



UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA

**UN MUNDO DE FLUIDOS:
SU ESTUDIO Y APLICACIONES**

LECCIÓN INAUGURAL
CURSO ACADÉMICO 2013/2014

JOSÉ MARÍA MONTANERO FERNÁNDEZ

*Catedrático de Universidad del Área
de Conocimiento de Mecánica de Fluidos.*

BADAJOS, 6 DE SEPTIEMBRE DE 2013

Un mundo de fluidos: su estudio y aplicaciones

Los fluidos: naturaleza y propiedades

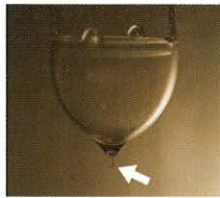
¿Qué es un fluido? Según el Diccionario de la Real Academia Española, “Un fluido es una sustancia en estado líquido o gaseoso”. Ciertamente la definición no es muy explícita, pero suficiente para nuestros propósitos.

La diferencia esencial entre líquidos y gases estriba en su *compresibilidad*: mientras que el volumen ocupado por un líquido no varía significativamente cuando modificamos la presión a la que se encuentra sometido, los gases se expanden y comprimen con suma facilidad. Por ejemplo, el agua que descansa en el fondo de una fosa marina a más de 11 km de profundidad no es muy diferente de la de la superficie. Aunque se encuentra sometida a una presión mil veces superior, su densidad es apenas un 5% mayor. Sin embargo, la densidad del aire que llena la rueda de una bicicleta supera en un 700% la del aire que respiramos.



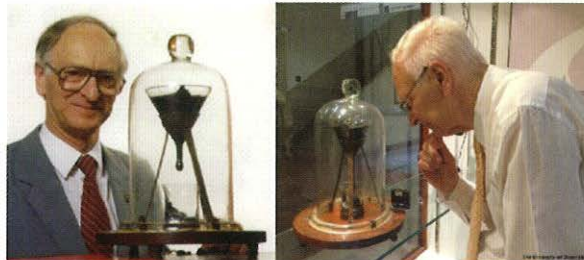
Delfines (izquierda) y criatura que habita en la fosa Mariana (derecha).
Con más de 11 km de profundidad, es la fosa marina más profunda del mundo
(National Geographic).

Una de las propiedades más interesantes de los fluidos es la viscosidad. Podríamos entenderla como la resistencia que ofrece un líquido o gas a fluir cuando es forzado a ello. Un fluido muy viscoso es “perezoso”, y se mueve con dificultad ante la acción de esfuerzos que llamamos cortantes o de cizalladura. Por el contrario, cuando su viscosidad es baja, el fluido es “diligente” y fluye con facilidad. El rango de viscosidades es inmenso. En un extremo, con viscosidad prácticamente nula, encontramos los *superfluidos*. Así, muy cerca del cero absoluto de temperatura, ciertos isótopos del helio se encuentran en estado líquido con una viscosidad tan reducida que pueden atravesar, como si de un fantasma se tratara, las paredes del recipiente que lo contienen.



Superfluido (Helio-3 en estado líquido) atravesando el recipiente que lo contiene
(www.rikenresearch.riken.jp).

En el extremo opuesto del rango de viscosidades encontramos la brea, un líquido un billón de veces más viscoso que el agua. En 1927, el profesor Parnell inició un experimento (probablemente el de mayor duración jamás realizado) para demostrar que, a temperatura ambiente, esta sustancia es efectivamente un líquido, aunque presente la apariencia de un sólido. Parnell vertió una muestra calentada de brea en un embudo con el cuello sellado, y lo dejó reposar durante tres años. En 1930 (tres años después), cortó el sello que taponaba el embudo, permitiendo que la brea fluyera hacia abajo. Varias gotas se han formado y desprendido del embudo desde entonces a un ritmo aproximado de una gota por década. La octava cayó el 28 de noviembre del 2000, y la próxima se espera en algún instante del presente año. Los interesados pueden observar el experimento en tiempo real en la página WEB <http://smp.uq.edu.au/content/pitch-drop-experiment>.



Experimento para medir la viscosidad de la brea en diferentes épocas de la vida del Pr. John Mainstone.

Muchos líquidos poseen propiedades viscoelásticas; es decir, disipan energía mecánica debido a la fricción viscosa, pero también son capaces de retener parte de ella y devolverla como cualquier material elástico. Estos líquidos protagonizan fenómenos sorprendentes. Probablemente, hayan visto un curioso experimento en un programa de televisión donde los presentadores andan sin hundirse sobre la superficie de una piscina llena de un líquido esencialmente compuesto por agua y maicena. La maicena confiere propiedades elásticas al agua, permitiendo disfrutar al presentador de esta bíblica experiencia.



Mujer andando sobre un líquido viscoelástico.

