

REAL ACADEMIA DE INGENIERÍA

INGENIERÍA COMPUTACIONAL:  
PERSPECTIVAS SOBRE UNA ESPECIALIDAD  
FUNDAMENTAL Y EMERGENTE

DISCURSO DEL ACADÉMICO ELECTO

EXCMO. SR. D. ANTONIO HUERTA CEREZUELA

LEÍDO EN EL ACTO DE SU RECEPCIÓN PÚBLICA  
EL DÍA 10 DE DICIEMBRE DE 2019

Y CONTESTACIÓN DEL ACADÉMICO

EXCMO. SR. D. EDUARDO ALONSO PÉREZ DE ÁGREDA



MADRID MMXIX

INGENIERÍA COMPUTACIONAL:  
PERSPECTIVAS SOBRE UNA ESPECIALIDAD  
FUNDAMENTAL Y EMERGENTE

REAL ACADEMIA DE INGENIERÍA

INGENIERÍA COMPUTACIONAL:  
PERSPECTIVAS SOBRE UNA ESPECIALIDAD  
FUNDAMENTAL Y EMERGENTE

DISCURSO DEL ACADÉMICO ELECTO

EXCMO. SR. D. ANTONIO HUERTA CEREZUELA

LEÍDO EN EL ACTO DE SU RECEPCIÓN PÚBLICA  
EL DÍA 10 DE DICIEMBRE DE 2019

Y CONTESTACIÓN DEL ACADÉMICO

EXCMO. SR. D. EDUARDO ALONSO PÉREZ DE ÁGREDA



MADRID MMXIX

Editado por la Real Academia de Ingeniería  
© 2019, Real Academia de Ingeniería  
© 2019 del texto, Antonio Huerta Cerezuela  
ISBN: 978-84-95662-69-9  
Depósito legal: M-37789-2019  
Impreso en España

## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN Y AGRADECIMIENTOS .....	7
INGENIERÍA COMPUTACIONAL: INTRODUCCIÓN .....	9
EL PARADIGMA DE LA MODELIZACIÓN: LAS ECUACIONES .....	11
APRENDIENDO A RESOLVER MODELOS .....	14
INGENIERÍA COMPUTACIONAL COMPLEMENTANDO TEORÍA Y OBSERVACIONES .....	19
CREDIBILIDAD DE LAS SOLUCIONES .....	26
LA SOLUCIÓN DE SOLUCIONES .....	30
LOS RETOS .....	34
REFERENCIAS .....	38
CONTESTACIÓN .....	41

## INTRODUCCIÓN Y AGRADECIMIENTOS

Excelentísimo Sr. Presidente de la Real Academia de Ingeniería,  
Excelentísimas Señoras y Señores académicos,  
Señoras y Señores; queridos amigos.

Me gustaría empezar manifestando mi agradeciendo por la confianza y el honor que me otorga la Academia permitiendo que me incorpore a ella, más aún en su vigésimo quinto aniversario. Me siento una persona con mucha suerte.

Suerte por haber sido propuesto por Excelentísimos Académicos que para mí son referentes de la ingeniería, un modelo a seguir y a quienes agradezco muy especialmente su apoyo. Empezaré por Ramón Agustí y Mateo Valero ambos de mi universidad “pero” de la Escuela de al lado (lo digo por esa manía que tenemos en España del “nosotros y ellos”, esa manía de crear división donde debería haber fraternidad). Gracias por su fraternidad y por enseñarme cómo debemos hacer las cosas tanto en la universidad como en el mundo académico. Debo agradecer también el apoyo y la ayuda de Enrique Castillo y Eduardo Alonso con quienes además he tenido el privilegio de compartir director de tesis. Ambos han seguido especialidades diferentes de la ingeniería. Pero ambos han compartido siempre esa visión por la honestidad y la excelencia académica, uno en la matemática aplicada, como yo, y el otro aunando los fundamentos, el rigor y la aplicación práctica de la ingeniería del terreno. Todos ellos son modelos de excelencia académica a emular. ¡Gracias!

Suerte por haber tenido maestros y referentes a lo largo de mi formación. Visto con perspectiva, fue un lujo y una suerte estudiar en aquel momento y en la Escuela de Caminos de Barcelona. Un ejemplo: el tribunal de mi tesina estaba formado por Eduardo Alonso, Eugenio Oñate y Manuel Casteleiro. Este último la dirigió y los tres me ayudaron a entrar en el mundo de la ciencia aplicada a la inge-

niería. Mención especial debe tener Manuel Casteleiro que decidió ver más allá de las *boutades* de “enfant terrible” de mi, digamos tardía, adolescencia y creyó en mí desde el primer día dándome libertad académica y todo su apoyo y consejo para acabar en los Estados Unidos haciendo la tesis doctoral.

Suerte por conseguir estar unos años en Northwestern University con un director de tesis como Raymond Krizek que me protegió y me dejó toda libertad para que pudiera trabajar con Gregory Kriegsmann (ingeniero eléctrico del departamento de ciencias de la ingeniería y matemática aplicada) y con Wing Kam Liu (del departamento de ingeniería mecánica). Gracias a todos ellos conocí a Jean Donea, un *gentleman* del que aprendí mucho más que ingeniería. Me enseñó a trabajar con amigos.

Suerte de encontrar a lo largo de mi carrera un montón de amigos con los que he tenido el privilegio de trabajar, aprender y que me han acompañado tanto en España como en el extranjero (en Francia, Reino Unido, Estados Unidos, Italia, ...).

Suerte por ver crecer el Laboratorio de Cálculo Numérico, en el que también estamos de aniversario: 20 años, donde la excelencia académica ha sido siempre la razón de ser. Evidentemente me refiero a la excelencia académica en sus tres vertientes: los aspectos docentes, la colaboración con empresas y sobre todo del rigor en la investigación de frontera. Estoy orgulloso y es un honor poder compartir ese espacio común que construimos día a día entre todos: profesores, postdocs, estudiantes y administración.

Suerte por tener unos alumnos de doctorado y postdocs con los que siempre tengo la impresión de estar en deuda ya que creo que me han dado mucho. De ellas y ellos he aprendido casi todo lo que sé. Además, con algunos tengo el privilegio de seguir colaborando, ahora entre iguales. Sólo los que tenemos el privilegio de disfrutar dirigiendo tesis sabemos lo mucho que cada una de esas experiencias nos completa. A pesar de que cada una de ellas es distinta. Hoy es un día señalado para agradecerles los buenos y, a veces, malos momentos, porque las cosas no salen, que hemos pasado juntos. ¡Gracias!

Una enorme suerte por tener una familia que me ha acompañado y soportado. Primero unos padres y hermanos que siempre me han empujado a ser mejor. Pero fundamentalmente una compañera de viaje, Sara, y unas hijas, Cristina y Patricia, que me han soportado

en todas las “cruzadas académicas” emprendidas. Ellas me llenan de vida, me alegran cada día y con su cariño me han hecho adicto a sus besos y abrazos. Ellas también me han enseñado mucho, a ser mejor persona y estar más cerca de los tiempos que corren. ¡Gracias!

No quiero entrar en materia sin antes darles otro dato sobre la suerte que tengo. Es para mí una enorme satisfacción que me llena de orgullo recibir la medalla número XIX, de la que ha sido portador el académico constituyente Excmo. Sr. D. Enrique Alarcón. Es imposible, en este espacio tan breve, poder glosar su figura, pero creo que todos coincidiremos en que Enrique Alarcón ha contribuido de forma excepcional en las tres vertientes académicas antes citadas (docencia, investigación y transferencia) siendo uno de los pilares en España de la mecánica de sólidos en todas sus facetas: teórica, aplicada y computacional. Muestra de ello, y centrándonos sólo en la parte computacional, conviene recordar que recibió el primer premio otorgado a un español por la Sociedad Española de Métodos Numéricos en Ingeniería (por cierto, otro aniversario: 30 años) y que es el único español miembro honorario de la International Association for Computational Mechanics. Su trayectoria es, claramente, la mejor entrada para hablar de la ingeniería computacional de la que él es uno de sus precursores en España.

## INGENIERÍA COMPUTACIONAL: INTRODUCCIÓN

Definir formalmente una especialidad de la ingeniería en el contexto de la Real Academia de Ingeniería supondría una osadía que vamos a intentar evitar. Así, preferimos empezar repasando la historia reciente de la Ingeniería Computacional para ir esbozando su perfil. Y continuar con un análisis que, ya les adelantamos, será necesariamente parcial y sesgado para que nos lleve progresivamente a las conclusiones que nos interesa enunciar.

Parece claro que, a lo largo de la historia, el número de áreas temáticas y especializaciones de la ingeniería ha desbordado las clasificaciones originales. Es cada vez más evidente que las fronteras temáticas originalmente bien definidas durante la creación en España de las Escuelas de Ingeniería se han ido difuminando. Hoy es habitual encontrar grupos de investigación transversales a nuestras Escuelas, cuyo trabajo es pertinente para varias de ellas y cuya motivación proviene de diversas disciplinas. De hecho, también es cada

vez más habitual ver colaboraciones entre ingeniería y ciencias experimentales, de la vida o sociales para hacer investigación de frontera. Merecen mención aparte las matemáticas, ya que desde sus orígenes han formado parte esencial de la ingeniería: recordemos a Lagrange, Legendre, Cauchy, Fourier y tantos otros.

Centrémonos pues en la Ingeniería Computacional. Se identifica como una área emergente según las “National Academies of Science, Engineering and Medicine” de los Estados Unidos en su taxonomía de las distintas áreas de la ingeniería, ver Board on Higher Education and Workforce (2006).

La ingeniería computacional es una disciplina de aparición relativamente reciente que se ocupa del desarrollo y la aplicación de modelos y simulaciones computacionales, a menudo asociada también a la computación de alto rendimiento, para resolver problemas físicos complejos que surgen en ingeniería. Puesto que esos modelos, simulaciones numéricas y algoritmos tienen aplicaciones más allá de problemas meramente ingenieriles (por ejemplo para estudiar fenómenos naturales en diversas disciplinas científicas), en el mundo anglosajón es habitual referirse a la ingeniería y ciencia computacional, i.e. Computational Science and Engineering (CSE).

En resumen, la ingeniería computacional es un concepto que incluye la modelización, la simulación, y la aplicación a problemas concretos que habitualmente están directamente vinculados a la ingeniería pero cada vez más se extiende a disciplinas científicas cuya relación con la ingeniería clásica es menos obvia.

La modelización es el diseño, desarrollo y la aplicación de modelos para describir una realidad observada. Esos modelos se expresan habitualmente con ecuaciones. Es decir, la modelización nos permite pasar de la realidad a las ecuaciones.

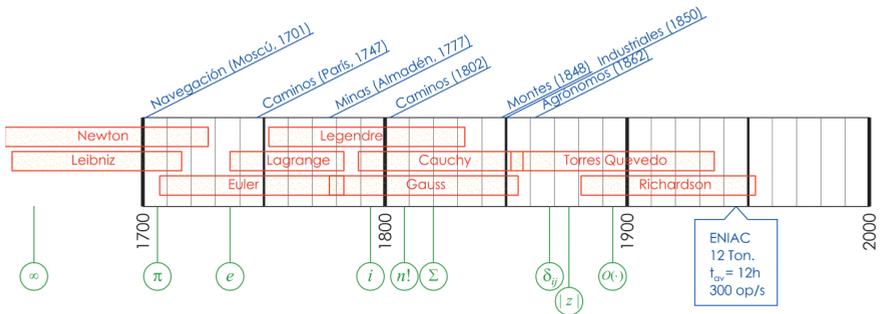


Figura 1. Esquema histórico con la creación de algunas escuelas de ingeniería.

La simulación que comporta las herramientas de cálculo, se refiere a la resolución de los modelos, las ecuaciones, con estrategias computacionales para el análisis y la predicción de la realidad física o el comportamiento de sistemas de ingeniería.

Nuestro objetivo es hablar de los retos de la ingeniería computacional y las oportunidades que nos presenta en un futuro próximo. Para sustanciar estos argumentos proponemos hacer un rápido viaje a través de la historia. Una historia que contaremos de forma muy breve, sesgada y parcial. La Figura 1 ilustra la época que nos interesa caracterizar indicando la creación de algunas escuelas de ingeniería y el año en que aparecieron por primera vez en publicaciones los símbolos que hoy son usuales en matemáticas, ver Higham (1988).

