

REAL ACADEMIA DE INGENIERÍA

EL RETO DE LA COMPLEJIDAD

DISCURSO DEL ACADÉMICO ELECTO

EXCMO. SR. D. JAVIER JIMÉNEZ SENDÍN

LEÍDO EN EL ACTO DE SU RECEPCIÓN PÚBLICA
EL DÍA 14 DE FEBRERO DE 2006

Y CONTESTACIÓN DEL ACADÉMICO

EXCMO. SR. D. AMABLE LIÑÁN MARTÍNEZ



MADRID MMVI

EL RETO DE LA COMPLEJIDAD

REAL ACADEMIA DE INGENIERÍA

EL RETO DE LA COMPLEJIDAD

DISCURSO DEL ACADÉMICO ELECTO

EXCMO. SR. D. JAVIER JIMÉNEZ SENDÍN

LEÍDO EN EL ACTO DE SU RECEPCIÓN PÚBLICA
EL DÍA 14 DE FEBRERO DE 2006

Y CONTESTACIÓN DEL ACADÉMICO

EXCMO. SR. D. AMABLE LIÑÁN MARTÍNEZ



MADRID MMVI

Editado por la Real Academia de Ingeniería

© 2006, Real Academia de Ingeniería

© 2006 del texto, Javier Jiménez Sendín y Amable Liñán Martínez

ISBN: 84-95662-38-8

Depósito legal: M-6949-2006

Impreso en España

EL RETO DE LA COMPLEJIDAD

Excmo. Sr. Presidente
Excmos. Sras. y Sres. Académicos
Señoras, Señores, queridos amigos:

Tengo que empezar este discurso agradeciendo mucho a mucha gente. Primero, por supuesto, a la Academia por aceptarme en su seno. No me es fácil expresar el sentimiento de honor y de responsabilidad que el nombramiento me produjo cuando me lo comunicaron, pero siempre estaré agradecido por él. Soy consciente de que tal distinción no puede dirigirse sólo a mí como individuo, sino como representante de un grupo de personas que, a lo largo de los años, hemos hecho las cosas de una cierta forma, y de las que probablemente se espera que sigamos haciendo algo parecido en el futuro. Tengo por lo tanto que buscar en primer lugar entre mis recuerdos a quienes deberían estar hoy aquí conmigo, o en mi lugar. Me encuentro antes de nada con mis maestros. Amable Liñán fue el primero que me enseñó mecánica de fluidos, y principalmente quien me inició en los caminos de la investigación. En su caso no tengo que lamentarme de su ausencia. Él ha sido uno de mis mentores en la Academia y tengo la satisfacción de que se haya prestado a contestar a este discurso y a darme la bienvenida en ella. También tengo que recordar a mis codirectores de tesis en el Caltech, Gerald Whitham y Brad Sturtevant, ambos retirados desde hace tiempo, pero que me guiaron en mis primeros pasos. Y a un nutrido grupo de compañeros y de colaboradores, demasiado numerosos para nombrarlos individualmente, tanto en España como fuera de ella.

En segundo lugar, me acuerdo de las instituciones que han sido importantes para mí. La mayor parte de mi vida se ha desarrollado en la universidad y, si tuviera que definirme de alguna forma, tendría que ser como universitario. La Universidad Politécnica de Madrid, el Caltech y la Universidad de Stanford han sido los ámbitos de la mayor parte de mi actividad, y creo firmemente que la universidad, como institución donde se crea y se transmite el conocimiento en un esfuerzo conjunto entre profesores y alumnos, ha sido desde hace tiempo el motor principal de la generación de ideas, tanto en mi caso como en la sociedad en general. Es muy probable que una parte importante de la ventaja tecnológica de la que Occidente ha gozado durante los últimos siglos sobre

otras partes del mundo, se deba a la superioridad del modelo colectivo de la universidad europea frente a la relación más individual entre maestro y discípulo en las naciones avanzadas de Asia.

Ha habido otro organismo que no puedo dejar de recordar. Trabajé durante años en el Centro Científico de la empresa IBM en la Universidad Autónoma de Madrid, y conservo de aquella experiencia un profundo respeto al papel que ese tipo de instituciones puede desempeñar en el entramado tecnológico de un país.

La empresa dispone generalmente de más recursos que la universidad, es el principal destinatario de los técnicos que se forman en ella, y suele tener una idea más clara de cuáles son las necesidades tecnológicas a medio plazo.

La universidad, por su parte, suele entender mejor las tendencias a largo plazo, y tiende a ser más ágil que la empresa a la hora de identificar tecnologías emergentes antes de que se conviertan en comercialmente aplicables. Esta complementariedad hace que los centros mixtos entre universidad y empresa puedan llegar a ser simbiosis casi perfectas, beneficiosas para ambas partes, a la vez que en muchos casos viveros para empresas nuevas. Son sin embargo instituciones complicadas, que hay que llevar con mucho cuidado para que no se desvirtúen. La universidad no debe, ni en realidad puede, convertirse en un centro de desarrollo para la empresa, pero tampoco puede pretender que la empresa actúe simplemente como un mecenas con la misión de financiar la investigación académica. El intento de que una de las partes adopte la forma de trabajar de la otra destruye casi siempre el propósito de la colaboración.

Mi experiencia con IBM, y lo que sé de otras aventuras similares, me hace pensar sin embargo que es posible dirigir estas instituciones de forma que ambas partes se beneficien, y que, cuando se hace así, los centros mixtos entre universidad y empresa forman una pieza fundamental en el desarrollo de un país. Quizá la demostración más palpable sea que aproximadamente la mitad de los que estuvimos en su día en el Centro Científico de IBM hayamos acabado en la universidad, y la otra mitad en la empresa.

Están luego mis estudiantes. Tanto los que han trabajado personalmente conmigo como los que no. Uno de los mayores placeres, y una de las

obligaciones más difíciles del profesor universitario, es trabajar con ellos. Especialmente con los que se niegan a aceptar nuestras enseñanzas como verdades absolutas. Los estudiantes son los que mantienen vivos al profesor y a la universidad, y los que nos impiden anclarnos en el pasado. Hay una percepción errónea de que el profesor busca un clon espiritual que continúe su obra. Yo siempre he preferido que mis estudiantes abran nuevos caminos. Algunos de mis mejores estudiantes decidieron dedicarse a la empresa. Miguel Ángel Hernán, Juan Claudio Agüí, Juan Zufiria y Pilar Martínez son ahora directivos de empresas, aunque para mi tranquilidad les agradezco que hayan elegido empresas tecnológicas. Otros, como Rodrigo Martínez-Val o Juan Antonio Hernández se quedaron en la universidad, mientras que otros como Roque Corral o Rafael Gómez Blanco compaginan los dos mundos. He aprendido mucho de todos ellos, y espero seguir haciéndolo en el futuro.

Llego por fin a mi familia. Mi mujer María, mi hija Alicia y últimamente hasta mis nietas, han tenido que aguantar durante años a un señor un poco raro que no estaba nunca en casa y que, cuando estaba, tendía a quedarse ensimismado mirando un grifo de agua sin razón aparente. Lo han llevado siempre con un humor y una comprensión que les agradezco infinito, y sin los que no podría haber resistido hasta ahora.

Hay, por último, una persona a la que tengo que dedicar un recuerdo especial. Mi padre, D. José Antonio Jiménez Salas, fue ingeniero de caminos. Sé que varios de los presentes fueron compañeros o estudiantes suyos, y que incluso alguno lo considera en cierta forma como su padre científico. En mi caso, aparte de muchas otras cosas, él fue quien me enseñó a sentir curiosidad por cómo funciona todo, y en última instancia, él es el responsable de que yo esté aquí. Sé que hubiera sido feliz asistiendo a este acto, y yo personalmente no puedo por menos que dedicarlo a su memoria.

La ingeniería y la investigación científica

Pero tenemos que pensar en el futuro, y en qué es lo que nos queda por hacer. No hay duda de que una de las misiones del ingeniero es mejorar el mundo, o por lo menos, como en el caso de los médicos, estropearlo lo menos posible. Para ello tenemos que intentar predecir qué va a pasar en los próximos años, y qué es lo que deberíamos hacer para preparar-

nos. A sabiendas de que predecir es difícil y de que lo más probable es que me equivoque, querría dedicar estos minutos a reflexionar un poco sobre estos temas. Quizá me lleve a ello la tentación, muy propia de un ingeniero, de pensar que en vez de escudriñar el futuro lo que tenemos que hacer es no conformarnos con las cosas como parece que van enca-minándose, y que es mejor diseñarlas a nuestro gusto.

