

El próximo avance en la ingeniería: los materiales y las estructuras adaptativas

*Asdrúbal Valencia Giraldo**

(Recibido el 13 de noviembre de 2002)

Como el hombre es falible, así son sus construcciones [...] Entonces la historia de la ingeniería estructural, en realidad la historia de la ingeniería en general, se puede leer tanto en sus fracasos como en sus triunfos. El éxito puede ser grande, pero el desengaño muchas veces puede enseñarnos más

Henry Petroski, *Hacer ingeniería es humano*

Resumen

Se hace una breve presentación de lo que son las estructuras adaptativas o inteligentes y sus aplicaciones. Se muestra que están constituidas por procesadores, actuadores y sensores hechos de materiales inteligentes. Se describen los tipos de estos materiales y cómo pueden funcionar como adaptadores o como sensores, se explica qué es un dispositivo y qué es una estructura adaptativa, sus limitaciones y posibilidades como elemento de vigilancia y control en los sistemas de ingeniería.

----- *Palabras clave:* materiales inteligentes, materiales adaptativos, sensores, actuadores, dispositivos adaptativos, estructuras adaptativas, estructuras sensitivas.

The next step in engineering: smart materials and structures

Abstract

A brief summary is presented on what are intelligent or smart structures and their applications. It is shown that they are combinations of processors, actuators and sensors made of smart materials. These materials are described, as well as the way they perform as sensors or actuators. The difference between a device and a smart structure or system is explained and also their limitations and possibilities for monitoring and control in engineering systems.

----- *Key words:* intelligent materials, adaptive materials, sensors, actuators, adaptive devices, adaptive structures, sensible structures.

* Ingeniería de Materiales. Universidad de Antioquia. avalen@udea.edu.co.

Introducción

Aunque se habla de materiales inteligentes, hay que puntualizar que “estos materiales, en ellos mismos, no tienen lo que podría llamarse inteligencia, en realidad son bastante estúpidos” [1]. Es decir, la *inteligencia* proviene de un nivel sistemático donde los componentes: sensores y actuadores se integran en una estructura capaz de alcanzar una funcionalidad mejorada, de ahí la expresión *estructuras inteligentes*. Éstas se pueden ampliar para incluir una lógica de control altamente integrada, el acondicionamiento de la señal y la electrónica de amplificación de potencia.

Para comprender la expresión *estructuras inteligentes*, hay primero que señalar la complejidad creciente que va de un material inteligente, el cual puede funcionar como *sensor* o *actuador* e incorporarse a un *dispositivo*, y luego al *sistema* o *estructura inteligente*. Así pues, en este orden de ideas, acá se hace un pequeño resumen de esos materiales, de lo que es un sensor y un actuador, de los dispositivos y finalmente se señala el papel de las estructuras.

Aunque hay distintas definiciones de lo que son los materiales adaptativos, el término generalmente se aplica a los materiales que responden con un cambio de forma cuando se aplica una fuerza externa. Es común que el cambio de forma sea un alargamiento, lo que permite su uso como un motor lineal, que es el caso de las cerámicas piezoeléctricas, las aleaciones con memoria de forma y los materiales electro y magnetorretrictivos.

Además de los anteriores, algunos sistemas que no exhiben cambio de forma sino de otras propiedades significativas también se denominan materiales inteligentes (mientras que otros, por extrañas razones, no). Ejemplos de *otros* materiales inteligentes son los fluidos electro y magnetorreológicos, los cuales pueden cambiar la viscosidad en varios órdenes de magnitud bajo la aplicación de un campo eléctrico o magnético externos. Otros materiales de este grupo son los fotoeléctricos, los termoeléctricos, los fotosensi-

bles y los optoelectrónicos, de los cuales se están desarrollando unos constituidos por proteínas. Entre éstas se destacan las proteínas fotorreceptoras, las cuales son capaces de convertir directamente la luz en señal. Las aplicaciones técnicas de estas proteínas fotorreceptoras podrían satisfacer algunas de las cada vez más frecuentes demandas de las tecnologías de la información actuales [2].

