

ANTONIO BARRERO, PROFESOR Y MAESTRO

*Por el Dr. D. José Manuel Gordillo Arias de Saavedra
Departamento de Ingeniería Aeroespacial y
Mecánica de Fluidos, Escuela Superior
de Ingenieros, Universidad de Sevilla.*

Resumen

Este texto reproduce de manera íntegra el discurso que pronuncié con motivo de la sesión necrológica en memoria y recuerdo del Excelentísimo Profesor Antonio Barrero Ripoll, que la Academia Sevillana de Ciencias organizó en el Paraninfo de la Universidad de Sevilla el 28 de Marzo de 2011. Aquí se exponen de manera cronológica los principales logros que Antonio Barrero consiguió durante su prolífica y dilatada carrera como investigador, profesor y maestro de tantos otros investigadores que, a la postre, hemos dirigido nuestras respectivas carreras profesionales hacia la docencia y la investigación en Mecánica de Fluidos. Los datos que se proporcionan han sido extraídos de algunas de las publicaciones científicas del profesor Barrero así como de los recuerdos apropiadamente contrastados que guardo de una primera etapa como alumno suyo y de otra posterior, en la que fuimos compañeros de Departamento.

Abstract

This text reproduces the speech given to honor the memory of the late Professor Antonio Barrero Ripoll, organized by the Academia Sevillana de Ciencias and held at the Universidad de Sevilla on March 28th 2011. The information provided, which has been extracted from several of the main publications Professor Barrero coauthored as well as from my own memories coming from a first period as his student and a latter one as his colleague, has been structured chronologically.

PRESENTACIÓN Y AGRADECIMIENTOS

Excelentísimo Rector Magnífico de la Universidad de Sevilla, Excelentísimos señores Vicerrectores, Ilustrísimo Presidente de la Academia Sevillana de Ciencias e Ilustrísimos Académicos, Amigos y familiares de Antonio, Regina,

Permítanme agradecer a la Academia Sevillana de Ciencias la invitación a participar en este acto y, en particular, al Académico Javier Aracil Santonja, por confiarme la nada

fácil tarea de hablar sobre la obra de Antonio Barrero Ripoll. Huelga decir que sería necesario mucho más que este homenaje para describir de manera justa y rigurosa su rica producción científica, extensa, variada y de gran profundidad. Debo añadir que, para evitar cualquier distorsión de la realidad a la hora de hacer este breve compendio, he tenido la suerte de contar con el asesoramiento de Miguel Pérez-Saborid, a quien agradezco enormemente su inestimable ayuda.

LA ETAPA DOCTORAL Y LOS PRIMEROS AÑOS COMO CATEDRÁTICO EN LA ESCUELA DE INGENIEROS DE SEVILLA

Aquéllos que conocimos a Antonio Barrero sabemos de sus dotes de gran comunicador y pudimos disfrutar del talento natural que poseía para conversar y para transmitir de forma amena y clara tanto hechos de la vida cotidiana como los conceptos más intrincados, una virtud que le hacía captar fácilmente la atención de sus interlocutores. Hablaba con frecuencia de su época como estudiante de la escuela de Aeronáuticos de Madrid, manifestando siempre un profundo respeto por sus maestros, Ignacio da Riva, Amable Liñán y Juan Ramón Sanmartín. Gracias al testimonio en forma de publicaciones y a los recuerdos de los que le escuchamos, no ha sido difícil reconstruir lo que aconteció en su vida científica durante sus diez primeros años como catedrático de Mecánica de Fluidos en la Universidad de Sevilla, así como durante el breve período que necesitó para completar su Tesis doctoral.

La Tesis de Antonio Barrero, que versó sobre la fusión por confinamiento inercial mediante láser, fue la primera tutelada por el profesor Sanmartín, quien había trabajado hasta poco antes en el Laboratorio de Física de Plasmas de Princeton. Fue precisamente en esta Universidad donde a comienzos de los años 50 del siglo pasado, Lyman Spitzer dirigió el proyecto Matterhorn, que estaba encaminado a estudiar la viabilidad de la fusión como fuente inagotable de energía limpia. En el tipo de fusión estudiado por Antonio, la fusión del combustible se logra haciendo uso de un haz intenso de luz láser que comprime, antes de su escape libre al vacío, una bolita de deuterio y tritio de unos pocos milímetros de diámetro hasta las enormes densidades y presiones (del orden del billón de atmósferas) requeridas para que se produzca la reacción termonuclear. La energía de la luz láser se deposita en una superficie crítica, relativamente alejada de la superficie de ablación, y se transporta a ésta por conducción térmica electrónica. Este flujo de energía es el responsable de la violenta ablación del material y de la denominada presión de ablación que el material que escapa ejerce sobre la superficie. La hidrodinámica de la interacción láser-plasma juega un papel fundamental en el proceso de transferencia energética ya que la energía que escapa al vacío con el material ablacionado debe minimizarse y la compresión del material debe realizarse de la forma más isentrópica posible en el corto tiempo que dura el proceso. Esto requiere que la presión de ablación varíe de forma adecuada.

