Capítulo 95
Y yo quiero ser...Ingeniero en Fluidomecánica
(Por Mario Sánchez Sanz)

Un ingeniero en Fluidomecánica se encarga de estudiar y aprovechar, en beneficio propio, el movimiento de los fluidos, las fuerzas inducidas por ese desplazamiento y el intercambio de energía asociado a él. La rama de la física que fundamenta esa rama de la ingeniería es la Mecánica de Fluidos y engloba tanto a líquidos como a gases. Creo que no existe ese título para definir a ningún ingeniero, pero la especialidad y la asignatura sí que se imparte, bajo diferentes nombres, en distintos títulos de grado de todas las escuelas de Ingeniería de España. Un ejemplo cercano es la asignatura de "Ingeniería Fluidomecánica" de la Universidad Carlos III de Madrid, donde imparto clase, y que se imparte en varios títulos de grado.

El agua y el aire han sido los fluidos más usados por el hombre. Existen evidencias históricas que sugieren la utilización de molinos de agua en la India en el siglo IV a. de C. Su importancia práctica y filosófica en el antiguo Egipto, Grecia y Roma es indudable. En el Renacimiento, Leonardo da Vinci, Torricelli, Pascal y Newton hicieron aportaciones importantes en el estudio de los fluidos. Sin embargo, durante siglos, todo avance tecnológico relacionado con el uso de los fluidos para la realización de un trabajo útil estuvo basado en el método de ensayo y error y era, por lo tanto, lento e impreciso. Para la cimentación de los fundamentos matemáticos de esa ciencia tendríamos que esperar al el matemático suizo Leonard Euler, al ingeniero francés Claude-Louis Navier y al físico y matemático irlandés George Gabriel Stokes.

En su trabajo original, que hacía uso de las aportaciones de otros científicos, Euler escribió las ecuaciones sin tener en cuenta el efecto de la viscosidad del fluido. Navier y Stokes si incluyeron los esfuerzos viscosos en las ecuaciones de Euler para, finalmente, escribir las que a la postre se denominaron ecuaciones de Navier-Stokes (NS de aquí en adelante): un conjunto de tres ecuaciones diferenciales en derivadas parciales que, junto a la ecuación de continuidad, permite obtener las tres componentes de la velocidad y la presión del fluido. Las ecuaciones de NS son esencialmente una nueva forma de escribir la tercera ley de Newton en las que la variación de la cantidad de movimiento es igual a la suma de las fuerzas que actúan sobre el fluido. A diferencia de los cuerpos sólidos, los fluidos se deforman bajo el efecto de las fuerzas, modificando su forma y, a veces, algunas de sus propiedades. Estas particularidades, que se derivan de la organización molecular de los fluidos, complica sustancialmente la descripción de su movimiento.

Esos tres científicos arriba mencionados redujeron el movimiento de un fluido a un problema de análisis matemático, ¡pero qué problema! Resolver las ecuaciones de NS es tan complicado que constituye uno de los siete problemas del milenio propuestos por el Clay Mathematics Institute y por los que pagará un sustancioso premio de un millón de dólares a quien logre obtener la solución general de las ecuaciones. Durante gran parte del siglo XX se avanzó poco en ese objetivo. La dificultad radica en el comportamiento aparentemente impredecible y caótico que muestra el movimiento de los fluidos debido, fundamentalmente, a la sensibilidad extrema del mismo a las condiciones iniciales: dos sistemas con condiciones iniciales casi idénticas dan lugar a soluciones que, rápidamente, divergen en dos soluciones sin relación aparente.

Puesto que las matemáticas no permiten integrar exactamente las ecuaciones de NS, la mecánica de fluidos ha utilizado los ordenadores de forma intensiva para resolver las ecuaciones mediante técnicas numéricas. Aunque siempre introducen pequeños errores en la solución final, las soluciones numéricas pueden llegar a ser muy precisas. Gracias a los ordenadores somos capaces de realizar multitud de operaciones matemáticas simples (sumas, restas, multiplicaciones y divisiones) en muy poco tiempo. La potencia de cálculo de los computadores se mide en FLOPS (operaciones en coma flotante por segundo que son capaces de realizar). Por poner un ejemplo, podemos estimar que un ordenador de sobremesa, como el que podamos tener en casa, realiza del orden de 10^9 operaciones por segundo. El mayor ordenador de España, el MareNostrum4, alojado en el centro de Supercomputación de Barcelona, tiene, desde su actualización en Julio de 2017, una potencia pico de 11.15 PetaFlops o, lo que es lo mismo, es capaz de realizar 13,000,000,000,000,000 (trece mil trillones o 10^{15}) operaciones por segundo.