## EL PARADIGMA DE LA MODELIZACIÓN: LAS ECUACIONES

El análisis conceptual del desarrollo de la Ingeniería, en tanto que relación entre los humanos y la naturaleza que hizo posible el mundo tecnológico que conocemos hoy, se puede enunciar en tres pasos:

1. De la realidad a las ecuaciones: la modelización matemática de la realidad física. Es decir, las relaciones formales, matemáticas, capaces de reproducir, al menos aproximadamente, un sistema físico.
2. De las ecuaciones a las soluciones: el análisis y la resolución de los problemas matemáticos planteados.
3. La toma de decisiones para controlar e intervenir en los sistemas.

Obviamente, estas tres fases que nos enseñaron y que aún enseñamos en las Escuelas de Ingeniería son de un reduccionismo extremo. Por ejemplo, la observación y la adquisición de datos son esenciales para la validación pero sobre todo para conceptualizar las observaciones y desarrollar modelos. Pero de ello ya hablaremos más adelante. También, es importante recordar que además de incluir los procesos de idealización y racionalización, la ingeniería es mucho más amplia, abierta y bella. Como dijo Sir Ove Arup “los problemas de ingeniería están infra-definidos, hay muchas soluciones, buenas, malas e indiferentes. El arte es llegar a una buena solución. Esta es una actividad creativa que involucra imaginación, intuición y una

elección premeditada”<sup>1</sup>. Además de las herramientas analíticas, numéricas y experimentales la ingeniería actual sigue necesitando una creatividad que nos conecta con la actividad artística y que es imprescindible para llegar a una solución idónea.

Los dos primeros puntos, la modelización y la resolución, necesitan de la matemática. Esto ha orientado la formación en ingeniería y la ha marcado profundamente. De hecho, el nacimiento de las escuelas de ingeniería en el siglo XVIII es casi a continuación de la muerte de Newton y Leibniz. Ambos sientan sólidas bases para la modelización y el cálculo, cuya estructura se empieza a levantar a partir de entonces.

De ambos científicos y rivales habló un contemporáneo suyo: Voltaire. Voltaire tomó partido, admiraba a Newton; de hecho Voltaire fue uno de los responsables de difundir y perpetuar la historia de la manzana para poder divulgar la teoría de la gravedad de Newton en las reuniones de salón de la época. Es posible que esta preferencia por Newton estuviera influenciada por el hecho de que Voltaire, exilado en Londres en 1727, quedara impresionado por la magnificencia del funeral de estado a Newton en la Abadía de Westminster. Es entonces cuando hace el ya famoso comentario de que Inglaterra honraba a sus científicos como los demás países honraban a sus reyes. Esta admiración por Newton influye seguramente en la opinión mucho menos entusiasta que Voltaire tiene de Leibniz. Leibniz, según su teoría optimista afirmaba que, siendo bueno o no, estamos en el mejor de los mundos posibles, y que el mal que en él se da es el menor posible. A este optimismo Voltaire le dedica su feroz crítica: *Cándido o el optimismo*. Recordemos que en la novela, el discípulo de Leibniz inventado por Voltaire, Pangloss, muere ajusticiado por la Inquisición en el mejor de los mundos posibles. Preferencias y sarcasmos aparte, esta admiración por las teorías de Newton y crítica al optimismo cándido de Leibniz son el resultado del impacto y del legado de ambos personajes que llega, y nos lleva, mucho más lejos que sus bases para la modelización y el cálculo.

Siguiendo con el sesgo orientado a nuestra conveniencia, podríamos caracterizar el siglo XVIII como el siglo en que científicos e in-

---

<sup>1</sup> “Engineering problems are under-defined, there are many solutions, good, bad and indifferent. The art is to arrive at a good solution. This is a creative activity, involving imagination, intuition, and deliberate choice.” Sir Ove Arup (1895-1988).

genieros realizan avances significativos en la modelización matemática de los fenómenos físicos. Somos conscientes del atrevimiento, puesto que la modelización ya venía de antaño y, además, se ha seguido desarrollando hasta nuestros días. Ahora bien, gracias a Newton y Leibniz, a los que siguieron Euler, d'Alembert, Lagrange y Legendre, entre otros muchos, se dispuso de herramientas matemáticas sólidas para poder plantear esta modelización basada principalmente en ecuaciones diferenciales.

Obviamente, la modelización dejó su huella en el nacimiento de las escuelas de ingeniería y por supuesto en sus egresados. El siglo XIX es el siglo de la revolución industrial. El siglo en que las escuelas de ingenieros tienen su mayor apogeo. En España se crean y empiezan a formar a los técnicos que deben "modelar la naturaleza en beneficio del progreso de la humanidad".

Pero, ¿cómo pueden científicos y tecnólogos analizar y resolver los problemas matemáticos planteados? Básicamente, simplificando el problema para llegar a su esencia y poder resolverlo analíticamente. Mientras que a principios del siglo XVIII, en 1727, muere Newton, fundador del cálculo infinitesimal, a principios del siglo XIX, en 1813, muere Lagrange, que nos deja ya el cuerpo de doctrina del cálculo diferencial (y establece la mecánica como una rama del análisis matemático). Un siglo, casi nueve décadas para ser preciso, transcurre entre ambos acontecimientos en el que se desarrolla el cálculo diferencial, prácticamente idéntico al que se explica aún hoy en las escuelas de ingeniería.

Por lo tanto, siguiendo con la caracterización (muy subjetiva) de estos últimos siglos, el XIX se asociaría a la resolución analítica de los modelos matemáticos que mayoritariamente se expresan bajo la forma de ecuaciones diferenciales.

La mayoría de las técnicas analíticas que hoy se utilizan fueron desarrolladas durante esos años. De hecho, las matemáticas se asientan con fuerza en las escuelas de ingeniería y las discusiones sobre el nivel al que deben impartirse son, como en la actualidad, importantes y fraticidas. Sirva de ejemplo el posicionamiento de Laplace para la enseñanza de las matemáticas, aceptado a regañadientes por Ampère (análisis) y Poisson (mecánica) pero discutido fuertemente por Cauchy según muestran las actas del consejo académico de la Ecole Polytechnique: "M. Cauchy anunció que, para ajustarse a los deseos del Consejo, ya no se empeñará en dar,

como lo ha hecho hasta ahora, demostraciones perfectamente rigurosas.”<sup>2</sup>

Independientemente de la diversas anécdotas que nos ofrece la historia, el desarrollo de los modelos matemáticos y su resolución analítica han sido la base que ha permitido a la ingeniería desarrollar la mecánica (sólidos y fluidos), el electromagnetismo y la termodinámica. De hecho, resulta imposible muchas veces separar el desarrollo de los modelos de la conceptualización del problema físico a resolver.

¿Qué fue primero el concepto o el modelo? es seguramente una pregunta que no tiene fácil respuesta ya que en realidad, en la mayoría de los casos, van de la mano. Sin la capacidad de formalizar el modelo, es muy difícil conceptualizar la física subyacente. Por lo tanto, los modelos y su resolución permiten entender mejor el problema y confirmar o descartar hipótesis conceptuales o teorías de comportamiento.

No es aventurado decir que una gran parte de los avances ingenieriles en mecánica, electromagnetismo y termodinámica del siglo XIX se deben a la combinación virtuosa de desarrollo de modelos, su resolución y las observaciones correspondientes. En muchos casos ya pueden considerarse ámbitos maduros pero esta combinación aplicada a la biología, biomedicina y nuevos materiales, por ejemplo, sigue generando avances en la frontera del conocimiento. Es decir, todavía hay ámbitos donde el diseño de nuevos modelos y su resolución sirven para realizar avances fundamentales puesto que proporcionan resultados imposibles de obtener con experimentos o sólo a partir de modelos teóricos.

## APRENDIENDO A RESOLVER MODELOS

Las hipótesis que permiten simplificar el problema lo suficiente como para resolverlo analíticamente se convierten en un serio límite para satisfacer las necesidades de la ingeniería del siglo XX. Reducir la complejidad del problema proporciona en muchas ocasiones información cualitativa, pero no cuantitativa, sobre el resultado del modelo. Esto es excelente para la comprensión del comportamiento

<sup>2</sup> “M. Cauchy annonce, que, pour se conformer au voeu du conseil, il ne s'attachera plus à donner, comme il a fait jusqu'à présent, des démonstrations parfaitement rigoureuses.” Conseil d'Instruction de l'École Polytechnique, 24 novembre 1825.

del sistema o del proceso que se está analizando. Sin embargo, a la hora tomar decisiones en el ámbito de la ingeniería es necesario disponer de información cuantitativa. Y las suposiciones, las hipótesis de trabajo que se realizan para obtener soluciones analíticas son, en la mayoría de las ocasiones, demasiado restrictivas, demasiado simplistas. Esto es especialmente cierto en problemas con geometrías complejas, modelos complejos como la multifísica o problemas acoplados.

Si asociamos el siglo XIX a la resolución analítica de los modelos matemáticos ¿Cómo caracterizamos entonces al siglo XX de forma simple? Aunque en el siglo XX se siguen desarrollando nuevos modelos, centraremos su contribución más característica en la resolución de los modelos matemáticos.

De hecho, ya en el siglo XIX los ingenieros, preocupados por la resolución de ecuaciones polinómicas y diferenciales, trabajan en el desarrollo máquinas que les ayudan con estos cálculos. Seguramente los trabajos de Charles Babbage en su "máquina analítica" reforzados por el primer programa de ordenador de Ada Lovelace son un buen ejemplo de ello. Sin embargo en la Figura 1 aparecen Torres Quevedo (1852-1936) y Richardson (1881-1953) como dos buenos ejemplos de esa transición al siglo XX con la consiguiente eclosión

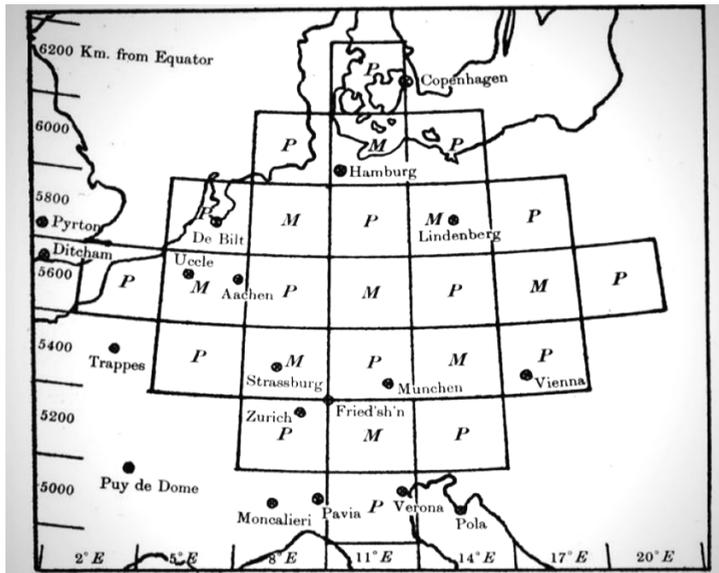


Figura 2. Malla de diferencias finitas, página 184 de Richardson, L.F. *Weather prediction by numerical process*, Cambridge University Press (1922).

de la resolución de los modelos y, en particular, de las ecuaciones diferenciales. Ambos son excelentes ejemplos de esa necesidad de resolver y calcular los problemas planteados.

De Torres Quevedo deberíamos resaltar sus *máquinas algébricas*, es decir máquinas de calcular. Por supuesto las mecánicas, que reciben una valoración muy positiva por una comisión de la Academia de Ciencias de París formada, entre otros, por Henri Poincaré (se empezó a construir en 1910 y se terminó en 1920). Pero también las electromecánicas, precursoras de las calculadoras digitales, que a su vez sientan las bases de la cibernética. Obviamente, se quedan en el tintero muchas contribuciones singulares en una gran diversidad de especialidades: dirigibles, transbordadores aéreos, radiocontrol, y el primer diccionario tecnológico Hispano-Americano, entre otras muchas.

El segundo, Richardson, es importante porque se centra la resolución numérica de ecuaciones diferenciales (más concretamente en las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales). Richardson es sobre todo conocido como el precursor de la simulación numérica del tiempo atmosférico. Para ello, parte de la formulación planteada por el meteorólogo noruego Vilhelm Bjerknes (1862–1951). La Figura 2 muestra, por ejemplo, la malla de diferencias finitas que aparece en su libro de predicción numérica del tiempo atmosférico, Richardson (1922). La predicción de Richardson integrando en el tiempo los datos medidos por la mañana no se correspondieron con las medidas que él realizó seis horas después. Grandes pasos de tiempo que no garantizaban la estabilidad del método junto con los errores de redondeo en el cálculo de la divergencia generaron variaciones de la presión nada realistas. Hay que tener presente que las mediciones las realizó durante la primera guerra mundial (en una unidad de ambulancias en el norte de Francia) y los cálculos los hizo a mano. La metodología que subyace en su procedimiento era, sin embargo, correcta.

