

ACADEMIA DE INGENIERÍA

INGENIERÍA DE MÁQUINAS

DISCURSO DEL ACADÉMICO ELECTO

EXCMO. SR. D. JAIME DOMÍNGUEZ ABASCAL

LEÍDO EN EL ACTO DE SU RECEPCIÓN PÚBLICA
EL DÍA 27 DE NOVIEMBRE DE 2001

Y CONTESTACIÓN DEL ACADÉMICO

EXCMO. SR. D. ENRIQUE ALARCÓN ÁLVAREZ



MADRID MMI

Editado por la Academia de Ingeniería

© 2001, Academia de Ingeniería

© 2001 del texto, Jaime Domínguez Abascal

ISBN: 84-95662-06-X

Depósito legal: M-49.746-2001

Impreso en España

INGENIERÍA DE MÁQUINAS

Excelentísimo Señor Presidente,
Excelentísimos Señores Académicos,
Señoras y Señores:

Es para mí un gran honor ser acogido como miembro de número en la Academia de Ingeniería. Pocas distinciones pueden honrar más a un ingeniero que ser admitido en esta docta institución entre excelentes ingenieros de muy distintos ámbitos. Este honor y esta honra se acrecientan al considerar que entre estos ingenieros se encuentran muchos de los que a lo largo de los años he utilizado como ejemplos a seguir en el desarrollo de mi vida profesional.

Agradezco enormemente la distinción de que he sido objeto y que no estoy seguro de merecer. Sólo puedo corresponder a ella continuando mi actividad profesional, mejorándola en lo posible, y ofreciendo a la Academia mi colaboración en cuantas tareas considere que puedo ser útil.

Introducción

Desde que terminé los estudios de ingeniería industrial, mi actividad profesional se ha desarrollado en el campo de la ingeniería mecánica. Dentro de las disciplinas incluidas en la ingeniería mecánica, mi actividad ha estado centrada principalmente en la aplicación de la mecánica de sólidos al diseño de sistemas mecánicos.

Los primeros años los dediqué a diversos aspectos de ingeniería sísmica y a dinámica de estructuras, lo que me permitió abordar numerosos problemas dinámicos en sistemas mecánicos. Esta corta experiencia y las circunstancias por las que atravesaba la Escuela de Ingenieros de Sevilla, que requería alguna persona que se responsabilizara de las disciplinas relativas a lo que tradicionalmente se conoce como ingeniería de máquinas, hicieron que reorientara mi actividad hacia esta área de la ingeniería.

En un primer momento, analizando solamente la bibliografía tradicionalmente empleada en estas materias, tuve la sensación de que la ingeniería de máquinas era un tema de poca actualidad, que poco nuevo había que investigar y desarrollar en ese campo y que los avances en las máqui-

nas vendrían de la aplicación de otras disciplinas en el diseño de las mismas. También comprobé que esta sensación era, y es, compartida por algunos profesionales de otras áreas más modernas de la ingeniería. Pronto comprobé mi error. Pude ver que, aunque muchas de las disciplinas de la ingeniería mecánica aplicadas al análisis y diseño de máquinas son muy antiguas, la complejidad de los problemas que se están presentando es tal que aún queda por realizar un enorme trabajo de investigación y desarrollo en este campo. También pude comprobar que la gran componente empírica de la ingeniería de máquinas ofrece a algunos diseñadores una disculpa para evitar análisis más profundos, haciendo descansar el diseño en los resultados de una serie de ensayos del tipo prueba-error. Esto contribuye también a que pueda considerarse que la ingeniería de máquinas es una disciplina obsoleta y de poco rigor científico. Sin embargo, es precisamente este carácter empírico el que da una idea real de la dificultad de los problemas a resolver y de la cantidad de aspectos aún por investigar; ya que los modelos teóricos que existen en la actualidad son poco aproximados para satisfacer los requisitos técnicos, económicos y de seguridad exigidos a las máquinas.

Por ello, al considerar los temas que yo podría desarrollar en este discurso, obviamente dentro del campo de la ingeniería de máquinas, opté por una reivindicación. Ante el auge de las nuevas tecnologías, quiero reivindicar para las tecnologías tradicionales el reconocimiento que merecen como elementos impulsores del desarrollo de las máquinas a partir de los avances producidos por la investigación y el desarrollo en dichas tecnologías.

Previamente me gustaría hacer una breve exposición que nos ayude a todos los aquí presentes al conocimiento de la evolución de las máquinas y su influencia en el desarrollo económico y social.

Las máquinas y su influencia en el desarrollo de la sociedad

Es difícil conseguir una interpretación única del término *máquina*. El sentido del término ha sufrido diversas modificaciones en el transcurso de la historia, a medida que han ido apareciendo nuevos tipos de máquinas.

En la antigüedad, Vitrubio la definía como «una combinación de vigas de madera unidas entre sí, especialmente útil para mover grandes pesos». Evidentemente, las máquinas existentes en aquella época eran muy simples y podían considerarse formadas a lo sumo por una combinación de las cinco máquinas elementales definidas por Herón de Alejandría: palanca, torno, cuña, polea y tornillo de potencia; todas ellas aplicadas fundamentalmente al movimiento de grandes pesos.

Posteriormente se amplió el concepto de máquina, para aplicarse a cualquier sistema formado por elementos conectados con posibilidad de movimientos relativos y capaces de producir trabajo mecánico. Pero, actualmente es frecuente denominar *máquina* al ordenador y se habla de *máquinas de juego*, cuando ni de éstas ni del ordenador se espera trabajo mecánico alguno; con lo que el concepto de máquina está sufriendo una nueva modificación, hasta el punto de no considerarse necesaria la realización de un trabajo en el sentido mecánico del término.

En cualquier caso, al referirme a las máquinas, lo haré en un sentido más tradicional del término. Ya sea en el sentido empleado por Reulaux, como «una combinación de cuerpos resistentes, conectados de tal forma que fuerzas de la naturaleza puedan transformarse en trabajo, al tiempo que se producen determinados movimientos». O de forma más general, en el sentido empleado por Coriolis, que reducía el concepto de *máquina* a un sistema formado por tres partes diferentes, el mecanismo motor, el mecanismo de transmisión y finalmente, la herramienta o la máquina de trabajo. A veces, sin embargo, haré un uso más amplio del término, incluyendo también instrumentos mecánicos como son los relojes, giroscopios, odómetros, etc., instrumentos que están formados por un conjunto de cuerpos conectados con capacidad de movimiento relativo, es decir, por mecanismos, pero que no realizan trabajo mecánico.

De acuerdo con esta acepción del término, podemos considerar *máquinas*, tanto las cinco máquinas elementales de Herón como el carro con ruedas, cuya existencia es previa a la Historia, y las numerosas evoluciones de este último, entre las que cabe citar el automóvil, para usos civiles o el carro de combate, con aplicaciones militares.

El objetivo de las máquinas siempre ha sido ayudar o sustituir al hom-

bre en el desarrollo de labores penosas y difíciles de llevar a cabo, y/o capacitarlo para conseguir otros objetivos que serían inalcanzables sin ellas. Por ello, desde la antigüedad, el desarrollo económico y social ha ido muy unido a la aparición de nuevas herramientas y máquinas que ayuden o sustituyan al hombre para la realización de determinados trabajos. Al mismo tiempo, el desarrollo de las máquinas ha dependido en gran medida de la evolución de otras ramas de la ingeniería, que han aportado nuevas posibilidades, y del desarrollo social, que ha planteado nuevas necesidades a resolver.

Podemos decir que la principal aplicación de las máquinas hasta el siglo XVII fue suplir la fuerza física del hombre. Muestra de ello son los molinos hidráulicos y de viento, las máquinas para elevar agua, los soplantes, o las máquinas de guerra. El desarrollo de las máquinas no fue más que la transformación progresiva de los mecanismos simples y poco eficientes de la antigüedad en otros más complejos y eficientes. Ejemplos de estas transformaciones son la progresiva sustitución de cierres de fuerza por cierres de forma, o los múltiples diseños realizados por Leonardo da Vinci, entre los que se encuentran rodamientos de rodillos para apoyo de ejes, cadenas de transmisión o engranajes cruzados con ruedas cilíndricas helicoidales. A estas mejoras de los mecanismos contribuyó sobremedida el desarrollo de los instrumentos de precisión, donde las fuerzas transmitidas son pequeñas y permiten el uso de cadenas cinemáticas más largas.

Igual que ocurre actualmente, la creatividad era uno de los pilares fundamentales para el desarrollo de nuevas máquinas. Sin embargo, su diseño se realizó de forma esencialmente empírica. Incluso la consecución de mecanismos relativamente complejos no implicaba un conocimiento científico organizado. Los principios científicos empleados no pasaban de la estática y, dentro de ella, de la ley de la palanca, que era la forma primitiva de enunciar el equilibrio de momentos. La escasez de conocimientos requeridos y su carácter empírico permitían que el diseño de máquinas lo realizaran personas que al mismo tiempo cultivaban otras artes y oficios, de lo que Leonardo es el ejemplo más significativo, aunque no el único.