Antes sin embargo es bueno mirar un poco al pasado. No hay duda de que la ingeniería es una profesión antigua. La ciencia, en el sentido de esquema de pensamiento en el que la naturaleza es ordenada, en el que las mismas causas llevan siempre a los mismos efectos, y en el que todo puede y debe explicarse de una forma racional, nació para occi-dente en la Grecia clásica. Algunas ciencias, como la astronomía o algunas ramas de las matemáticas, son más antiguas, pero la forma corriente de entender la vida en Mesopotamia o en Egipto estaba dominada por la magia. La primera discusión científica en el sentido moderno suele adju-dicarse a Tales de Mileto, que se preguntó allá por el año 600 AC, cuáles eran los constituyentes elementales de la materia. Más que su respues-ta, que fue que todo estaba hecho de agua, lo importante fue su atrevi-miento al plantear una pregunta que no versaba sobre un caso particu-lar, sino sobre *todo*. No se puede exagerar la importancia de este paso, del que eventualmente deriva toda la ciencia posterior.

Sin embargo, para cuando Tales se hizo su pregunta, la ingeniería era ya antigua. Las pirámides tenían 2.000 años de historia, los templos de Luxor se habían erigido hacía 1.000 años, y los regadíos de Egipto y Mesopo-tamia, que incluían tanto canales como presas bastante grandes, lleva-ban 1.500 años de uso y mantenimiento continuados. Imhotep, el inge-niero responsable de la primera pirámide de Saqqara, impresionó tanto a sus contemporáneos que acabó formando parte de su panteón de dioses. El actual oasis de al-Faiyum era una depresión desértica de 5.000 km², hasta que los ingenieros egipcios decidieron transformarlo en regadío en el año 1800 AC. Fue una obra de la que muchos ingenie-ros hidráulicos estarían orgullosos hoy en día, y probablemente uno de los primeros ejemplos de cambio climático intencionado.

Hemos dado en llamar “primera revolución industrial” a la que tuvo lugar a partir del siglo XVIII en Europa, pero en varios momentos de la Antigüedad

o de la Edad Media hubo cambios tecnológicos de una magnitud parecida. Como en el caso de Egipto o Mesopotamia, estas primeras revoluciones fueron probablemente empíricas. No sabemos bien qué papel tuvieron Euclides o Pitágoras en los acueductos romanos o en las catedrales góticas, pero sí sabemos que los textos de ingeniería que sobreviven de Roma o de la Edad Media no fueron escritos por científicos, sino por artesanos, o por lo que llamaríamos hoy en día "contratistas". Incluso las primeras máquinas de vapor fueron desarrolladas por mecánicos practicantes, sin prestar demasiada atención a la naciente termodinámica.

Sin embargo todo cambió hacia mediados del siglo XIX. Unos siglos antes, la primera revolución científica de la era moderna había comenzado la matematización de la naturaleza. Fueron dos siglos que vieron a Newton y a Galileo, a Maxwell en la electrodinámica, o, en un terreno más cercano a mi especialidad, a Euler y a Navier y a Stokes en el movimiento de los fluidos. Durante bastante tiempo estos desarrollos tuvieron poco efecto en la ingeniería, pero eventualmente la situación fue cambiando. La producción de acero a escala industrial no se pudo conseguir hasta que se entendieron bien las reacciones químicas del hierro con el carbono, con el fósforo, y con el oxígeno. Los primeros puentes de celosía del siglo XIX fueron construidos en gran parte a base de prueba y error; pero el desarrollo de la industria eléctrica es inconcebible sin referencia a las ecuaciones de Maxwell.

A partir de 1850 la ingeniería se convirtió en la ciencia aplicada que es hoy en día, y a partir de entonces nuestra obligación como ingenieros ha sido estar al tanto de los últimos descubrimientos científicos.

Sin embargo, no hay razón para que nuestro papel sea exclusivamente el de estudiantes pasivos. Los últimos siglos han estado dominados por el empuje reduccionista de la física y de la química. La materia se ha ido descomponiendo en moléculas, luego en átomos, y más tarde en partículas elementales. Ha sido un viaje fructífero que ha cambiado nuestra visión del mundo, y que ha dado lugar a algunas de las ideas claves de la cultura moderna. La mecánica cuántica, la relatividad, o la biología molecular no son sólo el origen de la electrónica, de la energía nuclear, o de la biotecnología, sino que constituyen también algunos de los capítulos más bellos de lo que distingue nuestra cultura de la de hace doscientos años.

Es probablemente en parte como consecuencia de este énfasis reduccionista por lo que la industria ha ido tendiendo cada vez más a la miniaturización. Si se entiende bien el comportamiento de un átomo, o de unos pocos átomos, se tiende también a generar aplicaciones basadas en sistemas compuestos por unos pocos átomos o por unas pocas moléculas.

Sin embargo, me parece personalmente claro, aunque me encantaría equivocarme, que el camino reduccionista de la ciencia está tocando a su fin como fuente de aplicaciones a medio plazo, y que es conveniente buscar también en otras direcciones. Es posible por ejemplo que la cromodinámica cuántica o la teoría de cuerdas den lugar algún día a una nueva forma de generar energía, pero hoy por hoy los problemas de la fusión nuclear tienen más que ver con el control de la turbulencia en plasmas que con la física nuclear.

De hecho, el reduccionismo no ha sido la única dirección en la que la ciencia ha avanzado últimamente. Ha habido durante los últimos siglos otra corriente de investigación que creo que tiene al menos el mismo potencial de dar lugar a aplicaciones tecnológicas revolucionarias. Me refiero al estudio de los sistemas intrínsecamente complejos.

Los sistemas complejos

Vivimos en un mundo complejo. Las simplificaciones clásicas, la masa puntual, la viga uniforme, o el flujo laminar, son muy útiles para plantear las disciplinas clásicas que utilizamos a diario, pero no existen en la naturaleza. Los cuerpos reales tienen una cierta forma y un cierto tamaño, no son esféricos, y no se mueven en el vacío. Las vigas no están simplemente empotradas o apoyadas, y los flujos industriales son raramente laminares.

He dedicado una gran parte de mis últimos años a estudiar la turbulencia en los fluidos. No es el tema del que quiero hablar hoy, pero, aunque sólo sea por ignorancia de otros campos, no tendré más remedio que utilizarlo varias veces como ejemplo.

La turbulencia es un paradigma de complejidad. El flujo alrededor de una persona que anda, incluso si nos referimos sólo al movimiento macroscópico y nos olvidamos de las moléculas individuales, tiene varios billones de grados de libertad (10^9), y el flujo alrededor de un avión tiene 10^{20} .

El estudio científico de sistemas con muchos grados de libertad se inició con el planteamiento de la teoría cinética de gases por Maxwell y Boltzmann en la segunda mitad del siglo XIX. Inmediatamente se descubrieron paradojas aparentes que ocuparon a los matemáticos durante bastante tiempo. La más famosa es probablemente el origen de la irreversibilidad en un gas formado por átomos que se comportan individualmente de forma reversible. Incluso hoy, cuando el concepto de entropía está firmemente arraigado, aparecen preguntas parecidas cuando manejamos pequeños sistemas formados por unos cuantos miles de moléculas, tales como las proteínas en una célula o los nanosensores [B05]. Son sistemas demasiado pequeños para usar la termodinámica clásica, pero con demasiados elementos como para seguir cada uno de ellos individualmente. No se trata de ejemplos de interés puramente teórico. Los dos casos citados forman parte de aplicaciones industriales en desarrollo.

La propiedad más característica de los sistemas complejos es su impredecibilidad. Hablar de la solución de una ecuación algebraica de segundo grado tiene un sentido obvio. Hablar del movimiento de las moléculas en una habitación es mucho menos claro. El comportamiento de una molécula particular depende tanto de detalles desconocidos de las condiciones iniciales o del estado de las paredes, que no tiene mucho sentido referirse a *la* solución del movimiento. Como mucho podemos hablar de *una* solución representativa. El análisis clásico no es siempre suficiente en estos casos, y es necesario recurrir a conceptos nuevos, como el caos determinista, los fractales, o las representaciones estadísticas.

Esta impredecibilidad se extiende a muchos problemas cotidianos. El tiempo sobre el que podemos predecir con seguridad la presión sobre un punto de un avión es del orden de unos pocos microsegundos. Su evolución sobre tiempos más largos también depende de detalles desconocidos de las condiciones iniciales y de contorno. El que seamos capaces de diseñar aviones que vuelan bien se debe en primer lugar a que las propiedades estadísticas de un sistema complejo son mucho más estables que sus valores instantáneos, y a que para calcular la sustentación de un avión no son necesarios generalmente más que los valores medios. También ayuda que existan modelos semi-empíricos, derivados de muchos años de observación y de experiencia, que nos permiten estimar las estadísticas globales del flujo. Pero la razón principal es que los aviones se diseñan pri-

mero y se prueban después, tanto en túneles de viento como en vuelo. Es algo que no necesitamos hacer, por ejemplo, para las estructuras.