Unos años más tarde, minimizando los errores de redondeo y limitando el paso del tiempo como indica Lynch (2008), se pudo comprobar que el procedimiento de Richardson era efectivamente correcto. De hecho, estos cálculos fueron de los primeros que realizó el ENIAC<sup>3</sup>. John von Neumann se percató de que la predicción atmosférica era un problema ideal para los ordenadores digitales. Hoy en día todas las predicciones atmosféricas que podemos consultar

<sup>3</sup> Electronic Numerical Integrator and Computer

en nuestros teléfonos vienen de simulaciones en superordenadores. Para poner en evidencia la evolución el cálculo en el siglo XX recordemos brevemente que el ENIAC no se presenta en público hasta el 16 de febrero de 1946, pesaba como mínimo 12 toneladas (algunas referencias dicen 30 toneladas), se extendía sobre unos 150 metros cuadrados, y necesitaba unos 150 kW de potencia (1500 bombillas de 100 W). No era precisamente un ordenador portátil. Además, su tiempo medio entre averías era de 12 horas. A pesar de todo ello, fue un gran avance con respecto a máquinas anteriores de las que hemos hablado, por su velocidad y sobre todo por su concepto. Pero para poner las cosas en perspectiva, tengamos en cuenta que el ENIAC hacía 5000 sumas o 300 productos por segundo (pongamos unas 1000 operaciones por segundo), y a finales del siglo XX, simplificando, cualquier ordenador personal permitía realizar tranquilamente decenas de millones de operaciones por segundo. Es decir, los ordenadores personales de finales del siglo XX eran más de diez mil veces más rápidos que el ENIAC. Además, para ser justos en la comparación habría que comparar el ENIAC con los superordenadores. Estos estaban cerca del teraflop (un billón, un millón de millones, de operaciones por segundo) al final del siglo. Hoy en día los ordenadores personales ya alcanzan los cientos de millones de operaciones por segundo y, en lo que respecta a los superordenadores, baste decir que en Junio de este año todos los TOP500 (los 500 ordenadores más rápidos del mundo<sup>4</sup>) estaban por encima de un petaflops (es decir mil millones de millones de operaciones por segundo).

Pero volvamos a Richardson. Su osadía, que le llevó a resolver directamente las ecuaciones de Bjerknæs, proviene probablemente del éxito previo que tuvo en la mecánica de sólidos y que influyó en su planteamiento para predecir las variaciones de presión atmosférica.

En cualquier caso, el reto de resolver numéricamente los problemas matemáticos planteados era importante. Estos cálculos se realizaban a mano, muchas veces con la ayuda de las famosas reglas de cálculo, Richardson empleaba unas de medio metro de largo. Él tenía estimado que seis ecuaciones con seis incógnitas (para una matriz casi vacía) se resolvían en una hora. Richardson (1910) publicó el análisis de la antigua presa de Asuán, ver Figura 3. Era una presa de mampostería que calculó mediante diferencias finitas, el sistema de ecuaciones re-

---

<sup>4</sup> Para el High Performance Linpack (HPL) benchmark

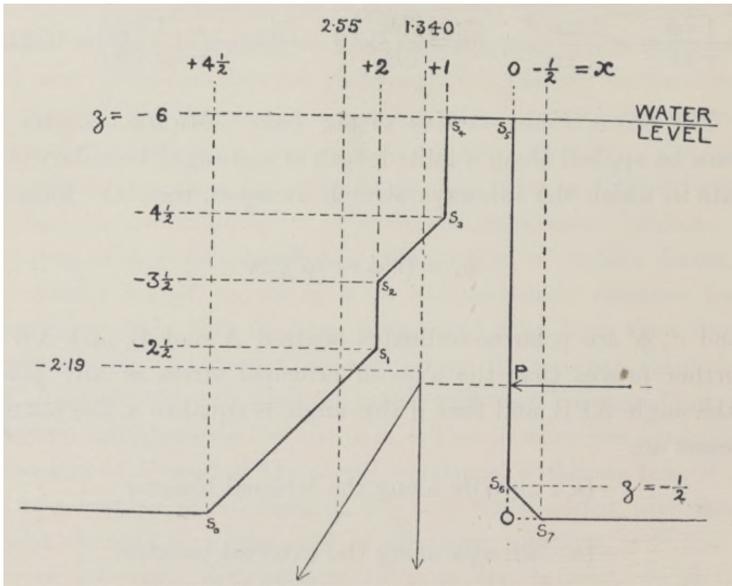


Figura 3.

sultante tenía 250 incógnitas. La definición del problema y los cálculos de esa publicación, según indica el mismo autor, necesitaron tres años. Para calcular la presa Richardson pagaba a “calculadores”: personas que realizaban las operaciones. El precio estaba asociado al número de dígitos empleados en las operaciones. Y un “calculador” realizaba aproximadamente diez mil operaciones correctas, las incorrectas las descontaba, por semana. El uso de las calculadoras humanas, no era novedoso, existía desde mucha antes que Richardson y duró mucho después. Sin embargo Richardson para evitar que los errores de un “calculador” afectaran a los resultados fue el precursor de los métodos iterativos para la resolución de sistemas lineales de ecuaciones. La importancia y la visualización de las calculadoras humanas ha llegado al gran público gracias al reciente libro de Shetterly (2016) y la posterior película. Mujeres como Katherine Johnson, a pesar de la consolidación de los ordenadores modernos, participó en programas de la NASA hasta bien entrados los años 70. Como muestra, se puede recordar su contribución en los cálculos de trayectorias en las misiones Apolo (por ejemplo para el Apolo 11 y 13).

En el siglo XX por lo tanto, primero a mano, o con ayuda de máquinas de calcular, y luego con ordenadores digitales, se calculan los problemas matemáticos que provienen de la modelización matemática.

## INGENIERÍA COMPUTACIONAL COMPLEMENTANDO TEORÍA Y OBSERVACIONES

A partir de 1950, con la aparición de los ordenadores y sus incrementos continuados de capacidades de cálculo, se identifica el nacimiento y un crecimiento exponencial de la ingeniería computacional. De hecho, en sus inicios se emplea el nombre de mecánica computacional que se ha mantenido en las asociaciones científicas por todo el mundo. Según el informe encargado por el National Research Council (1984) dependiente de las Academias de Ciencias, Ingeniería y Medicina, la mecánica computacional se aplica en todas las especialidades de la ingeniería tanto para el diseño como para el análisis. En el mismo documento se presenta la definición corta: “disciplina de la ciencia aplicada e ingeniería dedicada al estudio de los fenómenos físicos por medio de métodos computacionales basados en simulación y modelado matemático”<sup>5</sup>. Como se puede observar hay una gran coincidencia con la definición de Ingeniería Computacional presentada al inicio de este documento. Aunque esta última pone un poco más de énfasis en el desarrollo de modelos. En cualquier caso, es evidente que la mecánica computacional es el núcleo duro de la Ingeniería Computacional, y que esta no puede prescindir de aquella. De hecho, en el capítulo 2 del informe del National Research Council (1984) se define en detalle la mecánica computacional y se hace un repaso de las distintas especialidades de la ingeniería donde esta tiene un gran impacto: diseño y producción industrial, industria aeroespacial, tecnología y seguridad nuclear, industria de la automoción, ingeniería civil, arquitectura naval e ingeniería *offshore*, tecnología espacial, tecnología de combustibles fósiles, contaminación de aire y agua, predicciones atmosféricas, e ingeniería eléctrica y electrónica. Una de las muchas consecuencias de este informe del National Research Council fue la creación de asociaciones científicas asociadas a la mecánica computacional y, en particular, de la asociación internacional (International Association of Computational Mechanics).

Una de las grandes riquezas de la Ingeniería Computacional es su transversalidad. Esta no es sólo debida a las distintas especialidades de la ingeniería donde tiene aplicación e impacto. Está asociada también a la necesidad de tener conocimientos fundamentales y prác-

<sup>5</sup> “Computational mechanics is that discipline of applied science and engineering devoted to the study of physical phenomena by means of computational methods based on mathematical modeling and simulation.”

ticos de ciencias básicas, en particular matemáticas, computación y, por supuesto, de ingeniería para poder aportar contribuciones originales a esta especialidad. La transversalidad de la ingeniería computacional genera impactos en todas las ramas clásicas de la ingeniería, y que afectan muchas facetas de nuestras vidas y nuestra sociedad: nuestro entorno físico, nuestra seguridad, nuestras comunicaciones y movilidad, los productos que utilizamos...

Por lo tanto, la Ingeniería Computacional está a caballo entre la teoría y la práctica (englobando aquí desde el experimento a la aplicación), y también necesita de esta, ver Oden *et al.* (2006). Es evidente que el diseño, desarrollo y la aplicación de modelos así como su simulación y resolución nunca podrán reemplazar completamente los experimentos reales, sobre todo si estos se hacen en condiciones realistas.

La simulación de colisiones frontales de vehículos es seguramente un ejemplo paradigmático en el que la Ingeniería Computacional ha complementado la teoría y la experimentación y que la industria automovilística ha adoptado, puesto que le permite enormes ahorros tanto de coste como de tiempo para llevar sus productos al mercado.

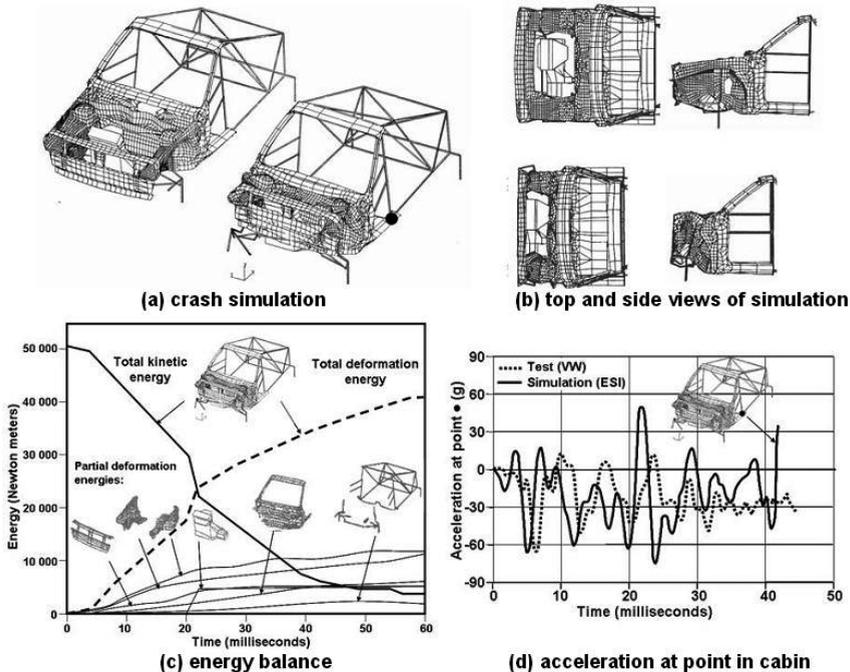
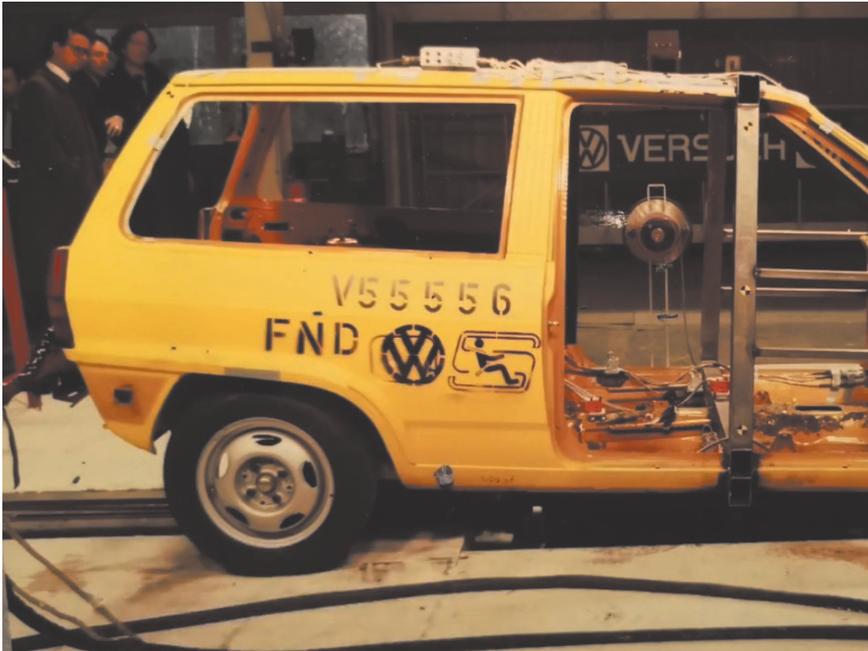


Figura 4. Resultados de la primera simulación de colisión frontal del Volkswagen Polo, en 1986 obtenidos con PAM-CRASH, el primer paquete comercial de ESI.