En el siglo XVIII se produce un cambio cualitativo en el desarrollo y aplicación de las máquinas. En el campo de las ciencias mecánicas, los trabajos de Euler establecen las bases de la cinemática, herramienta funda-

mental en el diseño de mecanismos. Posteriormente, los resultados obtenidos por diversos científicos, entre los que cabe mencionar a Euler, Carnot y Lagrange entre los más relevantes, sientan las bases necesarias para la aplicación de la dinámica al análisis y diseño de máquinas. En general, la ciencia adquiere en este siglo el desarrollo suficiente para influir creativamente en los procesos de descubrimiento e invención. A partir de este momento, el diseño de máquinas requiere un mayor nivel de los conocimientos científicos; y en consecuencia, la ingeniería de máquinas pasa a ser una actividad desarrollada por especialistas. Esta situación que se hace más patente con las nuevas máquinas desarrolladas durante los siglos XIX y XX.

Precisamente en el siglo XVIII, Newcomen desarrolló la primera máquina de vapor; la gran impulsora del desarrollo tecnológico, económico y social hasta principios del siglo XX. La posibilidad de disponer fácilmente de fuentes de energía origina nuevas aplicaciones de las máquinas existentes, produce un impulso en los métodos de fabricación y fomenta la aparición de nuevas máquinas. Al mismo tiempo, los requisitos impuestos por las máquinas de vapor exigen el diseño de nuevos sistemas mecánicos y procesos de fabricación. Se extiende el uso de la transformación del movimiento alternativo en rotativo, se mejora la fabricación de metales y se transforman las máquinas-herramienta.

Desde el punto de vista económico y social, la máquina de vapor genera un cambio en los sistemas de producción desde los métodos artesanales a los fabriles, mejora la capacidad de producción e incrementa la riqueza de la sociedad. En resumen, puede decirse que la máquina de vapor es uno de los principales artífices de la revolución industrial, con las consecuencias que ésta tuvo en todas las facetas de la sociedad.

Apoyados por los nuevos descubrimientos científicos acaecidos, a la máquina de vapor le siguieron durante el siglo XIX las turbinas hidráulicas y de vapor y los motores de combustión interna. Estos avances potenciaron el auge de la teoría de máquinas, de la que son precursores los españoles Lanz y Betancourt con la publicación de su obra *Ensayo sobre la Composición de las Máquinas*, publicado en París en 1808. Desde una perspectiva tecnológica, el aumento de las velocidades de rotación, de las fuerzas a controlar y, a veces, también, el aumento de las temperaturas requirió la búsqueda de nuevas formas de ejecución de los pares cinemáticos, nue-

vos materiales, mayor precisión en la fabricación, el desarrollo de sistemas de refrigeración y lubricación y el diseño de nuevos mecanismos para coordinación de movimientos. Desde la perspectiva de su influencia socioeconómica, estos avances permitieron el uso generalizado y económico de las fuerzas de la naturaleza en cualquier tipo de máquina, lo que redundó en un aumento de la productividad.

Sin embargo, la gran explosión en la ingeniería de máquinas se ha producido en el siglo xx. La generalización del uso de los motores de combustión interna produjo un formidable avance en las industrias del ferrocarril y el automóvil. Ha sido necesario conseguir sistemas de transmisión más sofisticados, con mayor eficiencia y fiabilidad. Los sistemas de suspensión y dirección han aumentado su complejidad para eliminar los problemas dinámicos producidos por los incrementos de velocidad de los vehículos. Igualmente, las exigencias de confort han requerido el empleo de nuevas técnicas en el análisis y eliminación de ruidos y vibraciones, especialmente en las últimas décadas. Es interesante reseñar que, mientras que a finales del siglo xix un automóvil estaba formado por unas cien piezas, el número de partes de un turismo de tamaño medio es actualmente próximo a catorce mil.

La generalización del uso de los motores eléctricos y los sistemas hidráulicos y neumáticos, y los requerimientos de la industria del automóvil han sido los elementos dinamizadores del desarrollo de las máquinas-herramientas. Los requisitos de precisión y velocidad de fabricación y la producción en cadena han llevado a la evolución de los procedimientos y a la especialización de las máquinas.

Hasta los años setenta, el progreso de las máquinas ha sido el resultado, por un lado, de la mejora de las capacidades de las máquinas motrices y de los procedimientos para la obtención de metales adecuados a las necesidades planteadas y, por otro, del diseño de nuevos sistemas mecánicos que aprovechen mejor estas capacidades y consigan nuevas prestaciones. La ingeniería de máquinas ha desempeñado un papel fundamental en el desarrollo tanto de las máquinas motrices como de las operadoras. Su diseño incumbía casi exclusivamente a la ingeniería mecánica y principalmente a la de máquinas. Sin embargo, el volumen y la profundidad de conocimientos requeridos convirtieron el diseño en un problema multidiscipli-

plinar que debe realizarse en equipo.

Finalmente, en los últimos treinta años, la evolución de las máquinas ha venido de la mano del uso de nuevos materiales y de la introducción de la electrónica y la informática. Por un lado, los nuevos materiales permiten conseguir mayores resistencias y menores pesos e inercias, sin olvidar los grandes avances en los lubricantes. Por otro lado, la informática ha permitido el uso de unos procedimientos de simulación y análisis cuyo potencial era insospechable antes de su aparición. Y, por último, la automatización de las máquinas ha supuesto un salto cualitativo en la ingeniería de máquinas en los últimos años. Actualmente, los automóviles están dotados de numerosos sistemas electrónicos que mejoran sus prestaciones. Los robots y las máquinas de control numérico han sustituido prácticamente a las máquinas-herramientas tradicionales. Este proceso de automatización de las máquinas con la introducción de la electrónica y la informática ha convertido el diseño de máquinas en un problema enormemente multidisciplinar, en el que deben participar, no sólo expertos en distintas áreas de la ingeniería mecánica, sino también ingenieros eléctricos, electrónicos, automáticos, informáticos, etc.

La importancia que la ingeniería de máquinas ha tenido en el desarrollo económico y social del último siglo, sólo puede atisbarse imaginando una situación en la que las máquinas actuales fueran similares a las de principios de siglo. Sin aviones y con automóviles primitivos, la movilidad, no sólo entre ciudades, sino incluso dentro de las ciudades sería casi imposible. Sin la mecanización agraria la alimentación sería aún un serio problema incluso en los países más desarrollados. Habría sido imposible pasar en un siglo de una población mundial de 1.600 millones a otra de 6.000 millones. Es ilustrativa una encuesta realizada el año pasado por la Academia Nacional de Ingeniería estadounidense para definir cuáles han sido los logros de la ingeniería en el siglo XX de mayor impacto en el desarrollo de la sociedad. El segundo lugar fue asignado al automóvil, al avión el tercero y a la mecanización agraria el séptimo. En cualquier caso, la evolución de las máquinas no podría haberse dado sin el avance tecnológico, económico y social ocurrido simultáneamente. Sin la electrificación, que es el logro de la ingeniería que mayor impacto económico y social ha tenido en el siglo XX según la Academia de Ingeniería americana, no habría sido posible el desarrollo de las máquinas al ritmo que se ha producido, ni de la medicina o las comunicaciones, por mencionar algunos ejemplos. Tampoco habría sido posible ese desarro-

llo sin los avances en otras áreas de la ingeniería y de las ciencias.

El papel actual de la ingeniería mecánica en el desarrollo de las máquinas

Ante el nuevo carácter multidisciplinar de la ingeniería de máquinas, con una fuerte aportación de la electrónica, la automática o la ingeniería de materiales, cabe preguntarse cuál es el papel de la ingeniería mecánica en el desarrollo de las nuevas máquinas y si este desarrollo dependerá de los avances logrados en los aspectos mecánicos, o si sólo será un soporte para los avances conseguidos a través de la aportación de otras disciplinas.

Podemos decir que todo el proceso de automatización producido en los últimos años no ha ido en detrimento de las necesidades de avance en los aspectos clásicos de la ingeniería de máquinas. Al contrario, igual que ocurrió con la aparición de las nuevas fuentes de energía, las posibilidades introducidas por estas nuevas tecnologías han llevado, por un lado, a la aparición de nuevas aplicaciones y de nuevas soluciones para resolver los problemas de manera más eficiente y, por otro, a la exigencia de mayores prestaciones y precisiones. Todo estos nuevos sistemas requieren para su desarrollo nuevas aportaciones de la ingeniería mecánica.

Los robots, o las antenas y otros sistemas desplegados en el espacio son muestra de nuevas aplicaciones de mecanismos y máquinas generadas por el desarrollo tecnológico. Los robots han exigido el empleo de nuevos métodos semianalíticos y numéricos para la solución de los problemas de posición, cinemático y dinámico. La influencia de las holguras y el rozamiento sobre el comportamiento dinámico requiere la consideración de estos efectos en los modelos, para poder conseguir así movimientos controlados con suficiente precisión. Los sistemas desplegados en el espacio se caracterizan por su poco peso y su gran flexibilidad una vez desplegados. La flexibilidad de estos sistemas hace que se produzcan grandes deformaciones elásticas, exigiendo que el análisis elastodinámico y la síntesis de los mismos se realicen empleando la teoría no lineal de la elasticidad conjuntamente con las no-linealidades geométricas producidas por los movimientos.