A nadie se le puede escapar por otra parte que los aviones comerciales no han cambiado mucho en los últimos treinta años, y que quizá nuestro modelo actual no sea el óptimo. Una parte importante del problema es que no entendemos bien los flujos turbulentos, y que los modelos empíricos que funcionan para un régimen de vuelo no necesariamente funcionan igual para otro. Hemos aprendido a diseñar un cierto tipo de avión, y nos falta confianza para implementar formas completamente nuevas.

Un ejemplo aún más común de imprecibilidad en detalle y de estabilidad estadística es la meteorología, donde todos tenemos claro que lo único que tiene sentido son las predicciones de la probabilidad de que llueva en un sitio, pero que la definición de una nube individual no es importante. También en este caso nos vemos aún reducidos a la utilización de modelos semiempíricos para la predicción de las estadísticas.

En ese sentido, los ingenieros aeronáuticos y los meteorólogos no somos muy distintos de los estudiosos de las ciencias naturales, como por ejemplo los zoólogos comparativos que intentan describir una especie por semejanza con otra. No es una situación deseable, y veremos más tarde que cada día hay más alternativas, pero es la situación actual. Lo que diferencia a estas disciplinas de otras más tradicionales es que tratan de sistemas con muchos grados de libertad acoplados no linealmente, y que este acoplamiento da lugar a propiedades que son fundamentalmente distintas de las de sistemas más pequeños.

Hay mucho camino entre una molécula de agua y el mar, o entre el aire y la atmósfera, o entre un caballo y una colección de proteínas. En todos esos casos el reduccionismo es importante, pero no suficiente. Los sistemas complejos son más que la superposición de sus partes, y lo que quiero reivindicar es su estudio, y su aplicación tecnológica.

La simulación numérica y los ordenadores

Cada revolución científica tiene su instrumento. Galileo y sus contemporáneos tuvieron el telescopio, el microscopio, y más tarde el cronó-

metro. El siglo XIX fue el siglo de los aparatos eléctricos, de la máquina de vapor y del espectroscopio. La primera mitad del siglo XX fue la era de la electrónica, pero el instrumento más representativo a partir de 1950 ha sido probablemente el ordenador.

John von Neumann, uno de los pioneros de la aplicación de los ordenadores a la física, observó al final de los años 1940 que la mayor parte de las matemáticas anteriores a esa época habían tratado de problemas lineales, mientras que la mayor parte de los problemas reales estaban gobernados por ecuaciones no lineales. Diagnosticó correctamente que el problema residía en la gran cantidad de operaciones aritméticas necesarias para resolver cualquier ecuación no lineal, y predijo que los nuevos ordenadores entonces en desarrollo contribuirían a aliviar esa limitación, y por lo tanto a promover el estudio de problemas que no había sido posible atacar hasta entonces [M99].

En parte debido a su influencia, las primeras simulaciones numéricas de fenómenos intratables por otros métodos se llevaron a cabo durante la segunda guerra mundial. Las primeras fueron probablemente simulaciones de Montecarlo del flujo de neutrones en pilas nucleares. Ya entonces se citaba la turbulencia como una de las posibles aplicaciones de las nuevas máquinas, aunque la primera simulación de la turbulencia con una cierta complejidad no llegó hasta los años ochenta. Mucho antes se aplicaron los ordenadores a problemas de optimización económica o de teoría de juegos, y más tarde a problemas físicos con relativamente pocos grados de libertad, pero cuyo tratamiento analítico resultaba difícil por su no linealidad.

Es instructivo repasar cómo han ido evolucionando los textos sobre las aplicaciones de los ordenadores a lo largo de los años. En un libro de 1958 nos encontramos con que los ordenadores se estaban aplicando al cálculo de modos propios de vibración de estructuras, a problemas lineales de electromagnetismo y de óptica, a la deformación elástica de sólidos, a problemas de optimización y control, y a problemas sencillos de aerodinámica tales como el flujo potencial estacionario en dos dimensiones [A58]. Las aplicaciones al control e interpretación de experimentos y procesos eran ya importantes, aunque la escasa fiabilidad y el gran tamaño de las instalaciones informáticas dificultaban su uso en

tiempo real. Las simulaciones como tal eran aún escasas, y los textos de la época estaban dedicados en gran parte a problemas que hoy consideraríamos relativamente triviales, tales como la resolución numérica de la ecuación del calor:

En los próximos años empezaron a aparecer aplicaciones “nicho” en las que el ordenador permitió estudiar nuevas clases de fenómenos.

Los modelos numéricos empezaron a dominar la predicción meteorológica a partir de la mitad de los años sesenta, especialmente cuando se los combinó con las observaciones por satélite. La predicción meteorológica fue de hecho la primera aplicación propuesta para la mecánica de fluidos computacional. La publicación original, en 1922, fue anterior a los ordenadores, incluso a los mecánicos, e incluía plantillas para distribuir las tareas de cada paso temporal entre equipos de personas conocidas como “calculadores” [R22]. El experimento falló y contribuyó al descrédito de la meteorología numérica durante muchos años. Pero cuando von Neumann retornó al problema en los años 1940 quedó claro que el planteamiento original había sido bueno, y que el problema había sido la baja resolución posible con los cálculos manuales. Los modelos actuales, tanto sinópticos como climatológicos, son descendientes directos de aquellos primeros programas.

En los años setenta y ochenta [D79, B87] el catálogo de aplicaciones científicas de los ordenadores incluía aún sólo problemas no estacionarios pero bidimensionales. Las mayores simulaciones de la época utilizaban como mucho unos pocos miles de grados de libertad y las aplicaciones a optimización eran más o menos del mismo tamaño. A pesar de lo cual, la mayor parte de las estructuras se diseñaban ya por ordenador, y las simulaciones aerodinámicas, a pesar de necesitar todavía un uso extenso de modelos en las zonas turbulentas y viscosas del flujo, se habían convertido en herramientas esenciales para el diseño de aviones y de buques.

En otro desarrollo importante, Pople y su equipo introdujeron en 1970 el programa Gaussian para el cálculo de la estructura electrónica de moléculas a partir de la ecuación de Schrödinger [H70], inaugurando así el nuevo campo de la química cuántica computacional que sigue siendo excepcionalmente activo hoy en día.

En los años noventa el desarrollo de aplicaciones para la simulación numérica se aceleró, y al fin del siglo todo había cambiado. El detonante fue probablemente la introducción del paralelismo como tecnología de uso común durante la primera parte de la década, pero las actas de un congreso en 2004 incluyen referencias a simulaciones turbulentas tridimensionales no estacionarias, a la dinámica de plasmas en reactores de fusión, y a la climatología y oceanografía en condiciones esencialmente realistas [W04].

A pesar de todo, queda mucho por hacer. Hemos visto que el número de grados de libertad del flujo alrededor de un avión es 10^{20} . Un ordenador de un petaflop/s (10^{15} operaciones/s), que es la velocidad de cálculo esperada para dentro de unos pocos años, tardaría un día simplemente en contarlos. Calcular cualquier cosa sobre todos esos grados de libertad costaría años. Las necesidades de la meteorología y de la oceanografía son aún mucho más estrictas, y cualquier ser vivo es un sistema de una complejidad todavía mayor:

Afortunadamente no siempre se trata de calcular todos los grados de libertad de un sistema complejo. El número de moléculas en un litro de gas es 10^{23} , y calculamos a diario las propiedades de los gases sin preocuparnos por ello. Lo que se trata es de entender suficientemente el sistema como para poder modelar el comportamiento de grandes bloques de grados de libertad. Si esto se hace correctamente, la complejidad puede llegar incluso a ser un factor simplificador, porque la estadística resume una gran cantidad de comportamientos posibles en unos pocos números. Es la razón por la que la termodinámica describe bien los fenómenos térmicos en equilibrio haciendo pocas hipótesis, y por la que incluso ecuaciones como las de Navier-Stokes, basadas en desarrollos alrededor del equilibrio local, describen tan bien el comportamiento de flujos que están macroscópicamente muy lejos del equilibrio.

En este proceso de modelización es donde los ordenadores han demostrado ser más útiles. Se ha acusado a menudo a los ordenadores de ser sólo capaces de dar respuestas. Es una crítica válida. La inteligencia artificial, que era otra de las grandes promesas de la informática, ha avanzado mucho menos que la simulación. Pero dar respuestas es importante. El ordenador es el equivalente de las máquinas herramienta para el cerebro. Una grúa no decide qué es lo que quiere mover, pero nos permite mover cosas que de otra forma no podríamos.

La ciencia y la tecnología han avanzado en gran parte a partir de experimentos conceptuales, que se plantean sin pretender necesariamente llevarlos a cabo. A veces son incluso imposibles de realizar, y esa imposibilidad es la respuesta que importa. Por ejemplo, ¿Qué pasaría si viajáramos a la velocidad de la luz? ¿O si pudiéramos elegir las moléculas que atraviesan un orificio en función de su velocidad?

