

## **SOBRE LA INTERACCION DE ANILLOS VORTICOSOS Y PAREDES<sup>1</sup>**

**Ing. Juan Carlos Ferreri**

### **INTRODUCCION**

En esta comunicación se presenta una revisión, razonablemente exhaustiva, relacionada con unos objetos intrigantes en la Mecánica de los Fluidos: los anillos vorticosos y, en particular, en su interacción con paredes sólidas. Los anillos vorticosos (que denominaremos con la sigla AV, o AVs para el plural, de aquí en más) están caracterizados por ser volúmenes de fluido que tienen una vorticidad alta y concentrada. Cuando dicho volumen tiene una estructura toroidal conforma lo que se denomina un “anillo vorticoso”. La particularidad de esta estructura es que no permanece estática en el fluido, sino que se desplaza a lo largo de una trayectoria rectilínea, alineada con el eje del toro. Además, si el fluido que conforma el toro está teñido con un color diferente al del seno de aquel en que se desplaza, se pueden obtener visualizaciones muy interesantes. Por ello ha sido (y continúa siendo) en la actualidad objeto de estudio, de elucidación de la física de su formación e interacción y de visualizaciones muy elaboradas. Por supuesto, el AV se desplaza perdiendo su estructura debido a la viscosidad, difundiéndose a medida que avanza. Todo esto será aclarado en lo que sigue.

¿Son los AVs elementos muy ajenos a la vida común? De ninguna manera: quien genera anillos de humo exhalando de manera impulsiva el producido por el fumar o quien deja caer una gota de tinta en un vaso lleno de agua desde una pequeña altura desde su superficie, puede generar AVs. La Figura 1 muestra una combinación de ejemplos de la primera situación, tomados de Internet, mientras que la Figura 2 ejemplifica la segunda. Aún vista esta familiaridad, resultan algo sorprendentes los resultados de una búsqueda de información online. En efecto, de una búsqueda selectiva en Internet y solamente a través de GOOGLE SCHOLAR, surgen los siguientes datos, seleccionando “vortex rings” sin citas y patentes: “todos los tiempos”: 23500; desde 1700 a 1973: 1460; en 1973: 112. Cuando la búsqueda es “vortex rings” + wall + vicinity, los resultados son: 3490, 176, 18. La conspicua inclusión del año 1973 será evidente más adelante.

---

<sup>1</sup> Versión de archivo de la presentación en la Sesión Privada Ordinaria del 29 de junio de 2017, titulada “MIS ANILLOS FAVORITOS”. La demora de procesamiento de la comunicación original me permite incluir unas pocas actualizaciones hasta la actualidad (octubre 2019). La presentación oral está constituida esencialmente por material audiovisual y por ello la lectura de ese texto debería ser complementada con la vista de la versión oral, disponible en [www.ciencias.org.ar](http://www.ciencias.org.ar) En todos los casos, el material utilizado está libremente accesible en Internet y, en el caso de vídeos se ha notificado al autor respectivo y se ha indicado la fuente con un hipervínculo, disponible como notas de la transparencia. Nótese que, debido al tiempo transcurrido, algún vínculo puede no estar disponible en la actualidad.



Figura 1. Una manera familiar de generación de anillos de humo<sup>2</sup>



Figura 2. AV generado a partir de una gota de tinta<sup>2</sup>

El tema de los anillos AVs ha sido estudiado desde hace mucho tiempo. En efecto, *en 1867*, H. Helmholtz<sup>3</sup> publicó la teoría matemática de los vórtices, incluyendo la del movimiento individual y la interacción de anillos. A partir de este trabajo, W. Thomson (Lord Kelvin) aportó una importante contribución en el marco de la teoría referida a sus trabajos sobre “átomos vorticosos”<sup>4</sup>. *En 1885*, J.J. Thomson y H.F. Newall, publicaron un trabajo<sup>5</sup> que describe las características de la formación de anillos asociada a partir de gotas, como la considerada en la Figura 2. La publicación de trabajos ha sido continuada y profusa, como indicamos anteriormente y la de vídeos y fotografías con interés científico también lo es, como puede ser verificado en la “Gallery of Fluids Motions”, de la American Physical Society, Division of Fluid Dynamics (APS-FDD) que, en todos los años recientes, discrimina premios al respecto<sup>6</sup>. En particular, en 2010<sup>7</sup>, en una de las reuniones anuales se dedicó una sesión especial a este tópico. El interés de estas estructuras está también simbolizado en la elección de la fotografía utilizada para ilustrar la portada de uno de los