**Figura 5.** Colisión frontal del Volkswagen Polo para verificar las simulaciones.

En la Figura 4 se muestra la comparación entre los resultados de la primera simulación de colisión frontal de ESI (Engineering System International) y los resultados del experimento de Volkswagen realizados en 1985 (y publicados un año más tarde). PAM-CRASH es una historia de éxito, es el primer software emblemático del grupo ESI.

A raíz de unas simulaciones presentadas en mayo de 1978 en una reunión en Stuttgart que mostraban el impacto de un avión de combate en una planta nuclear, los fabricantes de automóviles alemanes se preguntaron si esa tecnología les podría servir para la simulación de los ensayos destructivos de choques frontales. De hecho, para evaluar la viabilidad de las simulaciones de impacto frontal se desarrolló un proyecto de investigación conjunto del conglomerado de los siete fabricantes de automóviles alemanes (Audi, BMW, Ford, Mercedes-Benz, Opel, Porsche y Volkswagen).

Cuatro jóvenes (Eberhard Haug, Alain de Rouvray, Jacques Dubois y Iraj Farhoomand) con un doctorado recién obtenido por UC Berkeley y fundadores de ESI hacen la simulación del impacto frontal del Volkswagen Polo a 50 km/h. Al comparar los resultados en términos de contacto, aplastamiento, velocidad y aceleración y para sorpresa de

todos, los primeros 30 milisegundos coinciden razonablemente con el experimento.

En la Figura 5 se puede ver el ensayo experimental y al fondo a Eberhard Haug junto con Alain de Rouvray.

Obviamente, este éxito representó un punto de inflexión en la industria de la automoción. La malla del Volkswagen Polo de esta primera simulación solo estaba compuesta por 5555 elementos de lámina, 106 de vigas y un total de 5100 nodos. Se realizaban 40 000 pasos de tiempo (de 1,5 micro-segundos) para una simulación de 60 m y tardaba aproximadamente 4 horas de CPU.

Para mostrar la evolución de estos problemas daremos algunos datos. Diez años después, en 1996, PAM-CRASH simulaba una cabeza tractora del TGV con 485 000 elementos de lámina. Es decir, más de 87 veces el tamaño del primer Polo. Eso necesitaba 300 000 pasos de tiempo que implicaban 5 días de cálculo en un SGI Power Challenge R8000 con 15 procesadores. Ya en 2004, 18 años después del Polo original, la simulación del choque frontal entre dos vehículos necesitaba 9 millones de elementos lámina es decir 1620 Polos. Hoy en día, los fabricantes de automóviles trabajan con un número de elementos que supera las decenas de millones de elementos incluyendo muchos más detalles, por ejemplo: motor, asientos y pasajeros. Además, cada noche lanzan miles de cálculos para, como comentaremos más adelante, hacer estudios estocásticos.

La reducción de tiempos de diseño y de los costes han hecho que hoy la modelización y simulación numéricas abarquen todas y cada una de las fases del diseño y de cada componente de los vehículos. Hoy cada parte del automóvil y su conjunto se diseña y evalúa por ordenador y eso incluye los aspectos mecánicos, térmicos, aerodinámicos, acústicos y electromagnéticos que incluyen por ejemplo los sistemas avanzados de asistencia a la conducción.

Una historia parecida se puede encontrar en la industria aeronáutica. Parecida, pero a otra escala claro, ya que los costes de desarrollo de un avión son de un orden de magnitud superior al de un coche. Para tener un orden de magnitud es bueno recordar que el coste del desarrollo y fabricación del Boeing 787 Dreamliner se estima en 32 mil millones de dólares y se necesitaron ocho años. Por otro lado, la inversión de Tesla en investigación y desarrollo entre los años 2010 a 2018 se estima en más de cinco mil millones de dólares. Durante ese periodo Tesla ha sacado tres modelos (Model S en 2012,

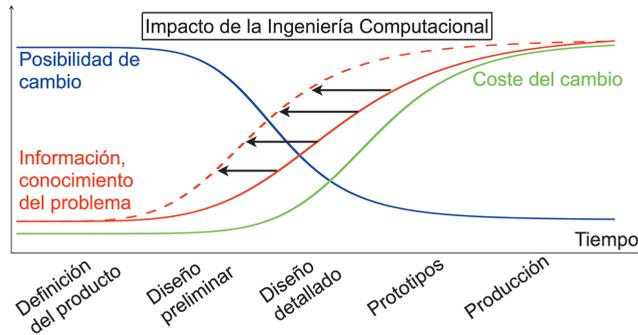


Figura 6. Influencia de la Ingeniería Computacional en el proceso de diseño.

Model X en 2015, Model 3 en 2017) y está diseñando otros tres además de las baterías para viviendas.

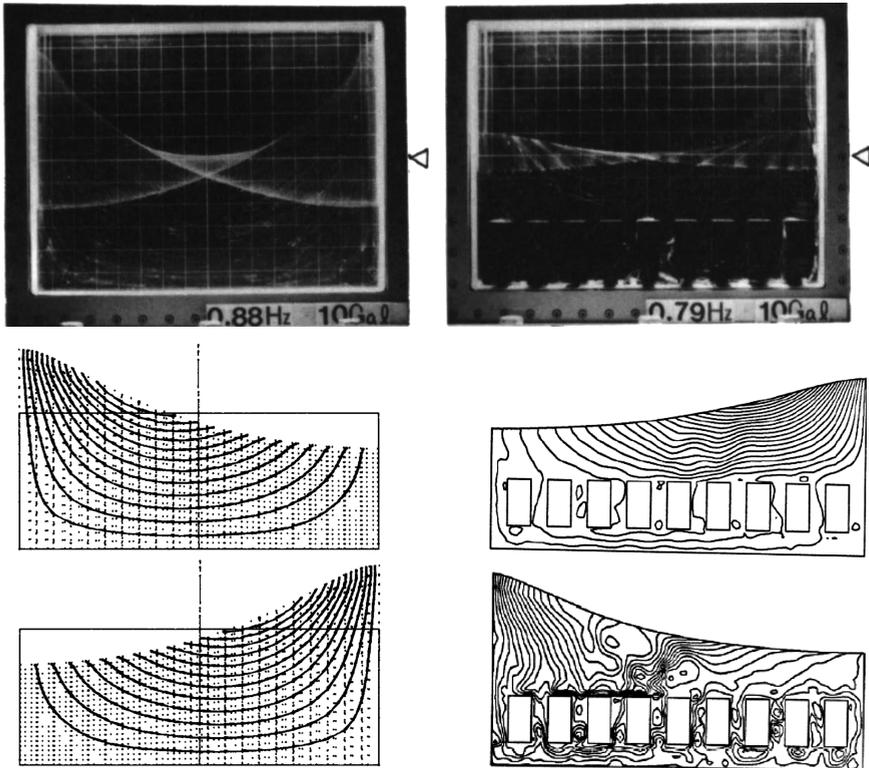
Por lo tanto, el potencial impacto económico de la ingeniería computacional en la industria aeronáutica puede ser considerable. De hecho, el valor añadido de la simulación para el diseño de nuevos aviones parece que está asumido por todo el mundo. Por un lado, como dicen Johnson et al (2005) se han reducido considerablemente el número de ensayos en túneles de viento para el diseño de aviones comerciales. En 1970 para el Boeing 757 fueron necesarios 77 ensayos en el túnel de viento (para el diseño del ala) mientras que 20 años más tarde, para el Boeing 777 solo 11 ensayos fueron necesarios. Como los propios autores indican, la reducción en número de ensayos debidos a los avances en el desarrollo y uso de herramientas de CFD (Computational Fluid Dynamics) para el desarrollo de aviones comerciales le han ahorrado a Boeing decenas de millones de dólares en esos 20 años. Sin embargo, por significativos que sean estos ahorros, son solo una pequeña fracción del coste del desarrollo de un nuevo avión. La reducción en el número de ensayos es sólo una parte de reducciones de costes que la CFD ha generado para Boeing. Gracias al uso de la CFD se llegan a soluciones óptimas en mucho menos tiempo. Los tiempos de comercialización son críticos en este sector, cualquier retraso implica penalizaciones importantes, en la mayoría de los casos hay menos de un año entre el primer vuelo de prueba y la primera venta. Los diseños realizados previamente en el ordenador deben por lo tanto estar muy próximos de los óptimos para que toda rectificación sea lo bastante rápida para obtener las certificaciones necesarias.

En la Figura 6 se detalla el razonamiento de Johnson et al (2005) que es extrapolarle a muchas áreas de aplicación de la Ingeniería

Computacional. A medida que avanza el proceso de diseño la posibilidad de cambio disminuye mientras que el coste del cambio aumenta. La información de la que se dispone, el conocimiento que se tiene del problema, igual que el coste, aumenta con el tiempo. La Ingeniería Computacional aumenta la información en épocas tempranas y permite incrementar drásticamente el conocimiento en las fases iniciales del proceso de diseño cuando las posibilidades de cambio son mayores y los costes mucho menores.

Sin embargo no siempre la Ingeniería Computacional está en tan buena armonía con los resultados experimentales. Sirva de ejemplo la campaña de estudios experimentales realizados en Japón para la seguridad de las piscinas de almacenamiento de los elementos de combustible nuclear gastado. En caso de terremoto, las olas generadas en esas piscinas no deben rebasar los límites de la contención para no perder el agua refrigerante. Recordemos que uno de los grandes problemas en el accidente de Fukushima fue la pérdida accidental del refrigerante. Al hacer los primeros ensayos en una mesa vibrante de un modelo 2D a escala 1/30 del depósito entre dos placas transparentes Muto et al (1985) observan que si excitan el primer modo de vibración la ola generada tiene una altura demasiado alta y no asumible para el diseño práctico de esas piscinas. En realidad, las piscinas de almacenamiento tienen normalmente en su interior las barras de combustible. Eso llevó a estos investigadores a reproducir los ensayos en una piscina con unos bloques sumergidos. El efecto de los bloques, según esos ensayos no variaba en exceso la frecuencia propia del primer modo pero reducía drásticamente la altura de ola (reducciones del 30% permitían diseños de piscinas mucho menos costosos), ver las fotografías de la Figura 7.

Las simulaciones numéricas de Huerta y Liu (1988) y (1990) reproducían fielmente los resultados de la piscina sin bloques pero no los de la piscina con los bloques sumergidos. En estas circunstancias es habitual pensar en errores del modelo matemático o del modelo computacional. Este no fue el caso, después de analizar en detalle la película de los ensayos y de observar las líneas de corriente de las simulaciones, se pudo concluir que el polvo de cobre introducido en el agua había modificado la viscosidad del fluido. El polvo de cobre se introdujo para que, bajo un foco de luz, la cámara de alta velocidad pudiera ver el movimiento de las partículas; se intentaba de esta forma reproducir, en el ensayo, el cálculo de las líneas de corriente.



**Figura 7.** Primer modo de resonancia en piscinas de almacenamiento de elementos de combustible nuclear gastado. Arriba fotografías de los ensayos experimentales de Muto et al (1985), abajo simulaciones de Huerta y Liu (1988) y (1990) que no muestran una reducción tan significativa de la altura de ola como los experimentos con bloques sumergidos.

Al incrementar la viscosidad, los vortices que se producían en el entorno de los bloques consumían energía y reducían drásticamente la altura de ola. En las simulaciones numéricas con la viscosidad del agua la reducción de la altura de ola era pequeña. Finalmente se optó por buscar otros elementos estructurales para reducir las olas en las piscinas de almacenamiento de los elementos de combustible nuclear gastado. No es este el único caso en el que la Ingeniería Computacional ayuda a mejorar los modelos o lo experimentos.

De cualquier forma, a partir de la segunda mitad del siglo XX la Ingeniería Computacional está presente en la mayoría de los ámbitos científicos e ingenieriles, hace posible la evaluación virtual de la respuesta de los sistemas y disminuye el número de ensayos experimentales en el sistema real. Pero en cualquier caso es lícito preguntarse ¿en qué medida son fiables los resultados de una simulación numérica?