Esas preguntas, que dieron lugar en su día a revoluciones científicas y más tarde a aplicaciones tecnológicas, se pueden contestar sin grandes cálculos, pero en otros casos resulta más difícil. La no linealidad antes citada, y la complejidad, son ejemplos de factores que dificultan la respuesta, pero los últimos cincuenta años están llenos de ejemplos en los que los ordenadores han permitido allanar esas dificultades, y avanzar en temas que llevaban atascados desde hacía mucho tiempo.

Empecemos por ejemplo con la física matemática. Las ondas permanentes solitarias se observaron por primera vez en los canales de transporte de mercancías del siglo XIX, y su descripción matemática, por medio de la ecuación de Korteweg-deVries, se hizo poco después. Se deben a un equilibrio entre dispersión y no linealidad, y la no linealidad es crucial. Durante los cien años siguientes ese carácter no lineal impidió que se produjesen avances adicionales en su estudio, y los solitones fueron arrinconados a la galería de curiosidades científicas.

Al final de los años sesenta los ordenadores habían mejorado hasta el punto de poder tratar ecuaciones no lineales en derivadas parciales en una dimensión espacial y en el tiempo, y un grupo de matemáticos decidió, probablemente por curiosidad, estudiar la interacción entre dos ondas solitarias [Z65]. Mucho antes Fermi, Pasta y Ulam [F40] habían realizado simulaciones numéricas de una cadena de osciladores acoplados de forma débilmente no lineal. Lo que esperaban era que la no linealidad acabase dando como resultado una equipartición de la energía entre todos los modos posibles de la cadena, de la misma forma que la energía se reparte por igual entre todas las moléculas de un gas en equilibrio. En el caso de los solitones, la predicción era que la colisión de objetos no lineales produciría su destrucción, y quizá la formación de una "nube de residuos" parecida a la colisión entre partículas elementales. Ambas predicciones resultaron erróneas. El comportamiento de los os-

ciladores de la cadena resultó ser ordenado y recurrente, en vez de caótico, y los solitones resultaron ser robustos. Las dos ondas solitarias se atravesaron limpiamente, y emergieron de la colisión esencialmente sin cambios. La teoría analítica de este proceso es posterior a la observación numérica [G67], y probablemente no se habría producido sin ella. Lo que empezó como curiosidad científica también acabó dando lugar a aplicaciones industriales. El transporte por medio de barcasas en canales ha perdido mucho peso económico desde el siglo XIX, pero los mismos procesos de no linealidad y dispersión controlan la propagación de pulsos en fibras ópticas, y la transmisión de información usando solitones es un método importante para multiplicar el ancho de banda.

Quizá más sorprendente aún que la anterior observación de orden donde se esperaba caos, fue la observación numérica de caos donde se esperaba orden. El experimento partió esta vez de la meteorología, donde Lorenz había estado buscando modelos sencillos para la convección atmosférica [L63]. Su primer modelo simplificado comprendía sólo la evolución temporal de tres variables, pero la simulación numérica demostró que no seguían ninguna ley sencilla, y que se comportaban de forma caótica. También en este caso la explicación teórica vino más tarde, y dio lugar a la teoría del caos determinista, una rama de las matemáticas completamente nueva, que probablemente tampoco se habría desarrollado sin los experimentos numéricos. De hecho, una gran parte de los desarrollos posteriores en ese campo han seguido siendo numéricos.

En un ámbito de interés más inmediatamente aplicado, podemos referirnos a la climatología, que incluye tanto al comportamiento de la atmósfera como su interacción con el océano, con la orografía, con la cubierta vegetal, y con el medio interplanetario. La incertidumbre actual sobre la realidad y sobre el posible origen del cambio climático demuestra la complejidad del sistema, y subraya nuestra ignorancia sobre cómo atacarlo. Es interesante recalcar sin embargo que la creencia generalizada de que el clima está cambiando se basa, aparte de en unas pocas medidas globales de la concentración de CO_2 y de la temperatura media, en la concordancia entre las predicciones de varios modelos numéricos aproximados. La predicción original de que un aumento del CO_2 atmosférico tendría como consecuencia un calentamiento global data del final del siglo XIX [A96], pero nuestra preocupación actual se debe a que las simulaciones climáticas parecen apoyar aquella predicción.

Sería quizá intelectualmente más satisfactorio disponer de una teoría sencilla que identificase las causas principales del cambio, y que nos permitiese plantear con seguridad qué medidas tomar para detenerlo o, por lo menos, para adaptar mejor nuestra sociedad a las nuevas circunstancias. Pero el problema es demasiado complejo para alimentar la esperanza de una solución de ese estilo, y lo más probable es que lo más que podamos esperar, y la única herramienta con la que contemos para tomar decisiones en el futuro, sea un modelo numérico más perfeccionado.

En un último ejemplo, mucho más cercano a mi trabajo personal, la influencia de los ordenadores en el estudio teórico de la turbulencia ha sido fundamental. La turbulencia es un problema de interés tanto teórico como práctico. La mayor parte de los flujos industriales son turbulentos, así como prácticamente todos los flujos geofísicos. El estudio de la turbulencia se inició a mitad del siglo XIX por ingenieros interesados en optimizar el aprovisionamiento de aguas de las ciudades, y en minimizar la resistencia de los vehículos. Durante mucho tiempo fue un campo esencialmente empírico. La mayor parte de los trabajos clásicos sobre la teoría de la turbulencia hasta mediados del siglo XX tratan en realidad sobre la transición del flujo laminar a turbulento, en vez de sobre el flujo turbulento en sí. Entre 1940 y 1960 una serie de trabajos realizados por estadísticos y por meteorólogos sentaron las bases analíticas de una solución al problema utilizando el modelo fenomenológico de la cascada de energía [ver F95]. Pero, a pesar de eso y de los grandes avances experimentales de los años siguientes, los detalles del flujo siguieron siendo desconocidos hasta mediados de los años ochenta.

Por esas fechas los ordenadores habían empezado a ser lo suficientemente potentes como para realizar simulaciones realistas de flujos bidimensionales, y el resultado fue una revolución instantánea en su comprensión. La organización a gran escala de la atmósfera es el ejemplo más familiar de turbulencia casi bidimensional. La profundidad de la atmósfera es aproximadamente de 10 km, mientras que la extensión lateral de las grandes borrascas y anticiclones es unas cien veces mayor. En 1967 se había propuesto una teoría para el espectro de potencia de la velocidad en ese tipo de flujos, siguiendo las mismas líneas que las teorías estadísticas de la turbulencia tridimensional, pero quedó pronto claro que, así como los experimentos tridimensionales seguían bien las

predicciones teóricas, los bidimensionales no lo hacían. La razón de esta anomalía siguió siendo un misterio hasta las primeras simulaciones numéricas, que demostraron que en dos dimensiones se forman estructuras coherentes estables, que no se rompen como en el caso tridimensional, y que impiden el funcionamiento de la cascada turbulenta. La consecuencia fue que los meteorólogos y los oceanógrafos pudieron reinterpretar muchas de sus observaciones de borrascas y de torbellinos en función de estas estructuras, y fueron capaces de plantear una teoría mucho más coherente de la atmósfera.

En tres dimensiones hizo falta esperar un poco más. La primera simulación de un flujo turbulento isótropo sin la utilización de modelos se realizó hacia 1985. El flujo se eligió por su sencillez más que por su importancia práctica, a pesar de lo cual requirió utilizar al máximo la capacidad de los ordenadores de la época. Unos pocos años más tarde llegó la primera simulación de un flujo de interés real. Fue un canal turbulento [K87], aunque su número de Reynolds, que es una medida de la complejidad del flujo, estaba aún muy por debajo de los valores industriales. Esta simulación fue importante históricamente. Hasta entonces la turbulencia teórica se había tratado en gran parte como un problema de física. Los flujos isótropos no existen en la práctica, aunque sean una buena aproximación para un cierto rango de escalas turbulentas, y el propósito principal de las simulaciones isótropas había sido validar o falsificar la teoría de la cascada de energía. Hay un grupo de estudiosos que propone, incluso hoy, que como la turbulencia bidimensional no cumple las hipótesis de la cascada, y como las simulaciones numéricas han aclarado por qué, no debe en realidad considerarse turbulencia.

El canal turbulento era un problema distinto, que nació como una ligera simplificación de flujos reales tales como las capas límites sobre vehículos o como las tuberías. Se sabía desde el principio que la turbulencia cerca de paredes no se regía por la teoría de la cascada, pero era un caso con demasiada importancia práctica como para discutir si se le debía clasificar como turbulento o no. Lo que interesaba no era comprobar una teoría existente, sino plantear una nueva. Y el resultado no sólo debía dar una explicación física, sino que debía también tener como resultado métodos prácticos de cálculo para configuraciones industriales, y generar en lo posible un modelo del flujo lo suficientemente detallado como para permitir quizá controlarlo

algún día. El estudio de la turbulencia de pared es una labor en marcha, y ninguno de los dos fines iniciales puede considerarse completo, pero el campo ha avanzado muchísimo desde las primeras simulaciones.