Los materiales adaptativos

En vista de lo ya señalado, no es muy afortunado hablar de materiales inteligentes; por esta razón, se les denomina más bien materiales adaptativos o activos. Éstos son un conjunto de nuevos materiales que tienen la especial habilidad de variar sus propiedades, apariencia o dimensiones cuando cambian las condiciones externas, sin interferencia humana directa. Es decir, se pueden alterar o controlar modificando el ambiente en el cual se sitúan, puesto que tienen la capacidad de detectar y responder a las señales del medio, al mismo tiempo que pueden controlar activamente su respuesta. Estos materiales, cuando se incorporan en diseños apropiados, pueden realizar ciertas funciones en respuesta a estímulos provenientes del ambiente o de otros dispositivos. Como se esquematiza en la figura 1, un material de este tipo da una respuesta (salida) a un estímulo (entrada). De acuerdo con ello, las entradas o estímulos se pueden agrupar en cuatro categorías: campos eléctricos, campos térmicos, campos magnéticos y campos lumínicos. Por tanto, las fuerzas aplicadas externas se pueden clasificar, en un sentido amplio, en cuatro categorías:



Entrada, estímulo Material adaptativo Salida, respuesta

Figura 1 Elementos para clasificar los materiales adaptativos

Campos eléctricos. Para este tipo de estímulo se tienen las siguientes respuestas en estos materiales:

- Una deformación mecánica, como en los materiales piezoeléctricos, sobre todo en ciertos cerámicos y polímeros, debido a la polarización eléctrica; el efecto es reversible.
- Un cambio de dimensiones y de forma debido a la polarización de los electrones, en el fenómeno de la electrostricción.
- Un aumento de la viscosidad, como en los fluidos electrorreológicos.
- Un cambio de color, como en los materiales electrocrómicos.

Campos térmicos. A esta entrada las salidas que pueden dar los materiales adaptativos son:

- Un cambio de forma, como en las aleaciones con memoria de forma.
- Una corriente eléctrica como ocurre con los materiales, ya sea por la ley de Joule o porque exhiben los efectos Seebeck, Peltier o Thompson.
- Una autorregulación de la temperatura por medio de ciertos dispositivos cerámicos.

Campos magnéticos. Los materiales de interés acá responden a los campos magnéticos con las siguientes acciones:

- Una deformación mecánica, como en los materiales que exhiben el fenómeno de la magnetostricción.
- Un cambio de forma, como en las aleaciones con memoria de forma ferromagnética: materiales para actuadores recientemente descubiertos, cuya característica sobresaliente son las grandes deformaciones causadas magnéticamente.
- Un cambio en la viscosidad, como en los fluidos magnetorreológicos.

Campos lumínicos. En este grupo están todos los materiales que responden a (o emiten) una señal lumínica y son los siguientes:

- Materiales fotocrómicos
- Materiales termocrómicos
- Materiales electroluminescentes
- Materiales fluorescentes
- Materiales fosforescentes
- Materiales fotovoltaicos

Los fenómenos en que se basan estos materiales, sus características y su descripción, pueden encontrarse en las referencias [3, 4, 5].

Sensores y actuadores

Un sensor es un elemento que capta un cambio en un parámetro ambiental —que puede ser físico, químico o mecánico— y produce una señal que estimula la acción de una persona o de otro elemento o mecanismo. Por ejemplo, un termopar detecta un cambio de temperatura y lo indica como un voltaje de salida; este voltaje puede activar un control o, mediante algoritmos adecuados de transformación, convierte los datos a valores en grados, que pueden ser leídos y registrados.

Por su lado, un actuador es un elemento que recibe un estímulo o señal de entrada, que puede ser un voltaje, y produce una acción. Por ejemplo, si a un fluido electrorreológico se le aplica un campo eléctrico, responderá poniéndose rígido, una acción que es muy útil en varias aplicaciones.

Una característica de muchos materiales y dispositivos adaptativos es que funcionan como sensores o como actuadores. En el caso de los materiales piezoeléctricos, los actuadores o actuadores de estado sólido, para ser más específicos, responden con un cambio en la longitud a una señal de voltaje, figura 2.

Inversamente, los materiales piezoeléctricos también se pueden usar como sensores, donde una deformación (presión) aplicada al material se

transforma en una señal que permite el cálculo de los niveles de deformación en el sistema. La figura 2 ilustra los principios básicos de un sistema de material adaptativo actuador/sensor.