Los centros de mecanizado de alta velocidad, basados en la realización del corte mediante deformación plástica localizada cuasi adiabática son

ejemplos de nuevas soluciones para realizar las mismas funciones. En su diseño se presentan problemas de estabilidad y precisión asociados a las no-linealidades y a las altas frecuencias de las vibraciones excitadas por la interacción pieza-herramienta. Asimismo, las necesidades de desplazamientos rápidos del cabezal y las grandes fuerzas desarrolladas hacen especialmente apropiados los sistemas de movimiento con cinemática paralela, que presentan grandes ventajas respecto a las soluciones convencionales con husillos. El análisis cinemático y dinámico que es necesario para el diseño y control de estos sistemas, presenta nuevos problemas por la complejidad de las ecuaciones de movimiento y restricción, con alta no-linealidad. Igualmente importantes para conocer la interacción pieza-herramienta son los análisis de los problemas termo-elasto-plastodinámicos presentes en el proceso de corte.

El campo de los transportes guiados, en el que se encuentra el tren de alta velocidad o el magnetolevitado, es un ejemplo de la confluencia y desarrollo coordinado de distintas áreas de la ingeniería. En el tren de alta velocidad, el avance tecnológico de la infraestructura y la superestructura es un logro de la ingeniería civil y en menor medida la mecánica. En la gestión de los nuevos sistemas de señalización y ayuda a la explotación participan distintas áreas de la ingeniería entre la que cabe destacar la ingeniería electrónica y la de sistemas y automática. La ingeniería eléctrica ha desempeñado un papel preponderante en los avances logrados en la motorización. Por último, las nuevas soluciones para resolver los problemas de estabilidad de los vehículos son logros de la ingeniería de máquinas. En este campo cabe destacar las mejoras de la estabilidad de los *bogies* mediante disminución de las inercias e inclusión de sistemas de amortiguación en las dos suspensiones, o las mejoras de los sistemas de frenado.

Pueden citarse otros muchos ejemplos de nuevas soluciones generadas por el desarrollo de nuevas áreas de la ciencia y la tecnología. Gran parte de ellos derivados de los avances de la electrónica, la automática y la tecnología de materiales. Entre ellos se incluyen las suspensiones activas en automóviles, los elementos mecánicos construidos con materiales piezoeléctricos, que modifican su geometría en función de las necesidades, las micro-mordazas y los micro-posicionadores piezoeléctricos, o los sistemas micro-electro-mecánicos y otros sistemas desarrollados a partir de las técnicas de micro-fabricación.

Como hemos dicho anteriormente, las nuevas máquinas tienen como característica común la interdisciplinariedad. En la mayoría de los casos, los aspectos mecánicos no son los más llamativos por ser un área bastante menos novedosa. Un ejemplo ilustrativo es el automóvil. En un automóvil, lo más llamativo y que parece ser garantía de su calidad es la cantidad de elementos electrónicos incluidos: sistemas ABS, ESP, TCS, EDS, TT, avisadores de fallos, ordenador de abordo, etc. Es menos llamativo que se haya conseguido un diseño de conjunto vehículo-suspensión con mejores características dinámicas ante diferentes situaciones de la conducción, lo que lleva a un aumento de la estabilidad, o, también, que se hayan reducido sustancialmente el ruido y las vibraciones; problemas que requieren un gran número de horas de investigación y desarrollo y que aún necesitan muchas más para seguir mejorando. Es más, se puede decir que el desarrollo de los sistemas electrónicos citados requiere nuevos procedimientos de análisis y nuevas soluciones de diseño de los sistemas mecánicos a controlar.

En esta línea de aportaciones de nuevas áreas de la ingeniería a las máquinas, ha habido unos años en los que los grandes logros de la electrónica hicieron pensar que los avances en las máquinas serían producto de los logros de esa disciplina, y que la aportación de la ingeniería mecánica no sería más que el apoyo para la realización física de los mismos. Sin embargo, podemos comprobar que los sofisticados sistemas automáticos incorporados exigen la definición de unos criterios de control que dependen del comportamiento mecánico. Igualmente, podemos decir que las mejoras en las prestaciones de las máquinas, con nuevas soluciones e incrementos de las velocidades, niveles de precisión y fiabilidad, no son posibles sin el desarrollo de nuevos modelos que incluyan factores no considerados anteriormente y de nuevos métodos de solución de estos modelos.

Hemos visto algunos ejemplos de los tipos de problemas mecánicos que aún se presentan y deben resolverse para conseguir máquinas más capaces y fiables. Algunos de ellos son problemas muy interdisciplinarios, otros son típicos de la ingeniería de máquinas clásica. Entre estos últimos cabe destacar el comportamiento dinámico y la integridad estructural ante cargas variables, por ser problemas de gran actualidad aunque se plantearon en las máquinas hace más de un siglo. A ellos dedicaré a continua-

ción especial atención.

La dinámica, un aspecto característico de las máquinas

El aumento continuo de las velocidades y potencias desarrolladas por las máquinas ha exigido prestar cada vez mayor atención a su comportamiento dinámico. Inicialmente, las bajas velocidades reducían a un mínimo los problemas dinámicos producidos. Éstos no pasaban de ser los clásicos de equilibrado y reducción de la irregularidad mediante los volantes de inercia.

En las primeras décadas del siglo xx, el uso de máquinas con mayores velocidades impulsó el desarrollo y aplicación de los procedimientos, hoy ya clásicos, de análisis dinámico en el diseño de máquinas. Estaban orientados principalmente al análisis y control de las vibraciones, normalmente producidas por ejes rígidos o con cierta flexibilidad. Las situaciones usuales permitían generalmente un planteamiento lineal del problema. En cualquier caso, se adoptaban modelos lineales que podían resolverse mediante procedimientos conocidos del álgebra lineal. Estos procedimientos se empleaban incluso en las industrias aeronáutica, del ferrocarril y el automóvil. Aunque se habían detectado problemas dinámicos con interacciones difíciles de modelar; problemas de varios cuerpos con grandes desplazamientos relativos y otros problemas no lineales, los modelos planteados no pasaban de linealizaciones más o menos aproximadas.

En los años sesenta se produjeron varias circunstancias que impulsaron el análisis dinámico de mecanismos con movimientos tridimensionales: el desarrollo de los ordenadores, con la posibilidad de emplear nuevos métodos de solución; el desarrollo de los vehículos espaciales, en los que se despliegan mecanismos de gran complejidad en situaciones de ingravidez y cuyos ensayos en tierra resultan prohibitivos; los incrementos de velocidad y flexibilidad en los vehículos de transporte; y la aparición de los robots, con movimientos complejos y cambios bruscos de velocidad. La aparición de los ordenadores permitió también el desarrollo de procedimientos para resolver problemas dinámicos acoplados, como son los de interacción entre elementos, ya sean rueda-carril en ferrocarriles, neumático-carretera en los automóviles o aire-vehículo en las aeronaves, y también otros problemas en los que la no-linealidad impide el tratamiento analítico de una forma global.

Actualmente existen varios programas comerciales capaces de resol-

ver con cierta aproximación problemas dinámicos en mecanismos con movimientos tridimensionales, incluyendo a veces la posibilidad de que los cuerpos sean flexibles. Pueden resolverse así casos complicados de dinámica ferroviaria o de vehículos, o casos de estructuras espaciales desplegables. Sin embargo, a la vista de la evolución de la tecnología y las exigencias del mercado, que requiere modelos capaces de conseguir mejores aproximaciones y alcanzar así mayores prestaciones, aún quedan innumerables aspectos por resolver, a los que están dedicando su atención muchos investigadores en dinámica de sistemas multicuerpos. A continuación me referiré brevemente a algunos de estos aspectos.

Un problema de gran interés es el comportamiento de sistemas multicuerpos con holgura o en los que se producen impactos. Ejemplos de estos sistemas son los trenes de engranajes, la conexión entre el rotor y los álabes de una turbina, el tren de aterrizaje de un avión o un robot manipulando piezas. Su simulación es un problema de enorme dificultad, del que no existen actualmente más que soluciones muy poco aproximadas. El modelado de estos sistemas para su análisis debe permitir la representación de las rotaciones finitas de los elementos, lo que genera no-linealidades geométricas, pero, al mismo tiempo, debe incluir diversas particularidades, que trataré de resumir.

La representación del contacto se hace considerando un comportamiento discontinuo, modificando las ecuaciones de restricción en función de que haya contacto o no. Ello implica la detección de los instantes de cambio de contacto a separación y de separación a contacto. La primera detección exige la determinación continua de las fuerzas de contacto para determinar el instante en que pasan a ser de tracción, lo que indica separación. La detección del cambio de separación a contacto requiere el análisis de los movimientos para detectar interpenetraciones. Una aproximación a esta situación puede hacerse representando el comportamiento mediante una ley aproximada, continua y no lineal. Tiene el inconveniente de generar un sistema rígido de ecuaciones diferenciales, con los problemas numéricos que ello implica. Si el contacto es con rozamiento, debe incluirse una ley de rozamiento, cuyas discontinuidades generan frecuentemente problemas de convergencia de la solución.

El impacto producido al contactar los elementos debe representarse

considerando la flexibilidad de los mismos tanto desde un punto de vista global, para analizar las vibraciones generadas, como local, para modelar el comportamiento en la zona de contacto. Las fuerzas de impacto producen vibraciones de alta frecuencia y problemas de propagación de ondas que se superponen a vibraciones de baja frecuencia. La discretización de cada cuerpo mediante elementos finitos para considerar ambos efectos es prohibitiva por la dimensión y complejidad del sistema de ecuaciones generado. Actualmente no se conocen soluciones generales de estos casos más que con un solo cuerpo y casos muy particulares de dos cuerpos monodimensionales conectados mediante algún tipo de par cinemático y con velocidades de contacto normales a las superficies. Debido a la complejidad del problema a resolver, se continúa trabajando en soluciones que desacoplan el problema local del global y permiten reducir su complejidad. El problema local se analiza mediante métodos numéricos con una discretización fina. El comportamiento obtenido se aproxima en el modelo global mediante restricciones que imponen unas fuerzas de contacto en función de las posiciones relativas de las superficies. En este modelo, las deformaciones de los cuerpos se representan por algún método de discretización, bien sea elementos finitos o Rayleigh-Ritz con unas funciones de forma adecuadas. Un aspecto de gran influencia para la elección de las funciones de forma y la obtención de una buena aproximación en la representación de las tensiones producidas es la elección de las condiciones de referencia de los sistemas de coordenadas flotantes.

