

# Estado del arte de los sistemas microelectromecánicos

## Microelectromechanical systems state of the art

Márquez\*, David y Cárdenas, Oscar  
Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería  
Postgrado en Automatización e Instrumentación  
Mérida 5101, Venezuela  
\*damarquezg.@ula.ve

Recibido: 09-09-2006

Revisado: 29-10-2006

### Resumen

*El progreso paralelo de la mecánica y la electrónica, ha creado una nueva tecnología incorporando mecánica y electrónica bajo el nombre de Sistemas Micro-Electro-Mecánicos (Microelectromechanical Systems: MEMS). Esta tecnología se está convirtiendo rápidamente en una de las tecnologías más promisorias, con un potencial aparentemente ilimitado para dominar los desarrollos tecnológicos futuros. Los Sistemas Microelectromecánicos han ganado gran aceptación como productos viables para las muchas aplicaciones comerciales y gubernamentales. Actualmente se están usando en la industria del automóvil, telecomunicaciones, aplicaciones biomédicas, domótica, medio ambiente, entre otras. En este trabajo se presenta el estado del arte y aplicaciones de sistemas con tecnología MEMS, basado en investigación bibliográfica y de Internet. La investigación esta limitada a describir los MEMS, definición, ventajas, tecnologías relacionadas con el diseño y fabricación, clasificación de sus aplicaciones, tendencias en mecánica y mercados de aplicación. La producción masiva de MEMS, garantiza una funcionalidad consistente y una ejecución exacta de los estándares de diseño. Sin embargo, la confiabilidad de estos dispositivos tiene que ser evaluada meticulosamente y éste es un requerimiento vital para mayores mejoras y una adopción más general. Los micro motores de 1 MHz mostrados recientemente sugieren el potencial extraordinario de los MEMS. El rápido desarrollo del campo de los MEMS iguala el progreso en microelectrónica de hace treinta años que condujo a los modernos microprocesadores de alta potencia y computadoras ultrarrápidas. Para desarrollar completamente el nuevo mundo de la microelectromecánica, es esencial un esfuerzo interdisciplinario coordinado y el apoyo continuado de la comunidad científica.*

**Palabras clave:** instrumentación, sistemas microelectromecánicos, tecnologías futuras.

### Abstract

*The parallel progress of the mechanics and the electronics, have created a new mechanical and electronic technology incorporating under the name of Micro-Electro-Mechanical Systems (Microelectromechanical Systems: MEMS). This technology is quickly becoming one of the most promissory technologies, with an apparently limitless potential to dominate the future technological developments. Microelectromechanical Systems have gained great acceptance like viable products for the many commercial and governmental applications. At the moment they are being used in the industry of the automobile, biomedical applications, telecommunications, domotica, environment, among others. In this work one appears the state of the art and applications of systems with technology MEMS, based on papers review and Internet. The investigation this limited to describe to the MEMS, definition, advantages, technologies related to the design and manufacture, classification of its applications, tendencies in mechanics and markets of application. The massive production of MEMS, guarantees a consistent functionality and an exact execution of the design standards. Nevertheless, the trustworthiness of these devices meticulously must be evaluated and this one is a vital requirement for greater improvements and one more a more general adoption. Micro motor of 1 MHz shown recently suggests the extraordinary potential of the MEMS. The fast development of the field of the MEMS equals the progress in microelectronics of thirty years ago that it lead to the modern microprocessors of high power and high speed computers. In order to completely develop the new world of the microelectromechanical, interdisciplinary effort coordinated and the continued support of the scientific community is essential.*

**Key words:** instrumentation, microelectromechanical systems, future technologies.

## 1 Introducción

Los MEMS, también conocidos como microsistemas, son definidos típicamente como dispositivos microscópicos diseñados, fabricados, y utilizados para interactuar o producir cambios dentro de un ambiente controlado (Fujita, 1996). Estos pequeños y más sofisticados dispositivos que piensan, actúan, miden y se comunican, están remplazando a los dispositivos actuales tradicionales en muchas aplicaciones.