<sup>2</sup> <http://www.abc.net.au/science/surfingscientist/toroidalvortex.htm>

<sup>3</sup> H. Helmholtz (1867): LXIII. On Integrals of the hydrodynamical equations, which express vortex-motion, *Philosophical Magazine Series 4*, 33:226, 485-512; <http://dx.doi.org/10.1080/14786446708639824>

<sup>4</sup> Thomson, Sir William, On Vortex Atoms, *Phil. Mag.* (4) xxxiii, 1867, pp. 19-24

<sup>5</sup> J.J. Thomson and H.F. Newall, V. On the formation of vortex rings by drops falling into liquids, and some allied phenomena, *39*, *Proc. R. Soc. London*, <http://doi.org/10.1098/rspl.1885.0034>

<sup>6</sup> <https://gfm.aps.org/meetings?>

<sup>7</sup> <http://meetings.aps.org/Meeting/DFD10/Session/EN> 63rd Annual Meeting of the APS, Division of Fluid Dynamics, Long Beach, California, 2010

libros más importantes para la enseñanza de la Fluidodinámica.<sup>8</sup> Tal vez, el interés de compilar visualizaciones de movimientos de fluidos se sistematizó a partir de un libro ensamblado por Milton Van Dyke<sup>9</sup>. El premio de la APS-FDD lleva su nombre.

Cabe reseñar ahora cuales son las contribuciones más interesantes sobre la dinámica de los AVs, dejando constancia que solamente haremos algunas consideraciones generales, puesto que hay dos revisiones: a) una de Zodoordny<sup>10</sup> en la que se reconsideran los aspectos teóricos y también se hacen algunas consideraciones “prácticas” de su uso eventual como armas sigilosas; b) la de Meleshko et al.<sup>11</sup> de 2011, cuyo original era de 2009, que tiene numerosas menciones interesantes de tipo histórico y más de dos centenares de referencias. Menciona muchos más datos que los antes mencionados como encontrados a partir de Internet, debido a que incluye bibliografía en ruso. También, un conjunto importante de revisiones no exhaustivas se encuentra en capítulos de varias tesis de doctorado.

Con referencia a la formación de AVs a partir de gotas que penetran en un líquido a través de su superficie libre, conviene citar textualmente<sup>4</sup> que: “When a drop of ink falls into water from not a great height, it descends through the water as a ring, in which there is evidently considerable rotation about the circular axis passing through the centres of its cross sections:...”. Una descripción<sup>2</sup> de un proceso experimental elemental para generar AVs puede visualizarse en la [Figura 3](#), que ilustra la secuencia “natural” para ello.

La generación de AVs a partir de gotas ha sido descrita y caracterizada de manera detallada bastante recientemente<sup>12</sup>. En efecto, en la citada referencia se especifican estudios experimentales que tienen un grado de detalle sin precedente (utilizando la adquisición ultra-rápida de imágenes a partir de rayos X) y que permiten caracterizar el proceso de formación de anillos sobre la base de dos números característicos. El primero es el número de Weber, que describe la penetración y penetración de la gota a través de la superficie libre del fluido receptor, y el segundo el número de Ohnesorge, que define cuando se forma un anillo.