Cuando un niño aprende a escribir, para enseñarle el trazado de las letras, se disponen una serie de puntos sobre una lámina de papel para que, después de unir todos los puntos mediante rectas, obtenga la letra buscada. De forma parecida, la mecánica de fluidos computacional calcula la presión y las tres componentes velocidad en ciertos puntos del espacio y, después, imitando la técnica de los niños de unir esos puntos, conforma la descripción continua de los campos de velocidad y presión. Esos puntos forman la *malla computacional*, como se denomina en la jerga del oficio. Lógicamente, cuanto más complicado es el movimiento del fluido o mayor precisión en la descripción del mismo se requiera, más puntos necesitamos, lo que a su vez implica un mayor coste a la hora de llevar a cabo ese cálculo.

De forma general, las características del movimiento de un fluido depende del valor del número de Reynolds, definido como $Re = \rho\, u_c\, l_c/\mu$, siendo ρ la densidad y μ la viscosidad del fluido, u_c la velocidad característica del fluido y l_c una longitud características del problema a estudiar. El parámetro Reynolds es un número sin dimensiones y mide la importancia relativa entre las fuerza de inercia $\rho u^2_c/l_c$ y la de viscosidad del fluido $\mu\, u_c/l^2_c$. Si el número de Reynolds es pequeño, la viscosidad del fluido domina el movimiento y decimos que éste se encuentra en régimen laminar. Como indica su nombre, en este régimen el movimiento del fluido se ordena en capas paralelas, como si fueran láminas que deslizan en la misma dirección una sobre otra, con la viscosidad actuando como mecanismo de disipación de energía.

Para valores grandes del número de Reynolds, el movimiento deja de ser ordenado para formar un flujo medio sobre el que se superponen un gran número de vórtices y de remolinos que giran. El flujo medio tiene una velocidad u_m a la que se añaden oscilaciones de velocidad u' inducidas por esos vórtices y remolinos. El tamaño del menor de estos torbellinos η es función del valor del *Re,* siendo menor cuanto más grande es el número de Reynolds y mayor es el nivel de turbulencia. Su tamaño se relaciona con la longitud característica a través del número de Reynolds $l_c/\eta = Re^{3/4}$. Es en esas escalas más pequeñas donde la viscosidad del fluido se hace dominante disipando la energía almacenada en el fluido. Como se indica en la Fig. 1, es común que un flujo laminar se inestabilice y se transforme en uno turbulento. Para complicar las cosas todavía un poco más, flujos con igual valor del número de Reynolds pueden presentar distintos valores de turbulencia debido, por ejemplo, a factores que amplifican las oscilaciones de velocidad (por ejemplo, la rugosidad del material).

Un ejemplo de integración numérica de las ecuaciones de NS se puede ver en la Fig. 1, donde se muestran los resultados de los cálculos llevados a cabo por Jones et al [1] para un flujo con $Re=5\times10^4$ basado en la velocidad a la que el fluido se acerca al perfil U_∞ y en la cuerda del mismo c. Basados en ese ejemplo podemos concluir que para describir numéricamente un flujo laminar, como el que se desarrolla cerca del borde de ataque del álabe de la Fig. 1, necesitamos mallas computacionales con puntos suficientes para describir cambios en la velocidad en una región de tamaño característico $l_c \sim c$, pero para un flujo turbulento necesitamos que la distancia entre los puntos de nuestra malla sea de orden $\eta \ll l_c$. Al ser esa distancia entre puntos mucho más pequeña, será necesario disponer de muchos más y el cálculo será más costoso.

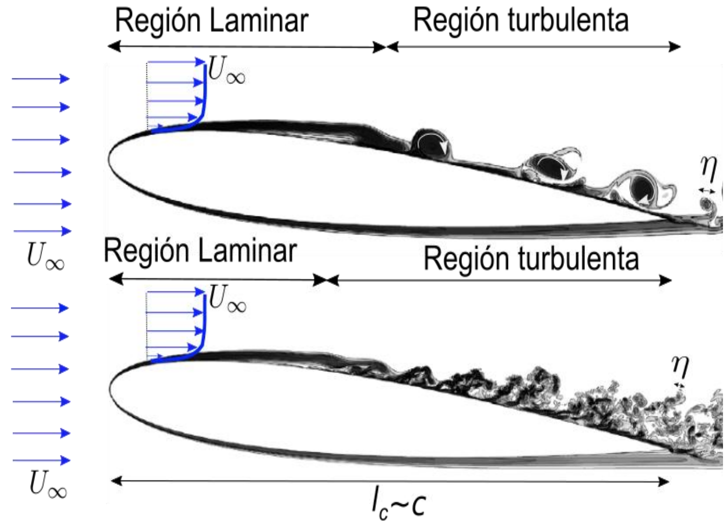

Fig. 1. Escalas características para el flujo sobre un perfil NACA-0012 con Re=50.000. La figura de arriba presenta niveles de turbulencia menores que la figura de abajo [1]. Las líneas azules representan el vector velocidad antes de llegar al perfil y sobre él.