Se ve, pues, que dependiendo de la dirección del estímulo-respuesta, un dispositivo de éstos se puede usar como sensor o como actuador.

Así, si se va en orden de complejidad, se tendría la siguiente escala:

Materiales tradicionales. Son los materiales naturales (piedra, madera, hueso) o fabricados (acero, aluminio, cerámicos) que tienen unas determinadas propiedades sobre las que se actúa y no tienen, o es muy limitada, capacidad de respuesta, pero pueden tener buenas propiedades para el papel que se les asigna.

Materiales de alto desempeño. Como ciertos polímeros, cerámicos, vidrios, aleaciones y compuestos, cuyas propiedades se diseñan para propósitos específicos.

Materiales adaptativos. Materiales que cambian de propiedades e intercambian energía y que se diseñan para responder inteligentemente a la variación de las condiciones externas o estímulos.

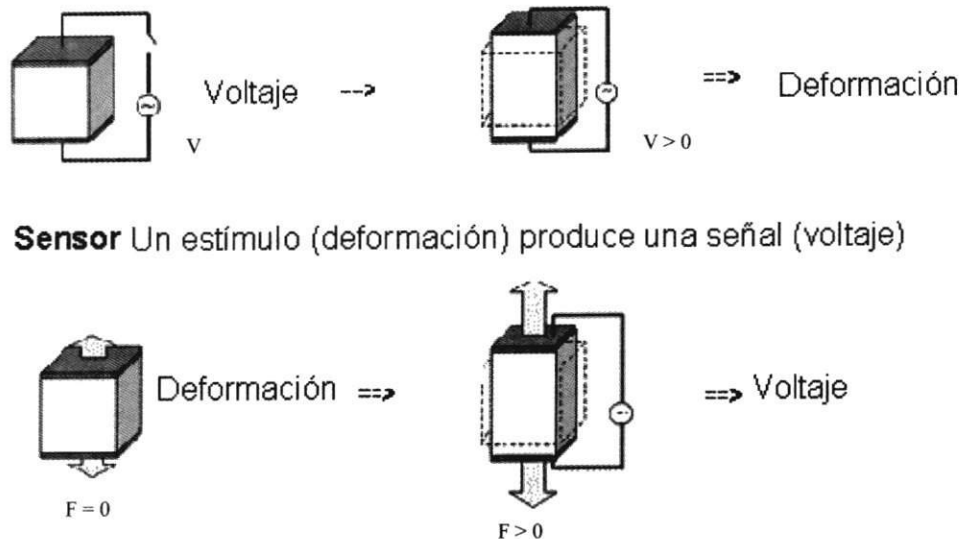
Es decir, tienen una respuesta activa a éstos y pueden servir como sensores o como actuadores.

Dispositivos o componentes adaptativos. Son ensamblajes inteligentes o paquetes, cuyo comportamiento está diseñado para responder inteligentemente a la variación de las condiciones externas o a estímulos en ubicaciones discretas. Se pueden diseñar comportamientos complejos para responder inteligente y directamente a las demandas multimodales.

Sistemas o estructuras adaptativas. Son conjuntos de componentes o dispositivos, organizados como estructuras o equipos, que se diseñan para que tengan comportamientos interactivos y respuestas inteligentes, de modo que los materiales y sistemas actúen sobre el ambiente. Generalmente combinan materiales y mecanismos tradicionales con materiales y dispositivos adaptativos, cuyas características de interacción se potencian por medio de la informática [6].

Sistemas o estructuras adaptativas

Como se acaba de señalar, las estructuras adaptativas son combinaciones de materiales tradi-



Sensor Un estímulo (deformación) produce una señal (voltaje)

Figura 2 Material adaptativo que funciona como actuador o como sensor

cionales y materiales adaptativos. Para tener una idea de lo que esta unión produce, se analiza una estructura muy simple: la combinación de una lámina de acero con una capa de cerámica piezoeléctrica como el zirconato-titanato de plomo, $[Pb(Zr,Ti)O_3]$, comúnmente denominado PZT. En la figura 3 se muestran los modos de vibración de una lámina de acero solo y de una lámina de compuesto. Como se puede observar, la capa de PZT tiene muy poco influjo sobre el modo y la forma de las frecuencias.