## CREDIBILIDAD DE LAS SOLUCIONES

Una pregunta fundamental es, ¿en qué medida son creíbles los resultados de un experimento simulado o virtual? Esta pregunta a menudo también surge incluso para experimentos no virtuales en el mundo físico. Pero, es doblemente importante y sustancialmente más desafiante responderla cuando los experimentos son modelados, simulados o virtuales. Además, como ya hemos comentado los modelos computacionales están cada vez más presentes en nuestro día a día y, por consiguiente, en la ingeniería. Cada día que pasa se abordan nuevos problemas, ver Oden *et al.* (2006). Sin embargo, independientemente del formalismo matemático en el que se basan o de su objetivo, comparten una característica común: no son la realidad. Los *gemelos virtuales* (virtual twins), es decir las copias que se generan gracias a la ingeniería computacional, no son la realidad.

Las discrepancias entre lo que resolvemos y la realidad observable tienen varios orígenes:

1. Los datos que introducimos en los modelos pueden no ser correctos, esto es pueden conllevar errores de medida o incertidumbre intrínseca a su naturaleza,
2. Los modelos no se ajustan exactamente a la realidad<sup>6</sup>,
3. La resolución puede estar sujeta a errores.

Evaluar o estimar la credibilidad de las soluciones, o más precisamente, de las cantidades de interés que deseamos obtener, es en sí mismo un desafío extenso y complejo. Esta complejidad mereció otro informe específico y prolijo del National Research Council (2012). Aquí evidentemente no seremos tan extensos en detalles pero sí queremos resaltar brevemente la importancia de la verificación, la validación y la cuantificación de la incertidumbre en la ingeniería computacional. Porque al final la ingeniería debe, como decía Sir Ove Arup, llegar a la buena solución con los datos que disponemos. Y, para escoger, de forma informada y racional la mejor solución, es fundamental ser consciente de los orígenes y la magnitud de las discrepancias entre los resultados de los modelos y la realidad. Pero, ¿qué credibilidad debemos asignar a los resultados computaciona-

---

<sup>6</sup> Recordemos lo que dijo George E. Box: “todos los modelos son falsos, pero algunos son útiles” en 1978.

les para poder escoger la solución óptima? La cuantificación de la confianza en los resultados pasa por la de la comprensión de los tres orígenes de las discrepancias.

Empecemos por la tercera de ellas: los errores de la resolución. Para traducir los modelos matemáticos a un modelo computacional, o mejor dicho, a un modelo computable (que se pueda calcular con las herramientas actuales), es necesario hacer aproximaciones. Estas aproximaciones consisten en escoger un método numérico y además trabajar con una estructura de datos finita. Por ejemplo, Richardson en los casos comentados anteriormente, escogió las diferencias finitas y unas mallas, que como hemos visto, resultan ser bastante groseras. Podemos escoger métodos más modernos y discretizaciones mucho más finas. Pero en cualquier caso la solución numérica no coincide con la solución exacta del modelo matemático definido en el continuo. El análisis del método empleado nos dirá cómo tiende la solución numérica a la solución exacta a medida que se refina la discretización. A estos resultados se les denomina estimadores de error a priori. Sin embargo, para conocer el error introducido por la discretización en una solución concreta, es necesario utilizar estimadores computables a posteriori, en su mayoría basados en el residuo de la solución obtenida, ver Chamoin & Díez (2016).

En ingeniería computacional el control de esta discrepancia se denomina *verificación*. Intenta responder a la pregunta ¿con qué precisión resuelve el cálculo las ecuaciones del modelo matemático para las cantidades de interés? Seguramente el caso más paradigmático de un error en el proceso de verificación fue el hundimiento de la plataforma petrolífera Sleipner A el 23 de agosto de 1991.

Sleipner A fue la duodécima plataforma de las trece que se construyeron entre 1975 y 1995 en el Mar del Norte. Debía alcanzar los 82 m de profundidad. Justo antes se había construido Draugen (251 m) y justo después vendría Troll (303 m). No parecía por lo tanto que Sleipner A fuera la más crítica. Este tipo de plataformas están compuestas de unas celdas de hormigón que una vez lastradas reposan en el fondo marino. Durante una prueba de lastre, la estructura se hundió 18,5 minutos después del primer ruido indicando una fractura, las 14 personas a bordo de la plataforma en construcción pudieron ser evacuadas, la fuerza hidrostática al hundirse y el impacto en el fondo destrozaron completamente la estructura. Un estudio posterior del fondo marino indicó que la estructura quedó deshecha en multitud de piezas no ma-

yores de 10 m. El hundimiento implicó un registro sísmico de magnitud 3.0 en la escala Richter, y los costes de este desastre se evaluaron en 700 millones de dólares. El estudio forense posterior determinó que ciertos muros de hormigón no eran lo suficientemente gruesos. Eso fue debido a que los esfuerzos cortantes se subestimaron en un 47% en el cálculo de elementos finitos realizado con NASTRAN lo que condujo a un diseño erróneo. Un análisis más preciso de elementos finitos (básicamente una malla más fina, no era un problema ni del modelo elástico empleado ni del programa de elementos finitos sino de los parámetros que caracterizaban la discretización que era demasiado grosera), realizado después del accidente, predijo que se produciría la rotura a una profundidad de 62 m (esta ocurrió a 65 m). Un claro ejemplo de que en este caso el proceso de verificación, es decir, la precisión con la que resolvió el problema de elasticidad lineal para las cantidades de interés, no fue adecuada.

El segundo origen de las discrepancias: los modelos no se ajustan exactamente a la realidad, forma parte intrínseca de la modelización en ingeniería. Cuando decidimos que vamos a usar la teoría de vigas porque una dimensión es mayor que las otras dos, no nos adecuamos a la realidad y sin embargo para muchísimas cantidades de interés en ingeniería esta es una aproximación más que suficiente. Nos referimos a la *validación* cuando queremos saber con qué precisión el modelo escogido representa la realidad para las cantidades de interés. Un ejemplo paradigmático de error en el modelo fue el accidente del transbordador espacial Columbia el 1 de febrero de 2003.

Durante el lanzamiento, que era el vigésimo octavo del Columbia, una pieza de aislamiento de espuma se desprendió del tanque externo del transbordador espacial y golpeó el ala izquierda. Estos impactos de trozos de espuma eran habituales en los lanzamientos. En este caso se sabía que, al ser la pieza mayor, el daño sobre el Columbia podría ser más grave y, en su caso, afectar la protección antitérmica. En el proceso de reintegración en la atmósfera el transbordador se destruyó.

La valoración de los daños producidos durante el lanzamiento se hizo con un modelo para pequeños meteoritos que no era válido para una espuma de grandes dimensiones. El estudio forense posterior, realizado, entre otros, con el código FELISA del profesor Jaume Peirre del MIT, permitió determinar que los daños en el aislamiento térmico del ala del transbordador eran mucho mayores de los ini-

cialmente estimados. Estos daños hicieron que el ala no pudiera soportar las altas temperaturas, los gases atmosféricos calientes penetraron y destruyeron la estructura interna del ala, la nave espacial se volvió inestable y se indujo un colapso general.

Por último, no se debe olvidar que todo modelo necesita datos para poder aplicarse. Esto incluye los valores de los parámetros del modelo, las condiciones iniciales y de contorno y aun las magnitudes geométricas que caracterizan el sistema que se desea analizar. A menudo, estos datos no se conocen exactamente o con certeza en cada punto e instante y, en consecuencia, introducen otra fuente de discrepancia con la realidad.

Por ejemplo, en las predicciones meteorológicas se necesitan los valores iniciales de la gran mayoría de las variables (presión, velocidad,...). A pesar de que en la actualidad se dispone de muchas más medidas que en la época de Richardson, estas no cubren en detalle todo el dominio de análisis y además pueden estar sujetas a errores de medida.

Algo parecido ocurre con las condiciones de contorno. Lo ilustra bien el problema, relativamente sencillo, de diseñar los conductos de climatización de los automóviles (denominados en inglés Heating, Ventilating and Air Conditioning o con sus siglas HVAC), donde se hacen hipótesis simplificadoras de las condiciones de contorno. En la simulaciones de flujo sanguíneo, estas son todavía más críticas y, en muchas ocasiones, obligan a tener un modelo simple de toda la circulación sanguínea en el cuerpo para contemplar condiciones de contorno más realistas.

En cuanto a los parámetros que caracterizan al modelo es habitual en ingeniería hacer suposiciones informadas porque, o bien no se conocen exactamente, o bien se dispone de datos aislados. Por ejemplo, en el caso de materiales fabricados, como son los aceros o el hormigón, es habitual caracterizarlos con valores estándar aunque las mismas normativas introducen pequeñas variaciones estadísticas asociadas a su incertidumbre. En el caso de materiales naturales, como por ejemplo suelos o tejidos biológicos, todavía es más difícil disponer de valores precisos de los parámetros que caracterizan su comportamiento y su rango de variabilidad es mucho mayor.

Es habitual en ingeniería realizar estudios de sensibilidad para saber cómo perturbaciones en los datos (condiciones iniciales, de contorno y parámetros) afectan los resultados, o más concretamente, a las cantidades de interés. Y también análisis paramétricos en los que se es-

tudia la respuesta del sistema cuando los parámetros se mueven en un rango determinado. Para analizar la sensibilidad o la respuesta paramétrica, es necesario ser capaz de calcular soluciones para “todos” los valores de los parámetros (o muchísimos): de cómo hallar soluciones para muchos datos hablaremos en el siguiente apartado.

En resumen, los datos que se introducen en los modelos tienen una incertidumbre más o menos importante. Además, pueden tener también un sesgo que los perturbe de forma sistemática. El estudio de cómo afecta a las cantidades de interés esa incertidumbre a través del modelo se denomina cuantificación de la incertidumbre (UQ por sus iniciales en inglés<sup>7</sup>). La cuantificación de la incertidumbre junto con la validación y la verificación son los tres ejes esenciales que controlan la credibilidad de los resultados en ingeniería computacional.

Obviamente los tres ejes están relacionados, no es muy viable hacer un estudio de validación de modelos si no se tiene un buen control sobre los errores en la resolución del problema (verificación). Además, un estudio de verificación, validación y cuantificación de la incertidumbre en la ingeniería está asociado al conjunto de cantidades de interés concretas para las que se ha realizado. Un modelo puede proporcionar una aproximación excelente a una cantidad de interés en un problema dado y, sin embargo, proporcionar aproximaciones pobres a otras cantidades de interés. Por lo tanto, la credibilidad de los resultados en ingeniería computacional necesita de estos tres aspectos siempre que el problema esté claramente identificado.

## LA SOLUCIÓN DE SOLUCIONES

Como se ha comentado, todos los datos que entran en los modelos están sujetos en mayor o menor medida a una incertidumbre. Para poder tomar decisiones fundamentadas, algo que forma parte intrínseca de la ingeniería, es necesario saber cómo variaciones de los datos afectan a las cantidades de interés. Por ello, es práctica habitual resolver el problema para los datos probables y también para otros valores posibles. Sin embargo este proceso puede resultar muy costoso o directamente inabordable en la práctica.

Por ejemplo, dado un problema que necesite diez datos entre condiciones de contorno, iniciales y parámetros y en el que se desee

---

<sup>7</sup> Uncertainty Quantification

muestrear cada rango de valores de esos datos con sólo cinco casos (el esperado, los extremos y dos intermedios para cada lado) implica realizar  $5^{10}$  resoluciones del problema, es decir casi 10 millones de resoluciones. Este es un muestreo simple y burdo, seguramente nos sería mucho más útil conocer las variaciones (derivadas en cada uno de esos puntos). Conocer los gradientes en este espacio de diez dimensiones implicaría que para cada punto de muestro (los casi 10 millones de puntos) se deberían hacer diez resoluciones más del problema, lo que nos situaría en un total de cien millones de resoluciones. En muchos problemas industriales es habitual encontrar tiempos de respuesta para los cálculos de una noche. Por lo tanto, no es realista plantearse, en estos casos, resoluciones que requieran cien millones evaluaciones del problema.