Los fluidos inmiscibles minimizan la superficie a través de la cual entran en contacto unos con otros. Esta cierta propensión a la “timidez” tiene lugar debido a las fuerzas de cohesión molecular que aparecen en la interfase, y se cuantifica a través de la tensión superficial. La existencia de esta tensión explica por qué las superficies líquidas son siempre suaves, redondeadas, sin aristas ni vértices, convirtiéndose en protagonistas de las imágenes más plásticas de la naturaleza. La tendencia de las pequeñas gotas a adoptar una forma esférica, la capacidad de los insectos para andar sobre el agua, o la acción de los detergentes, son fenómenos relacionados con esta propiedad.



La tensión superficial suaviza la forma de las superficies líquidas (izquierda).
Mosquito posado sobre una superficie de agua (derecha).

La tensión superficial es la fuerza misteriosa que da lugar a un prodigio de la naturaleza: la ascensión del agua a través de los árboles. En un día soleado, los árboles pueden elevar litros de agua hasta una altura de decenas de metros, aparentemente sin esfuerzo, sin hacer ruido, sin recurrir a ningún elemento móvil. Su vascularización está constituida por un extraordinario entramado de capilares y poros cuyo tamaño se reduce progresivamente con la altura hasta alcanzar la escala nanométrica. Se trata real-

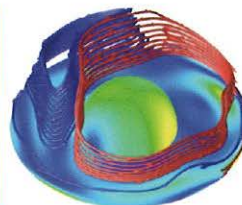
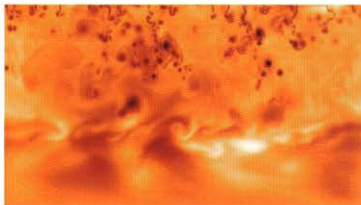
mente de un obra maestra de la microfluídica, que busca maximizar la fuerza de la tensión superficial y minimizar la resistencia viscosa. Ante este portento de la evolución natural, uno deja de preguntarse cómo pueden existir árboles de hasta 100 m de altura, para cuestionarse por qué no alcanzan alturas incluso superiores.



Sequoia.

Los fluidos forman el mundo que nos rodea

Los fluidos se encuentran literalmente en todas partes: el 65% del cuerpo humano es agua, dos terceras partes de la superficie terrestre están cubiertas por este líquido, y el aire de la atmósfera se extiende 17 km por encima de nuestras cabezas. La dinámica de fluidos juega un papel esencial en todas las escalas o tamaños que podemos imaginar, y es parte fundamental de la mayoría de las ciencias que estudian el mundo en el que vivimos. Por ejemplo, la comprensión del magnetismo solar en Astrofísica es un problema directamente relacionado con la dinámica de fluidos. También lo es la evolución del campo magnético terrestre producido por el flujo de aleaciones de hierro fundido en el núcleo externo de la Tierra. Este problema geofísico es crucial para la supervivencia de la especie humana. Es sabido que, cada cierto tiempo y de forma aparentemente aleatoria, el campo magnético terrestre se debilita enormemente antes de que se invierta la localización de los polos, dejando a la Tierra sin protección ante los rayos cósmicos. No son pocos los expertos que creen que este evento periódico está comenzando en nuestra era.



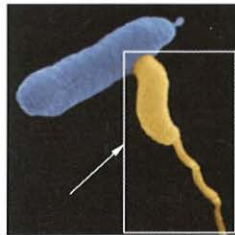
Plasma en el interior de una estrella (izquierda), y circulación en el núcleo externo terrestre (derecha)
(Institute of Geophysics and Tectonics. University of Leeds).

El estudio de las corrientes oceánicas es otro problema de dinámica de fluidos que determina en gran medida el desarrollo de la vida en la Tierra. La gravedad, la convección natural, la rotación del planeta y el viento compiten para desplazar gigantescas masas de agua marina a lo largo de la superficie terrestre. Aplicamos también la mecánica de fluidos para comprender los movimientos atmosféricos, que van desde los huracanes hasta la circulación general atmosférica. Los modelos atmosféricos, tan frecuentemente mencionados en las predicciones meteorológicas, están constituidos esencialmente por ecuaciones fluido-dinámicas que, resueltas de forma aproximada mediante supercomputadores, permiten pronosticar con algunos días de antelación las condiciones meteorológicas en cualquier punto del globo.



Vórtices de Von Kármán tras un cilindro de 1 mm de diámetro (www.cps.unizar.es), un avión (egyptian-cream.livejournal.com), y la isla de Juan Fernández en el Océano Pacífico [3].
El mismo fenómeno en escalas muy diferentes.

La mecánica de fluidos ha encontrado en las ciencias de la vida y la salud un campo de aplicación enorme. Hallamos fluidos allá donde hay vida, desde el interior de minúsculas células hasta inmensos ecosistemas. Fenómenos realmente asombrosos tienen lugar cuando ciertos micro-organismos interactúan con los líquidos en los que viven. Sin duda, los mejores nadadores de la naturaleza los encontramos entre ellos. Existen bacterias capaces de recorrer en un segundo una longitud equivalente a 100 veces su tamaño. Esta hazaña equivaldría a que cualquiera de nosotros nadara a más de 500 km/h en el seno de un líquido un millón de veces más viscoso que el agua.