Ya he comentado antes el interés que tiene el análisis del comportamiento dinámico de los sistemas de alta flexibilidad como son las estructuras desplegadas en el espacio, algunos manipuladores fabricados de material compuesto o el conjunto saltador-pértiga. El problema adicional de estos sistemas respecto a otros mecanismos flexibles es la necesidad de considerar grandes deformadas elásticas. Para ello es necesario el uso de la teoría de la elasticidad de segundo orden. Considerando elementos monodimensionales, que son los más usuales y simples, las grandes deformaciones implican acoplamiento entre los movimientos axiales y transversales en las barras deformables e incluyen no-linealidades geométricas en la formulación.

Un procedimiento de solución de estos sistemas, empleando la teoría lineal de la elasticidad, es el método de síntesis de componentes propues-

to por Wu y Haug. Se basa en descomponer cada elemento flexible en múltiples subestructuras, cada una con un sistema de referencia flotante que se mueve con ella. Las subestructuras se unen mediante enlaces rígidos y su número y tamaño se eligen para que en cada una sea válida la hipótesis de pequeñas deformaciones elásticas. A veces, esta aproximación se mejora incluyendo en cada subestructura una matriz de rigidez geométrica, que se obtiene a partir de una expresión de la energía de deformación que incluye algunos términos derivados de los de orden superior del tensor de deformaciones. Esta aproximación tiene el inconveniente de requerir un gran número de grados de libertad con los inconvenientes que ello representa tanto en tiempo como en estabilidad del método de solución.

La extensión del método de síntesis de componentes, haciendo un planteamiento general de las ecuaciones del movimiento y empleando la teoría de la elasticidad de segundo orden, presenta problemas importantes por el acoplamiento de las deformadas axiales con las transversales. Este acoplamiento produce generalmente dificultades para la representación de los movimientos elásticos, que requiere la inclusión de funciones de forma axiales para representar las no-linealidades geométricas generadas por la flexión, y matrices de rigidez variables. La calidad de la aproximación obtenida depende en gran medida de la capacidad de las funciones de forma axiales para representar el acortamiento por flexión. Una mejora de este método se obtiene representando el desplazamiento axial por dos componentes: una, función del desplazamiento transversal, y otra, función de las deformaciones axiales. Con esta solución no son necesarias las funciones de forma axiales para representar el acoplamiento entre los movimientos axiales y transversales y se evitan las componentes de alta frecuencia en la respuesta, que dificultan el proceso de integración. Al mismo tiempo, las ecuaciones del movimiento resultantes se simplifican al incluir todas las no-linealidades geométricas en los términos de inercia dependientes de las velocidades y en las reacciones.

Otro procedimiento para analizar el comportamiento dinámico con grandes deformaciones elásticas consiste en emplear únicamente un sistema de referencia inercial para expresar conjuntamente los movimientos finitos de sólido rígido y los debidos a la deformación. Para ello hay que obtener la relación entre los movimientos medidos en el sistema inercial y

las deformaciones; relación que debe ser invariante respecto a las traslaciones y rotaciones de sólido rígido. Las variantes existentes de este procedimiento difieren básicamente en los parámetros empleados para representar los movimientos. La principal ventaja de estos métodos es su generalidad, pero tienen el inconveniente de incrementar notablemente la dimensión del problema al trabajar con todas las variables nodales de la discretización empleada. Ello lleva a importantes costes computacionales tanto en lo que a tiempo se refiere como en posibles inestabilidades de las soluciones obtenidas. En resumen, podemos decir que aunque pueden obtenerse soluciones a casos particulares con cuerpos monodimensionales, queda aún mucho trabajo por hacer para obtener soluciones generales, tanto en la formulación de geometrías más complejas como en el empleo de métodos de integración fiables.

Un problema dinámico de gran repercusión económica por su aplicación al mantenimiento de máquinas es la diagnosis mediante la medida de las vibraciones en funcionamiento. Evidentemente, el tema no es novedoso. Cualquiera que tenga cierta edad recuerda la imagen del factor de RENFE golpeando con una maza los ejes de los ferrocarriles durante las paradas en las estaciones. Dependiendo del sonido emitido como consecuencia de la respuesta dinámica al impacto, podía comprobarse la existencia o no de determinados defectos. Los principios básicos del funcionamiento de los sistemas de diagnosis mediante análisis de vibraciones son los mismos, sin embargo, las técnicas han evolucionado y lo siguen haciendo a un ritmo apreciable. Gracias al desarrollo de las técnicas de análisis de señal y a las de modelado de respuesta de sistemas mecánicos es posible asociar determinadas peculiaridades de la respuesta a defectos concretos en el funcionamiento de una máquina. Actualmente, por este procedimiento es posible detectar pequeños defectos en el funcionamiento de elementos como motores eléctricos, engranajes o rodamientos, o incluso detectar grietas en rotores de turbinas. Sin embargo, especialmente en este último caso, queda mucho por hacer; ya que hasta ahora sólo es posible detectar las grietas poco antes de la fractura final, con lo que se evita el fallo catastrófico y sus consecuencias; pero no es posible aún detectarlas cuando son incipientes, lo que permitiría su seguimiento antes de la reparación, y tampoco puede conocerse, excepto en casos muy concretos, la posición de la grieta en el rotor.

El procedimiento de detección de grietas en rotores se basa en el

análisis de la modificación de la respuesta producida cuando éstas se inician y desarrollan. Una grieta introduce una flexibilidad local en el rotor, cuya determinación puede hacerse a partir del factor de intensidad de tensiones producido por la misma o mediante otras técnicas, normalmente numéricas. Esa flexibilidad local es distinta en la dirección del frente de la grieta que en la perpendicular al mismo. Si la grieta permanece siempre abierta durante el funcionamiento y hay aplicada una fuerza constante perpendicular al rotor, por ejemplo, el peso en rotores horizontales, la variación de la rigidez respecto a un sistema inercial de coordenadas genera varios armónicos de la velocidad de giro, siendo el del doble de la velocidad de giro especialmente importante. También se producen vibraciones a las frecuencias naturales axiales debido al acoplamiento axial-flexión producido por la grieta. Si las cargas aplicadas al rotor permiten que la grieta se cierre en ciertos momentos del giro del mismo, la evolución de la rigidez durante una vuelta dependerá de las cargas producidas y generará un comportamiento no lineal y un acoplamiento torsión-flexión. Al mismo tiempo, el contacto entre las superficies de la grieta produce un aumento del amortiguamiento. Igualmente, la no-linealidad producida puede generar aparecer inestabilidades.

Todos los efectos anteriores se superponen a las vibraciones producidas por otras muchas causas, como pueden ser fuerzas con componentes de variación aleatoria, posibles no-linealidades de los apoyos, pequeñas faltas de alineamiento, etc., que introducen ruido en los espectros de las vibraciones y dificultan la identificación de las causas. Por ello, en diagnóstico mediante análisis de vibraciones es fundamental, la conjunción del perfeccionamiento de los métodos de simulación del comportamiento de los sistemas reales y de las técnicas de análisis de señal para mejorar las predicciones y alcanzar las aproximaciones deseadas.

Podrían citarse otros muchos problemas dinámicos de interés, con fuertes repercusiones socioeconómicas, y que son objeto de grandes esfuerzos de investigación y desarrollo en nuestros días. Algunos de ellos, relativos a la seguridad de las personas, son el análisis y reducción de las vibraciones transmitidas por máquinas a sus operadores o la simulación del comportamiento del conjunto vehículo-pasajeros en las colisiones de automóviles, donde interaccionan el comportamiento elastoplástico de la estructura del vehículo, el movimiento de los elementos del motor duran-

te el impacto y el comportamiento dinámico del cuerpo humano. También cabe señalar el diseño de suspensiones activas para vehículos automóviles y ferrocarriles. Materia en la que es difícil distinguir qué parte es la relativa a la teoría de control y cuál es la relativa a la dinámica de sistemas mecánicos. A la complejidad del análisis dinámico de cada uno de estos sistemas multicuerpos, que incluyen además elementos flexibles, se une la necesidad de sintetizar sistemas que modifiquen el comportamiento, definir criterios que permitan reconocer las mejoras en el mismo y aplicar procedimientos de optimización.

La integridad estructural ante solicitaciones dinámicas. Fatiga de los materiales

En cualquier sistema que deba prestar un servicio, la fiabilidad es una condición indispensable para su aceptación en el mercado, tanto por razones de competitividad como, a veces, por requisitos de seguridad.