A partir de las estimaciones hechas más arribas, podemos anticipar que el número de puntos necesarios para integrar numéricamente uno de estos flujos turbulentos crece como $N \sim Re^{9/4}$. Consideramos, por ejemplo, la avioneta Air Tractor 802F que se usa en labores de extinción de incendios todos los veranos en España. Este pequeño avión tiene un ala de cuerda $l_c = c = 1$ m, un perfil semejante al mostrado en la Fig. 1 y se desplaza por el aire a baja altura con una velocidad de crucero de unos u_c=300 km/h=83 m/s. Usando los valores de densidad y viscosidad del aire a nivel del mar, tenemos valores del número de Reynolds del orden de $Re = 1.38 \times 10^5$. Para obtener la velocidad y la presión en una porción del ala de ese avión de 1 m² tendremos que integrar numéricamente las ecuaciones de NS. Si lo hacemos en un ordenador de sobremesa doméstico, ese cálculo llevaría 10^{13} s o 317.100 años. Para el mayor ordenador de España, el Marenostrum 4 necesitarías esperar 10^7 s, poco más de 4 meses. Si tenemos en cuenta el área total del ala de la avioneta es 18 m², rápidamente nos damos cuenta de que cálculos como el descrito en el párrafo anterior son, de momento, inasumibles tanto por el tiempo de cálculo que necesitan como por el tamaño descomunal de la información generada que hay que almacenar para su posterior análisis.

El cálculo de flujos industriales, con valores de Re mucho mayores al del ejemplo, es todavía una utopía y no se espera que podamos abordarlo hasta, al menos, dentro de un siglo. Y eso si la potencia de cálculo continua creciendo al mismo ritmo que lo hace actualmente, es decir, multiplicando el número de operaciones por segundo por un factor 10 cada siete años. La disponibilidad de los recursos computacionales para integrar las ecuaciones es una condición necesaria, aunque no suficiente. Las técnicas para la integración de las ecuaciones son complejas y su implementación en códigos requieres de años de estudio y dedicación. Además, hay que tener en cuenta que proceso de cálculo arriba descrito es la parte más sencilla del proceso de diseño. Posteriormente, es necesario analizar con mucho detalle todos esos datos para extraer conclusiones útiles tanto desde el punto de vista científico como técnico e ingenieril. Y ahí es donde el ingeniero es la clave, no hay ordenador que interprete los resultados obtenidos a partir de la integración de las ecuaciones.

Conocedores de esas limitaciones, ingenieros y científicos han obtenido resultados más que notables mediante aproximaciones y modelos con los que, pese a no conocer los detalles de la turbulencia, han hecho volar a los aviones y girar a las turbinas eólicas, han predicho el tiempo y navegar a los aviones. Hoy en día hay multitud de códigos comerciales que permiten integrar las ecuaciones de NS con poca formación previa. Sin embargo, esos códigos usan aproximaciones y técnicas numéricas que arrojan unos resultados que deben usarse con cautela por parte de los usuarios para evitar llegar a conclusiones de poca validez física. En el último siglo, nuestro conocimiento de la mecánica de fluidos ha crecido gracias a modelos simplificados de problemas complejos que se fundamentaban en hipótesis que se validaban, después, experimentalmente. La disponibilidad de recursos computacionales no debería modificar la secuencia que acabamos de describir y que es aplicación directa del método científico. Todo cálculo numérico debería estar soportado en la teoría ya que, de lo contrario, corremos el riesgo de reducir la práctica del ingeniero fluidomecánico a la creación de coloridos gráficos que nadie entiende y que nada representan.

Un ejemplo de buena práctica fue la misión Apolo 11 con la que se llegó a la Luna por primera vez en 1969. Los ordenadores usados para los sistemas de guiado de las naves tenían una capacidad de cálculos de entorno a las 85.000 operaciones por segundo. Hoy, un teléfono iPhone 7 es capaz de realizar 172.000.000.000 operaciones por segundo, más de dos millones de veces más capacidad de cálculo que los ordenadores del Apollo 11, que se usan, excepto excepciones, para mandar mensajes de texto o para consultar alguna que otra página web.

Referencias:
[1] L. E. Jones,R. D. Sandberg, N. D. Sandham, Journal of Fluid Mechanics, 602 (2008) 175-207.
[2] J. Jiménez, Journal of Turbulence 4 (2003) Paper 22.

Mario Sánchez Sanz
Doctor en Ingeniería Matemática, Profesor titular.
Departamento Ing. Térmica y de Fluidos, Universidad Carlos III de Madrid