



# Célula Couette-Taylor

Un aparato del que ya habló Isaac Newton en 1687 sigue proporcionando un vasto campo de experimentación en dinámica de fluidos

**T**ras un fenómeno tan común como la circulación del agua por una cañería, se esconden mecanismos de notable interés científico. De su análisis se ocupa la hidrodinámica, la parte de la física que estudia el comportamiento de los líquidos. En esta colaboración nos proponemos construir un instrumento que nos permitirá estudiar el comportamiento dinámico de los líquidos en un amplio espectro de condiciones.

En la mayoría de los sistemas hidrodinámicos (tubos, embalses, barcos, etcétera) sucede que el fluido, agua por ejemplo, roza contra una pared inmóvil, o viceversa. En la interfase, o capa límite, se experimentan fuerzas de cizalla que desembocan en movimientos de disipación de energía en el interior del líquido. En función de la velocidad relativa entre este y el vaso que lo contiene, aparecen dos tipos de comportamiento: a bajas velocidades, el flujo suele ser laminar, tranquilo y regular; a velocidades elevadas, en cambio, se torna agitado, turbulento y caótico.

En esos fenómenos la velocidad constituye un factor crítico. Pero hay otro no menos importante: la viscosidad dinámica del fluido en movimiento. Se define esta como la resistencia que ejercen las moléculas de un líquido a desplazarse entre sí; la causa última de este fenómeno corresponde a las interacciones intermoleculares que reducen la movilidad. La ley fundamental del movimiento viscoso, establecida por Isaac Newton en 1687, arroja un índice característico para cada líquido.

Mucho después, alrededor de 1880, Osborne Reynolds midió con precisión la velocidad a la que se producían transiciones en el tipo de régimen de circulación,

de laminar a turbulento. Descubrió que las transiciones ocurrían cuando cierto parámetro adimensional directamente proporcional al diámetro del tubo (o sección), la densidad y la velocidad del fluido, e inversamente proporcional a la viscosidad de este último, alcanzaba un valor umbral.

Con independencia del equipo instrumental, cuando el parámetro, ahora denominado número de Reynolds (NR), es inferior a 2100, tenemos un movimiento laminar. Cuando supera dicho valor, se convierte en desordenado y turbulento. El NR permite pronosticar el comportamiento de fluidos muy distintos en situaciones dispares. Ello resulta de gran

utilidad para el diseño de aeronaves, submarinos o el aparato que ilustramos en esta sección.

Volvamos a la viscosidad. En la actualidad, numerosos laboratorios disponen de instrumentos que permiten medir con precisión esta magnitud. Para la ciencia decimonónica, en cambio, el asunto distaba mucho de estar resuelto. En la búsqueda de un aparato adecuado, Sir George Gabriel Stokes explicaba en 1848: «Un cilindro hueco y otro macizo pueden montarse de tal manera que sea posible hacerlos girar con distintas velocidades uniformes en torno a su eje común, en posición vertical. Si se quiere que ambos cilindros giren, lo habrán de hacer en sentido opuesto; si gira solo uno de ellos, habrá de ser el exterior». He aquí una buena descripción del dispositivo que nos proponemos construir.

El instrumento recibe su nombre actual de Maurice Couette, quien lo utilizó en 1888 para estudiar los flujos laminares, y Geoffrey Ingram Taylor, quien, a principios del siglo xx, comprobó que, si se aumentaba la velocidad del cilindro interior, el flujo presentaba un espectro muy amplio de comportamientos. Por todo ello, al instrumento en cuestión se le denomina célula Couette-Taylor (C-T).

Centrándonos ahora en el plano constructivo, diremos que este instrumento es de fácil armado si lo proyectamos para bajas velocidades, es decir, si optamos por un fluido viscoso y espacios angostos para contenerlo. Expliquémonos. La geometría de la cubeta puede ser varia. En las células C-T bajas, achatadas y con un canal de circulación de sección rectangular, las paredes interior y exterior se hallan a una distancia notable; la turbulencia (dentro de regímenes bajos de velocidad) es escasa.

En las células C-T altas y estrechas (como la que aquí ilustramos),



**Turbulencias en la célula Couette-Taylor.** Las partículas en suspensión deben estar fuertemente iluminadas para mostrar el fenómeno en toda su belleza. El pigmento ayuda a mejorar el contraste, sobre todo cuando es oscuro o con una alta saturación.



en cambio, las paredes se hallan próximas y, por tanto, inducen fortísimas fuerzas de cizalla en el fluido.