Bellovibrio bacteriovorus (<http://www.genomenewsnetwork.org>).

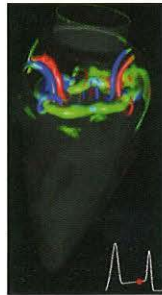
No menos admiración merece la capacidad de vuelo de nuestros amigos los mosquitos. Se sabe que vuelan con relativa normalidad en un día de lluvia moderada, aunque reciben en promedio el impacto de una gota cada 20 segundos. Es como si nosotros

paseáramos impertérritos por la ciudad mientras un coche de una tonelada cayera sobre nuestras cabezas con esa misma frecuencia.



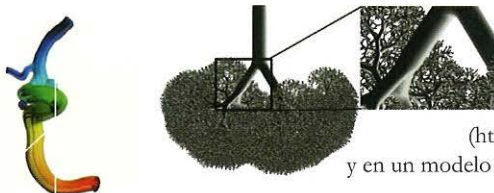
Impacto de una gota de lluvia sobre un mosquito volando.

La hemodinámica (el estudio del sistema circulatorio) ha sido el principal foco de atención de la biomecánica durante las últimas décadas. En una escala global, implica comprender el funcionamiento de nuestro sistema circulatorio; en particular, el acoplamiento entre el flujo sanguíneo y la respuesta elástica de arterias y venas. El corazón es una máquina fluido-mecánica formidable que late alrededor de mil millones de veces durante 75 años de vida, proporcionando una energía mecánica equivalente a subir un tráiler de cincuenta toneladas de peso desde el nivel del mar hasta la cima del Everest.



Simulación del flujo en el interior del corazón humano. Formación de vórtices en el ventrículo (Phys. Fluids 24, 091110 (2012)).

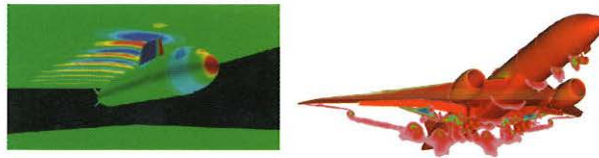
La lista de problemas fluido-dinámicos relacionados con la medicina no se limita al sistema cardiovascular y enfermedades relacionadas, sino que incluye la reología sanguínea, la microcirculación, el sistema respiratorio, la fluido-dinámica del globo ocular y del oído interno, o la dinámica de infecciones bacterianas, por poner algunos ejemplos.



Flujo en un aneurisma cerebral (izquierda) (<http://www.youtube.com/watch?v=wi98k5qkts>) y en un modelo del sistema respiratorio (derecha) (Ana. F. Tena, Instituto Nacional de Silicosis, Oviedo).

Aplicaciones tecnológicas

El conjunto de problemas tecnológicos abordables a partir de la mecánica de fluidos es prácticamente ilimitado. La industria química y agroalimentaria demanda un conocimiento cada vez más preciso del comportamiento de fluidos no newtonianos para la optimización de multitud de procesos. En la ingeniería agrícola, interesa de forma muy especial el flujo a través de canales, medios porosos y rocas. La ingeniería industrial es obviamente uno de los campos tecnológicos que mayor provecho obtiene de la mecánica de fluidos. El movimiento de fluidos en tuberías, bombas, ventiladores, turbinas, etc. son propios de esta disciplina. En la ingeniería naval y aeronáutica, la mecánica de fluidos es una de las ciencias básicas y uno de los pilares de la técnica.



Simulación del flujo alrededor de un submarino (<http://www.sandia.gov/tecs>) y un Boeing 777 (<http://www.sandia.gov/tecs>).

La creciente preocupación acerca del ahorro de combustible otorga relevancia a la aerodinámica de vehículos terrestres. Así, la resistencia aerodinámica del legendario Citroen 2CV era alrededor de un 200% mayor que la del moderno Toyota Prius.

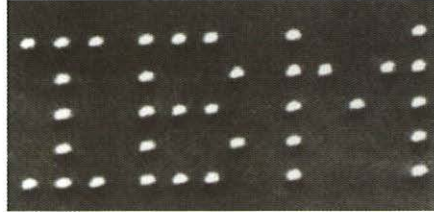


Citroen 2CV (izquierda) y Toyota Prius 3 (derecha).