Por lo tanto, a pesar de que la ingeniería computacional está bien integrada en la práctica industrial y tecnológica, en muchos problemas industriales relacionados con la optimización, identificación de parámetros o la con cuantificación de incertidumbre, los costes computacionales hacen que no se puedan plantear en la práctica del día a día. Esto es porque son problemas donde es necesario explorar grandes espacios paramétricos (es decir, que necesitan resolver una gran cantidad de problemas determinados por la variación de la familia de datos). Abordar múltiples consultas de manera eficiente y razonablemente precisa es crucial en aplicaciones de gran interés industrial (independientemente del producto fabricado: motores, automóviles, aviones, helicópteros, cohetes, dispositivos médicos...). El cuello de botella real reside en el esfuerzo computacional que se debe proporcionar para resolver cada una de las consultas con la precisión deseada.

Otro factor limitante afecta a la velocidad a la que se pueden tomar decisiones. El tiempo real (consultas rápidas) es crítico para el control de los procesos de fabricación, las pruebas no destructivas y la toma rápida de decisiones en las fases de producción. La toma de decisiones en tiempo real requiere tiempos reducidos entre la determinación de una nueva serie de datos y el resultado en términos de cantidades de interés. Por ejemplo, para el diseño aerodinámico de una carrocería de un automóvil, unos datos nuevos pueden implicar un pequeño cambio en la forma de la carrocería. Eso requiere en primer lugar un preproceso que en algunos casos se mide en días. Luego es necesario el cálculo, que como hemos comentado está ha-

bitualmente limitado por el industrial a una noche. Finalmente, es necesario hacer el postproceso para obtener las cantidades de interés deseadas, lo que supone un día más. Obviamente, este procedimiento no permite al diseñador tomar decisiones en tiempo real.

En resumen, a pesar de disponer de modelos y técnicas de resolución que permiten resultados con una alta credibilidad, no es viable su uso en tiempo real. Tampoco es viable esperar que el incremento de la velocidad y capacidades de los ordenadores vaya a resolverlo. Además, tecnologías sólo aplicables con superordenadores limitan su desarrollo ya que no llegan a la pequeña y mediana empresa, ni permiten su integración en productos de consumo. Modelos completamente tridimensionales y en régimen transitorio, permiten obtener representaciones de alta fidelidad del sistema, pero resultan demasiado costosos. Si bien representan el sistema con un alto grado de exactitud, no permiten su uso en tiempo real en infraestructuras de cálculo habituales y aún menos en sistemas embebidos.

Sin embargo, esta problemática no es nueva y ha acompañado a la ciencia y, más concretamente, a la ingeniería desde sus orígenes. La solución siempre ha sido disponer de los resultados ya precalculados para distintos valores de los datos en forma de ábacos, diagramas o tablas. Los ingenieros de cierta edad que, en España, hemos estudiado o trabajado con hormigón recordamos los ábacos y las tablas del libro de Jiménez Montoya, *Hormigón Armado*, para el dimensionamiento y comprobación de las estructuras de hormigón. En él, ábacos más o menos complejos permiten ahorrar un montón de cálculos al estar estos ya realizados y tabulados para su uso. Además, estos ábacos también muestran otra característica importante: los parámetros que hay que introducir en los ábacos son siempre menores que el número de datos/parámetros originales que habitualmente son geométricos y materiales. Es decir, la solución del problema está caracterizada por un conjunto de variables (datos, parámetros) más pequeño y sin redundancia.

Estás dos características, el precálculo y la reducción de la dimensionalidad, ya existentes en ábacos y tablas clásicas, son las que se desean reproducir de manera más formal con los modelos reducidos (ROM por sus siglas en inglés<sup>8</sup>).

---

<sup>8</sup> Reduced Order Models

En esencia se divide el esfuerzo de resolución en dos fases, una offline cuyo coste puede ser muy elevado que permite la construcción de los ábacos y tablas, esta vez digitales, y otra online que es la que realiza el usuario al emplear el ábaco. De hecho esta segunda fase consiste en evaluar la “solución de soluciones”: dados unos parámetros, unos datos, calcular de forma rápida, gracias al ábaco digital, la solución. Se han desarrollado diversas metodologías para implementar en la práctica estas dos fases y así asegurar respuestas casi instantáneas para cada nueva serie de datos para los que se desee una nueva aproximación y, además, manteniendo el nivel de precisión de los procesos clásicos y habituales, ver Chinnesta *et al.*, (2017)

Esta solución de soluciones obtenida gracias a los modelos reducidos ha permitido crear la siguiente generación de gemelos, los llamados gemelos digitales (digital twins). Incorporar, asimilar, los datos resulta ahora factible en tiempo real. Esto abre un gran abanico de posibilidades en optimización, inferencia de parámetros, y control. Los datos, incluidos los obtenidos con sensores, se pueden incorporar en las predicciones de forma eficiente, rápida y manejando su credibilidad.

Un ejemplo interesante es el control y monitorización de las presas de tierra, en particular de aquellas que se utilizan para almacenar residuos mineros. Este tipo de presas se auscultan con diversos sensores (piezómetros, inclinómetros, extensómetros, termómetros...) que permiten controlar su estado y prever una posible disfunción antes de llegar al colapso. Estas medidas que necesariamente son puntuales, se complementan con modelos que permiten tener una idea del estado global de la estructura, de su comportamiento. Es esencial en este caso que el modelo adquiera los datos experimentales para actualizar sus parámetros de estado y adaptarse en su evolución a las observaciones. Pero es también crucial que el diseño de la campaña experimental tenga en cuenta el modelo para que proporcione la mayor información posible. Por ejemplo, el análisis del modelo y de su sensibilidad permite establecer la localización óptima de los sensores.

En este punto nos podríamos extender mucho y derivar, como ha ocurrido en la práctica, en todo un cuerpo de doctrina asociado al análisis de datos y la inteligencia artificial. Pero vamos a seguir vinculados a los modelos

## LOS RETOS

¿Es la Ingeniería Computacional una especialidad madura? Es evidente que, en algunos ámbitos y para muchos problemas, se han alcanzado unas fiabilidades considerables tanto en el desarrollo de los modelos como en las técnicas asociadas para su resolución. Hoy se resuelven de forma habitual en la ingeniería diaria muchos problemas de multifísica y multiescala con niveles de credibilidad elevados. Además, en muchos de estos casos, los modelos reducidos permiten estudiar un amplio rango de parámetros y obtener resultados en tiempos razonables. La ingeniería computacional permite empoderarnos para, siguiendo con la analogía de Sir Ove Arup, encontrar las soluciones buenas frente a las malas e indiferentes.

Por lo tanto, en muchos casos podría parecer que la modelización y la resolución subsiguiente es un tema cerrado, asentado y completamente desarrollado. De hecho, estos modelos y sus correspondientes herramientas de resolución son, en muchos ámbitos clásicos, productos que están disponibles para ser empleados por usuarios interesados. Así, por ejemplo, debemos transmitirlo, para estos problemas, en las Escuelas de Ingeniería. Sin embargo, el uso adecuado e instruido de estas herramientas sigue siendo importante. Por ejemplo, el responsable de desarrollos y simulación de AIRBUS comentaba hace unos años que, a medida que los métodos de cálculo se iban consolidando en la compañía, había una tendencia generalizada a creerse los resultados sin cuestionarlos, sin el necesario análisis crítico y, por consiguiente, era necesario implementar protocolos de verificación y validación. En resumen, para muchos problemas de la ingeniería, modelos y herramientas de cálculo son tecnología lista para ser empleada directamente (*out-of-the-shelf commodities*) puesto que su eficacia y credibilidad están perfectamente asentadas.

Sin embargo, a pesar de esta madurez para ciertos problemas, existe mucho trabajo por hacer y muchos campos por explorar que seguro ocuparán el tiempo y los esfuerzos de los especialistas e investigadores en ingeniería computacional.

Continuemos con el ejemplo de la reducción del número de ensayos en túnel de viento para el diseño de aviones comerciales de Boeing. Ya hemos comentado que en 1970 para el Boeing 757 fueron necesarios 77 ensayos en el túnel de viento y 20 años más tarde, para el Boeing 777 solo se realizaron 11. Sin embargo, también es impor-

tante recordar que para el Boeing 787 Dreamliner, diseñado al inicio del siglo XXI, también fueron necesarios 11 ensayos en túnel de viento. Diez años después del 777 los modelos y herramientas de CFD no permitían reducir el número de ensayos. Tenemos, por consiguiente en este campo (y no es el único), mucho trabajo por delante.

A continuación sólo vamos a citar tres de desafíos concretos en los que ya se está trabajando:

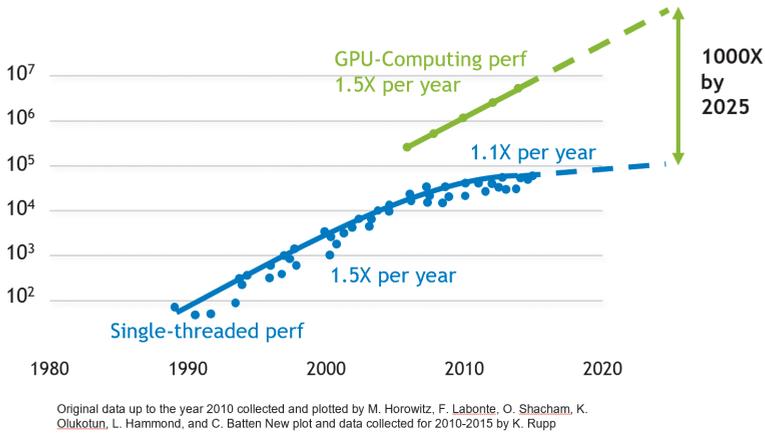
1. Más y mejores modelos,
2. Más y mejores algoritmos de resolución,
3. Más y mejores gemelos digitales incorporando medidas, datos y sesgos.

Empezando por la modelización, esa idealización de los fenómenos observados, es importante resaltar que nos acompañará a lo largo de la historia. Ya ha sido así, a pesar de las simplificaciones realizadas aquí, es importante recordar que Navier y Stokes proponen sus modelos en el siglo XIX mientras que Schrödinger lo hace en el siglo XX.

En el estudio de nuevos materiales el desarrollo de los modelos se hace en paralelo a la resolución de los problemas. En algunos casos es necesario definir nuevas ecuaciones con términos que representen los efectos desconocidos. Aquí, la ingeniería computacional permite dar soluciones que contrastadas con experimentos pueden validar (o no) esos nuevos términos en las ecuaciones y avanzar en el comportamiento, diseño y optimización de estos materiales. Por ejemplo, en Yoo *et al.* (2019) se usa un método de Galerkin discontinuo híbrido para simulaciones no locales nano-fotónicas que junto con técnicas de nano-fabricación permiten explorar diseños para la fabricación de sensores y antenas que funcionen en el infrarrojo medio (longitudes de onda de 2.5  $\mu\text{m}$  a 50  $\mu\text{m}$ ).

Otro campo, el de los tejidos biológicos, permite encontrar otro ejemplo ilustrativo del desarrollo de nuevos modelos combinado con la correspondiente resolución del problema. Latorre *et al.* (2018), gracias a la combinación de modelos mecánicos y resultados experimentales, muestran un comportamiento mecánico, que denominan super-elasticidad activa, que permite que las láminas epiteliales mantengan un estiramiento extremo bajo tensiones constantes.

En lo que respecta a los algoritmos de resolución, se necesitan métodos y algoritmos más precisos y robustos que, además, estén diseñados para los ordenadores que tendremos en un futuro próximo.



**Figura 8.** Previsión de la evolución del rendimiento computacional.

Por ejemplo, hemos observado que la fiabilidad de las herramientas de CFD no alcanza, en algunos problemas, los objetivos deseados. Los problemas acoplados transitorios (p. ej. acústica y vibraciones) o los asociados a flujos turbulentos complejos (separación, mezcla) siguen presentando enormes contratiempos para los modelos y algoritmos actuales de resolución. Por ejemplo, para el diseño de vehículos hipersónicos es crítico predecir con precisión la fricción y calentamiento aerodinámico. Estas cantidades de interés dependen de procesos físicos complejos. Por ejemplo de la interacción capa límite y onda de choque, o del desprendimiento de la capa límite, o de la transición del flujo laminar al turbulento. En otra escala, en el mundo de la aerodinámica en automoción, los problemas (ahora sin ondas de choque) también tienen dificultades importantes, cómo la predicción de la acústica inducida. Más concretamente es indispensable disponer de herramientas (cómo modelos de LES, large eddy simulation, y DNS, direct numerical simulation) que en problemas y escalas de interés en ingeniería puedan ayudarnos a comprender la física detrás de la transición a la turbulencia, validar los métodos existentes (cómo modelos de RANS, Reynolds-averaged Navier-Stokes) y desarrollar nuevos modelos para aplicaciones prácticas.