¿Cuál es la motivación para usar microsistemas? El uso de microsistemas ofrece un menor consumo de potencia, alto desempeño, peso reducido y un costo mas bajo que los dispositivos utilizados actualmente. La técnica de fabricación "batch" (Malshe et al, 1999) reduce los costos de ensamble y manufactura, reduce el tamaño y su peso lo que resulta en menos consumo de potencia e incrementa la flexibilidad del diseño de sistemas. Reduciendo el tamaño y peso de un dispositivo permite que puedan usarse múltiples componentes en serie o paralelo para aumentar la funcionalidad, capacidad y fiabilidad del dispositivo.

Los microsistemas se pueden categorizar en seis distintos tipos: (Fujita, 1998)

*Sensores* son dispositivos MEMS diseñados para medir cambios e interactuar con el ambiente. Estos microsistemas incluyen sensores químicos, de movimiento, inerciales, térmicos y ópticos.

*Actuadores* son un grupo de dispositivos diseñados para proporcionar un estímulo a otros componentes o dispositivos MEMS. En los microsistemas los actuadores son operados electrostáticamente o térmicamente.

*MEMS RF* son una clase de dispositivos usados para transmitir alta frecuencia, es decir señales de radio frecuencia. Los dispositivos típicos incluyen: interruptores (switches), capacitores, antenas, etc.

*MEMS ópticos* son dispositivos diseñados para dirigir, reflejar, filtrar, y/o amplificar la luz. Estos componentes incluyen interruptores ópticos y reflectores.

*MEMS para microfluidos* son dispositivos diseñados para interactuar con fluidos. Dispositivos como bombas y válvulas se han diseñado para trabajar con pequeños volúmenes de fluido.

*Bio MEMS* son dispositivos que, como muchos de los MEMS para microfluidos, son diseñados para interactuar específicamente con muestras biológicas. Dispositivos como éstos son diseñados para interactuar con proteínas, células biológicas, reactivos médicos, etc. y pueden usarse para suministrar medicamentos u otro análisis médico en sitio.

Estas seis áreas representan aplicaciones totalmente diferentes de dispositivos MEMS que actualmente se encuentran en uso o en desarrollo para aplicaciones comerciales o gubernamentales.

## 2 Generalidades sobre MEMS

Aunque no existe una definición estandarizada de

MEMS, está comúnmente aceptado que se trata de un dispositivo de pequeñas dimensiones con cierto nivel de autonomía, compuesto de elementos activos y pasivos microfabricados y que realiza diferentes funciones (Trimmer, 1996). Estas funciones son esencialmente la percepción, el procesamiento de datos, la comunicación con el exterior y la acción sobre el entorno. La naturaleza del microsistema puede ser eléctrica, magnética, óptica, térmica, mecánica o fluidica. La arquitectura del microsistema incorpora circuitos electrónicos y/u ópticos, generadores de señal y receptores, microsensores, microactuadores y microgeneradores.

Los circuitos electrónicos/ópticos realizan principalmente funciones inteligentes, entre las que se encuentran el procesamiento de señal, el análisis de datos y las tareas de decisión. A su vez, la acción conjunta de generadores de señal y receptores permite realizar las funciones de comunicación del microsistema. Los microsensores, por su parte, realizan funciones sensoriales de detección y de percepción, mientras que los microactuadores llevan a cabo funciones de adaptación y de acción/reacción. La autonomía del sistema está garantizada por los microgeneradores que realizan funciones de suministro y de transformación de energía (Janson, 2000).

Como se observa en la Fig. 1, básicamente, MEMS es un sistema conformado por microestructuras, microsensores, microelectrónica y microactuadores. Las microestructuras constituyen el armazón del sistema, los microsensores detectan señales, la microelectrónica procesa la señal y da las órdenes al microactuador para reaccionar.