Éste es un campo de aplicación de la mecánica de fluidos que se ha popularizado recientemente en nuestro país gracias a la “Fórmula 1”. Y es que la ciencia no ha resistido la enorme atracción que ejercen las competiciones deportivas sobre la sociedad actual. Numerosos grupos de investigación de primer orden dedican gran parte de sus esfuerzos a analizar problemas fluido-dinámicos que aparecen en disciplinas como la natación, la vela, el golf, o el fútbol. Por ejemplo, el año pasado se presentó en el congreso de la Sociedad Americana de Física un riguroso estudio sobre el denominado efecto “nudillo”, que explica la errática y desconcertante trayectoria seguida por el balón cuando un cierto famoso jugador lo golpea con fuerza. La clave parece encontrarse en la total ausencia de rotación en el movimiento de la pelota, lo que provoca la

aparición de fuerzas aerodinámicas fluctuantes que desvían la trayectoria unos 20 cm.

La nanotecnología es, sin duda alguna, uno de los campos multidisciplinarios más fértiles en la actualidad. En él se conjugan muy diversas disciplinas para desarrollar técnicas y productos que constituyen una de las bases tecnológicas de nuestra civilización.



Palabra escrita con 35 átomos de xenón en un substrato de níquel.

Entre las disciplinas con aplicaciones nanotecnológicas, no podía faltar la dinámica de fluidos. En micro y nano-fluídica hemos aprendido a producir de forma controlada y reproducible burbujas, gotas y chorros en la escala nanométrica. Se generan chorros hasta 10 000 veces más finos que un cabello, cuya rotura y posterior solidificación da lugar a minúsculas formas sólidas con estructuras y morfologías que pueden ser seleccionadas en función de su aplicación.

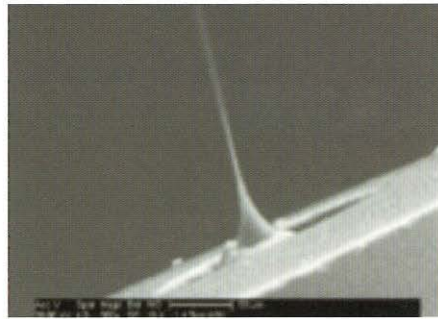


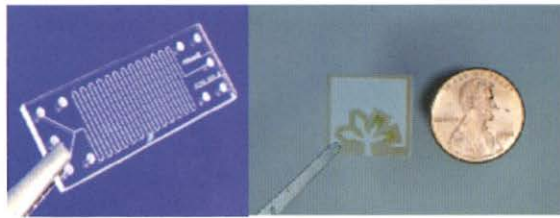
Imagen de chorro líquido micrométrico obtenido mediante enfocamiento gaseoso (Arizona State University).

La fabricación de fármacos y su liberación controlada en el organismo humano ha sufrido una revolución gracias al desarrollo de la micro y nano-fluídica. En un futuro, sustancias como la insulina podrían ser suministradas por vía oral mediante un aglomerado de partículas nanométricas, de igual tamaño, y procedentes de la solidificación de microgotas. Estas partículas superarían las condiciones estresantes del estómago, atravesarían la membrana intestinal, y alcanzarían intactas el torrente sanguíneo.



Producción de fármacos y encapsulación de de microorganismos (Ingeniatrix S.A.)

Células inyectadas en el cuerpo humano con fines terapéuticos pueden ser encerradas en micro-cápsulas fluidas que las protegen del sistema inmunológico hasta que alcanzan su destino. También es posible encapsular microorganismos en diminutas gotas líquidas para estudiar su crecimiento individual sin la interacción con el entorno. Los dispositivos “lab-on-a-chip” integran diversas funciones de un laboratorio en un único chip del tamaño de la punta de un bolígrafo, y pueden ser fabricados en un simple trozo de papel.



“Lab-on-a-chip” hecho de vidrio y de papel.

Podríamos abusar de la paciencia del auditorio extendiendo indefinidamente la lista de aplicaciones de la mecánica de fluidos. En lugar de ello, cerraremos este capítulo mencionando el papel que juega esta disciplina en uno de los nichos tecnológicos más explosivos y con mayor proyección: la impresión tridimensional de productos industriales a partir de un diseño digital. Imagínense: en un futuro no lejano, en lugar de peregrinar por tiendas y centros comerciales, uno se descargará de internet un fichero que contiene el diseño del producto que desea obtener. Ese fichero se enviará a una impresora 3D que tendremos instalada junto a nuestro ordenador. La impresión producirá como resultado el objeto que deseábamos adquirir. El consumidor podrá modificar ciertas características del producto, convirtiéndose de esta forma en diseñador. La capacidad de crear no será privilegio de unos pocos, sino que estará alcance de cualquiera.

Más aún, haciendo uso de un escáner 3D, podremos digitalizar cualquier pieza o elemento, modificar su diseño si lo deseamos, y reproducirlo en nuestra impresora.

Ésta era una idea de cierta popularidad en la ciencia-ficción y el imaginario del cómic del siglo XX. Los más veteranos pueden recordar Tintín y El Lago de Los Tiburones.



Tintín y el Lago de los Tiburones (izquierda).
Gárgola original y reproducida mediante impresión 3D (derecha).