Desde su inicio, la investigación en fusión inercial se concentró pronto en los grandes laboratorios, donde era realizada usando modelos hidrodinámicos de la interacción

láser-plasma muy complejos que exigían costosos y complicados cálculos numéricos. Sin embargo, debido a su complejidad, dichos modelos no permitían obtener ni resultados exactos ni conclusiones claras sobre el comportamiento hidrodinámico del plasma. Fue aquí precisamente donde el trabajo pionero de Antonio Barrero en aquellos días en los que las capacidades computacionales y experimentales del país eran muy limitadas, resultó clave para mostrar una forma de hacer investigación competitiva frente a la de los grandes laboratorios. En efecto, producto de su tesis doctoral, que comenzó en 1975, fue una serie de artículos publicados entre los años 1977 y 1978 en la prestigiosa revista *Physics of Fluids* (Sanmartin & Barrero, 1977, 1978a, 1978b) en los que por primera vez se analizaba la fluidodinámica del plasma mediante modelos matemáticos que, aunque de forma simplificada, incluían los principales fenómenos físicos involucrados en el proceso de fusión. De esta forma, los resultados analíticos obtenidos permitían entender algunos aspectos de la compleja física de la interacción láser-plasma observados experimentalmente.

En particular, en estos primeros trabajos de Antonio se consideraron geometrías planas, unidireccionales, en los que un semi-espacio de materia, limitando inicialmente con el vacío, se irradiaba uniformemente con un pulso láser. Se demostró que para pulsos lineales con el tiempo, las ecuaciones en derivadas parciales que gobiernan el movimiento del plasma eran de semejanza; esto es, que podían reducirse a un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias, fuertemente no lineales, pero cuya resolución era mucho más abordable que la del sistema original. De esta forma, por primera vez se puso de manifiesto la importancia capital en la fluido-dinámica de los procesos de fusión de un parámetro adimensional que incluye la influencia de tanto el pulso como del plasma. Asimismo, en estos artículos se analizaron los regímenes que aparecían para valores grandes y pequeños de este parámetro. En particular, se determinó por primera vez de forma rigurosa la estructura del hasta entonces controvertido régimen de deflagración. En efecto, en éste régimen, dentro de la onda de deflagración, se encuentra la superficie crítica que separa una región que se expande isentrópicamente al vacío de otra donde se produce una compresión isentrópica y ésta última región, se encuentra tras una onda de choque que se propaga hacia el interior del material termonuclear. Como pueden imaginar, esta descripción nada trivial de la estructura en capas que aparecen en el plasma tras ser irradiado, fueron más que suficientes para que Antonio se doctorase en el año 1978.

Sólo dos años más necesitó Antonio para ganar por oposición la cátedra de Mecánica de Fluidos de la Universidad de Sevilla, donde continuó investigando en la fusión por confinamiento inercial. Fruto de este trabajo fueron las tesis doctorales de Antonio Fernández García-Navas, hoy profesor de la escuela de Ingenieros de esta Universidad y la de Ángel Velázquez, hoy profesor en la escuela de Aeronáuticos de Madrid. En la primera de ellas se analizó el proceso de fusión de un semiplano de material combustible nuclear que es irradiado por un haz de iones, mientras que en la posterior se extendió este mismo análisis al caso de la geometría esférica.

LOS VERANOS EN YALE Y EL HALLAZGO DEL ELECTROSPRAY

Durante estos diez primeros años en Sevilla, Antonio no desarrolló su labor investigadora de manera aislada, sino que continuó trabajando con el profesor Sanmartín y con su grupo. Estas colaboraciones fueron enriquecidas por las estancias veraniegas en la Universidad de Yale, en las que Antonio colaboró con el insigne físico de plasmas Ira Bernstein. Una de las consecuencias más visibles de esta interacción fue que la última Tesis tutelada por Bernstein sobre el papel de las ondas acústicas en la turbulencia solar fue la de quien a su vez tuteló la mía, el pupilo de Antonio y hoy profesor de la escuela de ingenieros, Miguel Pérez-Saborid Sánchez-Pastor.