Luego se aplicó una resistencia a los electrodos de la placa compuesta y se estudió la respuesta dinámica al corto pulso de presión. Los resultados de esas simulaciones se muestran en la figura 4, donde se comparan las envolventes de los desplazamientos normales promedio. Como puede observarse, la atenuación adicional causada por la resistencia influye mucho en la respuesta dinámica de la placa combinada de acero y PZT.

Este tipo de combinación encuentra amplio uso en la mecatrónica (esencialmente sistemas híbridos mecánico/electrónicos). El enfoque mecatrónico es familiar en los sistemas ya existentes, como en los frenos ABS, y tal enfoque se ha empleado en el control de la vibración de los edificios altos en Japón. Sin embargo, en las estructuras realmente adaptativas, la integración de la sensación y la actuación es generalmente mucho mayor que en los sistemas mecatrónicos, con la función requerida integrada dentro del material estructural mismo. Tales estructuras han sido comparadas con el monstruo de Frankenstein pues los sensores y actuadores están integrados juntos (o atornillados) en un material estructural, sin que el material mismo sea adaptativo. Ejemplos de ello son las estructuras sensitivas, que contienen sensores de fibra óptica para seguir la historia de carga y acumulación del daño en puentes, represas y aviones, así como las estructuras adaptativas que contienen los nuevos actuado-

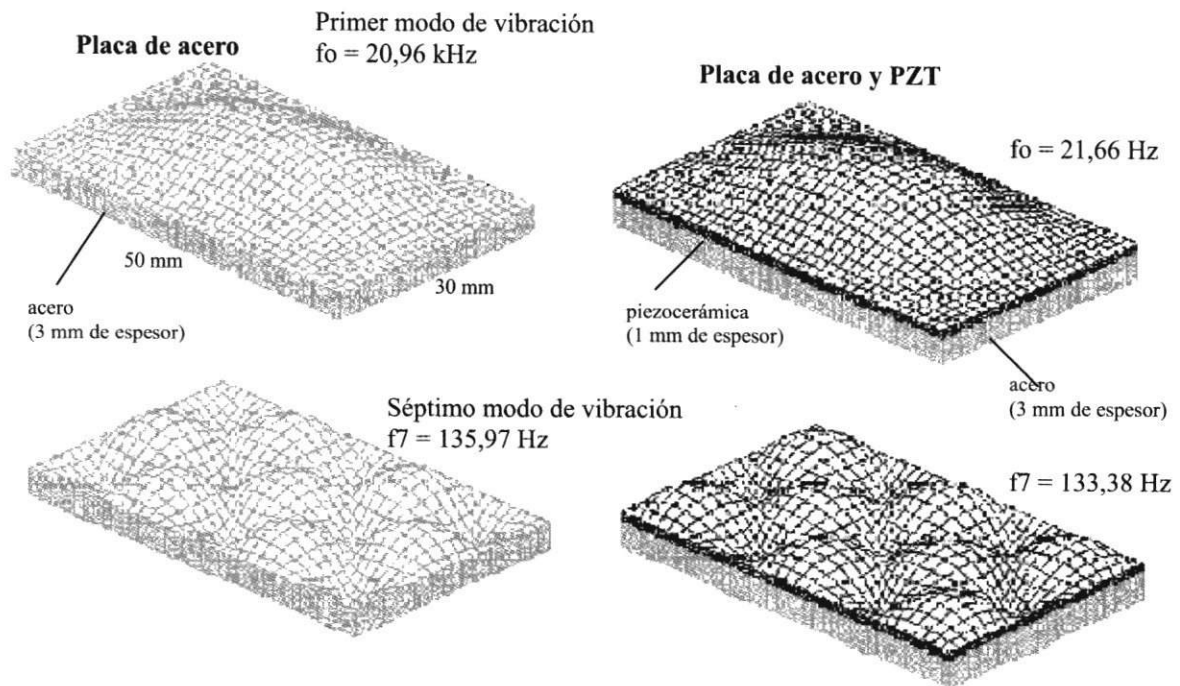


Figura 3 Modos de vibración de una lámina de acero y de una lámina de acero y PZT [7]