La impresión 3D es una realidad usando algunos materiales, por ejemplo, poliméricos. El salto definitivo a la producción de objetos metálicos de altas prestaciones, completamente funcionales y de elevada complejidad no está resuelto a escala industrial con la suficiente simplicidad, flexibilidad, robustez y escalabilidad. Cuando esto suceda, presenciaremos lo que algunos han denominado la “Tercera Revolución Industrial”. Para que se produzca esta revolución, el metal fundido debe ser emitido de forma perfectamente controlada y en cantidades diminutas (gotas micrométricas), compatibles con la precisión dimensional del objeto a construir. Es aquí donde de nuevo aparece la fluido-dinámica. Una correcta emisión de metal líquido y posterior solidificación requiere un profundo conocimiento de la física de fluidos y micro-metalurgia involucrada en el proceso. Ésta es, de hecho, una de las líneas de investigación de nuestro grupo.

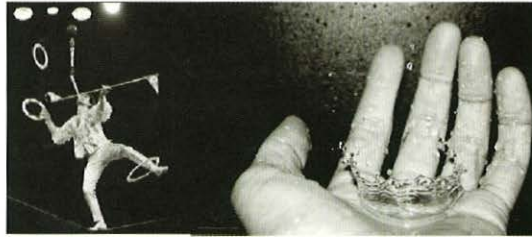


Ilustración extraída de “The Economist” (izquierda). Producción de gotas micrométricas de una aleación de estaño (Grupo de Mecánica de Fluidos, UEx).

Antecedentes y futuro de la mecánica de fluidos

Los alumnos de mecánica de fluidos me preguntan a menudo por qué esta disciplina resulta tan compleja. Francamente, suelo responderles que la culpa no es mía (aunque en parte pueda serlo) sino de ellos (me refiero a los fluidos, por supuesto). Técnica-

mente, decimos que un fluido tiene infinitos grados de libertad; es decir, puede moverse sin limitaciones inherentes a su naturaleza. En lenguaje más coloquial diríamos que “un fluido hace lo que le da la gana”. Un malabarista es capaz de mantener en equilibrio sobre la punta de su barbilla varios elementos sólidos colocadas unos sobre otros, al tiempo que hace rotar algunos más alrededor de su cuerpo. Sin embargo, sería incapaz de mantener sobre la palma abierta de su mano la cantidad de agua contenida en un dedal.



Equilibrista (izquierda) y agua sobre la palma de la mano (derecha).

Fijémonos en un ejemplo algo más sofisticado. El aire que atraviesa el motor de un avión se desplaza, rota, deforma, expande, comprime, reacciona químicamente con el queroseno inyectado en la cámara de combustión, e incluso se condensa (el vapor de agua) dando lugar a esa estela blanca que todos podemos apreciar desde el suelo. Sin embargo, un cuerpo sólido esencialmente se traslada y rota como un todo.



Motor a reacción en un banco de ensayos (www.tumblr.com).

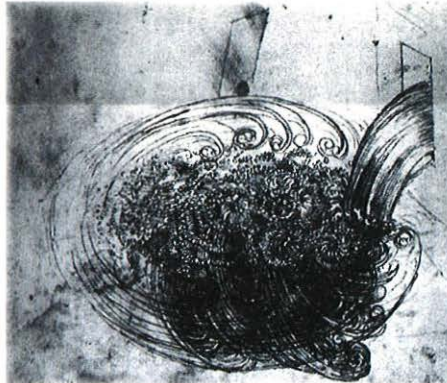
La inmensa diversidad de fenómenos protagonizados por los fluidos explica que, incluso hoy en día, cuando parece que somos capaces de explorar, por ejemplo, los constituyentes más básicos de la materia, la dinámica de fluidos sea una disciplina inacabada, con cuestiones fundamentales que no han encontrado aún una respuesta satisfactoria.

La primera formulación de una ley fluido-mecánica cuantitativa es debida a Arquímedes (287-212 a.C.), quien introdujo el teorema de la flotabilidad y lo aplicó a cuerpos sumergidos. Por cierto y en contra de la creencia generalizada, la famosa expresión “Eureka” (“lo encontré”) pronunciada por Arquímedes mientras salía de la bañera y corría desnudo por las calles de Siracusa, nada tiene que ver con el descubrimiento de su principio; pero ésa es otra historia.



Ilustración del siglo XVI de Arquímedes en la bañera.

Leonardo da Vinci (1452-1519), extraordinario experimentalista, propuso una ecuación de continuidad para flujos unidimensionales. En sus notas nos dejó descripciones muy reales sobre chorros, formación de torbellinos, olas, resaltos hidráulicos, etc.



Representación del flujo turbulento de agua a través de un orificio (Leonardo Da Vinci, 1500).