Gracias a su firme convicción, sin duda aprendida de sus maestros, de que el sistema de investigación español se beneficiaría enormemente al enviar a sus estudiantes más brillantes y motivados a las universidades más prestigiosas del mundo, Antonio también favoreció, allá en la década de los ochenta, que las Tesis doctorales de Ramón Fernández-Feria, Pascual Riesco Chueca e Ignacio González Loscertales –hoy en día, también todos ellos catedráticos y profesores titulares del área de Mecánica de Fluidos en las universidades de Sevilla y Málaga– fueran tuteladas por su colega, también ingeniero aeronáutico y profesor en Yale, Juan Fernández de la Mora.

No es difícil imaginar que los veranos de trabajo en Yale con el profesor Bernstein, con Fernández de la Mora y con los que hasta un poco antes habían sido sus alumnos, transcurrían en un entorno bastante cercano y familiar para Antonio. Tampoco es difícil imaginar que fue su carácter abierto, afable y expansivo, así como su aguda inteligencia y conversación los que le hicieron ampliar su círculo y conseguir el aprecio otros insignes profesores, como el de John Fenn.

Precisamente coincidiendo con su visita veraniega de 1989 a Yale, Fenn acababa de publicar un artículo en *Science* (Fenn, 1989) en el que se describía cómo utilizar un cierto fenómeno electrohidrodinámico, denominado electrospray, para aplicaciones a la espectrometría de masas de moléculas orgánicas de gran peso molecular. Movidio por la curiosidad, Antonio visitó el laboratorio de Fenn para observar en directo el fenómeno. Esta visita casual, que posiblemente no habría causado ningún tipo de mella en otra persona sin su inquietud intelectual, causó un gran impacto en Antonio: él mismo confiesa que “...me atrajo fuertemente la belleza con que se manifestaba el fenómeno: un cono casi perfecto de líquido, de cuyo vértice emerge un finísimo chorro que rompe finalmente en un aerosol de gotas cargadas”. En efecto, este fenómeno puede observarse bajo ciertas circunstancias cuando un pequeño caudal de un líquido conductor se suministra a través de una aguja metálica de un diámetro típico del orden del milímetro está sometida a un cierto campo eléctrico. Por nuestra experiencia cotidiana al abrir ligeramente un grifo, todos sabemos que al inyectar un pequeño caudal de líquido a través de un tubo alineado con la vertical y orientado hacia tierra, el líquido comienza a gotear desde la salida del tubo. Sin embargo, si existe una cierta diferencia de potencial eléctrico entre la aguja y tierra, las gotas comienzan a deformarse, adoptando una forma que es conocida, en honor del gran físico y matemático aplicado inglés George Ingram Taylor, como cono de Taylor (Barrero & Loscertales, 2007). Lo más interesante ocurre cuando