Las definiciones y los criterios son los siguientes:

a) Número de Weber: considera la relación entre las fuerzas dinámicas y la tensión superficial, a saber:  $W = \rho D U^2 / \gamma$ , donde  $\rho$  es la densidad del fluido,  $D$  es el diámetro de la gota,  $U$  la velocidad de impacto de la gota y  $\gamma$  la tensión superficial del fluido. El criterio es  $W < 64$ . Estos autores muestran que no es un criterio suficiente, dado que han observado anillos para  $W > 64$ ; b) Establecen experimentalmente que para que se formen anillos que penetren el fluido debe satisfacerse, además, que el número de Ohnesorge, que mide la relación entre las fuerzas viscosas y las de capilaridad,  $O_h = \mu / (\rho D \gamma)^{0.5}$ , debe ser  $O_h < 0.011$ . Estos autores muestran muchos otros resultados, pero estos dos criterios son, tal vez, los más relevantes. Las visualizaciones, disponibles como vídeos (ver los vínculos en la citada referencia) son realmente interesantes.

---

<sup>8</sup> G.K. Batchelor, An Introduction to Fluid Dynamics, Oxford University Press, 1967

<sup>9</sup> M. Van Dyke, An Album of Fluid Motions, The Parabolic Press, Stanford, California, 1982

<sup>10</sup> S. Zodoordny, Revised Theory of Vortex Rings - A Simplified Review of the State of the Art, TM 66-01, U.S. Res. Army Lab, April 1966

<sup>11</sup> V. V. Meleshko, A. A. Gourjii y T. S. Krasnopol'skaya, Vortex Rings: History and State-Of-The-Art, Journal of Mathematical Sciences, Vol. 173, No. 4, July 2011

<sup>12</sup> Ji San Lee, Su Ji Park, Jun Ho Lee, Byung Mook Weon, Kamel Fezzaa & Jung Ho Je, Origin and dynamics of vortex rings in drop splashing, NATURE COMMUNICATIONS, 6:8187, 10.1038/ncomms9187, www.nature.com/naturecommunications

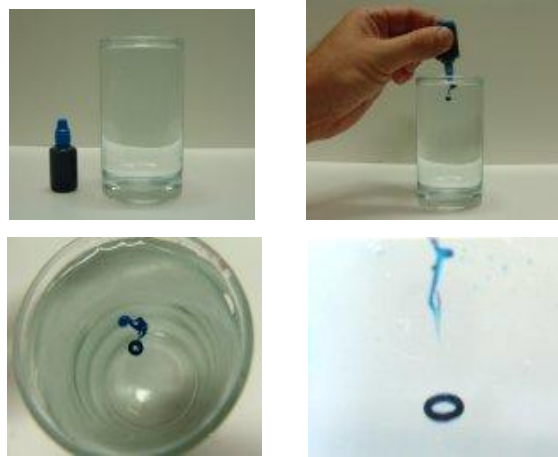


Figura 3 Ilustración de una manera elemental<sup>2</sup> de generar un AV a partir de gotas

Tal vez los casos más llamativos son los que corresponden a la formación y el desplazamiento libre de AVs en aire. En la [Figura 1](#) hemos mostrado algunos ejemplos asociables a lo cotidiano. En los trabajos científicos se utilizan aparatos de construcción elaborada que permiten, además de la repetibilidad de los AVs generados, la ubicación adecuada de instrumentos de registro y medición. La escala de los anillos varía según los casos. En todos los casos, la generación de un AV parte de un movimiento impulsivo de un fluido contenido y que emerge de una boca del recipiente. El anillo es generado a partir del efecto de la fricción en el borde del orificio. Un caso de sumo interés y de escala macroscópica (100 a 200 m) y de origen natural son los que se visualizan en erupciones de monte Etna<sup>13</sup>.

También, en laboratorio<sup>14</sup>, pueden producirse otros de interés de gran escala como con el generador mostrado en la [Figura 4](#).

La generación, la trayectoria de un AV de gran escala y su visualización<sup>15</sup> es notable y resulta de gran atractivo visual. Es por ello por lo que una exploración en Internet permite encontrar una gran cantidad de vídeos, incluyendo algunos correspondientes a espectáculos de entretenimiento en televisión.



Figura 4 Un generador de AVs de gran escala<sup>14</sup>

<sup>13</sup> <http://www.fiboni.com/2013/04/the-mystery-behind-smoke-rings/>

A la fecha se puede visualizar un vídeo.