Como otros campos de la física, la mecánica de fluidos recibió un impulso definitivo gracias a la fundamental contribución de Isaac Newton (1642-1727). Newton postuló las leyes generales del movimiento y la relación lineal de resistencia viscosa para los fluidos *newtonianos* (la mayoría de los líquidos y los gases).

Es también obligado resaltar la contribución a la mecánica de fluidos de grandes matemáticos del siglo XVIII, entre los que podemos destacar a Daniel Bernoulli (1700-1782), Euler (1707-1783), D’Alambert (1717-1783) o Lagrange (1763-1813). A partir de los resultados de Euler, D’Alambert dedujo su famosa paradoja: un cuerpo que se mueve en un baño fluido poco viscoso experimenta una resistencia al avance nula. Esta afirmación contradice la más elemental experiencia fluido-dinámica. Implicaría que la corriente del río no nos arrastraría cuando nos bañamos en él; que un viento huracanado no sería más molesto que una leve brisa marina; o que los barcos y aviones no consumirían energía cuando se desplazan de un punto a otro.

Naturalmente, D’Alambert fue el primero de los desconcertados por este resultado. Él mismo llegó a afirmar: “Creo que la teoría, aunque desarrollada con el máximo rigor, predice en algunos casos resistencia estrictamente nula, una paradoja singular que dejó para que los futuros matemáticos esclarezcan“. Sin embargo, nadie en la época pudo resolverlo, a pesar de la indudable talla científica de ilustres personajes como Euler, Laplace, Cauchy o Poisson. De esta forma, la mecánica de fluidos quedó desacreditada ante los ingenieros, lo que condujo a un divorcio desafortunado entre aquellos que trabajaban en el campo de la hidráulica empírica y los que lo hacían en la mecánica de fluidos teórica. En palabras de un premio Nobel de la época, “los primeros observan fenómenos que no pueden explicar, mientras que los segundos explican fenómenos que no pueden observar”.



Resistencia al avance en un medio fluido.

Son muchos los experimentalistas que trabajaron en una gran variedad de problemas hidráulicos. Paralelamente, Navier (1785-1836) y Stokes (1819-1903) obtuvieron las ecuaciones fundamentales de la dinámica de fluidos añadiendo a las expresiones de Euler los términos correspondientes a la viscosidad. De esta forma se estableció el lenguaje universal de la mecánica de fluidos. En principio, cualquier proceso fluido-dinámico puede ser analizado en términos de estas ecuaciones considerando las leyes constitutivas correspondientes. No obstante, y debido a su considerable dificultad matemática, fueron relegadas durante gran parte del siglo XX. En ese periodo de tiempo e incluso hoy en día, la mecánica de fluidos ha sido entendida como “el arte de extraer información de las ecuaciones de Navier-Stokes sin llegar a resolverlas”.

得 人 凡 子 孛 界 因
 著 免 係 撥 伊 上 爲
 永 脫 相 伊 个 人 爲
 生 滅 信 拉 獨 甚 神
 亡 伊 以 養 至 愛
 佬 个 致 兒 於 世

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) &= 0 \\ \frac{\partial(\rho V_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V_i \mathbf{V}) + \frac{\partial p}{\partial x_i} &= \nabla \cdot \tau_i \\ \frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \cdot ((E+p)\mathbf{V}) &= \nabla \cdot (\kappa \nabla T) + \nabla \cdot (\underline{\tau} \mathbf{V}) \\ \frac{\partial \rho \lambda}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \lambda \mathbf{V}) &= \nabla \cdot (\rho D \nabla(\lambda)) + \kappa \end{aligned}$$

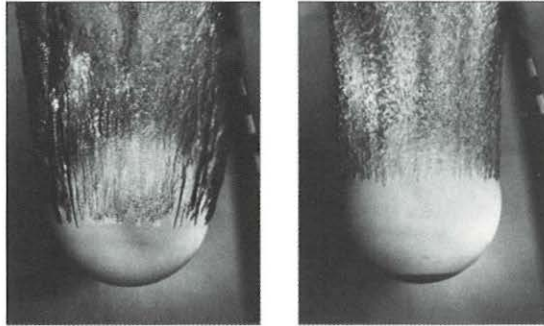
Lenguajes ampliamente utilizados. Chino mandarín (izquierda) y ecuaciones de Navier-Stokes (derecha).

Las ecuaciones de Navier–Stokes siguen despertando un gran interés desde un punto de vista puramente matemático. Quizás sorprendentemente, los matemáticos no han probado todavía que, dadas unas condiciones de contorno e iniciales cualesquiera, existe siempre una solución (suave) de las ecuaciones de Navier-Stokes. El Instituto de Matemáticas Clay ha incluido esta cuestión en la lista de los siete problemas matemáticos del milenio, y ha ofrecido un millón de dólares a quien lo resuelva.

A finales del siglo XIX, Reynolds (1842-1912) realizó el primer estudio sistemático de la turbulencia, estableciendo un criterio de transición entre los regímenes laminar y turbulento.