el campo generado sobre el líquido por esta diferencia de potencial es lo suficientemente elevado, puesto que entonces, desde la punta de este cono se emite un chorro cargado cuyo diámetro puede ser, dependiendo de la conductividad del líquido, hasta 100.000 veces menor que el de la aguja inyectora. Éste es, precisamente, el régimen conocido como electrospray y el que posee mayor número de aplicaciones tecnológicas. Típicamente, para poder observar este fenómeno, es necesario que la conductividad eléctrica del líquido sea superior o del orden de los 10^{-4} S/m, que las diferencias de potencial utilizadas estén en el rango del kilovoltio o de la decena de kilovoltios para generar campos eléctricos que sean del orden o superiores al millón de voltios por metro y que los caudales inyectados sean superiores a uno mínimo, que es proporcional a la permitividad relativa del líquido e inversamente proporcional a su conductividad. Típicamente, los caudales empleados son minúsculos, y están comprendidos entre el microlitro/hora y el mililitro/hora. Hay que decir que éste fenómeno fue ya descrito en 1600 por William Gilbert, que tres siglos después fue de nuevo estudiado por el físico polaco Zeleny, pero que sólo una vez que el artículo de Fenn puso de manifiesto sus aplicaciones, la comunidad científica dedicó verdaderos esfuerzos a describir un fenómeno tan complejo. Muy probablemente fue gracias a esa primera visualización en el laboratorio de Fenn, lo que hizo que Antonio encaminase sus esfuerzos en investigación hacia la descripción del electrospray, abandonando definitivamente la investigación en fusión inercial. Afortunadamente, arrastró en su decisión a su hasta entonces alumno, Ignacio González Loscertales, quien precisamente dedicó su Tesis doctoral a caracterizar este fenómeno de manera experimental bajo la supervisión de Juan Fernández de la Mora. Como quedará claro a continuación, esta decisión no sólo tuvo una gran repercusión en las respectivas carreras investigadoras de estos tres científicos, sino que también influyó de manera decisiva en el devenir de la investigación desarrollada por los integrantes de sus respectivos grupos de investigación. Puesto que es muy posible que el conocimiento que tenemos hoy en día de las leyes que rigen tanto la carga transportada como el diámetro de los chorros electrificados que se forman en los electrosprays no fuera tan profundo, no es exagerado afirmar que esta decisión también tuvo una repercusión en la comunidad científica en general. Además, tampoco se habrían desarrollado muchas de las aplicaciones tecnológicas, distintas a la de la espectrometría de masas, que hoy sabemos que poseen los electrosprays. Pero no adelantemos los acontecimientos al poner ahora ejemplos que constaten la afirmación anterior y digamos que a comienzos de la década de los noventa, Antonio comenzó a realizar experimentos de visualización y caracterización del electrospray en el laboratorio que de la Mora poseía en Yale.

NUEVAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN EN LA UNIVERSIDAD DE SEVILLA: SPRAYS DE LÍQUIDOS CARGADOS Y FLUJOS CON GIRO INTENSO

Antonio trasladó la experiencia adquirida en Yale a Sevilla, donde equipó un laboratorio para realizar experimentos de manera independiente. Esta labor conjunta de investigación entre ambos equipos dio pronto sus frutos y en 1994, Juan de la Mora e

Ignacio Loscertales descubrieron una de las leyes fundamentales en la física del electropray: la intensidad emitida es igual a una función desconocida que depende de la permitividad relativa del líquido multiplicada la raíz cuadrada del producto de la tensión superficial, la conductividad eléctrica del líquido y el caudal inyectado (de la Mora & Loscertales, 1994). En su artículo, de la Mora y Loscertales explican este resultado utilizando el hecho de que el chorro se forma gracias a la acción de los esfuerzos eléctricos tangenciales. Puesto que éstos sólo son distintos de cero cuando la superficie libre del cono de líquido no es equipotencial, la superficie del cono sólo debe ser aproximadamente equipotencial hasta aquella sección en la que la velocidad del líquido sea tal que el tiempo de residencia hidrodinámico se haga del orden del tiempo de relajación de carga eléctrica. En este momento, el líquido interior no podrá aportar la carga necesaria para mantener la superficie equipotencial y el esfuerzo tangencial eléctrico formará un chorro que transportará una carga superficial proporcional a la raíz cuadrada del caudal, tal y como se observa experimentalmente. Tres años después, en 1997, Alfonso Gañán y Javier Dávila junto con Antonio Barrero, quien tuteló las tesis doctorales de los dos primeros, hoy en día profesores de la escuela de ingenieros, publican un exhaustivo estudio experimental en el que corroboran que la intensidad depende de la forma descrita con anterioridad para una gran cantidad de líquidos (Gañán et al. 1997). Pero, además, en este artículo se proporciona una teoría alternativa que predice que la función desconocida en el análisis de Loscertales y de la Mora debe ser proporcional a la permitividad relativa elevada a un cuarto, como así ocurre en la práctica en numerosas situaciones de interés. Hay que decir que, mientras que la teoría del 94 se basa en el análisis del flujo de carga en la región de transición cono-chorro, la de Barrero y su grupo del 97 se basa en el análisis de las ecuaciones casi unidireccionales que describen tanto la dinámica, como la carga transportada por el chorro electrificado. Por el gran número de citas que poseen, puede comprobarse que ambos son considerados como los artículos seminales sobre la descripción experimental y teórica del electropray por toda la comunidad científica, siendo éste un campo en el que se publican cientos de trabajos al año. No fue ésta, sin embargo, la única aportación capital que realizó Antonio a la ciencia y la tecnología asociada a los electrosprays, pero éstas las describiré siguiendo el orden cronológico de los acontecimientos.