La historia de estas investigaciones es interesante, porque son un ejemplo de cómo la simulación numérica puede dar lugar a la formulación de una teoría para un sistema complejo. Desde el principio se vio que el catálogo de estructuras fluidas propuestas por los experimentalistas en la cercanía de la pared había sido incompleto en algunos casos y demasiado prolijo en otros. Aquellas primeras simulaciones proporcionaron una descripción cinemática del flujo, y al final de los ochenta existía ya una enumeración de las principales estructuras presentes en la capa inmediatamente contigua a la pared. Estos primeros trabajos resultaron agotadores para los investigadores y para los centros de cálculo implicados. Era normal que las simulaciones se extendiesen a lo largo de varios meses, y que utilizarasen completamente el ordenador mayor disponible en el momento. Con esas limitaciones era difícil llegar más allá de la cinemática.

El estudio de la dinámica de un proceso requiere generalmente algo más que la simple observación. Es necesario responder a preguntas del tipo de: ¿Qué pasaría si hiciéramos esto? Y esos experimentos hay que realizarlos varias veces para comprobar o descartar diversas hipótesis posibles. Este proceso interactivo es imposible cuando cada prueba requiere meses. Sin embargo, aun en ese contexto, la simulación tiene una gran ventaja sobre la mayor parte de los experimentos de laboratorio. Hemos hablado antes de la incapacidad de los ordenadores actuales de formular preguntas, pero nadie duda de su capacidad para producir respuestas. Una vez que somos capaces de simular un flujo tenemos su descripción esencialmente completa, y podemos usarla para contrastar nuestras hipótesis. Además, ya que una simulación no está necesariamente sujeta a limitaciones físicas, cualquier experimento conceptual, por peregrino que pueda parecer, puede realizarse numéricamente. Desde ambos puntos de vista, los experimentos tradicionales están mucho más limitados.

Además, si el principal problema de la simulación numérica era el coste de cada experimento, la informática ha proporcionado hasta ahora la respuesta. Durante las últimas décadas la potencia de los ordenadores se ha multiplicado por un factor de mil aproximadamente cada diez años. No sabe-

mos cuánto tiempo seguirá esa tendencia, pero los especialistas pronostican que continuará al menos por otras dos décadas. Mientras sea así, el problema del coste de las simulaciones se reduce a un problema de espera. Las simulaciones dinámicas que no resultaban prácticas en los años ochenta, se volvieron triviales en los noventa. La década estuvo dedicada a simulaciones conceptuales que fueron aislando aspectos parciales de la física del problema hasta conseguir, hacia finales del siglo, lo que creemos que es una teoría consistente y esencialmente completa de la capa adyacente a la pared. Una consecuencia, por ejemplo, es que tenemos ahora varias estrategias de control que deberían en principio permitirnos manipular la turbulencia sobre el ala de un avión hasta reducir su resistencia de fricción en un 20-30%. Los obstáculos no son ya teóricos, sino de implementación práctica.

Nada de esto habría sido posible sin simulaciones numéricas. El problema de la turbulencia en tuberías tiene 150 años de historia, y fue el primer problema en el que la turbulencia se consideró científicamente. Su resolución había parecido imposible hasta hace poco, pero cedió, al menos parcialmente, a los primeros veinte años de simulación numérica. La solución aún no es completa. Lo que se llama la capa logarítmica, que es la que está inmediatamente encima de la capa de pared, también es especial, y también es importante. Su simulación exacta es más cara, porque los números de Reynolds locales son más altos que justo al lado de la pared. Los últimos cinco años han proporcionado las primeras simulaciones "cinemáticas" de esta parte del flujo. También han utilizado al máximo las máquinas existentes, y también han requerido varios meses de cálculo cada una. Estamos en la misma situación para esta capa que estábamos hace quince años para la capa de pared. Tenemos un catálogo de las estructuras que intervienen, pero no sabemos cómo están relacionadas entre sí. Sin embargo, sabemos los experimentos numéricos que querríamos hacer, y el problema es otra vez una cuestión de esperar. Lo más probable es que, según los ordenadores sigan aumentando sus prestaciones, la teoría de la capa límite turbulenta esté esencialmente completa en los próximos diez o quince años.

La próxima revolución industrial

Ejemplos parecidos a los que acabo de describir se pueden encontrar en muchas otras ramas de la ciencia y de la tecnología. La potencia de los

ordenadores sigue aumentando, y la lista de problemas que aún no podemos abordar por falta de capacidad de cálculo se hace cada día más corta. Probablemente no está lejos el día, que llegará casi con seguridad dentro de este siglo, en el que podamos calcular esencialmente “todo”. Por lo menos en el mismo sentido en el que en la actualidad las grúas y las máquinas herramientas nos permiten mover casi cualquier cosa. Cuando llegue ese momento podremos también predecir el resultado de “cualquier” proyecto antes de llevarlo a cabo, en el mismo sentido en el que ahora no estamos limitados en lo que podemos construir por el tamaño de las piezas. El resultado es que se está produciendo una revolución científica referida a los sistemas complejos del mismo orden que las revoluciones pasadas en el contexto del reduccionismo.

Sus consecuencias para el futuro de la ingeniería son algo que debemos considerar desde ahora para poder prepararnos, y para ello conviene usar otra vez como guía la historia de las pasadas revoluciones industriales. Entre los desarrollos científicos del siglo XVII y la revolución industrial del siglo XIX pasaron 150 años. Entre el desarrollo de la mecánica cuántica al principio del siglo XX y la eclosión de la electrónica de estado sólido y de la informática en los años cincuenta, pasaron sólo cincuenta años. Nadie sabe cuánto costará pasar de la revolución científica en curso hasta sus aplicaciones industriales. Quizá sea posible acortar aún más el retraso entre las aplicaciones y la teoría, o incluso realizarlas en tiempo real, inmediatamente después de los descubrimientos.

Si miramos a lo que causó el retraso entre la revolución científica de los siglos XVII y XVIII, y el desarrollo industrial del siglo siguiente, nos encontramos más que nada con la falta de materiales y de métodos de producción adecuados. El acero era un material de producción artesanal, escaso y caro. Hubo que inventar la fresa, el torno y los materiales de corte. Hubo que construir ferrocarriles y canales para transportar los productos de la industria. Muchos de esos desarrollos dependían de la existencia de otras aplicaciones anteriores, que tenían que asentarse antes de poder ser utilizadas de forma económica. La revolución electrónica del siglo XX también tuvo que esperar al desarrollo de herramientas apropiadas, tales como la microlitografía y la producción de materiales de gran pureza. Igual que hemos visto que cada revolución científica tiene sus herramientas, las revoluciones industriales tienen las suyas, y no pueden desenvolverse hasta desarrollarlas.

La pregunta que debemos afrontar ahora es cuáles serán las herramientas de la complejidad. En algunos casos empezamos ya a ver las necesidades, mientras que en otros sólo las vislumbramos. He citado antes que sabíamos cómo controlar la turbulencia sobre una pared, y que eso nos permitiría reducir la resistencia de un avión en un 15-20%. Es una posibilidad tentadora, que no sólo abarataría los costes del transporte aéreo, sino que permitiría reducir su contribución a la contaminación y al aumento del CO₂ atmosférico. Lo que nos impide implementarla inmediatamente es que necesitaríamos cubrir el ala con un mosaico de sensores y actuadores del flujo a una escala inferior al milímetro. La microtecnología necesaria no está aún disponible, aunque se investiga activamente en ella. Quizá sea aún más grave la falta de un sistema de control adecuado para esos millones de celdas de actuación. La potencia de cálculo embarcada necesaria sería del orden de 20 teraflop/s por metro cuadrado de ala, o el equivalente a un superordenador actual por metro cuadrado. No es un desarrollo impensable, porque no se trata de un ordenador de propósito general sino de un circuito especializado, pero indudablemente no existe todavía.

La misma falta de herramientas se encuentra en otros campos tecnológicos basados en sistemas complejos, desde la transmisión y utilización de la información hasta la biotecnología, y está claro que una de las principales labores de la ingeniería durante los próximos años será suplir esa falta. La nanotecnología es de hecho una de las áreas de desarrollo tecnológico más activas de la actualidad, pero se ha prestado menos atención al desarrollo de las técnicas de control para sistemas muy complejos, a pesar de que necesariamente empezarán a aparecer en cuanto las micromáquinas estén disponibles. Además, la tendencia de algunas de las investigaciones actuales sobre ese tema, que es tratar los grandes sistemas como “sociedades” –redes neuronales– de las que se espera que se autoorganicen de la misma forma que los sistemas ecológicos, no es necesariamente la más apropiada en todos los casos. En el ejemplo de la superficie del ala, el control debe ser necesariamente adaptativo, pero la solución no tiene necesariamente que ser que la colectividad de sensores aprenda por su cuenta las ecuaciones de Navier-Stokes. Sabemos por experiencia que ese es un proceso complicado, para el que el ecosistema humano ha necesitado miles de años, y que no es fácil que se reproduzca espontáneamente en una colectividad de agentes sencillos. Sabemos bastante exactamente lo que queremos que pase, y el problema es más bien cómo evitar que la complejidad del sistema nos impida imponerle el comportamiento que deseamos.