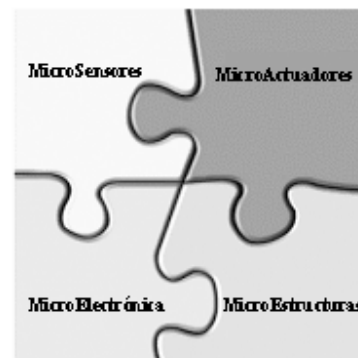


Figura 1. Componentes de los microsistemas (MEMS) (Fujita, 1998).

## 3 Tendencias en micromecánica

El advenimiento de la era de la microelectrónica avanzada hace dos décadas atrás, marcó el comienzo de una nueva era de la información y las comunicaciones. Se están desarrollando tecnologías multidisciplinarias con el objeto de satisfacer requerimientos cada vez más complejos. En particular, la experiencia en mecánica está siendo transferida, modificada y mejorada a fin de orientar nuevos desafíos. Las tecnologías de la información juegan hoy un rol de liderazgo, y el hardware necesario sigue siendo de naturale-

za predominantemente mecánica. Los dispositivos CD-ROM, DVD-ROM y los discos duros entre otros, integran componentes mecánicos, electrónicos, magnéticos y ópticos, los que deben ser necesariamente ultra pequeños y livianos, a la vez que confiables y robustos (Trimmer, 1996).

A raíz de la significación de estas aplicaciones y del nivel de madurez de la microelectrónica, la investigación ha estado orientada en la última década al "mundo pequeño", es decir, a las nuevas micro y nano tecnologías. El progreso paralelo de la mecánica y la electrónica ha creado una nueva tecnología, incorporando mecánica y electrónica bajo el nombre de Sistemas Micro Electro Mecánicos (MEMS), la que se está convirtiendo rápidamente en una de las tecnologías más promisorias, con un potencial aparentemente ilimitado para dominar los desarrollos tecnológicos futuros (Koester et al, 1996). La Mecánica jugará un rol de liderazgo en el desarrollo de nuevas aplicaciones de MEMS, incluyendo artefactos que realizan ya sea funciones básicas, tales como acelerómetros de airbag y micro interruptores de radio frecuencia para comunicaciones inalámbricas o tareas avanzadas, tales como micro giróscopos, visores digitales de micro espejo y pico satélites (Trimmer, 1996).

Estos nuevos sistemas con micro actuadores, micro sensores, y artefactos de control incrustados, pueden proveer evidencia experimental sobre fenómenos de pequeña escala y así verificar principios fundamentales en el microcosmos. Las aplicaciones en micro fluidica contribuyen al suministro eficiente de medicamentos mientras que los BioMEMS están ganando incesantemente el interés de la comunidad de ingenieros y científicos. Los nuevos productos MEMS incorporarán materiales inteligentes avanzados piezoeléctricos, ferroeléctricos o magnetostrictivos con funciones y aplicaciones particulares. Permitirán que micro máquinas "inteligentes" funcionen con desempeños inigualables (Fujita, 1996). En los casos en que la mecánica puede reemplazar a la electrónica, provee funcionalidad superior y no está sujeta a ruido electrónico no deseado. Por ejemplo, los componentes electrónicos clásicos de redes de fibra óptica están siendo reemplazados ahora por interruptores MEMS ópticos que permiten la creación de conjuntos de interruptores en miniatura de alta capacidad que jugarán un rol crítico en el desarrollo de interruptores ópticos de gran escala en redes de fibra óptica futuras (Petersen, 2000).