Un análisis de las causas de los fallos debidos a problemas mecánicos en las máquinas refleja que, en más del 50% de los casos, el origen de los mismos está asociado al fenómeno de la fatiga. Es conocido que este fenómeno se produce en los sólidos sometidos a cargas cíclicas o de variación irregular. Cuando el número de ciclos de carga es suficientemente alto, este tipo de sollicitación puede producir la iniciación de una grieta en un punto y el posterior crecimiento hasta la fractura final. Los valores máximos de tensiones necesarios para producir este fallo pueden ser muy inferiores a los que producirían deformación permanente o rotura estática. Un aspecto característico de este tipo de fallo, que frecuentemente incide en la seguridad de los usuarios, es el carácter espontáneo de la fractura que se produce, sin que en muchos casos haya posibilidad de prever su aparición. Por ello, desde que se generalizó el uso de las máquinas de vapor en la industria y, sobre todo, desde la extensión del uso del ferrocarril a mediados del siglo XIX, se empezó a tomar conciencia de un nuevo tipo de fallo mecánico no conocido hasta la fecha: la fatiga de los materiales. Desde entonces, el progreso en este campo ha estado impulsado especialmente por el desarrollo de las industrias del ferrocarril, la automoción y la aeronáutica. Se ha producido un gran avance en el conocimiento del fenómeno y en los métodos de diseño para garantizar la seguridad ante

este tipo de fallo.

El único procedimiento de diseño a fatiga existente hasta hace algo más de treinta años, y el más extendido actualmente, es el que usa como criterio de resistencia las curvas experimentales denominadas curvas S-N. Estas curvas relacionan la amplitud de las tensiones nominales cíclicas que se producen en una probeta estándar del material objeto de estudio con el número de ciclos que puede soportar. Las curvas obtenidas con esas probetas, normalmente de pequeño tamaño, cilíndricas y pulidas, se extrapolan a las condiciones de un elemento mecánico cualquiera, que tiene diferentes dimensiones, una geometría más compleja, y una superficie generalmente más rugosa, sometido, además, a un estado de carga diferente y bajo unas condiciones ambientales distintas. La extrapolación de la curva S-N se realiza mediante unos coeficientes reductores de la resistencia que consideran el efecto de los aspectos diferenciadores respecto a los ensayos. Aunque estos coeficientes están basados en fundamentos científicos, sus valores concretos en cada caso tienen un marcado carácter experimental. Este método de diseño tiene serias limitaciones. Está basado únicamente en los valores de las tensiones nominales y en los coeficientes que tienen en cuenta los efectos locales de la zona donde se inicia la grieta. Las tensiones nominales son normalmente elásticas, sin embargo, a veces se producen en los elementos deformaciones plásticas muy localizadas. La predicción de la duración del proceso se hace a partir de una información local de la zona en que se inicia la grieta, sin que se considere la influencia de la distribución de tensiones en la zona por donde va a ir creciendo la grieta producida. Otra limitación tiene su origen en que la mayoría de los datos de que se dispone se han obtenido en ambientes controlados, mientras muchos sistemas desarrollan su actividad a la intemperie o en ambientes especialmente corrosivos y condiciones extremas de temperatura. Ocurre también que las curvas S-N se han obtenido en ensayos con cargas cíclicas de amplitud constante; sin embargo, un gran número de elementos reales se somete a cargas de amplitud variable, irregulares o aleatorias. Piénsese, por ejemplo, en los elementos de la suspensión de un automóvil, cuyas sollicitaciones dependen de la rugosidad del terreno, cuyo perfil es aleatorio, o en las cargas que soportan las alas de un avión, cuya variación también es aleatoria o en los ciclos de carga aplicados a un tren de aterrizaje, cuyos picos dependen en cada maniobra de múltiples factores.

En los años cincuenta se produjo un hecho que supuso un serio revés

para la industria aeronáutica comercial británica e impulsó sobremanera el estudio de la fatiga en metales. Entre mayo de 1953 y abril del 54 explotaron en el aire tres aviones Comet. Estos aviones fueron los primeros comerciales construidos con cabina presurizada y llevaban funcionando solamente un año. Ensayos realizados posteriormente a los accidentes, en los que se simularon los ciclos reales de presurización, permitieron comprobar que el fallo se produjo como consecuencia de los cerca de mil ciclos de presión a que estuvieron sometidas las cabinas de los aviones destruidos. Los diseñadores no conocían la incapacidad de las curvas S-N para predecir la iniciación de grietas a bajo número de ciclos, ni los factores que gobiernan el crecimiento de grietas por fatiga. Pensaron que el paso de una prueba de presión con un valor de la misma el doble que la producida durante los vuelos era suficiente para garantizar su resistencia a fatiga durante los varios miles de ciclos a que iba a estar sometida la cabina durante su vida.

El avance de los conocimientos sobre la fatiga en metales ha permitido conocer que para que se inicie una grieta se necesita una deformación plástica cíclica, aunque sea a nivel microestructural. Esta constatación, unida a las dificultades de predicción con la curva S-N del comportamiento cuando se producen niveles altos de tensiones y deformaciones, ha llevado al desarrollo de un nuevo método para la predicción del comportamiento a fatiga, denominado método de las deformaciones locales. Se basa en las denominadas curvas ϵ -N, que relacionan las deformaciones cíclicas producidas en un punto con el número de ciclos necesarios para que en dicho punto se inicie una grieta; curvas que se obtienen experimentalmente. El conocimiento de esta relación ha permitido el desarrollo de procedimientos más fiables para predecir la vida de un componente bajo condiciones de carga de variación irregular, sea determinista o aleatoria. Estos procedimientos permiten el análisis de la interacción entre ciclos de altos niveles de tensión con otros de niveles bajos, a través del análisis de las deformaciones producidas y los ciclos de histéresis generados durante el proceso de carga.

El método de las deformaciones locales presenta, sin embargo, algunas limitaciones para su aplicación. Una posible limitación se presenta cuando el estado de tensiones producido por las cargas variables tiene un marcado carácter multiaxial. En ese caso es necesario establecer un criterio de

iniciación de grietas que tenga en cuenta la complejidad del estado de tensiones. Pero, el mecanismo de generación de las grietas puede ser distinto dependiendo del material, lo que puede hacer necesarios criterios diferentes. Los criterios más aceptados son dos: los basados en las deformaciones normales cíclicas máximas producidas, que se emplean para materiales con mecanismos de generación de grietas típicos de comportamiento frágil; y los que se basan en los incrementos máximos de deformaciones tangenciales, que se emplean para materiales con mecanismos de iniciación típicos de materiales dúctiles. Sin embargo, estos criterios pueden llevar a errores apreciables en algunos casos, especialmente cuando la variación de las cargas produce el giro de los planos principales de tensión durante cada ciclo. Otra posible limitación se produce cuando existe un gradiente de deformaciones apreciable en la zona en que aparece la grieta. En ese caso, su efecto depende de la magnitud del gradiente y de la microestructura del material. Para la consideración de este efecto no existen actualmente criterios aceptados de forma general. No obstante, se están realizando grandes esfuerzos de investigación en este campo.

De mayor importancia para la predicción del comportamiento a fatiga son los avances conseguidos, y los que están actualmente en desarrollo, para la aplicación de la mecánica de la fractura al análisis del crecimiento de grietas por fatiga. Ello ha permitido predecir con aceptable precisión el ritmo de crecimiento de una fisura cuando un elemento agrietado se somete a cargas cíclicas.

La aplicación conjunta de la mecánica de la fractura y el método de las deformaciones locales para análisis del proceso de fatiga está transformando tanto los procedimientos como la filosofía de diseño. A partir de estos métodos es posible determinar con mejor aproximación la vida esperada de un elemento con geometría compleja sometido a cargas variables de cualquier tipo. Con el método de las deformaciones locales es posible aproximar el número de ciclos necesarios hasta que se produzca una grieta de longitud inferior a algunos milímetros, que pueda ser detectada por los métodos de detección existentes actualmente, ya sean líquidos penetrantes, partículas magnéticas, ultrasonidos, métodos electro-potenciales o corrientes inducidas. Además, con la mecánica de la fractura es posible conocer la duración del proceso de crecimiento de una grieta por fatiga. De este modo, se puede estimar el tiempo necesario para que una

grieta de pequeña dimensión, pero detectable por los procedimientos existentes, llegue a alcanzar longitudes que sean peligrosas para la integridad del sistema.

Los desarrollos de la mecánica de la fractura aplicada a la fatiga han permitido la adopción del criterio de tolerancia al daño en los diseños; criterio que comenzó aplicándose en las estructuras aeronáuticas y que actualmente se aplica a multitud de máquinas y estructuras sometidas a cargas variables. La aplicación de este criterio en las estructuras de aviones permite actualmente garantizar, no sólo que una grieta que se genere en una estructura pueda ser detectada en las inspecciones previstas con suficiente antelación al fallo, sino también la seguridad ante el impacto de un cuerpo extraño que genere un defecto en el fuselaje de dimensiones menores a unos valores definidos. Como ejemplo puede decirse que, de acuerdo con este criterio, el fuselaje de un avión de pasajeros de tamaño medio se diseña con capacidad para prestar servicio con una grieta de dimensiones próximas a medio metro, sin que ello quiera decir que no se reparen cuando se detectan grietas con longitudes mucho menores.