Si tuviéramos que elegir un momento clave en el desarrollo de la mecánica de fluidos, éste sería el *Tercer Congreso Internacional de Matemáticos* que tuvo lugar en Heidelberg (Alemania) en 1904. Allí, un profesor de 29 años llamado Prandtl (1875-1953) presentó su trabajo titulado “Acerca del movimiento de los fluidos con muy baja viscosidad”. Su presentación duró sólo diez minutos, el tiempo necesario para describir el concepto de “la capa límite viscosa” que revolucionaría completamente la mecánica de fluidos. El posterior artículo, limitado por las normas del congreso a ocho páginas, fue publicado en 1905, el mismo año en el que Albert Einstein dio a conocer su famosa Teoría de la Relatividad Especial. Con la contribución de Prandtl se cerró el cisma abierto 150 años atrás entre experimentalistas y teóricos.

Para muchos, el concepto de la capa límite fue merecedor del Premio Nobel de Física, pero el Comité de La Real Academia de las Ciencias de Suecia se resistió a reconocer un avance en mecánica clásica en unos años marcados por una incipiente mecánica cuántica. Prandtl se tuvo que conformar con dar su nombre a un cráter del lado oscuro de la Luna. En la primera mitad del siglo XX, los ilustres alumnos de Prandtl (Schlichting, von Kármán, Blasius, etc.) fueron los encargados de difundir y desarrollar sus ideas, un proceso que en absoluto fue rápido. De esta forma, se sentaron las bases de la dinámica de fluidos moderna.



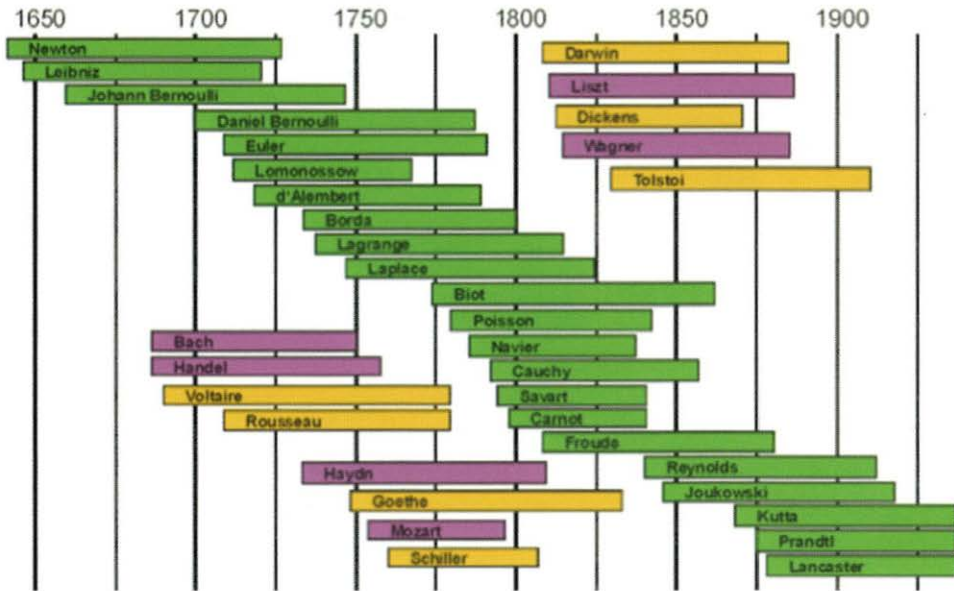
Desprendimiento de la capa límite cuando una esfera penetra en un baño líquido (www.mhhe.com).

Existen, sin embargo, aspectos fundamentales de esta disciplina que aún no han sido convenientemente aclarados. Entre ellos, mención especial merece la turbulencia.



Mezcla turbulenta de jabón (Phys. Rev. Lett. 93, 214504).

La turbulencia es y será, al menos en un futuro inmediato, el problema central de la dinámica de fluidos, algo que el ilustre científico Horace Lamb (1849-1934) proféticamente predijo: “Soy un hombre viejo ahora, y cuando muera y vaya al cielo hay dos asuntos sobre los que espero se me aporte luz. Uno es la electrodinámica cuántica, y el otro es el movimiento turbulento de los fluidos. Sobre el primero soy bastante optimista.” Efectivamente, debemos reconocer con humildad que todavía hoy intentamos, sin conseguirlo, describir los flujos turbulentos más elementales que podemos imaginar; por ejemplo, el movimiento del agua en una simple tubería. La turbulencia es un boquete inmenso en el cuerpo de conocimiento constituido por la dinámica de fluidos, porque la mayoría de los flujos de interés son, desgraciadamente, turbulentos.



Desarrollo de la mecánica de fluidos (verde), la música clásica (magenta), y la filosofía (amarillo).