La producción masiva de MEMS con geometrías idénticas garantiza una funcionalidad consistente y una ejecución exacta de los estándares de diseño. Sin embargo, la confiabilidad de estos artefactos tiene que ser evaluada meticulosamente y este es un requerimiento vital para mayores mejoras y una adopción más general. Deben desarrollarse técnicas experimentales para medir propiedades mecánicas y de materiales para abordar las preguntas críticas y fundamentales de comportamiento constitutivo y de fractura en micro escalas reales de MEMS. El ensayo de materiales y el análisis de tensiones son partes claves de este desarrollo y los métodos experimentales existentes deben ser perfeccionados o rediseñados completamente para armonizar con los

desafíos y requerimientos del nuevo tamaño (Trimmer, 1996). Las herramientas necesarias para la visualización de las deformaciones en una escala pequeña ya están disponibles. Los microscopios de exploración electrónica son instrumentos de alta resolución, mientras que el microscopio de fuerza atómica recientemente desarrollado provee potencia de resolución sin precedentes y una flexibilidad sin paralelos para operar en virtualmente cualquier medio a fin de facilitar las pruebas de materiales bajo una variedad de condiciones (Malshe, 1999). La mecánica computacional y los métodos de elementos finitos han alcanzado el nivel de maduración necesario como para desarrollar nuevas capacidades de CAD (diseño asistido por computador) y modelado para micro artefactos y nuevas y mejores técnicas de fabricación.

Estos nuevos desafíos deben ser satisfechos por un esfuerzo metodológico de la comunidad mecánica relacionada con los MEMS. El diseño de artefactos, la fabricación, la evaluación de los ensayos y de la confiabilidad deberían ser abordados en un esfuerzo coordinado que sopesa por igual todos los aspectos del desarrollo de los MEMS antes mencionados. A la fecha, el sector manufacturero ha demostrado una actividad considerable para atraer la mayoría del soporte financiero y la atención de las comunidades académica e industrial. Hoy, el campo de la micro-mecánica es impulsado por la aplicación, y la confiabilidad ha sido abordada sin un adecuado entendimiento de la mecánica. Sólo casos aislados han sido estudiados sin desarrollar las herramientas generales y los métodos apropiados para resolver la cuestión de la integridad mecánica. Aplicaciones novedosas e importantes requieren una evaluación de la confiabilidad basada en la mecánica (Malshe, 1999). Antes de que pueda lograrse la introducción y perfeccionamiento de micro máquinas nuevas, la comunidad mecánica debe demostrar el adelanto necesario. Las tensiones residuales, los efectos de la concentración de tensiones en micro entalladuras y esquinas y las fallas por propagación de fisuras están llegando a ser crecientemente significativas, causando a menudo interrupciones temporarias en la investigación de nuevas micro estructuras (Trimmer, 1996). Las herramientas analíticas y experimentales requeridas están, en principio, disponibles en un nivel de desarrollo que hace factibles tales investigaciones. La comunidad de investigación en mecánica debe prestar atención cuidadosamente a las etapas tempranas del desarrollo de la micro tecnología y coordinar sus esfuerzos.

Hoy, muchos aspectos de la mecánica están siendo re-inventados, aunque a escalas variables (Fig. 2). El rápido desarrollo del campo de los MEMS iguala el progreso en microelectrónica de hace treinta años que condujo a los modernos microprocesadores de alta potencia y computadoras ultrarrápidas. Para desarrollar completamente los nuevos mundos de la microelectromecánica y de la nanotecnología, son esenciales un esfuerzo interdisciplinario coordinado y el apoyo continuado de la comunidad científica.