Hay además otra consecuencia del aumento de nuestra capacidad de simulación que hay que considerar, y que va más allá de la necesidad de herramientas. Tenemos que preguntarnos cuáles serán las consecuencias para la ingeniería de la posibilidad de predecir todos los resultados de nuestras actuaciones. El ala de un avión es un sistema relativamente sencillo, en el que las consecuencias de un fallo son en el peor de los casos un accidente, y en general nada más grave que un aumento del consumo en un cierto vuelo.

Oímos hablar mucho hoy en día del cambio climático, y en general se culpa a los ingenieros. Probablemente sea verdad. Desde el día en el que alguien construyó un regadío, o roturó un bosque, la humanidad ha cambiado el clima. El valle del Manzanares es hoy un sitio muy distinto de lo que era antes de que se construyese Madrid. El cambio climático no necesariamente tiene que ser malo, pero el problema es que hasta ahora hemos estado haciéndolo sin saber muy bien cómo. Una cosa es la idea genérica de que una gran presa puede influir sobre el régimen local de lluvias, y otra muy distinta es ser capaz de predecir exactamente cómo y cuánto. Lo primero empuja a la precaución, que es lo que solicita hoy una parte de la sociedad cuando se acometen grandes obras. Lo segundo conlleva una responsabilidad moral que no hemos experimentado hasta ahora.

El día que seamos capaces de simular todos los resultados de nuestras obras, ya sea de una autopista o de una aerolínea, tendremos que acostumbrarnos a incluir en nuestros cálculos sus efectos globales. Al contrario que en la simplificación intrínseca que conlleva la construcción de nanomáquinas, tendremos que empezar a pensar en nuestros grandes sistemas como macromáquinas complejas. Eso no significa necesariamente nuevas limitaciones, pero sí nuevas responsabilidades.

Si construimos una presa, ¿qué pasará con el clima de las ciudades colindantes? ¿Existe una ubicación o un tamaño óptimo que no sólo no cambie ese clima, sino que lo mejore? Por otra parte, ¿cuáles serán los efectos sobre comarcas más lejanas? ¿Quién decide en qué consiste mejorar el clima? ¿Será necesario un referéndum antes de construir cualquier cosa? ¿Cuál será el efecto aguas abajo, por ejemplo en Italia o en Cuenca? Todas estas preguntas no tienen sentido en la actualidad, porque no tienen respuesta, pero cada día serán más fáciles de contestar, y la sociedad nos exigirá cada día más que actuemos en función de esas respuestas. Ni siquiera será posible la de-

sidia. La misma capacidad de simulación que tendremos nosotros para prever los efectos de nuestra presa sobre Cuenca, estará también disponible para los conquenses, que probablemente exigirán negociar sobre cualquier consecuencia que consideren adversa. Problemas de este tipo aparecieron en los años cincuenta cuando se propuso por primera vez estimular la lluvia sembrando las nubes. El campo murió en parte por problemas técnicos reales, pero también por las dificultades políticas que implicaba.

Según nuestra capacidad de simulación se vaya extendiendo a más campos, la excusa tecnológica será más difícil de utilizar, y tendremos que tratar de forma explícita con las consecuencias morales y políticas. A los dioses siempre se les ha representado como omniscientes, pero como amorales, y es que quizá siempre hayamos sabido que es difícil compatibilizar la clarividencia con la ética. El problema no se restringe a la ingeniería civil o al posible control climático. Piénsese por ejemplo en los problemas actuales de la bioingeniería o de la medicina.

Será un mundo nuevo, probablemente tan distinto del actual como lo es el nuestro de la Europa del siglo xvii. Dos de sus principales características serán la explosión del conocimiento disponible, y el tamaño de los sistemas que se podrán manejar. No es por supuesto el único futuro posible. Puede que la complejidad resulte un desarrollo estéril desde el punto de vista aplicado, o que el reduccionismo nos sorprenda con otra maravilla que nos distraiga durante un tiempo, y nos lleve por otros caminos. También es posible que la humanidad decida resistir a la tentación de saberlo todo, y que se retire, como en el caso antes citado de la lluvia artificial. Pero en general todas las tecnologías que han sido posibles se han aplicado por lo menos una vez, y es el momento de empezar a pensar en cómo va a evolucionar nuestra profesión según vayamos siendo cada vez más capaces, no sólo de diseñar máquinas que puedan cambiar el mundo, sino de diseñar el mundo como tal.

Muchas gracias por su atención.

Referencias

- [A58] Alt, F.L. 1958 *Electronic digital computers: their use in science and engineering*. Associated Press.
- [A96] Arrhenius, S. 1896 "On the Influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground", *Philosophical Magazine and Journal of Science* **41**, 237-276.
- [B87] Benzi, R. & Sguazzero, P. (eds.) 1987 *Scientific computing on IBM multiprocessors*. IBM ECSEC, Roma.
- [B05] Bustamante, C., Liphardt, J. and Ritort, F. 2005 "The nonequilibrium thermodynamics of small systems". *Phys.Today* **58** (7), 43-48.
- [D79] Dertouzos, M.L. & Moses, J. (eds.) 1979 *The computer age: a twenty year view*. The MIT Press.
- [F40] Fermi, E., Pasta, J., Tsingou, M. & Ulam, S. 1955 "Studies of nonlinear problems", *Los Alamos Sci. Rep. LA-140* (publicado 1955). También en *Enrico Fermi: Collected papers*, vol. 2, (E. Armaildi, H.L. Anderson, E. Persico & E. Segrè, eds). Univ. Chicago Press.
- [F95] Frisch, U. 1995 *Turbulence. The legacy of A.N. Kolmogorov*. Cambridge U. Press.
- [G67] Gardner, C.S., Green, J.M., Kruskal, M.D. & Miura, R.M. 1967 "Method for solving the Korteweg-deVries equation", *Phys. Rev. Lett.* **19**, 1095-1097.
- [H70] Hehre, W.J., Lathan, W.A., Ditchfield, R., Newton, M.D. & Pople, J.A. 1970 *Gaussian 70* (Quantum Chemistry Program Exchange, Program No. 237).
- [K87] Kim, J., Moin, P. & Moser, R.D. 1987 "Turbulence statistics in fully developed channel flow at low Reynolds number". *J. Fluid Mech.* **177**, 133-166.
- [L63] Lorenz, E.N. 1963 "Deterministic non-periodic flows", *J. Atmosph. Sci.* **20**, 130-141.
- [M99] Macrae, N. 1999 *John von Neumann*, Am. Math. Soc., pag. 302.
- [R22] Richardson, L.F. 1922 *Weather prediction by numerical process*, Cambridge University Press.
- [W04] Winter, G., Ecer, A., Periaux, J., Satofuka & N., Fox, P. (eds.) 2004 *Parallel computational fluid dynamics*. Elsevier.
- [Z65] Zabusky, N.J. & Kruskal, M.D. 1965 "Interaction of solitons in a collisionless plasma and the recurrence of initial states", *Phys. Rev Lett.* **15**, 240-243.

CONTESTACIÓN

EXCMO. SR. D. AMABLE LIÑÁN MARTÍNEZ

Excmo. Sr. Presidente,
Excmos. Sres. Académicos
Señoras y Señores:

Es para mí muy grata la tarea que me ha correspondido de, en nombre de la Real Academia de Ingeniería, dar la bienvenida a esta Institución a Javier Jiménez Sendín, y contestar al discurso de ingreso que acabáis de oír. Me propongo hacer un breve resumen de su labor investigadora y de los méritos que le hacen acreedor a la medalla que recibirá en unos momentos.

Javier Jiménez Sendín nació en Madrid en 1945, en una familia que propició su futura inclinación hacia su actividad posterior a la ingeniería y la investigación. Su padre, José Antonio Jiménez Salas, fue el ingeniero de caminos que, como catedrático de mecánica de suelos en su escuela, más impulsó en España los estudios, la investigación y las aplicaciones de esta disciplina; creando una Escuela Española de Mecánica de Suelos que alcanzó pronto un gran prestigio internacional. Fue miembro de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales y sólo por razones de edad no pudo ser miembro de esta Academia.