Por esta época, en la década de los 90 Antonio Barrero no sólo se limitó a describir la carga transportada por el electropray, sino que también describió los distintos tipos de flujos de recirculación que surgen en el interior del cono de Taylor a consecuencia de los pequeños esfuerzos tangentes que el campo eléctrico ejerce sobre su superficie. A él, se debe la solución de semejanza de recirculación en una geometría cónica que describe en la práctica el campo de velocidades en el caso de líquidos con una conductividad eléctrica y viscosidad lo suficientemente elevadas (Barrero et al. 1999). Sin embargo, Antonio también encontró que el número de Reynolds basado en la velocidad del líquido en la superficie del cono puede superar un cierto valor crítico en el caso de electrosprays formados por líquidos de baja viscosidad y pequeña conductividad eléctrica. Sorprendentemente, por encima de éste valor el tipo de flujo con simetría axial predicho por la solución de semejanza anterior, deja de ser válido y en este rango de

parámetros las únicas soluciones estables de las ecuaciones, son aquellas que incluyen una componente acimutal en el campo de velocidades; es decir, un giro (Barrero, 1998). Éste, surge gracias a un fenómeno conocido como “vortex dynamo”. Los resultados experimentales confirmaron esta predicción y, gracias a su descubrimiento de soluciones hidrodinámicas con giro en este tipo de situación electrofluidodinámica tan particular, Antonio abrió una nueva línea de investigación en España durante la década de los 90: la de flujos con giro, que simultaneó con la de los electrosprays (Sthern & Barrero, 1995, Fernández-Feria et al. 1999). Ambas, son situaciones físicas de muy distinta naturaleza, con aplicaciones muy diferentes y con escalas características de tiempo y longitud muy dispares. En efecto, mientras que una de ellas se da en la escala del milímetro o inferiores gracias a la acción de un campo eléctrico, los vórtices concentrados suelen ocurrir a la escala del metro o mayores, se utilizan frecuentemente en numerosas aplicaciones tecnológicas que nos resulta familiares y ocurren de manera natural en muchas situaciones de nuestra experiencia cotidiana. Algunos ejemplos de situaciones muy comunes en las que encontramos flujos con giro son los ciclones utilizados en cualquier industria para limpiar de partículas un determinado flujo de aire, en el movimiento de un líquido próximo a un sumidero, en los bordes marginales de las superficies sustentadoras de cualquier tipo de aeronave, o en los tornados. Entre los resultados fundamentales obtenidos por Antonio y su grupo en este campo, cabe citar la descripción del fenómeno de la separación térmica en flujos compresibles con giro (Herrada et al. 1999, Pérez-Saborid et al., 2002). Este curioso efecto, que recibe el nombre de Ranke-Hilsch, es utilizado en ciertas aplicaciones industriales cuando se quiere conseguir el enfriamiento de unas zonas y el calentamiento de otras de manera simultánea. En este tipo de flujos con giro, se observa que un flujo de gas isoterma puede separarse en dos corrientes de temperaturas mayor y menor que la inicial respectivamente. Aunque el fenómeno era conocido, no estaba bien descrito. Fueron Antonio y su equipo quienes descubrieron que esto ocurre gracias a la pérdida de entalpía de remanso que ocurre en el núcleo de los flujos con giro intenso. En el núcleo de los vórtices, la viscosidad regulariza el infinito en las velocidades acimutales que aparece como consecuencia de la conservación del momento angular en flujos con poca influencia de la viscosidad y es la causante de la pérdida de la entalpía de remanso. Asimismo, también contribuyó a entender que la rotura espontánea de vórtices (el conocido como vortex breakdown) es consecuencia directa de los gradientes adversos de presión autoinducidos por el propio el núcleo del torbellino al ser éste decelerado en su movimiento acimutal por efectos viscosos (Pérez-Saborid et al. 2002).

A causa de su inquietud intelectual, a su ímpetu y a la convicción de estar en la dirección correcta, Antonio emprendió una nueva línea de investigación en la que embarcó a su estudiante de doctorado, Miguel Herrada, hoy profesor en la escuela de ingenieros de Sevilla. Asimismo, benefició a muchos otros: no en vano, hoy día en España se sigue trabajando en la dinámica de vórtices concentrados gracias a su iniciativa pionera.