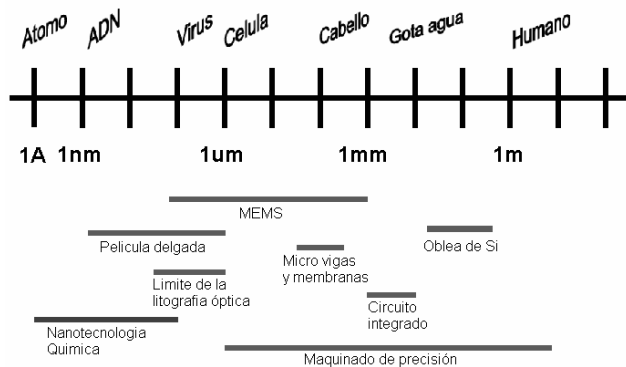


Figura 2. Escalas y dimensiones

#### 4 Diseño y fabricación de MEMS

Como en la fabricación de semiconductores, los dispositivos MEMS se fabrican habitualmente a partir de obleas de silicio o vidrio. Sin embargo, la tecnología MEMS ha superado sus orígenes en la industria de semiconductores al incluir otras técnicas de fabricación, como el micro-mecanizado de silicio superficial, micro-mecanizado de plástico (LIGA), y maquinado por electrodescarga (EDM) (Ehrfeld et al, 2000), (Petersen, 1982).

La fabricación específica de MEMS crea características físicas en las obleas quitando capas que se pueden sacrificar debajo de las estructuras mecánicas deseadas (Bustillo et al, 1998), (Kovacs, 1998). El procesamiento de MEMS habitualmente comprende grabados más profundos y especializados y puede fusionar obleas en una pila para crear un dispositivo multicapa más grande (Ehrfeld et al, 2000). Los dispositivos MEMS suelen también tener características en ambos lados de la oblea. En algunos procesos, se requiere una serie de pasos de grabado para labrar las características deseadas. En otros procesos, múltiples capas de un material -polisilicio, generalmente- se depositan en la superficie de una oblea y luego se graban selectivamente, dejando características complejas de múltiples capas en la superficie (Bustillo et al, 1998), (Griffin et al, 2000).

Tabla 1. Técnicas de fabricación de MEMS.

Micro mecanizado	Proceso	Aplicaciones
Substrato	Se "esculpe" el substrato con ataques químicos selectivos	Espesor ~100µm Microválvulas Bombas de fluido Inyectores de tinta Membranas
Superficie	Se añaden materiales sobre la superficie del substrato que son los que se "esculpen"	Espesor ~5-10µm Microespejos Micromotores
Alta relación de aspecto	Se realizan moldes con un substrato que luego se rellenan con materiales (técnica LIGA) Resolución horizontal micrónica	Espesor ~1 cm Sensores de gas Acelerómetros Microengranajes

En la Tabla 1 se resumen las técnicas de fabricación más usadas en la tecnología MEMS, se muestran las técnicas de micromecanizado, el proceso de fabricación relacionado, así como algunas aplicaciones específicas desarrolladas para cada técnica.

En cuanto al proceso de fabricación de MEMS, Fig. 3, se basa en el mismo proceso que la industria microelectrónica (Koester et al, 1996), este requiere una precisión muy alta en todas y cada una de sus etapas. Esto hace que sea necesario desarrollar complejos sistemas sensorizados capaces de controlar, monitorear y supervisar las características y evolución de dichos procesos.

Además de controlar y supervisar las condiciones del proceso de fabricación, para asegurar la precisión y funcionalidad del microdispositivo producido, es necesario someter a este a numerosas pruebas una vez finalizada su fabricación (test de hermeticidad, integridad eléctrica, etc.) (Malshe et al, 1999), (Ehrfeld et al, 2000).

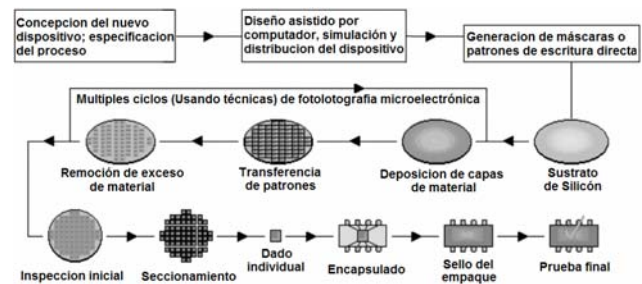


Figura 3. Proceso de microfabricación (Malshe et al, 1999).