<sup>14</sup> <http://makezine.com/projects/blow-smoke-vortex-cannons/>

<sup>15</sup> <http://science.wonderhowto.com/news/vortex-cannon-belches-jumbo-smoke-rings-0113498/>

## INTERACCION DE AVs LIBRES Y CON PAREDES

El primer trabajo en explicar físicamente el comportamiento de un AV en las cercanías de una pared fue originado por el autor<sup>16</sup>, en colaboración con el Prof. U. Boldes en 1973 y permitió, para una configuración con simetría axial, verificar resultados previos relacionados con pares de vórtices rectilíneos<sup>17</sup>. Este hecho está explicitado en la citada referencia del autor. En este caso, los vórtices son generados a partir de gotas, a partir de un tubo gotero de pared muy delgada, afilada, de 4 mm de diámetro y con un desplazador que permitía la repetibilidad de los experimentos. La altura de la gota desde la superficie libre era de 15 mm. La [Figura 5](#), anotada convenientemente, está tomada de la publicación. En ella se muestra que la evolución del AV hacia la pared de vidrio es registrada en dos vistas, de frente y en planta, en este caso a partir de un espejo a 45° pegado a la superficie horizontal. El registro era fílmico, a 100 cuadros por segundo. Las trayectorias fueron analizadas y cuantificadas a partir de mediciones mediante un análisis gráfico de los cuadros del filme tomados a intervalos regulares. En este trabajo se mostró que, si un AV tiene suficiente energía, al llegar a las inmediaciones de la pared la interacción con una capa vorticiosa que genera y que se desprende de la pared, provoca el “rebote” del anillo que invierte momentáneamente su movimiento, retomándolo luego en un proceso que puede repetirse. Esta interpretación de la dinámica de la interacción fue visualizada a partir de la deposición de una capa de colorante, que era “barrida” por el AV, mostrando la capa vorticiosa. De paso, el término “rebote” (“rebound” en inglés) fue introducido para este comportamiento por primera vez en esta nota y fue utilizado en todos los trabajos posteriores<sup>18</sup>.

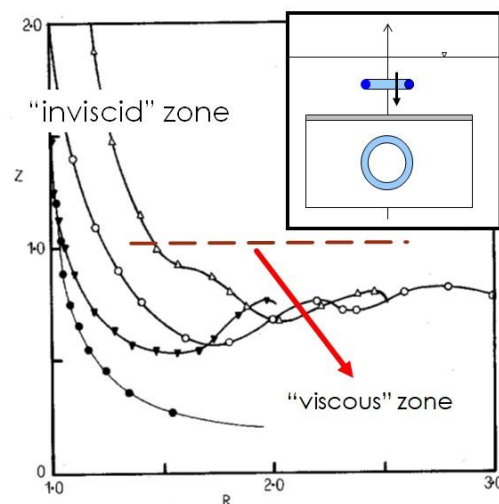


FIG. 1. Trajectories of vortex rings toward a wall. ●, results from Ref. 2. △○▼, results from experiments.

Figura 5 Esquema de un AV avanzando hacia una pared en vista y planta<sup>16</sup>

La [Figura 6](#), también tomada de la citada referencia 16, ilustra la secuencia de cuadros de uno de los filmes y es una composición *ad hoc*. La estrella indica el momento en la que el AV alcanza la posición más alejada luego del rebote.

<sup>16</sup> U. Boldes, J.C. Ferreri, On the Behavior of Vortex Rings in the Vicinity of a Wall, *Physics of Fluids*, vol. 16, pp. 2005-2006, 1973

<sup>17</sup> J. Harvey, F. Perry, Flowfield Produced by Trailing Vortices in the Vicinity of the Ground. *AIAA Journal*, 9(8), 1659-1660, 1971

<sup>18</sup> Es interesante notar que, desde la publicación de 1973 y hasta 2019, el trabajo ha sido citado anualmente de manera continuada en 53 oportunidades.