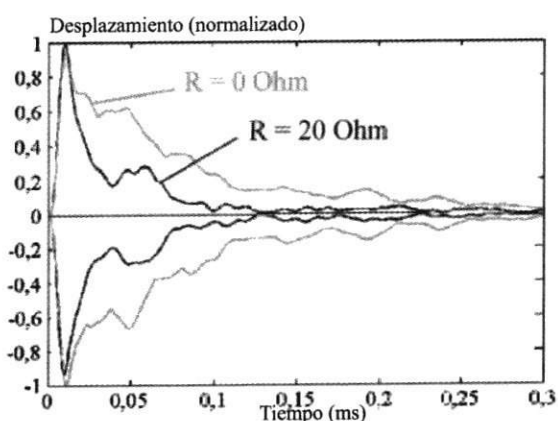


Figura 4 Envolvente de los desplazamientos normalizados para la vibración de las placas [7]

res piezocerámicos, electrostrictivos, magnetostrictivos y de memoria de forma, para el control en tiempo real de la vibración y la forma.

Las estructuras mecatrónicas adaptativas han demostrado la capacidad de esta tecnología, pero presentan el problema de la complejidad del sistema resultante. Estas estructuras adaptativas contienen una multitud de materiales diferentes y en el caso de las estructuras sensitivas se generarán grandes cantidades de datos. Es decir, cuando se colocan muchos actuadores y sensores en un material que los hospeda, resulta el *problema del alambrado* o el *síndrome del espagueti*. Esto es así porque una parte del sistema debe saber qué está haciendo cada una de las demás partes del mismo, y los investigadores han encontrado que cuando estas conexiones crecen más allá de un tamaño modesto, de unos cien nodos, se vuelven demasiado complejas para que las computadoras centrales puedan manejarlas. En las estructuras mecatrónicas todos los sensores y actuadores están conectadas a una computadora central que recibe toda la información, la procesa y envía las instrucciones a todos los actuadores sobre cómo deben responder. A medida que el tamaño de la estructura y el número de elementos aumenta, el alambrado crece dramáticamente. También crecen las di-

ferencias en el tiempo de arribo de la información entre los sensores más cercanos y los más lejanos, así como el tiempo que les toma a estos últimos recibir sus órdenes. A más grande el sistema mayores son éstos y otros problemas. Además, el peso, el consumo de potencia y los costos se hacen prohibitivos; en otras palabras, no se pueden escalar a tamaños grandes [8].

Por las razones anteriores se están estudiando los principios físicos y matemáticos que ayudarán a superar el problema del alambrado. Además, recientes avances en los sistemas microelectromecánicos y la informática distribuida están ayudando a superar esas limitaciones. En los sistemas embebidos, cada nodo contiene un microprocesador con un programa relativamente simple y una memoria pequeña que le permite controlar directamente los sensores y actuadores conectados con aquél. El microprocesador también se comunica con sus vecinos más próximos, de modo que pueden trabajar juntos. De acuerdo con la manera como se organice el sistema, el procesador también recibe datos de un cierto número de vecinos, de modo que puede coordinar la acción de sus actuadores con las de los otros nodos. Aunque cada procesador tiene mucha menos capacidad que uno central, debe manejar menos información y su carga de trabajo no aumenta con el tamaño del sistema. Estos sistemas también son más tolerantes, pues siguen operando aunque fallen varios microprocesadores, posiblemente con menos capacidad [9].

Un enfoque similar para atacar el problema del tamaño es una estructura adaptativa alterna basada en el concepto de los *materiales ken* (ken es el carácter chino que significa sabiduría, estructuración, control, integración y benignidad, que se pronuncia ken en japonés). Tales estructuras llevan a la integración funcional a los materiales mismos. Hay pocos ejemplos de materiales ken, aunque un compuesto estructural basado en este concepto fue desarrollado en Japón; es un concreto reforzado con carbono y vidrio que es capaz de vigilar y controlar las estructuras de concreto usando solamente las fi-

bras de refuerzo, reduciendo así la complejidad del sistema. En ese país la investigación sobre esas estructuras es acelerada [10].