Es decir, se necesitan mejores programas (herramientas de cálculo) y mejores modelos (ecuaciones matemáticas que describan fiel y eficazmente el problema). Y además, adaptándose a las arquitecturas que parece que permitirán varios órdenes de magnitud superiores del rendimiento computacional en los próximos años. Ver, por

ejemplo la Figura 8, donde se muestra la predicción de crecimiento del rendimiento de las GPU frente procesadores clásicos<sup>9</sup>. Por cierto, ya que hablamos de nuevas arquitecturas podríamos hacer un paralelismo con la propuesta de Richardson para evitar la propagación de los errores hechos por los calculadores (los métodos iterativos). Hoy ya se está trabajando en nuevos algoritmos (y en su credibilidad) teniendo en cuenta que de los miles de procesadores empleados alguno puede dar de forma arbitraria errores de cálculo. El desarrollo de algoritmos con resiliencia es claramente un campo emergente.

Por último, es importante resaltar que los modelos reducidos ya se han incorporado en la rutina diaria de la práctica de la ingeniería computacional. Además, los gemelos digitales puesto que tienen escasos costes en la fase *online*, permiten la asimilación de datos. Es decir, incorporar las medidas a medida que se avanza en la simulación para mejorar las predicciones (por cierto, práctica habitual en las previsiones atmosféricas).

Sin embargo, esta combinación virtuosa del ábaco digital con modelos matemáticos complejos que representan adecuadamente la realidad física y una resolución eficaz tampoco garantiza que se reproduzca exactamente el resultado observado. Y esto, independientemente de una buena verificación, validación y cuantificación de la incertidumbre. El origen de las discrepancias entre la simulación de datos en el gemelo digital y la realidad observable puede provenir de que el modelo, por complejo que sea, no deja de ser una idealización de la realidad física. Además los parámetros del modelo alimentados por una datos observados pueden tener su incertidumbre segada o no. En el último caso se puede interpretar como ruido que puede ser controlado con técnicas de cuantificación de la incertidumbre. Pero el caso del sesgo sistemático, seguramente indica que el modelo realizado no se corresponde en algún aspecto (geometría, materiales, heterogeneidad, etc.) con la realidad. Este desconocimiento que, evidentemente puede evolucionar en el tiempo y el espacio, necesita de otra estrategia para ser considerado. Las técnicas de análisis de datos, aprendizaje automático, la inteligencia artificial o simplemente el control pueden permitir corregir los efectos del “desconocimiento”. De esta forma incorporando el extenso

<sup>9</sup> De L. Brown (2018) [https://asd.gsfc.nasa.gov/conferences/ai/program/047-NVIDIA\\_NASA\\_AI\\_wrkshp\\_Nov\\_2018.pdf](https://asd.gsfc.nasa.gov/conferences/ai/program/047-NVIDIA_NASA_AI_wrkshp_Nov_2018.pdf) basado en los resultados de K. Rupp (2018) <https://www.karlsruhp.net/2018/02/42-years-of-microprocessor-trend-data/>

cuerpo de doctrina asociado a los datos y su análisis a los modelos y su simulación se consigue no renunciar a la mochila de la modelización de la realidad. Esto, que algunos autores han denominado el gemelo híbrido (Hybrid Twins<sup>TM</sup><sup>10</sup>), permite la combinación virtuosa de la modelización y simulación de resolver problemas complejos con niveles de credibilidad elevados, junto con estrategias de asimilación y análisis de datos y al mismo tiempo una estrategia para adaptar la predicción de los resultados al desconocimiento inherente del problema real.

A medida que profundicemos en los avances y el desarrollo de los fundamentos de la Ingeniería Computacional así como de su amplia gama de aplicaciones, esta especialidad se irá convirtiendo, como ya lo ha demostrando en los últimos 60 años, en una herramienta poderosa, que ya está cambiando la forma en que ingeniería y ciencia se desarrollarán en este siglo. Parafraseando la misión de MIT<sup>11</sup> también podríamos afirmar que “la misión de la ingeniería computacional es avanzar en el conocimiento y educar para servir mejor a la nación y al mundo en el siglo XXI. La ingeniería computacional se compromete a generar, difundir y preservar conocimiento, y a trabajar con otras especialidades para llevar este conocimiento a los grandes desafíos del mundo”.

## REFERENCIAS

- Board on Higher Education and Workforce (2006), “Taxonomy List with Sub-Fields,” The National Academies, [sites.nationalacademies.org/pga/resdoc/pga\\_044522](https://www.nationalacademies.org/pga/resdoc/pga_044522).
- Chamoin, L., Díez, P. (2016) *Verifying Calculations - Forty Years On: An Overview of Classification Verification Techniques for FEM Simulations*. Springer International Publishing; 2016. SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology.
- Chinesta, F., Huerta, A., Rozza, G., and Willcox, K. (2017), “Model Reduction Methods.” In *Encyclopedia of Computational Mechanics*, 2nd Edition, (eds E. Stein, R. Borst and T. J. Hughes) doi:10.1002/9781119176817.ecm2110.
- Higham, N.J. (1998), *Handbook of Writing for the Mathematical Sciences*. Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Huerta, A. and Liu, W.K. (1988), “Viscous flow with large free surface motion,” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 69, Issue 3, pp. 277-324.

<sup>10</sup> Nombre patentado por ESI-Group

<sup>11</sup> MIT MISSION, <https://web.mit.edu/facts/mission.html>

- Huerta, A. and Liu, W.K. (1990), "Large-Amplitude Sloshing With Submerged Blocks," *Journal Pressure Vessel Technology*, Vol. 112, Issue 1, pp. 104-108.
- Johnson, F.T., Tinoco, E.N. and Yu, N.J. (2005), "Thirty years of development and application of CFD at Boeing Commercial Airplanes, Seattle," *Computers & Fluids*, Vol. 34 pp. 1115-1151.
- Latorre, E., Kale, S., Casares, L., Gómez-González, M., Uroz, M., Valon, L., Nair, R.V., Garreta, E., Montserrat, N., del Campo, A., Ladoux, B., Arroyo, M., and Trepap, X. (2018) "Active superelasticity in three-dimensional epithelia of controlled shape," *Nature*, Vol. 563, pp. 203-208.
- Lynch, P. (2008), "The origins of computer weather prediction and climate modeling," *Journal of Computational Physics*, Vol. 227, pp. 3431-3444.
- Muto, K., Kasai, Y., and Nakahara, M. (1985), "Visualization of Sloshing Response of a Water Pool with Submerged Blocks by Metal-foil Tracing Method," Special Issue, Osaka Joint Meeting, *Journal of the Flow Visualization Society of Japan*, (in Japanese), Vol. 5, Supplement.
- National Research Council (1984), *Computational Mechanics: A Perspective on Problems and Opportunities for Increasing Productivity and Quality of Engineering*. The National Academies Press.
- National Research Council (2012), *Assessing the Reliability of Complex Models: Mathematical and Statistical Foundations of Verification, Validation, and Uncertainty Quantification*. The National Academies Press.
- Oden, J. T., Belytschko, T., Fish, J., Hughes, T.J.R. , Johnson, C., Keyes, D. , Laub, A. , Petzold, L. , Srolovitz, D. and Yip, S. (2006), *Revolutionizing engineering science through simulation: A report of the National Science Foundation blue ribbon panel on simulation-based engineering science*. National Science Foundation.
- Richardson, L.F. (1910) "The approximate arithmetical solution by finite differences of physical problems involving differential equations, with an application to the stresses in a masonry dam," *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, Vol. 210, pp. 307-357.
- Richardson, L.F. (1922), *Weather prediction by numerical process*, Cambridge University Press.
- Shetterly, M. L. (2016), *Hidden Figures: The American Dream and the Untold Story of the Black Women Mathematicians Who Helped Win the Space Race*, William Morrow.
- Yoo, D., Vidal-Codina, F., Ciraci, C., Nguyen, N.-C., Smith, D.R., Peraire, J. and Oh, S.-H. (2019) "Modeling and observation of mid-infrared nonlocality in effective epsilon-near-zero ultranarrow coaxial apertures," *Nature Communication*, Vol. 10, Article 4476.

CONTESTACIÓN

EXCMO. SR. D. EDUARDO ALONSO  
PÉREZ DE ÁGREDA

Excmo. Sr. Presidente de la RAI  
Excmos. Académicos  
Queridos compañeros y amigos  
Querida familia de Antonio  
Querido Antonio

Este es un acto importante en la vida de Antonio. No le faltan reconocimientos, especialmente internacionales, que siempre son muy significativos porque juegas en “campo contrario”. Pero éste es un reconocimiento singular, porque se refiere a su vida entera: investigadora, académica y profesional.

En su discurso, un fascinante y ameno recorrido por el esfuerzo de ingenieros y matemáticos para proporcionar modelos que nos ayuden a diseñar y construir la compleja infraestructura y los complejos artefactos de nuestro mundo, se adivina su entusiasmo por la ciencia y la tecnología.

Este entusiasmo ha estado presente en él desde sus primeros años de formación en la E.T.S. Ingenieros de Caminos, donde lo conocí.

Comenzaré por repasar, un poco a mi aire, su vida académica y sus contribuciones. Después me referiré a su discurso, que me ha sugerido –cosa que le agradezco– ideas y pensamientos, desde una perspectiva diferente a la suya, pero, después de todo, no tan alejada.

En el año 1983, cuando terminó su carrera de Ingeniero de Caminos en Barcelona, los estudios de Doctorado en la Escuela estaban en fase de consolidación, para ser benévolos. La Escuela se fundó en una reducida ala de un convento en 1974. A Antonio le atrajo la Mecánica del Suelo y, a semejanza de otros académicos que le han precedido, se dirigió a Northwestern University, donde su pasión investigadora se amplió de forma radical. Yo creo que no es ajeno a ello el potente grupo de investigadores en mecánica, medios continuos, materiales y, sin duda, matemáticas que trabajaban en el “Technological Institute” de Northwestern. Allí se amplió su interés por la

aplicación de métodos matemáticos, singularmente los numéricos, en Ingeniería. Como contrapunto, Karl Terzaghi, ampliamente reconocido como el fundador de la Mecánica del Suelo, no parecía tener la misma opinión. En efecto, y aquí hablo un poco de memoria porque no he encontrado la referencia exacta, Terzaghi vino a decir que a los matemáticos había que guardarlos bajo rejas y, de vez en cuando, se les suministrarían los problemas que hubiera que resolver. Está claro que Terzaghi tenía un alto concepto de la Ingeniería.

A pesar de esos augurios, lo que definiría la brillante carrera de Antonio fue su afinidad con las matemáticas, especialmente por las ecuaciones en derivadas parciales. De Augustin-Louis Cauchy, Ingeniero de Puentes y Caminos, se dice que perdió el interés por la ingeniería y se vio atraído por la belleza abstracta de las matemáticas. Poco antes de morir, este Ingeniero declaró: “No me imagino una vida más plena que una vida dedicada a la matemática”.

No digo yo tanto de Antonio, porque su voluntad por aplicar lo que sabe a problemas de la ingeniería es una faceta clara de su investigación. Se adentró en un amplio espacio que le permitía plantear y resolver problemas complejos de la física y la ingeniería. A ese espacio, que ocupa ya un lugar sólido en la investigación y diseño avanzado en ingeniería, la Mecánica Computacional, le ha dedicado Antonio todo su esfuerzo.

No me extraña esa eclosión. En 1971 se explicaban con frecuencia los elementos finitos como una generalización del cálculo matricial de estructuras. En uno de esos cursos, en Northwestern University, un profesor invitado, O. C. Zienkiewicz, no mencionaba especialmente las estructuras. Simplemente enseñaba cómo resolver numéricamente ecuaciones diferenciales en derivadas parciales. Recuerdo que pensé “esto lo cambia todo”. Ese cambio se había iniciado muy pocos años antes y su impacto, como ha destacado Antonio, ha sido espectacular en ingeniería.

En una parte de su Tesis Doctoral (“Flujo de fangos con superficie libre”) se adentró en los problemas de grandes deformaciones y encontró un método sencillo y elegante para identificar parámetros del material. Ese trabajo le puso en contacto con el Centro Común de Investigación de la Comisión Europea en Ispra, con el que mantendría una relación permanente desde entonces, y en especial, con Jean Donea, Director de la División de Mecánica Estructural. Años más tarde, en 2003, Jean Donea y Antonio publicaron el texto “Finite Element

Methods for Flow Problems”, editado por Wiley, que es una referencia fundamental para los investigadores en mecánica de fluidos.