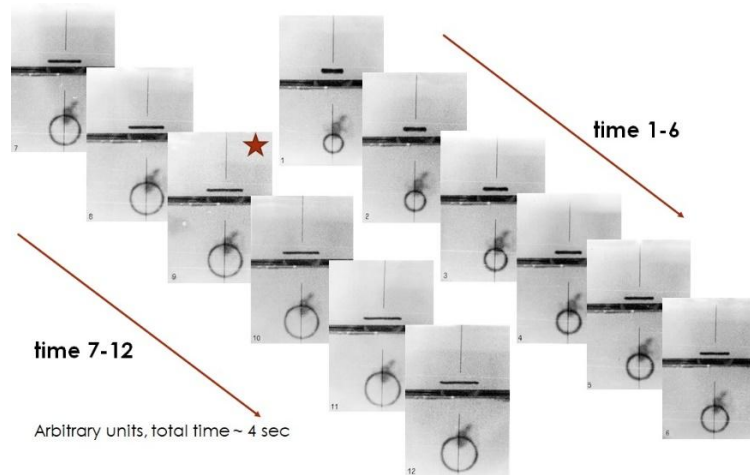


Figura 6 Rebote de un AV contra una pared<sup>16</sup>

Por otra parte, también se dio una explicación mecanicista de la interacción, pero no fue aceptada por ser “simplista”. Con todo, la explicación fue publicada<sup>19</sup> con algún detalle.

Es de interés para esta contribución complementarla con un conjunto reducido de menciones a trabajos experimentales científicos, en particular los de T.T. Lim y sus colaboradores, primero en la University of Melbourne, Australia y luego en la National University of Singapore, debido a su alta calidad, relacionados con los AVs y más específicamente a la interacción de los AVs con paredes. Un aparato experimental de Lim et al.<sup>20</sup> está esquematizado en la [Figura 7](#), tomada de dicha referencia. Los trabajos relacionados con esta disposición o similares han permitido verificar y cuantificar algunos aspectos de sumo interés en la dinámica de AVs.

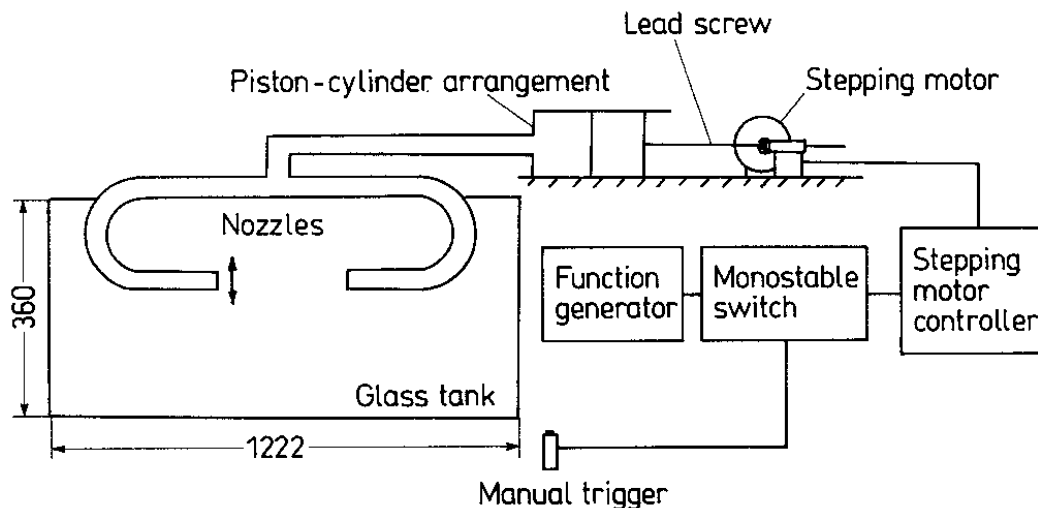


Figura 7 Esquema del aparato experimental de T.T. Lim et al.<sup>15</sup>

Este esquema experimental es utilizado, obviamente con variantes, en la mayoría de los estudios de evolución e interacción de vórtices y en este caso el fluido es agua. En la citada referencia, se muestran diversos experimentos de interacción, que confirman lo afirmado en las referencias 16 y 18. Por otra parte, se muestran resultados de colisiones de

<sup>19</sup> Boldes, U. and Ferreri, J.C., “Sobre el comportamiento de un anillo vorticoso en las cercanías de una pared”, in Spanish, Pub. 182, Depto. De Aeronáutica, FI-UNLP. 1972