La extensión del criterio de tolerancia al daño a los componentes de máquinas presenta algunas dificultades añadidas al caso de elementos estructurales. Por un lado, la menor dimensión de los componentes de máquinas hace que el tamaño de las grietas críticas sea sustancialmente menor, lo que dificulta su detección una vez iniciadas. De otra parte, las frecuencias de aplicación de las cargas son generalmente un orden de magnitud superiores, lo que incrementa el número de ciclos de carga que debe soportar el elemento, convirtiendo el proceso de daño en uno típico de fatiga a alto número de ciclos. Estos casos de fatiga se caracterizan porque la mayor parte del proceso de daño hasta el fallo se ocupa en el crecimiento de grietas de dimensiones del mismo orden que la distancia característica entre barreras microestructurales, que no suele superar algunas decenas de micrómetros, lo que hace difícil su detección. Finalmente, los estados de tensiones producidos en estos componentes son claramente multiaxiales y, frecuentemente, difíciles de determinar con suficiente aproximación, tanto por métodos numéricos como experimentales. A veces, además, las variaciones cíclicas de las tensiones modifican las direcciones de las tensiones principales durante un ciclo de carga, lo que dificulta la determinación del daño producido por fatiga. Un ejemplo en el que se

presentan estas dificultades es algo tan simple como la unión con ajuste a presión entre una rueda dentada y un eje. Los microdeslizamientos producidos en la zona de contacto entre rueda y eje generan un estado triaxial de tensiones con variación de las direcciones principales durante un ciclo de carga. En este caso se une un problema elastoplástico en el borde de la zona de unión a un problema de contacto con rozamiento, en el que el coeficiente de rozamiento varía con el número de ciclos de carga. De todas formas, aunque lentamente, el criterio de tolerancia al daño comienza a emplearse actualmente en el diseño de componentes de máquinas.

Un ejemplo de cómo el diseño de componentes adopta el criterio de tolerancia al daño es el programa iniciado a mediados de los años ochenta por las fuerzas aéreas de los Estados Unidos denominado ENSIP (ENgine Structural Integrity Program). Este programa pretende que todos los elementos críticos de los motores de los aviones puedan ser inspeccionados para determinar si es necesaria su sustitución o si, por el contrario, se garantiza su resistencia hasta el siguiente período de inspección. Con este procedimiento se ha conseguido pasar de una situación en la que algunos componentes de los rotores se sustituían cuando la probabilidad estimada de tener una grieta de 0,75 mm era del 0,1%, a otra en la que, con la ayuda de los programas de inspección, estos elementos se sustituyen cuando se detecta una grieta de longitud superior a un valor definido. Esta modificación supone un incremento notable en la seguridad, debido a la mejora de los métodos de inspección y análisis basados en la mecánica de la fractura.

En los últimos años, se continúa trabajando en la extensión de la mecánica de la fractura a la simulación del proceso de fatiga en situaciones más complejas, en las que actualmente la fiabilidad de las predicciones de vida es baja y el coste de la experimentación requerida es alto. Los principales esfuerzos se están dedicando a la simulación de los procesos de fatiga a alto número de ciclos, de marcado carácter empírico actualmente. En esta dirección es necesaria la investigación de numerosas cuestiones, como las que se refieren a: la interacción entre fatiga a bajo y alto número de ciclos, donde se combinan dos mecanismos de fallo distintos; el efecto de la relación de tensiones máximas y mínimas en los ciclos; el comportamiento de grietas microestructuralmente pequeñas y su transición hacia las longitudes a las que es posible la aplicación de la mecánica de la fractura elástica lineal; el efecto del cierre de grieta y su simulación, especial-

mente en situaciones próximas al umbral de crecimiento o en casos de grietas pequeñas; los factores que modifican el umbral de crecimiento y su comportamiento en casos de crecimiento en modo mixto; el efecto de las distribuciones de tensiones con grandes gradientes en la zona de iniciación; la mejora de los procedimientos de ensayo, que permitan conocer con mayor precisión el efecto de distintos parámetros...; por poner algunos ejemplos importantes.

La extensión de la mecánica de la fractura a grietas microestructuralmente pequeñas reducirá la componente empírica de la fatiga a alto número de ciclos. Permitirá, también, conocer los mecanismos que gobiernan el crecimiento de las grietas por fatiga y mejorará la fiabilidad de las predicciones.

Es conocido que el factor de intensidad de tensiones mínimo para que se produzca el crecimiento de una grieta por fatiga, denominado generalmente *umbral de crecimiento*, es menor cuando las grietas son microestructuralmente pequeñas que cuando sus dimensiones son mayores. También es conocido que dicho umbral crece a medida que lo hace la grieta, estabilizándose a partir del momento en que ésta alcanza una longitud superior a varias veces la dimensión característica de la microestructura del material. El umbral de crecimiento para cualquier longitud de grieta superior es constante y se considera una propiedad del material. Igualmente, en experimentos realizados con grietas microestructuralmente pequeñas se ha constatado que ante un mismo incremento del factor de intensidad de tensiones, la velocidad de crecimiento depende de la longitud de la grieta. Bajo estas condiciones, disminuye la velocidad al aumentar la longitud de la grieta, produciéndose ciertas discontinuidades en la evolución.

No se conoce suficientemente el proceso por el que el crecimiento inicial de la grieta produce un aumento del umbral y una reducción de la velocidad de crecimiento. Sin embargo, sí se conoce que tienen una gran influencia el crecimiento de las tensiones de cierre de grieta por deformación plástica y la resistencia al crecimiento ejercida por las barreras microestructurales. Dependiendo del material de que se trate, uno u otro fenómeno puede tener un efecto más acusado.

En los últimos años se están realizando esfuerzos especialmente im-

portantes para incluir adecuadamente estos efectos en los modelos de predicción. En ese sentido se han propuesto diversos modelos que intentan representar mediante la mecánica de la fractura este comportamiento particular de las grietas pequeñas. Unos modifican el factor de intensidad de tensiones obtenido mediante la mecánica de la fractura elástica lineal, incrementándolo en función de la longitud de la grieta, para adaptarlo al comportamiento observado experimentalmente. Otros, a partir de la mecánica de la fractura, determinan la evolución de las tensiones de cierre de grieta e incluyen su efecto sobre el crecimiento de las grietas. Por último, otros, mediante consideraciones sobre la microestructura tienen en cuenta de una u otra forma el efecto de la falta de semejanza entre grietas largas y cortas así como la influencia de la orientación cristalográfica de los granos por los que se propaga la grieta. De todos estos modelos los más prometedores son los mencionados en segundo y tercer lugar.

El primer paso a dar en los modelos basados en la variación de las tensiones de cierre de grieta, es establecer experimentalmente la relación de estas tensiones con el umbral de crecimiento y con la velocidad de propagación de las grietas. Conocidas estas relaciones, deben definirse los procedimientos de determinación numérica de las tensiones de cierre. La fase experimental se ha realizado sólo para un número limitado de materiales y configuraciones, con unos resultados que permiten comprobar los modelos de predicción. La determinación numérica de las tensiones de cierre obliga a simular conjuntamente el crecimiento de la grieta y el comportamiento elastoplástico producido en las inmediaciones de la misma. La escala mesoscópica del modelo hace especialmente compleja la simulación del crecimiento por diversas razones, entre las que cabe destacar la anisotropía y falta de uniformidad del material a esa escala, y el carácter discontinuo de la propagación de la grieta. Por un lado, anisotropía y falta de uniformidad del material a esa escala requieren modelos que representen la variación de orientación de los planos atómicos en cada grano y el establecimiento de leyes de comportamiento que tengan en cuenta la anisotropía. Y por otro, el crecimiento de las grietas pequeñas es irregular y discontinuo a lo largo del frente de la misma, lo que dificulta la simulación numérica del proceso. En determinadas situaciones pueden obtenerse aproximaciones aceptables a las tensiones de cierre considerando al material como un medio continuo, sin embargo, hasta la fecha no es posible simular de esta manera el carácter estadístico de su evolución. En cual-

quier caso, la obtención de mejores o peores resultados depende del ajuste empírico de algunos parámetros, lo que requiere un enorme trabajo experimental.

El segundo grupo mencionado es el de los modelos que ponen especial énfasis en el efecto de la microestructura del material sobre la resistencia a la propagación. La consideración de la influencia de la microestructura del material sobre el umbral de crecimiento y sobre la velocidad de propagación de las grietas requiere modelar la interacción de las grietas con las sucesivas barreras microestructurales existentes en el material. En este sentido, estos modelos también tratan de simular a escala mesoscópica el proceso de crecimiento de una grieta a través de los primeros granos del material. La característica principal de estos modelos es que representan, mediante modelos de dislocaciones, los sucesivos bloqueos producidos por las barreras microestructurales sobre la zona plástica generada en el borde de la grieta y establecen las condiciones bajo las que una grieta es capaz de superar la resistencia ejercida por tales barreras. De igual manera, haciendo uso de estas técnicas es posible simular las sucesivas aceleraciones y deceleraciones observadas experimentalmente en la velocidad de propagación durante el crecimiento de las grietas pequeñas. Otra característica común de todos estos modelos es la necesidad de definir un parámetro que represente la resistencia de las barreras, además de otros efectos, como el cierre de grieta. La mayoría de ellos obtienen este parámetro a partir de los diagramas de Kitagawa-Takahashi, que se obtienen experimentalmente.

En la actualidad, estos tipos de modelos se han aplicado con resultados bastante satisfactorios a diversos problemas, entre los que se incluyen la evaluación de la velocidad de propagación de grietas en componentes sin entallas, la estimación del límite de fatiga en componentes con y sin entallas, y la predicción de aparición de grietas no-propagantes en componentes metálicos entallados.