Su hijo ha demostrado poseer una inteligencia excepcional, una gran capacidad de trabajo y una gran ambición que le impulsa a la búsqueda de los conocimientos y al desarrollo de las herramientas que permitan abordar los problemas más complejos de las ciencias y de la ingeniería. Cuando comenzó sus estudios de ingeniería aeronáutica con el plan 57, después de cursar el selectivo en el CEU de Madrid, yo que estuve presente, como profesor de mecánica de fluidos en sus exámenes del curso de iniciación, tuve ya que admirar la rapidez vertiginosa con que resolvía los problemas que se planteaban. Más tarde pude conocer de cerca su gran capacidad intelectual, cuando, recién nombrado catedrático, le tuve como alumno del curso más avanzado de mecánica de fluidos, junto con otros alumnos muy brillantes, entre ellos nuestro compañero César Dopazo.

Fue en una época, los años sesenta, de gran optimismo en la escena mundial y de cambios vertiginosos en nuestra sociedad española. Nuestros estudiantes, y Javier Jiménez entre ellos, daban también muestras claras de

una actitud optimista y ambiciosa ante la vida, compaginando una rebeldía inequívoca frente a los asuntos del orden político que no aprobaban con un gran empeño en sus estudios, basado en su vocación por los conocimientos científicos y técnicos, lo que facilitó su preparación para contribuir con sus conocimientos y con su trabajo a la construcción de un mundo y una España más satisfactorios.

Estos estudiantes mostraban una actitud nada pasiva en las clases; cuestionando todo lo que no les parecía claro y relevante. Yo que, siguiendo el ejemplo de mis maestros, Gregorio Millán y Manuel Sendagorta, intentaba transmitirles mi entusiasmo por la mecánica de fluidos y por la gran variedad e importancia de sus aplicaciones a las ciencias y a la ingeniería, me beneficié mucho de su actitud crítica como estudiantes; pues contribuyeron a mejorar mi capacidad como profesor e investigador gracias al diálogo interactivo con ellos.

La desbordante energía y capacidad intelectual de estos estudiantes les impedía centrar sus esfuerzos en la mecánica de fluidos, como era mi propósito cuando les incitaba a seguir los seminarios que organizábamos para presentar los avances recientes de la disciplina. En particular, Javier Jiménez y César Dopazo montaron en la Escuela un grupo TEU de teatro, donde Javier hacía de director y guionista junto con César Dopazo, que también hacía de actor y se encargaba del montaje musical. El proyecto fin de carrera de Javier Jiménez estuvo dedicado a los estudios de viabilidad y al diseño preliminar de una sonda espacial para la exploración de Júpiter.

Afortunadamente para mi ambición de que estos estudiantes, como españoles, contribuyesen activamente a las ciencias aeronáuticas, tuve la satisfacción de que, al recibir su título de ingeniero aeronáutico en 1969, solicitaran becas para seguir estudios de doctorado fuera de España. Así pues, Javier Jiménez pudo incorporarse al Instituto Tecnológico de California (Caltech), un centro de excelencia a la medida de sus capacidades, para seguir, con una beca conjunta de la NASA y de la ESRO, estudios graduados; primero en los Laboratorios Aeronáuticos Guggenheim (Galcit), donde obtuvo el Master en Ciencias en 1970, y después en el recién creado Departamento de Matemática Aplicada ligado al Galcit, donde obtuvo el Doctorado en 1973.

Su tesis doctoral estuvo dedicada al análisis de los efectos no lineales y de la disipación viscosa en la propagación de ondas, y a la determinación de la amplitud y estructura de las ondas acústicas en tubos, cuando se excitaban con la frecuencia de resonancia. (Su director de tesis, Gerald Whitham, está considerado con mucha razón como uno de los investigadores más influyentes en los fenómenos no lineales de propagación de ondas, acústicas y de todo tipo. Sus aportaciones se iniciaron con la descripción del campo aerodinámico lejano de un avión en régimen supersónico, para predecir la intensidad del estampido sónico, asociado a las ondas de choque que induce el avión).

Sin embargo, los temas de investigación de Javier Jiménez derivaron pronto a otros campos. Desde 1968 se estaba desarrollando en el Caltech un proyecto de análisis experimental de los procesos de mezcla turbulenta entre corrientes paralelas, con el objetivo de descubrir cómo solventar las dificultades que impedían que un avión pudiese tomar en vuelo hipersónico (con números de Mach superiores a 6) el aire ambiente necesario para la oxidación de los combustibles; incluso cuando se utiliza uno como el hidrógeno, tan reactivo con el aire a temperaturas altas.

En este proyecto, dirigido por Anatol Roshko, colaboró el ingeniero español Manuel Rebollo que acababa de llegar al Caltech para hacer el doctorado. Allí se encargó de la puesta a punto del sistema de visualización por umbrioscopía (dada la diferencia de densidad de los gases, nitrógeno y helio, de las dos corrientes) y también del análisis de las fuertes fluctuaciones temporales y espaciales de concentración que se detectaron en la capa de mezcla. Manuel Rebollo diseñó una sonda aspirante que permitía detectar estas fluctuaciones, con una gran resolución espacial y temporal. También el sistema de umbrioscopía permitía la visualización del flujo, sin sembrado de partículas, y su observación con películas de alta velocidad (8.000 fotos por segundo).

Los resultados de las observaciones fueron asombrosos, y con implicaciones claras para nuestra comprensión de los fenómenos de mezcla turbulenta (ubicuos en los procesos de combustión y en la ingeniería química), y también para entender los mecanismos básicos de la turbulencia. Encontraron que la capa de mezcla turbulenta estaba dominada por una sucesión de torbellinos del mismo signo, con un tamaño linealmente creciente

con la distancia al origen de la capa de mezcla. Pronto comprobaron que este crecimiento se debía al apareamiento de los torbellinos con sus vecinos, estableciéndose una cascada inversa de formación de escalas grandes a partir de las pequeñas.

Yo que acostumbraba a pasar por California en mis viajes al Oeste de Estados Unidos, para así poder conocer los progresos de mis antiguos alumnos Rebollo y Jiménez Sendín, soy testigo del entusiasmo que mostraban al contarme estos hallazgos que, por otra parte, tenían una implicación obvia para el análisis de los procesos de combustión. Es lógico que esta demostración nítida de la existencia de estructuras coherentes en la turbulencia redefiniere la actividad posterior de Javier Jiménez. Por ello, empezó aceptando una beca post-doctoral, que prolongaba su estancia en el Caltech para trabajar en el análisis de las estructuras coherentes de las capas de mezcla turbulenta.

Por otra parte, también en torno los setenta, se iniciaron otras revoluciones en la investigación científica, que por supuesto también afectaron de lleno a la mecánica de fluidos. Por un lado, el desarrollo de técnicas de visualización y medida, asistidas con láseres, y por otra parte el crecimiento explosivo de la capacidad de los ordenadores (que han sido esenciales para el tratamiento de imágenes y señales y para la simulación numérica). Javier Jiménez ha tenido un papel muy activo en estos desarrollos.

Cuando Rebollo y Jiménez Sendín regresaron a España montaron en nuestra Escuela de Ingenieros Aeronáuticos, con Rodrigo Martínez Val que iniciaba sus estudios de doctorado, un canal hidrodinámico para el análisis de la capa de mezcla entre dos corrientes de agua con distintas velocidades y temperaturas, y diseñaron una sonda de placa caliente para medir las fluctuaciones de velocidad y temperatura, con buena resolución espacial y temporal.

Debido a la menor viscosidad cinemática del agua, en el canal hidrodinámico se podían alcanzar números de Reynolds altos con velocidades moderadas, reduciéndose así las frecuencias de paso de los torbellinos; lo que facilitaba la visualización y sobre todo la toma de datos. Aun así, las señales analógicas proporcionadas por los sensores debían digitalizarse, proporcionando hasta 50.000 datos por segundo, para su almacenamiento en el

ordenador. Por ello les fue imprescindible desarrollar los sistemas de tratamiento y análisis de los datos, con los ordenadores entonces disponibles, lo que incluía el diseño de la interfaz sensor-ordenador.

La reincorporación de Rebollo y Jiménez Sendín a España coincidió con el establecimiento por IBM de un Centro Científico ubicado en la Universidad Autónoma de Madrid. Rebollo se incorporó a este Centro para dirigir una división dedicada al tratamiento de señales y de imágenes con ordenador; y a esta división se incorporó también Javier. El objetivo era desarrollar las técnicas apropiadas, y ayudar a grupos muy diversos de las universidades y centros de investigación, a usarlas en sus programas. Durante el período, 1975 a 1989, de estancia de Javier en el Centro IBM-UAM contribuyó al desarrollo de las técnicas de tratamiento de imágenes en campos muy diversos. Una imagen de un virus, reconstruida a partir de micrografía electrónica, apareció en la portada de la revista *Science*.