EL PROFESOR

Pero Antonio no sólo era un gran científico: era un excelente profesor. Yo mismo fui su alumno durante el curso 92-93 y mi opinión es la misma que la de muchos otros: lo consideramos como el mejor que tuvimos durante nuestros estudios en la escuela de ingenieros de Sevilla. Ese talento también se vio reconocido en otras universidades, como en la de California San Diego, donde a pesar de enseñar durante menos de un año, fue galardonado con el premio que se otorga sólo a los mejores docentes. A este respecto, hay que aclarar que la Mecánica de Fluidos posee una dificultad intrínseca, quizás asociada a la complejidad del sistema de ecuaciones en derivadas parciales no lineales que sirven para describir los campos de las distintas magnitudes termofluidomecánicas. Pero Antonio nos ayudaba a superar esta barrera aparentemente infranqueable utilizando un recurso que para mí era completamente novedoso: combinaba de manera magistral la intuición física y el rigor matemático en sus explicaciones. Esto, unido a su expresividad, hacía que los conceptos no sólo se entendiesen hasta el punto de poder asimilarlos y hacerlos propios al instante sino que, además, se sentían. Valga para ilustrar esta idea el siguiente ejemplo, quizás demasiado gráfico, que perfectamente podría haber sido sacado de una de sus clases: “Pero no ven que este viento que me está despeinando tira del paraguas hacia arriba tanto que me va a hacer despegarme del suelo, ¡pero no ven que voy a salir volando!” y se despeinaba, y estiraba el brazo tanto que parecía que fuera a descoyuntarse, y la clase entera prorrumpía en carcajadas... Y a continuación, tras tanta tensión escénica, explicaba que en este tipo de movimientos a altos números de Reynolds las aceleraciones del fluido están producidas por el gradiente de presiones, siendo las diferencias de presión sobre las superficies de los objetos las responsables de las fuerzas aerodinámicas que todos experimentamos cada día. Una vez dicho esto, cuantificaba con el rigor matemático necesario todas estas ideas en la pizarra.

EL ÉXITO Y LOS RECONOCIMIENTOS

En 1998 se me presentó la oportunidad de realizar en su grupo mi Tesis doctoral gracias a una beca formación del personal investigador concedida por el ministerio de educación. La verdad, no lo dudé demasiado y acepté de inmediato. Dos años después, durante la primavera del año 2000, comprobé que Antonio era un visitante asiduo del laboratorio, donde yo por aquella época trabajaba casi a diario. No había que ser un experto para percibir que lo que Antonio hacía era novedoso: estaba realizando, en colaboración con Ignacio González Loscertales -ya entonces profesor en la Universidad de Málaga- experimentos en los que inyectaba dos líquidos inmiscibles a través de dos agujas concéntricas electrificadas. Uno de estos líquidos, bien el que fluía por la aguja interior o el que circulaba por la exterior, era conductor y el conjunto se sometía al campo eléctrico generado entre las agujas y un electrodo colector conectado a tierra. El resultado fue que, para ciertas condiciones de operación, se formaba un cono de Taylor estructurado; es decir, dos conos de Taylor coaxiales en el que uno interior está

