los capítulos 1 y 2 en el aspecto de que aborda la desintegración de la fina lámina de líquido que delimita la parte superior de la burbuja con la atmósfera circundante. Una vez que se nuclea el primer hueco sobre esta delgada capa de líquido, las fuerzas de tensión superficial son las responsables de aumentar el radio de dicho hueco al retraer la lámina a la velocidad de Taylor-Cullick; asimismo, las fuerzas de tensión superficial también son las responsables de la desintegración en gotas de la región con geometría toroidal que constituye la frontera entre el hueco y la lámina.

El proceso de drenaje de líquido y posterior fragmentación de la lámina en gotas había sido objeto de estudios como los llevados a cabo por Zheng ([84]), Spiel ([70]) o Lhuissier y Villermaux ([51]). Sin embargo, en estos trabajos no se respondía a la siguiente cuestión fundamental: ¿cuál es la causa por la que nuclea el primer hueco sobre la superficie de la burbuja? En esta Tesis se ha llevado a cabo un cuidadoso estudio experimental en el que, gracias a la correcta iluminación y al uso simultaneo de dos cámaras de alta velocidad situadas en ángulo recto, se ha observado que, cuando una burbuja emerge desde el volumen de líquido hacia la superficie, las pequeñas partículas hidrofóbicas que, de manera natural, flotan en la interfase aire-agua, quedan atrapadas en la delgada capa de líquido. Cuando, como causa del drenaje capilar, el espesor de la lámina de líquido alcanza un valor proporcional al diámetro de estas partículas, y puesto que el sólido es hidrofóbico, las fuerzas de tracción de tensión interfacial desplazan la línea de contacto radialmente hacia fuera del sólido, ocasionando de esta forma la aparición del primer hueco sobre la interfase. Un mecanismo similar al descrito con anterioridad es el responsable de producir la nucleación de huecos en láminas líquidas que contienen go-

tas de un aceite con una tensión interfacial menor que la del agua, como se describe en [79].

En este capítulo también se ha desarrollado un modelo fenomenológico basado en estas observaciones que, además de reproducir cualitativamente la distribución de espesores de la lámina de líquido en el momento de la rotura deducidos de los experimentos, también tiene en cuenta el grado de contaminación de la interfase. El modelo, que permite reproducir la tendencia  $h_b \propto R^2$  ya anticipada en [51], es compatible tanto con nuestros experimentos, como con los publicados por [51], [70] y [84], que fueron obtenidos utilizando agua con diferentes grados de contaminación.

Los principales resultados de los capítulos 1 y 2 se recogen en [25], [26], artículos publicados en la revista de referencia a nivel internacional en el campo de la mecánica de fluidos. La posición del *Journal of Fluid Mechanics* es, de acuerdo con el JCR 2015 y atendiendo a su factor de impacto, 2.514, la decimoséptima de las ciento treinta y cinco revistas incluidas en la categoría *Mecánica* y la octava de las treinta revistas incluidas en la categoría *Física, fluidos y plasmas*.