Dentro de la cubeta existen dos interfasas: la superior, donde el líquido se halla en contacto con el aire, y la inferior, donde el líquido toca con la base en rotación de la cubeta. Estas perturbaciones «de extremo» se minimizan mediante la prolongación, en sentido vertical, de la cubeta.

El experimentador puede optar solo por unas pocas dimensiones estándar para los tubos exteriores, necesariamente transparentes, con los que construirá el artefacto. Dado que la construcción se inicia con numerosas incertidumbres sobre dimensiones y velocidades, opté por la fabricación de un prototipo básico, provisional, con el que debía averiguar bajo qué parámetros se producían los fenómenos que me proponía estudiar.

Para empezar, tomemos un tubo de metacrilato, de unos 200 milímetros de diámetro exterior, unos 300 milímetros de longitud y un espesor de pared de 5 milímetros o más. Pediremos a un tornero que mecanice un tapón de plástico con un eje de acero calibrado de 25 milímetros bien fijado y, sobre todo, perfectamente concéntrico. Pegaremos luego el tapón con epóxido. Repetiremos el proceso con un tubo o una barra de unos 150 milímetros de diámetro por 300 milímetros de longitud, que, sumergida en el fluido, no debe ser necesariamente transparente.

Montaremos el eje sobre dos rodamientos de bolas con soporte, que habremos adquirido en un suministro industrial. A su vez, los cojinetes quedarán fijados dos a dos en sólidos paneles de madera hidrófuga. Pondremos un tubo dentro del otro y fijaremos los paneles mediante cuatro espigas enroscadas y de

buen diámetro. Realizaremos los ajustes necesarios para lograr una concentricidad total de los dos tubos.

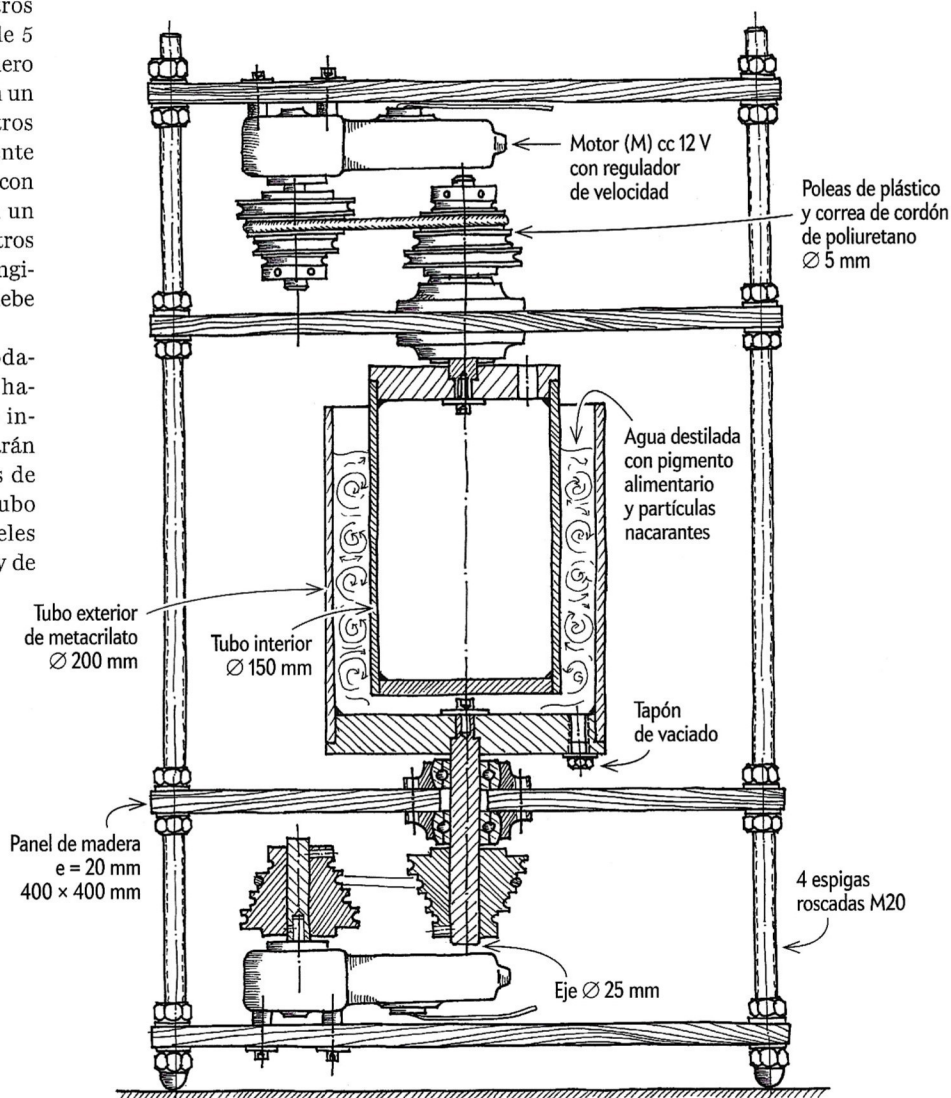
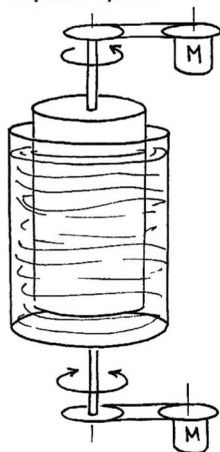
Debemos procurarnos ahora los motores que activarán los cilindros. Al ignorar cuáles serían las velocidades óptimas para los líquidos que me interesaban, opté por dos motores gemelos de corriente continua, pues permiten invertir el sentido de giro mediante un simple conmutador. Para conseguir un amplio abanico de regímenes de experimentación, instalaremos poleas de transmisión entre los ejes de motores y cilindros. Por fin, colocaremos dos paneles más de madera para conformar un conjunto rígido y nivelarlo perfectamente. Será entonces el momento de llenar los tubos.