embebido en otro de mayor tamaño. Lo más interesante es que de la punta de ambos conos emergían sendos chorros coaxiales de líquido, uno confluyendo por el interior del otro, con lo que la rotura capilar del chorro en gotas, daba lugar a gotas compuestas. Como resultados de estos experimentos, Antonio e Ignacio consiguieron demostrar que la ley descubierta por ellos para el electrospray simple y que relaciona la intensidad transportada con el caudal, sigue siendo aplicable en esta situación. Además, mostraron que el líquido conductor puede ser tanto el interior como el exterior, con lo que los esfuerzos eléctricos, que se ejercen sobre la interfase de separación entre una pareja de fluidos inmiscibles en los que uno de ellos conductor y el otro dieléctrico, pueden estar aplicados en la interfase interior líquido-líquido o en la exterior líquido-gas. En ambos casos, demostraron que la acción del esfuerzo cortante eléctrico, difundida por viscosidad hacia ambos líquidos, es capaz de hacer fluir de manera simultánea a ambos. Sólo necesitaron Ignacio y Antonio un año para completar describir este fenómeno y a partir de ahí, las consecuencias de su trabajo se sucedieron de manera vertiginosa: en mayo de 2001 patentaron la idea y el procedimiento para generar gotas y fibras de estructura compleja de manera controlada a partir del electrospray compuesto y también crearon la empresa Y-Flow, una spin-off de las Universidades de Sevilla y Málaga. Unos pocos meses después enviaron un artículo a la revista *Science* con algunas de las conclusiones de su estudio experimental, que fue rápidamente aceptado (Loscertales et al, 2002). En este artículo se aporta la evidencia y la explicación de que es posible generar cápsulas compuestas por una gota embebida en otra de manera que es posible generar cápsulas compuestas submicrométricas con aplicaciones en alimentación y medicina en las que el espesor de la corteza puede ser controlado de manera muy precisa a través de la relación de caudales interior/exterior. Gracias al impacto inmediato que tuvo el artículo, comenzaron a colaborar con expertos en la química sol-gel que aportaron la idea de sustituir los líquidos poliméricos fotosensibles utilizados como flujo exterior en algunos de los resultados publicados en *Science*, por suspensiones coloidales de compuestos inorgánicos, como silicatos y aluminatos. Al hacer que el proceso de polimerización de la suspensión coloidal ocurra justo después o un poco antes de que se desarrollen las inestabilidades capilares que dan lugar a la rotura del chorro en gotas, demostraron que una vez evaporado el líquido interior, es posible generar nanocápsulas y nanofibras huecas respectivamente. Estos resultados dieron lugar a sendos artículos, que fueron publicados en el *Journal of the American Chemical Society*, y fueron lo que abrieron las puertas para las aplicaciones en ciencia de materiales al electrospray compuesto (Larsen et al. 2003, Loscertales et al, 2004). Permítanme comentarles que el hito de la publicación en *Science* en el año 2002 estuvo acompañado por otro hecho muy singular: John Fenn, quien doce años antes había invitado a Antonio a su laboratorio de Yale para que visualizase un electrospray, fue galardonado en ese mismo año con el premio Nóbel de química gracias, precisamente, a su artículo, también publicado en *Science*, sobre las aplicaciones del electrospray en la espectrometría de masas. Ambos hechos, que prácticamente coincidieron en el tiempo, precedieron a los muchos y merecidos premios que Antonio recibió en vida en reconocimiento a su ingenio natural, a la valentía y tenacidad de arrancar desde cero en campos que le eran completamente ajenos, por vencer tantas

veces la sensación parecida al “horror vacui” del que se habla en arte cuando uno se enfrenta por primera vez a un nuevo reto y, cómo no, por los enormes sacrificios personales que siempre conlleva tener un éxito en Ciencia.

Durante la segunda mitad de la década pasada, YFlow patentó procedimientos e ideas basados en el electrospray compuesto con Kraft, EADS-CASA, así como con Henkel-Loctite y la empresa tiene hoy en día beneficios anuales de decenas de miles de euros. Pero Antonio no se solazó en el éxito empresarial y económico y continuó investigando: fue el primero en conseguir en el año 2004 un electrospray simple en un baño de un líquido dieléctrico (Barrero et al., 2004, Marin et al, 2007) y el mes pasado vio la luz uno de sus artículos, firmado también por mi colega Guillaume Riboux en el Journal of Fluid Mechanics, en el que caracterizan las inestabilidades no axilimétricas (las whipping instabilities en el argot) de chorros de glicerina electrificados en un baño de hexano (Riboux et al., 2011).

CONCLUSIONES

Confío en que a partir de lo aquí dicho aquí hasta ahora, aquéllos que no lo conociesen, puedan formarse la imagen certera de que Antonio Barrero fue un gran científico, un emprendedor valiente y decidido y un excelso profesor. Creó una escuela muy extensa y fértil que ha trascendido a la Universidad española: valga como ejemplo que dos de sus más brillantes estudiantes, Manuel Gamero y Carlos Pantano, son hoy profesores en las Universidades de Irvine y Caltech respectivamente. Pero, además, era una persona cuya capacidad intelectual en todos los ámbitos le hacía pasar de dar la fecha exacta de la toma de Jaén por el rey Fernando, a estimar la potencia eléctrica generada en España o a recitar una poesía de memoria. Aquéllos que lo tratamos con cercanía disfrutamos además de su espíritu alegre y entusiasta, así como de su generosidad: continuamente creaba nuevas ideas, enseñaba, daba ánimos a sus colegas y alumnos en sus tareas bien fuesen docentes o investigadoras y, si percibía que éstas pudiesen resultar pesadas, las asumía como propias aunque no le correspondiesen. En definitiva, sus muchas virtudes hacían que fuese percibido por la mayor parte de sus compañeros como un líder insustituible, con el mérito añadido de que él jamás reclamó este puesto.