Como era de esperar, Javier Jiménez se ocupó también, con la colaboración de estudiantes de doctorado como Marta Cogollos y Miguel Hernán, del uso de estas técnicas para el análisis de las estructuras coherentes de los flujos turbulentos; incluyendo el tratamiento de las películas que Manolo Rebollo había obtenido de estas estructuras en el Caltech. También se preocupó con otros estudiantes, entre ellos Carlos Agüi, del desarrollo de técnicas de seguimiento de partículas para la medición y análisis de flujos diversos, con el apoyo imprescindible del ordenador. Su vinculación con la Universidad se había iniciado en 1974 con dedicación parcial, primero como Profesor Encargado de Curso, y después desde 1984 como Profesor Titular; para, en 1989, pasar gracias al Programa Propio del Ministerio de Educación y Ciencia a Catedrático con dedicación completa.

Su actividad investigadora y su docencia han estado centradas en la descripción y el análisis, con ayuda de la simulación numérica, de los flujos turbulentos. Estos flujos corresponden a las soluciones de las ecuaciones de Navier-Stokes para los valores típicamente altos que encontramos en una gran mayoría de los flujos de interés en la ingeniería, pero también en la oceanografía, meteorología y astrofísica. Era bien conocido, por los investigadores de la mecánica de fluidos, que estas soluciones representaban movimientos no estacionarios, no periódicos ni casi-periódicos, con fuertes fluctuaciones tanto temporales como espaciales. (Éstas con escalas

muy dispares, desde la escala grande del flujo hasta la mucha más pequeña escala de Kolmogorov, donde tiene un papel determinante la disipación viscosa; lo que dificulta grandemente tanto su análisis experimental como su simulación numérica).

Como señalé antes, se descubrieron a principios de los setenta las estructuras coherentes en los flujos turbulentos; lo que implicaba la existencia de un orden en estos flujos de carácter aparentemente tan caótico. Por otra parte, como nos ha dicho Javier Jiménez en su discurso, en la misma época Lorenz descubrió mediante análisis numérico que la respuesta de un sistema dinámico, no lineal, con tres grados de libertad tenía un carácter caótico y presentaba atractores extraños en el espacio de las fases. El sistema de Lorenz correspondía a una truncación a tres modos del sistema de ecuaciones de Navier-Stokes, incluyendo los efectos de las fuerzas de flotabilidad, en una configuración modelo para los flujos convectivos de la meteorología. El descubrimiento de Lorenz desencadenó una gran multitud de investigaciones que encontraron respuestas de tipo caótico, con caos determinístico, en gran variedad de sistemas dinámicos no lineales.

Nuestra perplejidad ante estos fenómenos está bien reflejada en los versos de Borges:

*El vago azar o las precisas leyes
que rigen este sueño, el universo*

No puede extrañarnos que alguien como Javier Jiménez, que elige como proyecto fin de carrera una sonda para la exploración espacial de Júpiter; se lance a la búsqueda de los mecanismos que ponen orden en un fenómeno tan complejo como es la turbulencia, que encontramos en las variadísimas aplicaciones de la mecánica de fluidos.

Su preocupación inicial estuvo ligada a las estructuras coherentes que se encuentran en chorros y capas de mezcla, no afectadas por la presencia de paredes cercanas. Representan el mecanismo determinante de los procesos de mezcla turbulenta que encontramos en las cámaras de combustión de los motores cohete y, también, en las cámaras anulares de combustión de los motores de reacción de los aviones. En éstas se debe mezclar íntimamente el combustible con el aire, en tiempos de residencia

en la cámara inferiores a diez milisegundos, para generar una potencia del orden de 100 megavatios en un volumen del orden del metro cúbico.

El interés de Javier Jiménez, y de sus alumnos de doctorado, ha estado dedicado posteriormente al análisis de la turbulencia llamada de pared, por estar fuertemente afectada por ella, y al análisis de las inestabilidades que conducen a esta turbulencia. Estos flujos turbulentos son los que encontramos en las capas límites externas de los aviones y de los álabes de las turbinas de los reactores; de ahí el interés práctico, no sólo científico, de estos trabajos. Interés práctico reflejado en los contratos que ha mantenido con Marcel Dassault, en conexión con el proyecto Hermes de la Agencia Europea del Espacio, con Airbus, para mejorar la eficiencia aerodinámica de sus aviones, y con la empresa ITP de motores de propulsión, para ayudarles en el desarrollo de procedimientos de diseño de sus turbinas.

Para la simulación numérica de los flujos turbulentos y el análisis de los resultados es imprescindible disponer de los ordenadores más potentes existentes. Por ello, cuando Javier Jiménez dejó el Centro Científico de IBM para venir con dedicación completa a la Escuela inició sus contactos con el Centro de Investigación de la Turbulencia (CTR) de Nasa-Ames y la Universidad de Stanford. Allí ha pasado los veranos, desde 1989, trabajando en colaboración estrecha con los investigadores del Centro, con acceso por ello a los ordenadores más avanzados de la NASA. La voracidad de Javier Jiménez por el tiempo de cálculo de los ordenadores más potentes es inmensa, como puede atestiguar Mateo Valero, porque éstos pueden utilizarse para responder al reto de entender los mecanismos que gobiernan los tan complejos flujos turbulentos. Así ha podido contribuir al descubrimiento de estructuras coherentes, tanto en la turbulencia isotrópica (sólo uno de sus trabajos en este tema tiene más de 250 citas en el ISI) como en la turbulencia de pared, donde es ciertamente la autoridad científica indiscutible.

Sus aportaciones al descubrimiento de los mecanismos subyacentes a la turbulencia isotrópica incluyen el análisis de la dinámica y estabilidad de los torbellinos intensos que encontraron, de dimensión transversal del orden de la escala de Kolmogorov y longitud del orden de la escala grande de la turbulencia. Estos torbellinos, que en su núcleo viscoso tienen velocidades circulatorias del orden de las máximas turbulentas, pueden tener

efectos e implicaciones muy importantes en campos diversos; en particular en la propagación de llamas en flujos turbulentos reactivos.

Sus aportaciones a la estructura de la turbulencia de pared incluyen la descripción de las estrías, en forma de chorros alineados con la corriente básica, a la que refuerzan o frenan, interaccionando con torbellinos en forma de horquilla que arrancan de la vecindad de la pared. El conocimiento de estas estructuras, de su dinámica y de su dependencia respecto a la rugosidad y geometría de la pared, es imprescindible no sólo para el posible control de la capa límite sino también para el análisis de los procesos de transporte de calor y masa del fluido a la pared.

Por sus conocimientos y por sus contribuciones al análisis de la estabilidad de la calle de torbellinos de Kármán y del flujo en la capa límite y, muy especialmente, por sus aportaciones al descubrimiento de mecanismos básicos de la turbulencia, Javier Jiménez ha sido honrado con el nombramiento de Fellow de la American Physical Society. Por sus muy relevantes aportaciones a la mecánica de fluidos ha sido elegido miembro del comité editorial y editor de las principales revistas de esta disciplina. También ha sido organizador, o miembro del comité organizador, de muchas reuniones internacionales y conferenciante invitado de otras muchas. Una medida clara de su prestigio como investigador y conferenciante está en su nombramiento como Profesor de Mecánica de la Escuela Politécnica de París, desde 1999; donde sus conferencias sobre dinámica de los torbellinos y turbulencia están recogidas en una monografía sobre el tema que sin duda se convertirá en clásica.

Supongo que ustedes habrán disfrutado como yo con el discurso de ingreso de Javier Jiménez, dedicado a un tema de gran actualidad para nosotros "los retos de la complejidad"; visto desde la perspectiva excepcional de alguien que ha dedicado un gran esfuerzo a analizar la estructura del prototipo de la complejidad representado por los flujos turbulentos.

La turbulencia sigue siendo todavía, a pesar de los avances recientes, uno de los grandes retos de las Ciencias; aunque, por su importancia práctica y conceptual, haya atraído, como señaló Javier Jiménez, a muchos de los matemáticos, físicos e ingenieros más distinguidos. Hans Liepmann, que fue director del Galcit en el período de Javier en el Caltech, contaba en una

conferencia el chiste de aquel borracho que andaba dando vueltas a un farol. Cuando alguien quiso ayudarle y le preguntó por lo que hacía, contestó diciendo que buscaba la llave que había perdido. Pero ¡hombre!, busque en otra parte que aquí no está. A lo que el borracho respondió: Sí, pero éste es el único sitio donde hay luz.

Javier Jiménez entendió pronto que debía dedicar sus esfuerzos, como ha hecho, a desarrollar las herramientas experimentales, de tratamiento de datos, y de análisis de reconocimiento de patrones y de simulación numérica que nos permitan disponer de luz para descubrir los mecanismos subyacentes a la turbulencia. ¡Enhorabuena por seguir dedicándote a este empeño!.

Gracias por tu discurso y bienvenido a esta Casa, que por tus muchos méritos se honra al acogerte.