Al igual que otras muchas disciplinas, la mecánica de fluidos ha encontrado en los computadores los aliados esenciales para progresar. En un ordenador, la resolución de las ecuaciones fluido-dinámicas se reduce a toneladas de sumas y restas que, una vez calculadas, proporcionan una solución numérica aproximada. Es importante destacar que la mayoría de los modelos utilizados en las simulaciones numéricas fueron desarrollados a finales de los ochenta y principio de los noventa. No ha habido un avance significativo en este terreno durante los últimos veinte años. Lo que ciertamente ha crecido es la potencia de cálculo a nuestra disposición. Un buen ordenador portátil actual tiene una capacidad comparable a la de un supercomputador de los noventa. También en el campo de la supercomputación, China ha adelantado a Estados Unidos. El supercomputador asiático “Vía Láctea” es el más rápido del mundo, y equivale a un millón de PCs de escritorio trabajando en paralelo. Ubicado en el conventual de San Francisco en Trujillo (al menos en el momento de escribir esta lección), “Lusitania” es uno de los supercomputadores con más memoria compartida de Europa.



El supercomputador “Vía Láctea” (izquierda) y el “Lusitania” (derecha).

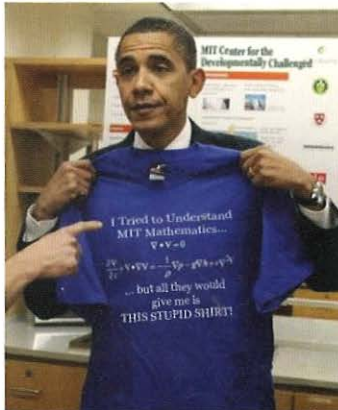
Una reflexión final

La dinámica de fluidos computacional ha transformado completamente la mecánica de fluidos. Nuestros estudiantes de ingeniería aprenden a realizar simulaciones de flujos con interés tecnológico en sus portátiles. Esta posibilidad confiere a nuestra disciplina un grado de practicidad muy positivo. Sin embargo, no son pocos los que piensan que corremos el riesgo de convertirnos en meros usuarios de esa poderosa caja negra, olvidando los principios y fundamentos que subyacen, o, lo que es peor, perdiendo la capacidad de extraer conclusiones significativas de nuestro análisis.

Permítanme que utilice este último comentario como pie para llevar a cabo una reflexión docente con la que terminar mi exposición. La tensión entre una enseñanza de fundamentos, ideas y conceptos abstractos, y otra centrada en aplicaciones y resultados es tan antigua como la ciencia y la ingeniería. Ya a finales del siglo XIX, Reynolds, el padre de la turbulencia, defendía con pasión que todos los ingenieros, independientemente de su especialidad, debían tener una sólida base en matemáticas y física. Un profundo cambio pedagógico en este sentido tuvo lugar en Estados Unidos tras la segunda guerra mundial, que aceleró enormemente el desarrollo de disciplinas ingenieriles como la mecánica de fluidos.

Me gustaría humildemente romper una lanza en favor de aquéllos que piensan que fundamentos y aplicaciones deben convivir en la enseñanza de las ingenierías, en contra de una cierta tendencia actual a eliminar los primeros en favor de las segundas. No deberíamos dejarnos llevar por la urgencia o la inmediatez en la formación académica de nuestros estudiantes. La historia de la mecánica de fluidos ejemplifica que el auténtico desarrollo ingenieril y tecnológico está basado en un profundo conocimiento de los principios que lo sustentan. Uno puede aprender muchas cosas cuando sale de la Universidad. En mi modesta opinión, los fundamentos de mecánica de fluidos no es una de ellas.

Muchas gracias.



Obama en el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) mostrando una camiseta con las ecuaciones fluido-dinámicas. Traducción: "He intentado aprender las matemáticas del MIT pero todo lo que he conseguido es esta estúpida camiseta".

Bibliografía

- J. D. Anderson Jr, *Ludwing Prandtl's Boundary Layer*, Physics Today, 42-48, 2005
- M. Gad-El-Hak, *Fluid Mechanics from the Beginning to the Third Millennium*, International Journal of Engineering Education 14, 177-185, 1998.
- A. Meseguer y F. Mellibovsky, *El Enigma de Osborne Reynolds*, Investigación y Ciencia, Marzo 2010, 60-69.
- T. J. Pedley, *Hydrodynamic phenomena in suspensions of swimming micro-organisms*, Annual Review of Fluid Mechanics 24, 313-358, 1992
- N. M. holbrook water and M.A. Zwieniecki, Transporting water to the tops of trees, Physics Today, 77-78, 2008.
- J. H. E. Cartwright, O. Piro, and I. Tuval, *Fluid Dynamics in Developmental Biology: Moving Fluids that Shape Ontogeny*, HFSP Journal 3, 77-93, 2009.
- J. A. Freinstein, Stanford University, *Imaging the Cardiovascular System*.
<http://www.youtube.com/watch?v=N9Za6K2HyIQ>