<sup>20</sup> Lim, T. T., Nickels, T. B., & Chong, M. S, A note on the cause of rebound in the head on collision of a vortex ring with a wall. *Experiments in Fluids*, 12, 41–48, 1991



frente (head-on collisions) de anillos simétricos, que están en sintonía con lo predicho por la teoría clásica. Un aspecto interesante de interacción es el ilustrado en la [Figura 1](#) con dos anillos. Se muestra teóricamente<sup>3</sup> que en este caso los anillos se sobrepasan sucesivamente (leapfrogging en inglés) pasando uno por dentro del otro. Obviamente, la difusión de la vorticidad impide esto, más allá de un par de ciclos. La Figura 8<sup>21</sup>, ilustra un experimento de esta interacción. Es importante señalar que Lim, hizo públicos un conjunto de vídeos que, con su conocimiento, fueron reproducidos en la versión multimedial<sup>1</sup> citada al inicio. El sitio web no se encuentra disponible en la actualidad, ni su autor localizable.

Como es de esperar, los experimentos numéricos utilizando códigos de cálculo detallados (Computational Fluid Dynamics codes) han proliferado recientemente. Es importante mencionar que los resultados confirman los hallazgos experimentales mencionados.

La bibliografía es profusa, con algunas tesis de doctorado en temas directamente relacionadas con los AVs hasta bastante recientemente. Las paredes son porosas o de lecho móvil en algunos casos y también se consideran ángulos de inclinación variables. La interacción con lechos es aprovechada por algunos animales (Ctenóforos - Ocyropsis) de zooplancton<sup>22</sup> que generan AVs.

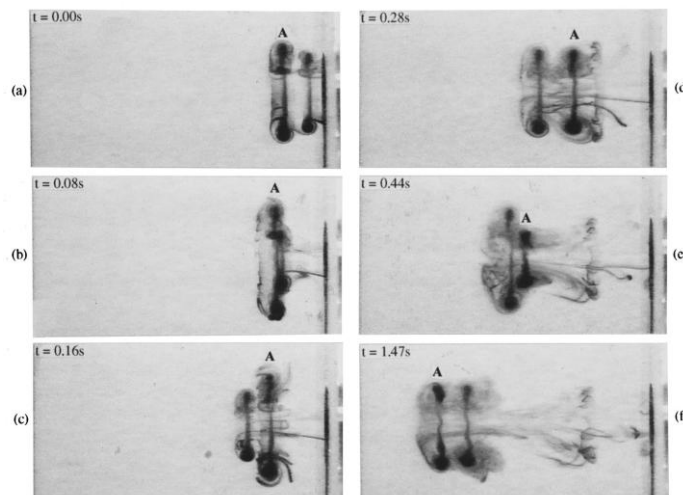


Figura 8 Anillos que se sobrepasan por adentro (leapfrogging AVs)<sup>21</sup>

## CONCLUSIONES

Se ha presentado una versión en texto de una presentación mayormente multimedial referida a los AVs en aspectos relacionados con su interacción con paredes. La lectura de este trabajo debería ser complementada con dicha versión, disponible públicamente en [www.ciencias.org.ar](http://www.ciencias.org.ar), que ha sido actualizada a la fecha de esta edición (octubre de 2019). Los resultados originales de 1973 publicados por el autor, juntamente con el Prof. U. Boldes, han sido confirmados plenamente y dicho trabajo es citado hasta la fecha, lo que constituye una satisfacción. Por razones de brevedad, no se ha incluido una gran cantidad de referencias que, para el lector interesado, están disponibles a pedido.

<sup>21</sup> Lim, T.T., A note on the leapfrogging between two coaxial vortex rings at low Reynolds numbers, *Phys. Fluids* 9 (1), pp. 239-241, 1997

<sup>22</sup> Gemmell B.J., Colin S.P., Costello J.H., Sutherland K.R., A ctenophore (comb jelly) employs vortex rebound dynamics and outperforms other gelatinous swimmers, *R. Soc. open sci.* 6: 181615, 2019  
<http://dx.doi.org/10.1098/rsos.181615>