Finalmente, podemos decir que existen en fatiga otras muchas cuestiones que requieren un gran esfuerzo de investigación. Es importante determinar la influencia del carácter estadístico de las cargas, de la microestructura del material y de su comportamiento local sobre la velocidad de crecimiento de las grietas. Este análisis permitirá estimar con mayor preci-

sión la dispersión de los resultados obtenidos en ensayos teóricamente idénticos, en los que se producen unos resultados cuya relación puede ser dos o tres a uno. También merece un trabajo importante la predicción del comportamiento ante la combinación de cargas multiaxiales y agentes químicos o atmosféricos, o el comportamiento a fatiga de nuevos materiales compuestos, cuya diversidad hace, por ahora, imposible un análisis de forma general. Sin embargo, debemos destacar que los avances alcanzados en los últimos años son muy importantes y su resultado es la fiabilidad de los sistemas mecánicos actuales.

Con esta breve descripción de algunos problemas típicos que se presentan en el diseño de máquinas y de la forma de abordarlos, creo que ha quedado patente la enorme actualidad de la ingeniería de máquinas. También hemos podido comprobar que, al contrario de lo que pudo pensarse hace algunos años, la participación de las nuevas tecnologías en las máquinas actuales no ha hecho más que enriquecer esta rama de la ingeniería y darle nuevas perspectivas.

Quisiera terminar recordando una cita de Theodore von Karman que puede traducirse diciendo que «ciencia es el estudio del mundo como es, e ingeniería es la creación del mundo del mañana». Es evidente que crear algo para el mañana requiere el conocimiento científico como pilar fundamental, ya que permite entender el mundo de hoy. Pero, además, requiere una gran dosis de imaginación y creatividad, virtudes que son indispensables para hacer una buena ingeniería. Sin ellas no podremos hacer más que el análisis de la situación existente, sin aportar soluciones de interés.

CONTESTACIÓN

EXCMO. SR. D. ENRIQUE
ALARCÓN ÁLVAREZ

Excmo. Sr. Presidente,
Excelentísimos Señoras y Señores,
Señoras y Señores, queridos amigos:

El acto de hoy es especialmente grato a la Academia que se dota de un especialista de alto nivel en una rama importantísima de la ciencia madre de la ingeniería: la mecánica.

Como decía Fernández Casado¹ en su discurso de ingreso en la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando «la misión del ingeniero está en sacar la máxima utilidad posible de las cosas y esta apetencia de utilidad es la que enderezó al homínido hacia el *Homo faber* primero, y después, hacia el *Homo sapiens*». Aunque este orden sea cronológicamente discutible no cabe duda que el proceso de reflexión, creación del artefacto y su experimentación contribuyó a la evolución de la mente humana y justifica el aserto de Max Van Laue²: «En el principio era la mecánica».

El hombre muestra su presencia como mecánico en la talla del sílex, la generación del fuego, la alfarería y en la elaboración de dispositivos basados en la idea intuitiva del peso y la palanca que le permiten la construcción de trampas y redes. Cuando el ser humano deja de ser, en palabras de García Olmedo³, un «animal edénico» e inventa la agricultura comienza el sedentarismo, la construcción de ciudades y almacenes, el comercio y en definitiva la civilización que impulsa todavía más el desarrollo de máquinas.

Domínguez ha recordado las aportaciones de los antiguos. Sin embargo, el gran impulso surge a partir del Renacimiento cuando frente al uso de la esclavitud como reserva de fuerza se afronta la necesidad de las máquinas de forma sistemática, en lugar de utilizarlas como simples curiosidades indignas de las mentes superiores. A este respecto, y como origen de prejuicios que han perdurado en nuestro país, Schul⁴ cita la afirmación de

¹ Carlos Fernández Casado: «Estética de las artes del Ingeniero». Real Academia de Bellas Artes de San Fernando. Madrid 1976.

² Max Van Laue: «Geschichte der Physik». Bonn 1946.

³ Francisco García Olmedo: «Entre el placer y la necesidad». Drakontos 2001.

⁴ P. M. Schul: *Machinisme et philosophie*. PUF 1969.

Aristóteles «... la naturaleza hace los cuerpos de los hombres libres diferentes de los de los esclavos; a éstos les dota del vigor necesario para los trabajos pesados mientras que a aquéllos los hace incapaces de rebajarse a estas rudas labores» y Plutarco afirma que Arquímedes desconfiaba de la legitimidad de sus trabajos en mecánica ... «y repudiando toda esta ciencia de inventar y componer máquinas y, en general, todo arte que aporte alguna utilidad al uso vil, bajo y mercenario, empleó su espíritu y su estudio en escribir solamente las cosas cuya sutileza y hermosura no tuvieran ninguna relación con la necesidad».

¿No les parece estar oyendo el famoso «que inventen ellos» o las frases de Ganivet⁵ en el *Ideario español*? «... cuando acierto a levantarme siquiera dos palmos sobre las vulgaridades que me rodean, y siento el calor y la luz de alguna idea grande y pura todas esas invenciones no me sirven para nada». ¿Es sorprendente que la fundación de la Academia de Ingeniería de España se haya dilatado a 1994?

Como el nuevo académico ha indicado, a partir del Renacimiento y sobre todo a partir del s. XIX el maquinismo es impulsado de forma decidida en todos sus aspectos tanto científico y técnico como por su capacidad de transformación de la sociedad. El propio K. Marx⁶ promueve su aceptación por el movimiento obrero al indicar que «... al adquirir nuevas fuerzas de producción, los hombres cambian sus modos de producción, la manera de ganarse la vida, y con ello cambian todas las relaciones sociales...» Y ello no sucede solamente en el lugar de trabajo, (recuérdese la parodia que en *Tiempos modernos* hace Chaplin de la cadena de montaje), sino que se refiere al comercio con la aparición de los medios rápidos de transporte y al propio ambiente familiar en que se produce la incorporación masiva de la máquina a las labores domésticas, a los propios instalaciones del domicilio y a ámbitos inesperados: en 1944 John Steinbeck⁷ hacia notar que «la mayoría (de los niños EE.UU.) fue concebida en Fords Modelo T, y no pocos nacieron en ellos. La teoría del hogar anglosajón quedó tan torcida que ya nunca más volvió a enderezarse».

⁵ Ganivet: *Ideario Español*. 1897.

⁶ K. Marx: *La miseria de la filosofía*, 1847.

⁷ J. Steinbeck: *Cannery Row* N.Y. 1944.

Siegfried Giedion⁸ hizo en un curioso estudio sobre la mecanización del entorno humano en que analiza los cambios provocados en el mobiliario, el baño, la cocina, etc., donde ya planteaba la importancia que para la evolución de costumbre y actitudes tenían el entorno cotidiano en el que tan poco reparamos y donde la importancia de los artefactos no ha dejado de crecer:

En el mundo actual y desde el punto de vista económico, cabe señalar que la importancia de la industria de la máquina es doble, por un lado permite escapar a la competencia de otros países al poner en valor la capacidad de organización industrial y el potencial tecnológico autóctono, tal como ha remarcado Domínguez, pero además tiene un enorme impacto en el empleo y en la cifra de negocios relacionada con el conjunto de usuarios.

Y es que la producción de artefactos ocupa un lugar intermedio entre las ciencias básicas (como la mecánica teórica, el comportamiento de sólidos o fluidos o la termodinámica) y las ingenierías elaboradas entre las que se encuentran sectores tan importantes como el de la aeronáutica y astronáutica, la ingeniería civil o de minas, la agrícola o algunas más consuetudinarias como la de electrodomésticos, mueble, etc.

Como Domínguez ha indicado, competencia técnica y éxito industrial van íntimamente ligados. A veces grandes intuitivos se han adelantado al desarrollo puramente intelectual; la máquina de vapor, por ejemplo, funcionaba setenta años antes que su teoría fuese elaborada. Lo mismo sucedió con los increíbles logros de un industrial como Hennebique en el hormigón armado. Otras veces la teoría ha ido por delante. Al ser preguntado por los usos prácticos de sus descubrimientos Faraday indicaba que no podría dar una contestación en firme, para establecer acto seguido que estaba seguro que sus descendientes acabarían pagando impuestos por el uso industrial de aquéllos. En otro campo la curiosidad de Euler, por ejemplo, permitió el desarrollo de una teoría de estabilidad del equilibrio que seguimos enseñando a nuestros estudiantes.

⁸ S. Giedion: *La mecanización toma el mando*. Oxford U. P. 1948.

La organización actual de la producción comienza con las investigaciones desarrolladas por profesores y estudiosos en Escuelas e Institutos especializados, sigue con las aportaciones de ingenieros, técnicos y obreros en las realizaciones prácticas llevadas a cabo por empresas e industrias y finaliza en la sistematización del conocimiento en Normas y Códigos de buena práctica sancionadas por organismos estatales encargados de velar por la seguridad de los usuarios y la sana competencia en el mercado.

La industria mecánica afecta así no solamente a la fabricación de máquinas-herramientas, equipos especializados para otras industrias, mecánica de precisión, máquinas agrícolas y maquinaria auxiliar para ingeniería, civil, minas o metalúrgica sino que influye también en la fundición y trabajo de metales o nuevos materiales, en el material de transporte terrestre (automóviles, ferrocarriles, vehículos industriales y deportivos), en la construcción naval, aeronáutica y en la industria del armamento.