BIBLIOGRAFÍA

- BARRERO, A. & J.R. SANMARTÍN (1977). Self-similar motion of laser fusion plasmas-absorption in an unbounded plasma, *Phys. Fluids*, 7:1155-1163.
- BARRERO, A., A.M. GAÑÁN-CALVO, J. DÁVILA, A. PALACIO & E. GÓMEZ-GONZÁLEZ (1998). Low and high Reynolds number flows inside Taylor cones, *Phys. Rev. E*, 58: 7309-7314.
- BARRERO, A., A.M. GAÑÁN-CALVO, J. DÁVILA, A. PALACIO & E. GÓMEZ-GONZÁLEZ, (1999). The role of the electrical conductivity and viscosity on the motions inside Taylor cones, *J. Electrostatics*, 47: 13-26.

- BARRERO, A., J.M. LÓPEZ-HERRERA, A. BOUCARD, I.G. LOSCERTALES & M. MÁRQUEZ (2004). Steady cone-jet electrosprays in liquid insulator baths, *J. Colloid Interf. Sci.* 272:104-108.
- BARRERO, A. & I.G. LOSCERTALES (2007). Micro- and Nanoparticles via Capillary Flows, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 39:89-106.
- DE LA MORA, J.F. & I.G. LOSCERTALES (1994). The current emitted by highly conducting Taylor cones, *J. Fluid Mech.*, 260: 155-184.
- FENN, J.B., M. MANN, C.K. MENG, S.F. WONG & C.M. WHITEHOUSE (1989). Electrospray ionization for mass-spectrometry of large biomolecules, *Science*, 246: 64-71.
- FERNÁNDEZ-FERIA, R., J. FERNÁNDEZ DE LA MORA, M. PÉREZ-SABORID & A. BARRERO (1999). Conically similar swirling flows at high Reynolds numbers, *Quat. Jl. Mech. Appl. Mech.*52: 1-53.
- GAÑÁN-CALVO, A.M., J. DAVILA & A. BARRERO (1997). Current and droplet size in the electro-spraying of liquids. Scaling laws. *J Aerosol Sci.* 2: 249-275.
- HERRADA, M.A., M. PÉREZ-SABORID, & A. BARRERO (1999). Thermal separation in near-axis boundary layers with intense swirl, *Phys. Fluids*, 11: 3678-3687.
- LARSEN, G., R. VELARDE-ORTIZ, K. MINCHOW, A. BARRERO & I. G. LOSCERTALES (2003). A Method for Making Inorganic and Hybrid (Organic/Inorganic) Fibers and Vesicles with Diameters in the Submicrometer and Micrometer Range via Sol-Gel Chemistry and Electrically Forced Liquid Jets, *J. Am. Chem. Soc.*, 125: 1154-1155.
- LOSCERTALES, I. G. A. BARRERO, I. GUERRERO, R. CORTIJO, M. MARQUEZ & A. M. GAÑÁN CALVO (2002). Micro/Nano Encapsulation via Electrified Coaxial Liquid Jets, *Science*, 295: 1695-1698.
- LOSCERTALES, I. G., A. BARRERO, M. MÁRQUEZ, R. SPRETZ, R. VELARDE-ORTIZ & G. LARSEN (2004). Electrically Forced Coaxial Nanojets for One-Step Hollow Nanofiber Design, *J. Am. Chem. Soc.* 126: 5376-5377.
- MARIN, A.G., I.G. LOSCERTALES, M. MÁRQUEZ & A. BARRERO (2007). Simple and double emulsions via coaxial jet electrosprays, *Phys. Rev. Lett*, 98:014502.
- PÉREZ-SABORID, M., M.A. HERRADA, A. GÓMEZ-BAREA & A. BARRERO (2002). Downstream evolution of unconfined vortices: mechanical and thermal aspects, *J. Fluid Mech.* 471: 51-70.
- RIBOUX, G, A.G. MARIN, I.G. LOSCERTALES & A. BARRERO (2011), Whipping instability characterization of an electrified visco-capillary jet, *J. Fluid Mech*, 671: 226-253.
- SANMARTÍN, J.R. & A. BARRERO (1978). Self-similar motion of laser half-space plasmas. 1. Deflagration regime. *Phys. Fluids*, 11: 1957-1966.
- SANMARTÍN, J.R. & A. BARRERO (1978). Self-similar motion of laser half-space plasmas. 2. Thermal wave and intermediate regimes. *Phys. Fluids*, 11: 1967-1971.
- STHERN, V. & A. BARRERO (1995). Bifurcation of swirl in liquid cones, *J. Fluid Mech.* 300: 169-205.