Aplicaciones

El objetivo de los materiales y estructuras adaptativas es mejorar los objetos ordinarios, o crear otros extraordinarios, embebiendo sensores, procesadores y actuadores en objetos mayores. Sin embargo, el tema en general invita a los ingenieros a hacer maravillas con polímeros, fibra óptica y microprocesadores. Una vez que se tienen los principios básicos y la tecnología, especialmente los sensores y actuadores, se pueden hacer toda clase de cosas interesantes. Por ello, tales estructuras adaptativas tienen aplicaciones, desde el equipo de sonido del hogar hasta las naves espaciales.

Por ahora los cuatro tipos de actuadores más usados en las estructuras adaptativas son: las aleaciones con memoria de forma, los dispositivos piezoeléctricos, los materiales magnetostrictivos y los fluidos magnetorreológicos. Como se sabe, los actuadores piezoeléctricos responden a un voltaje aplicado expandiéndose o contrayéndose, el material más usado para esto es el PZT. Los materiales magnetostrictivos se usan también mucho para atenuar vibraciones; el material más común de este tipo es el Terfenol D, una aleación de terbio, hierro y disprosio. Los fluidos magnetorreológicos, con base en aceite mineral y partículas de carbonilo de hierro, se han usado para amortiguadores, en partes móviles como embragues, frenos y brazos de robots. En la figura 5 se ve un prototipo de motor construido con estos elementos.

Además, los polímeros piezoeléctricos, como el polivinilideno, se pueden aplicar en películas y unirse a una gran variedad de superficies. Tales polímeros han probado ser lo suficientemente sensibles como para usarlos en la lectura Braille.

Hasta ahora las principales aplicaciones típicas son en la industria aeroespacial, en helicópteros, aviones y naves espaciales

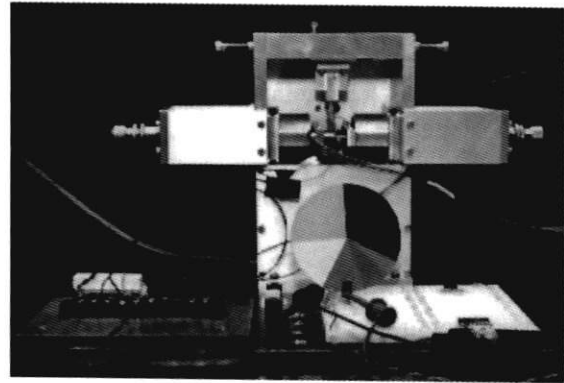


Figura 5 Prototipo de motor híbrido, que combina actuadores piezoeléctricos y magnetostrictivos para generar movimiento. Desarrollado por Intelligent Lab, Maryland [8]

Las aspas de los helicópteros ajustan la forma continuamente para responder a los cambios de presión del aire que producen vibración. Esas fluctuaciones desalinean la maquinaria y ocasionan mucho tiempo de paradas. El programa de mantenimiento de un helicóptero es aproximadamente 15% de su tiempo útil. Con actuadores y sensores piezoeléctricos ubicados en las aspas junto con otros elementos, al ajustar la forma disminuyen la vibración y los tiempos de ajuste. Experimentos recientes en la NASA, en túneles de viento con estructura adaptativa sin optimizar, han mostrado un 70% de disminución del desplazamiento y 20% de aumento en la velocidad del aspa al usarlos conceptos de control adaptativo. Una suspensión adaptativa para el ruido en las cabinas de los helicópteros disminuye en gran medida las intensidades del ruido y la vibración.

Una aerolínea como British Airways requiere más de 1.000 empleados para darle servicio a sus aviones 747, efectuando extensas revisiones rutinarias, en plataforma, intermedias y mayores, para conocer la salud y el uso de la flota. Las revisiones rutinarias requieren docenas de tareas efectuadas de acuerdo con una guía de doce apretadas páginas. Las revisiones en plataforma aumentan en minuciosidad desde cada diez días hasta cada mes. Las que se realizan en el han-

gar son cada tres meses, las revisiones intermedias son cada quince meses y las mayores cada 24.000 h de vuelo. Además del talento humano, las revisiones de hangar se toman 24 h, las intermedias, diez días y las mayores, cinco semanas. Los costos de las revisiones en seguridad son enormes.