Para observar los diversos flujos que aparecen en el líquido, hay que incorporar una sustancia «trazadora». En general utilizaremos partículas reflectantes en suspensión. Empezaremos los experimentos

con una mezcla de agua destilada, pigmento azul alimentario y un agente nacarante (el trazador) compuesto por diminutas plaquitas de un compuesto orgánico birrefringente. Cada una mide unas pocas micras de superficie y menos todavía de espesor. Su baja densidad aparente permite estabilizarlas en agua, de forma que no se decanten. Es así como las encontramos en el supermercado: en forma de viscosos geles de baño de reflejos nacarados. Las adquiriremos en forma de «perlado concentrado» en industrias suministradoras de productos para jabones.

Se trata de un producto de inestimable valor para el experimentador, pues permite representar, de manera espectacular, las líneas de corriente. Su uso se extiende a la observación de células convectivas, análisis hidrodinámico de perfiles y visualización de flujos en cañerías. Tal fenómeno se debe a las plaquitas, que se orientan según el flujo, reflejando más o menos

**Esquema operativo**





## La comprensión del amplio abanico de comportamientos

que se observan en la célula Couette-Taylor requiere de un vasto arsenal matemático para resolver las ecuaciones de Navier-Stokes. Estas ecuaciones permiten pronosticar —no sin dificultades— el comportamiento dinámico de los fluidos, en particular, cuando estos son incompresibles y newtonianos (de viscosidad constante). El análisis teórico se simplifica de forma notable, si se considera que la longitud de los cilindros es mucho mayor que el espacio entre ellos.

Cuando los dos cilindros giran en el mismo sentido con velocidades semejantes (con independencia de cuál es el más rápido), la solución de las ecuaciones de Navier-Stokes es sencilla, ya que guarda un alto grado de simetría.

Por el contrario, cuando los cilindros giran en sentidos opuestos, las soluciones entrañan mayor complejidad. Los patrones de flujo observables corresponden a distintas rupturas de simetría que conducen a nuevas soluciones de las ecuaciones de Navier-Stokes de simetría menor. Al variar la velocidad relativa entre los cilindros

(parámetro externo de control), aparecen puntos críticos en las soluciones de la ecuación general que dan lugar a bifurcaciones, las cuales representan nuevos estados de flujo del sistema. Esas bifurcaciones, llamadas de Hopf, pueden ser inestables y conducir a oscilaciones periódicas entre estados distintos. En determinadas condiciones se observa también la interacción de modos