En 1987 Antonio volvió a la Escuela de Caminos de Barcelona. La Escuela que él había dejado en 1983 estaba cambiando rápidamente, en gran medida por la aplicación de la Ley de Reforma Universitaria, que contemplaba la creación de Departamentos “transversales” entre Escuelas. Ello abrió la posibilidad de desarrollar nuevas iniciativas que permitían una relación directa con los Rectorados de las Universidades. Muy probablemente en ausencia de la LRU, Antonio hubiera aceptado el puesto que le ofrecieron en Ispra en 1992.

La década siguiente fue un largo período de trabajo intenso y de notables aportaciones de Antonio. Con 34 años tomó posesión de la Cátedra de Matemática Aplicada de la Escuela, en un concurso con muchos competidores.

Fueron años de trabajo en solitario, en los que dirigió sus primeras tesis doctorales, amplió su colaboración con grupos de investigación en Ispra y Francia, y se puso de manifiesto su interés por otros temas, además de la mecánica de fluidos: la formulación arbitraria Lagrangiana-Euleriana en sólidos, el daño en geomateriales y la estimación de errores de computación.

Este período termina con un proyecto singular de investigación, financiado por Electricité de France como resultado de una interpelación parlamentaria, para estudiar la degradación de contenedores de hormigón para el almacenamiento de residuos nucleares. No repararon en gastos, Antonio y sus colaboradores para celebrar el éxito del proyecto. Fue en “Le Procope”, el café-restaurante de París, famoso por su antigüedad y por las reuniones de los padres de la Independencia Norteamericana y de los líderes de la Revolución Francesa.

Me detengo aquí para destacar un aspecto docente, pero con un significado estratégico interesante en la creación de grupos potentes de investigación. En estos últimos años se han puesto de moda las dobles titulaciones que incluyen las matemáticas como compañera académica de carreras de carácter profesional o aplicado. Las matemáticas están de moda y, seguramente, por una buena razón. En 1992 se crea en el seno de la UPC la Facultad de Matemáticas y Estadística (FME), que nació con una voluntad de excelencia y exigencia académica. El término “Ingeniería Matemática” aparece en el Master Oficial de la Facultad. Actualmente la Facultad ofrece también dobles titulaciones de Grado asociadas a las ingenierías de Teleco-

municaciones, Civil, Industrial, Informática, Aeronáutica y Física. En efecto, Ingeniería Física: todo se va convirtiendo en Ingeniería.

Pues bien, poco después de la creación de la FME, Antonio pone en funcionamiento la especialidad de “Ingeniería Computacional” en la Escuela, un término que hizo fortuna creciente con el tiempo. Esta iniciativa surgía del convencimiento profundo de que era necesario preparar a las nuevas generaciones de ingenieros en las herramientas de trabajo que se estaban desarrollando a gran velocidad. Y, también, de la voluntad de convertir al grupo docente e investigador que lideraba Antonio en un referente en la modelización y resolución de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, en una visión “horizontal” de la formación de alto nivel en ingeniería, a secas.

Antonio no rehuyó tareas de gestión universitaria. Su pasión por la excelencia y por empujar hacia el mejor nivel mundial a la institución a la que servía le llevó a consolidar el Laboratorio de Cálculo Numérico, de gran solidez y prestigio internacional. La simbiosis ingeniería-matemáticas es la clave de ese Laboratorio, conocido por la calidad de su docencia, el rigor matemático y su trabajo en la frontera del conocimiento. En sus años de Director de la Escuela de Caminos de Barcelona, los rankings internacionales la situaron entre las cincuenta mejores del mundo en Ingeniería Civil y la mejor de España.

Esta vertiente de servicio a la comunidad académica no redujo su dedicación e intensidad en investigación. Al final de la década de 2000-2010 Antonio cuenta con colaboradores y estudiantes excelentes de Doctorado, atraídos por su personalidad y prestigio creciente.

Antonio ha citado en su discurso algunas contribuciones suyas a la Ingeniería Computacional. Toda carrera científica tiene una “intra-historia”, más próxima a nuestra condición humana, que proporciona otra luz a la fría revisión de logros y éxitos. Por otra parte, la lectura de su discurso me ha sugerido pensamientos, lógicamente alimentados por experiencias propias, pero inspirados en su brillante exposición.

Me parece muy acertado vincular el nacimiento de las ingenierías, al menos aquellas próximas a la Mecánica, en un sentido amplio, con la necesidad de desarrollar modelos reducibles a ecuaciones (y, por tanto, susceptibles de ser resueltas) que simulan la realidad con mayor o menor fortuna. Pero no quiero dejar pasar la ocasión para recordar que no es siempre la devoción abstracta por la ciencia

la que provoca cambios estratégicos y duraderos en la estructuración y enfoque de la formación en Ingeniería. La cristalización de áreas transversales, como la ingeniería computacional, tiene una clara motivación práctica e indudablemente económica, como ha señalado Antonio. Pero a veces el drama se convierte en un ingrediente fundamental en este continuo desarrollo de nuestras áreas de trabajo. Digo esto con el recuerdo de los motivos que llevaron a la creación de una nueva especialidad técnica en 1802: los “Estudios de Hidráulica del Buen Retiro”, que algunos años después dieron origen a la nueva Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos.

La creación de esa nueva disciplina fue obra de Carlos IV, a petición de Agustín de Betancourt, que honra con su nombre al premio más relevante que concede esta Academia a jóvenes investigadores en Ingeniería. La propuesta de Betancourt es consecuencia de la trágica rotura de la presa de Puentes, un record mundial en su época (una presa de gravedad, construida en mampostería, de 50 m de altura, una dimensión extraordinaria para su época). La presa fue proyectada y su construcción dirigida por arquitectos. Betancourt, por encargo del Rey, visitó el emplazamiento tras la rotura y emitió un informe sobre sus causas. No llegó a entender el motivo, pues no tenía aún las herramientas conceptuales para saberlo. Pero en su informe al Rey escribe sobre el proyectista: [no tuvo]... “presentes las leyes de la Hidráulica y la aplicación que de ellas se debía hacer en aquel caso; en suma, la falta de instrucción ha sido la causa de la ruina que se ha experimentado, y eso manifiesta que los conocimientos y la práctica que son muy suficientes para ejecutar ciertas obras no bastan en otras”. Betancourt ya estaba hablando de modelos (“las leyes de la Hidráulica”), de su aplicación en la práctica y, poco después, de poner los medios para instruir a los futuros ingenieros en nuevos saberes. Pura modernidad.

Se refiere Antonio a la transición de los métodos analíticos, suficientemente desarrollados en el siglo XIX, a los numéricos en el siglo XX. Ya sé que Antonio está muy lejos de declarar fenecidos los métodos analíticos. Lo cierto es que no es ya fácil encontrar soluciones analíticas a nuestros modelos, simplemente por la dificultad de hacerlo en casos complejos e incluso en casos aparentemente “simples”. Pero, cuando se encuentran esas expresiones analíticas, hay que festejarlo. Me decía un colega, editor que fue de la revista *Géotechnique* y poco sospechoso de no utilizar la potencia del cálculo nu-

mérico en su investigación, que había que declarar “especie protegida” a las soluciones analíticas.

Afortunadamente, en nuestra época siguen apareciendo este tipo de soluciones y son realmente apreciadas. Las contribuciones de muchos autores en este sentido forman parte ilustrada de la ingeniería del Siglo XX, aunque no lo caractericen con la rotundidad y generalidad de la mecánica computacional.

Ocurre que todavía nos refugiamos con frecuencia en soluciones elegantes, sencillas, exactas y baratas en muchos casos. Es cuestión de imaginación, como señala Antonio en su cita de Ove Arup. En nuestros problemas tridimensionales (ahora me refiero al continuo), en presencia de geometrías complicadas, materiales complejos (tanto por su comportamiento intrínseco como por su heterogeneidad), y condiciones de contorno mal conocidas, es difícil encontrar y entender la solución. En esos momentos de desesperación, una solución analítica de un modelo que renuncia a la gran complejidad te ayuda a sobrevivir. La otra alternativa es buscar a Antonio.

La discusión, tan bien traída, sobre la ayuda que los modelos pueden prestar a la experimentación, a cualquier escala, está, me parece, fuera de dudas. El ejemplo de la viscosidad alterada por un procedimiento para visualizar el flujo se puede extender a otras experiencias. Aquéllos que se enfrentan a una experimentación compleja, a menudo a partir de prototipos, conocen bien las dificultades y el “sinvivir” para alcanzar resultados fiables. Experimentación y modelos tienen objetivos comunes, se trata de entender y predecir. El segundo requisito es una característica muy propia de la ingeniería, que está íntimamente asociada a la conceptualización matemática de nuestros problemas. Es decir, a los modelos, simples o complejos. Un viejo chascarrillo decía que, si das a elegir a un astrónomo entre un telescopio o un ordenador, seguramente elegiría el ordenador. En el fondo, es una buena manera de expresar el valor de las dos herramientas que necesitamos para el avance del conocimiento.

En estos tiempos ha hecho fortuna la expresión “gemelo virtual” como una alternativa “chic” al modelo de toda la vida. La palabra “gemelo”, sin embargo, parece indicar que una copia virtual representa cabalmente la realidad. Este paso es complicado y así lo explica con claridad Antonio en la última parte de su discurso. Antonio solo deja entrever el concepto de ecuación o modelo constitutivo, que se utiliza para definir mecánicamente un material determinado. Son legión los

modelos constitutivos disponibles para representar un material de comportamiento complejo. Por desgracia, un modelo de sólidos con una determinada “micro” o “meso” estructura añade decenas de parámetros a los “espacios paramétricos” que describe Antonio. La determinación experimental de esos parámetros, una empresa de notable dificultad en sí misma, es un escollo mayor (un “stumbling block”, diríamos en inglés) en la fiabilidad de los cálculos.

Por si fuera poco, en la validación de esos modelos constitutivos se encuentran sistemáticamente trayectorias de tensiones o deformaciones que no reproducen ni siquiera aproximadamente los resultados experimentales. La desesperación que provocan estos resultados, en el sentido de conceder poca esperanza a la obtención de un modelo constitutivo razonable (pocos parámetros determinables con fiabilidad) ha llevado a planteamientos que podríamos denominar “modelo de modelos”.

Ya no se busca una formulación matemática global, constitutiva, del material, que pueda integrarse en la solución de las ecuaciones de conservación. Se opta por describir cada punto del material complejo, a escala microestructural, por una representación física, simplificada, de la interacción de los componentes del material que juega el papel del modelo constitutivo, pero solamente en el punto en cuestión. Se reducen los parámetros pero los tiempos de cálculo crecen rápidamente. También podríamos denominar esta aproximación como una “solución de soluciones”, aunque con un significado diferente al que Antonio utiliza en su discurso. Queda mucho por hacer. Finalmente, el modelo es siempre una idealización física de la realidad. No sé si se trata de hermanos gemelos.

Termino ya esta contestación y elogio a Antonio Huerta. Antonio es conocido, respetado y admirado por el rigor de su trabajo. Es un pionero en la formulación de los métodos conjuntos de elementos finitos y partículas, es un experto internacional en la resolución de problemas en mecánica de fluidos y ha incorporado geometrías exactas a los procedimientos numéricos. Ha aplicado su conocimiento con brillantez a problemas difíciles que surgen en la ingeniería y es un adelantado en el desarrollo de procedimientos y metodologías para estimar la fiabilidad de cálculos numéricos.

Además, está comprometido con el objetivo de que nuestros Centros dedicados a la Ciencia y a la Tecnología alcancen el mejor nivel internacional. Su trayectoria personal es un buen reflejo. Su trabajo

en instituciones y organismos internacionales (es Presidente de la “International Association for Computational Mechanics” y Consejero científico del grupo ESI: “Engineering Systems International”) le proporciona la visión privilegiada del estado del arte y de las necesidades futuras. Antonio fue el fundador del Programa de Doctorados Industriales de Cataluña en 2012 y es el actual Director de ICREA en Cataluña, una iniciativa de amplio impacto con el objetivo de incorporar a los candidatos más capaces al sistema universitario e investigador.

La Academia se honra con tener entre sus miembros a Antonio Huerta. También espera de él la contribución y ayuda que seguramente le dedicará para que se cumplan sus altos objetivos: “La Real Academia de Ingeniería tiene como fines promover la calidad y competencia de la ingeniería española y fomentar el estudio, la investigación, la discusión y la difusión de las técnicas y de sus fundamentos científicos y sociales”.



GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE CIENCIA, INNOVACIÓN  
Y UNIVERSIDADES