Para darse una idea de la importancia económica de la industria metalmecánica cabe indicar que en Andalucía aproximadamente un 20% del total de la inversión industrial anual va dedicado a ella. De esa cantidad, aproximadamente la mitad de la inversión en industrias nuevas se destina a la adquisición de maquinaria extranjera, un cuarto a la adquisición de maquinaria de origen nacional y el resto se emplea en edificios, construcciones y otros equipos.

El empleo en esta rama de la industria se ha mantenido relativamente estable, pero si en el conjunto del país representa aproximadamente un 8% de la población activa en Andalucía no supera el 5% de la suya.

El gasto en I+D es aproximadamente 2,5%, la mitad del de la industria química, aunque alcanza órdenes semejantes al de la electrónica si se suman las contribuciones destinadas a vehículos y transportes.

En el conjunto de España este gasto se distribuye entre la Administración pública (20%), las Universidades (30%) y las empresas (50%).

En Andalucía, aunque la Administración Pública mantiene el porcentaje del resto del país, la contribución al I+D en las empresas baja al 20% y las Universidades contribuyen con el 60% restante.

Los porcentajes globales son muy bajos en comparación con los países europeos, lo que a veces se justifica en la necesidad de renovar el equipamiento del parque de maquinaria a la mayor velocidad para adaptarse a los retos de la competencia. Si no se rompe esta tendencia con un esfuerzo decidido en la investigación y la innovación desde nuestras industrias estaremos repitiendo la historia de dependencia de las importaciones que se ha visto en otros empeños.

En este marco tan amplio Jaime Domínguez se ha revelado como ingeniero en temas punteros, como gestor de la investigación cooperativa entre Industria y Universidad y como sabio profesor en sus lecciones y en sus estudios por los que es conocido en España y en el extranjero.

Jaime Domínguez, proveniente de una familia en la que abundan los ejemplos de competencia en temas de desarrollo industrial, docencia e investigación, terminó en 1973 su carrera de Ingeniero Industrial en la Escuela Superior de Sevilla. Esta Escuela, creada bajo el patrocinio de la OCDE, disponía de un plan experimental entre cuyos méritos se encontraba el desarrollo de trabajos en taller en paralelo con el estudio teórico, tanto en clases convencionales como en el gabinete de modelos numéricos (que estaba dotado con un, en aquellas fechas, envidiable computador IBM 1130), así como las prácticas en empresas que permitían a sus alumnos el contacto directo con la realidad industrial de su entorno.

No cabe duda que ese enfoque influyó en derivar la vocación de Domínguez hacia la mecánica de máquinas en la que se conjugan perfectamente las ideas de investigación, experimentación y desarrollo industrial.

Al terminar su carrera el joven ingeniero, tras una breve etapa en la automoción, se incorporó a la industria relacionada con la construcción de centrales nucleares, entonces en su apogeo. Ello le permitió participar en el gigantesco esfuerzo realizado por nuestro país en la puesta a punto de proyectos modernos, y nuevas técnicas de organización del proyecto y de la construcción cumpliendo requisitos de seguridad y garantía de calidad muy estrictos tanto para los edificios como para todas las instalaciones de la planta.

Entre ellos se encontraban hipótesis de respuesta dinámica que nunca antes se habían considerado rigurosamente en nuestro país como el com-

portamiento sísmico de estructuras y equipos, el impacto de proyectiles o aviones en edificios de contención, el choque entre bastidores de almacenamiento de combustible usado sumergidos en piscinas y tantos otros temas cuyo estudio y control contribuyó a elevar el nivel de nuestra ingeniería.

A estos problemas Domínguez les aplicó la doble visión que había aprendido en la Escuela: la experimentación dinámica con modelos físicos en simuladores sísmicos, lo que le llevó a conocer los mejores laboratorios de ensayo dinámico en todo el mundo, y la interpretación de los resultados mediante modelos numéricos desarrollados en computador usando técnicas, que, habiendo comenzado a desarrollarse en el decenio anterior, estaban experimentando un florecimiento extraordinario y requerían, por tanto, un esfuerzo intelectual de formación permanente.

Quizá este último factor, y el deseo de participar activamente en el empeño mundial de investigación, lo condujo a desarrollar su tesis doctoral, que terminó brillantemente en 1978.

En este caso el objetivo era la comprensión del difícil problema de interacción dinámica entre estructuras de plataformas *off-shore*, su cimentación en el fondo marino y el efecto del oleaje y viento con su fuerte carácter aleatorio.

De nuevo cabe notar la coincidencia entre la curiosidad científica y el desarrollo industrial que han motivado desde siempre los logros ingenieriles.

Como es sabido, las tesis doctorales cierran pequeños temas pero abren campos inmensos de investigación que quedan como desafíos para el futuro en la mente de sus autores. No es extraño por ello que, tras cinco años de permanencia en temas punteros de la actividad industrial de nuestro país, Domínguez decidiera optar a la Cátedra de Cinemática y Dinámica de máquinas de su Escuela, que consiguió por oposición en 1980.

De hecho, al ganar la Cátedra, pasó a ser continuador y heredero de la labor iniciada por el gran patriarca de la ingeniería española, el canario Agustín de Betancourt, los restos de cuyo Gabinete de Máquinas estuvieron en los orígenes de las Escuelas de Ingenieros Industriales. En efecto, el

Gabinete, mantenido por dos mecánicos excepcionales, Juan López de Pañalver y Bartolomé Sureda, e inicialmente integrado como laboratorio en la recién creada Escuela de Caminos, pasó cuando cerró ésta, a formar parte de la Real Academia Matritense de Amigos del País. Desde allí y al formarse la tercera Escuela de Ingenieros de Caminos y Canales en 1833, la colección se subdividió en la parte relativa a obras hidráulicas que volvió a ella y los modelos y planos relativos a las actividades industriales que pasaron al Real Conservatorio de Artes y finalmente al Real Instituto Industrial, origen directo de las Escuelas de Ingenieros Industriales a la más joven de las cuales se incorporó Jaime Domínguez en 1980 en dedicación completa.

Como en otros ámbitos de la enseñanza de la ingeniería, la dinámica de máquinas en aquellos años se encontraba en una situación paradójica: el alto nivel de competencia en métodos clásicos había producido un ambiente de autosatisfacción y cierta desidia respecto a la innovación que había dejado obsoletos los libros y programas existentes. En este marco la llegada casi simultánea a la Cátedra de dos jóvenes profesores Jaime Domínguez y Javier García de Jalón, equipados con su experiencia en nuevos métodos y problemas, supuso una renovación de contenidos que, junto con la de otros catedráticos posteriores, ha ido permeando progresivamente los programas de docencia e investigación de la disciplina, facilitando la incorporación de investigadores españoles al desarrollo mundial de la misma y elevando el nivel técnico de nuestro país.

A lo largo de los años transcurridos, Domínguez ha sido capaz de organizar en la Universidad de Sevilla un grupo de trabajo donde se mantienen las premisas que hemos remarcado: alto nivel en modelos numéricos, competencia excepcional en ensayos in-situ y en laboratorio, cooperación con la industria para resolver problemas y contacto permanente con los equipos internacionales semejantes entre los que destacan los de Stanford; M. I. T.; Sheffield y Southwest Research Institute.

Como temas más específicos cabría citar las contribuciones a los problemas de fatiga aleatoria en contactos con y sin rozamiento contenido, que le han situado en primera línea mundial o los procedimientos puestos a punto para medir los casos de vibraciones transmitidas por ferrocarriles o en aerogeneradores que han establecido una tipificación que es seguida en todo el país.

Desde 1989 participa activamente en la gestión de la investigación en España tanto desde organismos centrales como en los autonómicos en los que, de nuevo, ha contribuido al impulso dado en los últimos años a los esfuerzos para el fomento de la innovación industrial en España y al desarrollo de institutos imprescindibles como el Centro Andaluz de Metrología, del que es actualmente Director.

He tenido el privilegio de trabajar con Jaime en diferentes proyectos en los que hemos intentado dar asistencia técnica a industrias españolas que lo solicitaban. Quizá el más espectacular fue el llevado a cabo para Construcciones Aeronáuticas y la Agencia Europea del Espacio donde fue preciso interpretar ensayos y desarrollar modelos numéricos de la fractura del anillo pirotécnico que separa la parte superior del cohete Ariane 5. En este trabajo, donde tuvo también una participación destacada el profesor Manuel Doblaré, de la Universidad de Zaragoza, se pusieron de manifiesto las virtudes del nuevo Académico: capacidad crítica de observación, audacia reflexiva en la interpretación, ingenio en la búsqueda de soluciones, inmensa capacidad de trabajo y, desgraciadamente para los que osábamos contradecirle, inmensa también capacidad de refutación.

Recuerdo perfectamente el primer día que le hice exponer en la pizarra sus avances en la tesis doctoral que había iniciado. Para las discusiones en la Cátedra disponíamos de una maravillosa pizarra de cristal que debía de medir 5 m de longitud y no menos de 1,50 m de altura. Pues bien, Domínguez comenzó su exposición rellenando esos 7,5 m² con una sola fórmula: $F = ma$.

Ante mis protestas por el derroche de espacio indicó que sólo pretendía exponer claramente su convicción fundamental y ver si estábamos de acuerdo pues, en su opinión, las densísimas pizarras en las que siguió planteando su esquema de vibraciones aleatorias, no eran mas que sencillos desarrollos fácilmente previsibles tras aquella.

Jaime, sé bienvenido.