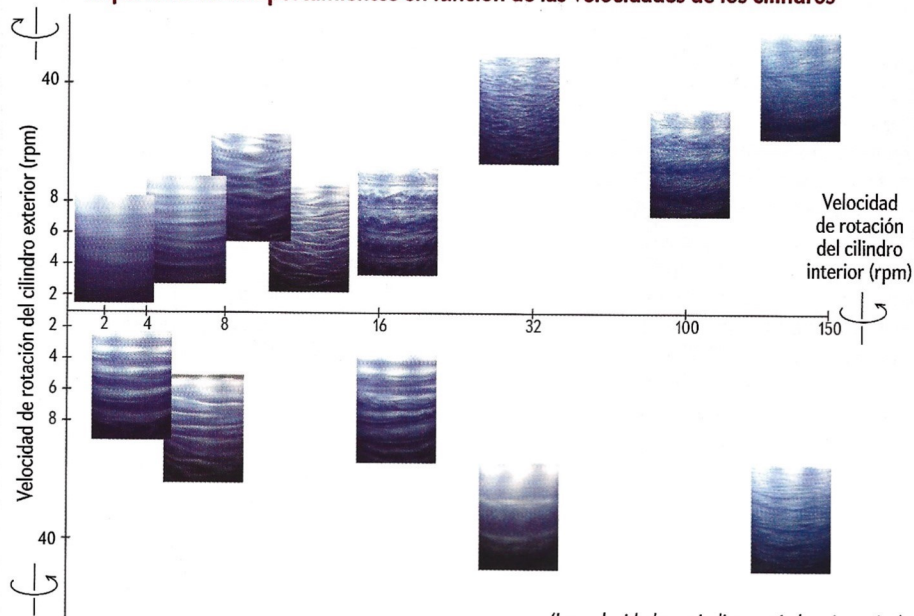
distintos de circulación, así como una transición hacia la turbulencia cuando el parámetro de control alcanza valores suficientemente elevados.

Hay que tener en cuenta que la introducción de partículas trazadoras altera las propiedades del líquido, en particular cuando son poliméricas, ya que el fluido adquiere viscoelasticidad. Es decir, el compor-

tamiento del fluido respecto a los esfuerzos no es solo viscoso, sino que aparece también una respuesta elástica. La turbulencia surge entonces en otros regímenes.

El estudio de estas espirales líquidas encuentra diversas aplicaciones de interés práctico: en viscosimetría, enfriamiento de maquinaria eléctrica rotante, desalinización, etcétera.

## Repertorio de comportamientos en función de las velocidades de los cilindros



(Las velocidades se indican a título orientativo)

luz hacia el observador. Sea cual fuere su procedencia, de concentrado o champú, en agua destilada el perlado decanta con lentitud. Incorporaremos, pues, entre un 5 y un 10 por ciento de glicerina. Con todo ello, habremos elevado de forma notable la densidad y la viscosidad del fluido. Pueden ensayarse otras partículas (polvo de aluminio, por ejemplo). Existe una interesantísima bibliografía sobre la visualización de flujos bajo los medios más diversos.

La experimentación con la célula C-T requiere un control y una regulación precisa de las velocidades de rotación. Exige además una medición exacta de estas. Por tanto, en dispositivos más perfeccionados, lo correcto es instalar motores paso a paso. A estos sumaremos los tacómetros necesarios (*encoders*), que nos permitirán adquirir de forma sistemática registros y patrones de comportamiento. Dado que

mi objetivo era comprobar la viabilidad del sistema y su grado de dificultad, tomé los datos mediante un tacómetro fotoeléctrico, lo que hizo muy engorrosa la operación.

En cualquier caso, con los cilindros llenos hasta 5 o 6 centímetros de la boca, alimentaremos los motores y observaremos lo que ocurre. Al empezar a girar, el líquido, antes de aspecto uniforme, empieza a mudar su aspecto. Primero asoman vórtices espirales en su seno. Cambia luego súbitamente y se torna más ordenado. Se observa, por fin, un enorme repertorio de comportamientos que varían en función de la velocidad de giro (que gobernaremos mediante el potenciómetro de velocidad): aparecen y desaparecen estados de orden y turbulencia, así como transiciones suaves mezcladas con frecuentes rupturas de simetría.

Los movimientos relativos de un cilindro respecto del otro pueden englobarse

en dos tipos principales. En el primero, los dos cilindros rotan en el mismo sentido, aunque a velocidades distintas; en estos regímenes, las velocidades angulares relativas entre cilindros son reducidas y los patrones muestran una circulación laminar similar al rodillo con patrón helicoidal de la fachada de la barbería.

En el segundo, los cilindros giran en sentido opuesto. La turbulencia aparece pronta y fascinante. Con agua poco viscosa (un dos por ciento de concentrado nacarante) y pigmento para pinturas azul y negro, girando a menos de 20 revoluciones por minuto y ensayando todas las combinaciones de velocidad entre cilindros, podremos observar un mínimo de cinco patrones de circulación: flujo laminar de Couette, vórtices ondulantes, microturbulencia, espirales de barbería y vórtices aislados.