Un avión construido con una estructura sensitiva puede auto vigilar su desempeño en un nivel superior al simple registro de datos, y proporciona datos mejores a la tripulación en tierra. Los aviones con alas adaptativas controlan las superficies para que puedan cambiar de forma en vuelo y se flexionen como las colas de los peces. Con la ayuda de las estructuras adaptativas, las alas, alerones y estabilizadores adaptarán su forma y se mejorará el ascenso de los aviones.

El reemplazo de los actuales (y pesados) sistemas de control hidráulico con estructuras adaptativas aumentará la capacidad de carga en el 30% y el alcance del vuelo en un 50% [12].

Las grandes estructuras espaciales están sometidas a una variedad de perturbaciones dinámicas producidas por la tripulación, la ubicación de otras naves y los estados térmicos transitorios durante el seguimiento de su órbita, los micrometeoritos, etc. La amplitud de la perturbación debe amortiguarse antes de que haya inestabilidad en la estructura. Además, la amortiguación de los modelos flexibles es un ingrediente necesario para lograr un control robusto de la nave espacial. Todo esto se está mejorando con estructuras adaptativas [13]. Sin embargo, estas estructuras no están restringidas a las aplicaciones aeroespaciales de alta tecnología. Se anotó que se pueden usar, por ejemplo, en la vigilancia y control de las estructuras de ingeniería civil para evaluar la durabilidad. El seguimiento del comportamiento actual y a largo plazo de un puente lleva a mejorar la seguridad durante su vida útil, pues los problemas estructurales se detectarán cuando todavía se pueden subsanar.

Para el hogar y los edificios, las estructuras adaptativas emplean sensores de luz y movimiento en el control de los sistemas de iluminación,

de seguridad, de calefacción y de aire acondicionado, y en los equipos de audio, video y teléfono. El diseño proporciona un centro de control, operación y programación de los electrodomésticos y puede interactuar con los timbres de las puertas, las computadoras personales y otros aparatos periféricos. Uno de los dispositivos más populares, basado en la memoria de forma, es para impedir la quemadura con agua caliente en las duchas. También hay en el mercado lavaplatos inteligentes, equipados con detectores que controlan la temperatura del agua, las adiciones de detergente y enjuagador, y el número de veces que la puerta se abre. Estos aparatos también usan lógica difusa para aprender la historia de los ciclos de lavado y ajustar los parámetros del sistema para ahorrar energía [14].

Todas las demás posibilidades parecen cosa de ciencia ficción, pero en este momento se están desarrollando.

Referencias

- Ouellette, Jennifer. "How Smart are Smart Materials?" En: *The Industrial Physicist*. June, 1996. p. 10.
- Culshaw, B. "*Smart Structures and Materials*". Artech House. Norwood, Boston, 1996.
- Valencia, A. "Los materiales inteligentes". En: *Informetal*. No. 52. Enero-julio, 2003.
- Craig A. Rogers. "Intelligent materials". En: *Scientific American*. September, 1995. pp. 122-125.
- Schwartz, Mel (ed). *Encyclopedia of Smart Materials*. John Wiley and sons. New York, 2001.
- Friend, Clifford M. "Smart materials and structures: the emerging technology". En: *Interdisciplinary Science Review*. Vol. 21. 1996.
- <http://www.Ise.e-technik.uni-enlargen.de/CAPA>.
- Krishnapassad, P. S. "Smart Structures". En: *Connections*. The Institute for Systems Research. A. James Clark School of Engineering. University of Maryland. 2001.
- Salisbury, David F. "Scaling up Smart Structures". En: *Exploration. The Online Research Journal*. University of Vanderbilt. June 4, 2002.
- Guran, Ardeshir *et al.* "Structronic systems: Smart Structures, Devices and Systems". En: *Series on*

- Stability, Vibration and Control of Systems*. World Scientific. London, 1998.
11. Harvey, Jeff. "Smart Structures for Spacecrafts". En: *Starsys Quarterly Newsletter*. Starsys structural systems. tjharvey@starsys.com.
 12. Friend, Cliff M. "Even aircraft have feelings". En: *New Scientist*. February, 1996. pp. 32-35.
 13. Mutlu, Necmi. "Smart Structures". En: *The Fountain Magazine*, www.fountainlink.com/2000/january-March/5.html.
 14. Friend, Clifford M. "Smart Materials and Structures: The Emerging Technology". En: *Materials Word*. Vol. 4. 1996. pp. 16-18.