#### 5 Ventajas de los dispositivos MEMS

Los MEMS poseen una serie de ventajas frente a los sistemas de mayor tamaño, entre las cuales se encuentran: (Fujita, 1998), (Janson, et al, 2000)

- Posibilidad de fabricación masiva con bajo costo.
- Componentes más finos y delicados.
- Tamaño y peso reducido.
- Consumo de energía reducido.
- Alta precisión y biocompatibilidad.
- Partes mecánicas precisamente diseñadas, las cuales serán más eficientes y durables.
- Micro-materiales con propiedades que les permitan ser más fuertes y ligeros.
- Desarrollo de componentes electrónicos más rápidos, de mayor potencia y funcionalidad.
- Sistemas mecánicos y ópticos más rápidos y complejos. Mayor número de partes, mayor funcionalidad.
- Nuevos dispositivos ópto-electrónicos sobre la base de principios cuánticos.
- Aprovechamiento de reacciones químicas resultantes de "nuevas propiedades" como es el reducir las dimensiones de trabajo (exposición de mayor número de electrones disponibles para la reacción).

Dichas ventajas han favorecido su introducción en un gran número de aplicaciones y mercados (Fujita, 1998), (Janson, et al, 2000), (Fujita, 1996).

## 6 Mercado previsto

El mercado mundial de MEMS en el año 2000 ascendió a más de 13.000 millones de dólares. Según el "Análisis de mercado de los MEMS" desarrollado por NEXUS (European commissioned NEXUS Task Force), esta cifra podría elevarse a más de 34.000 millones de dólares para el año 2006, de acuerdo con las previsiones de expansión de los productos existentes actualmente en el mercado. A esta cifra habría que sumarle otros 4.200 millones de dólares procedentes de la comercialización de nuevos productos emergentes: chips-laboratorio, sistemas de dosificación de drogas, sensores de olor (nariz electrónica), cabezales magneto-ópticos, etc.

El sector automotriz era el que estaba a la cabeza del mercado de los MEMS. Una de las aplicaciones más típicas en este campo es el uso de acelerómetros para sistemas de detección de impactos y activación del airbag. Sólo en el 2000, se vendieron 240 millones de acelerómetros, generando un mercado de 1.300 millones de dólares (Maseeh et al, 2005).

Hoy en día, la situación ha evolucionado de tal forma que son las tecnologías de la información y la medicina los sectores que integran un mayor volumen del mercado de microsistemas (Butler, 2005). En tecnologías de la información, los cabezales de lectura de disco duro y cabezales de impresión de chorro de tinta ocupan un volumen de mercado de 8.900 millones de dólares, unos dos tercios del mercado total de los MEMS. En cuanto al sector de la medicina, el mayor volumen de ventas de microsistemas se produjo para audífonos y marcapasos: 1.150 y 1.000 millones de dólares, respectivamente (Maseeh et al, 2005).

En la Tabla 2 se presenta el mercado previsto en dólares para los dispositivos MEMS, se muestran las ventas para el año 2000, las proyecciones de ventas para el presente año 2006, así como la tasa de crecimiento, lo que deja de manifiesto la creciente penetración en el mercado que tienen estos dispositivos.

## 7 Mercados de aplicación

La variedad de productos existentes en la actualidad es muy grande, desde sensores de presión en un motor de automóvil hasta micropinzas para cirugía. Estos microdispositivos sustituyen a sus homólogos de mayor tamaño, o bien permiten nuevas aplicaciones que les estaban vetadas (Maseeh et al, 2005).

Uno de los sectores considerado con un alto potencial de desarrollo es el de las telecomunicaciones. Su introducción en dicho campo ha sido favorecida por la rápida expansión de los sistemas basados en fibra óptica (Hagelin et al, 1999).

Tabla 2. Mercado previsto (NEXUS, 2005).

Dispositivos y aplicaciones MEMS	Ventas 2000 \$M	Ventas 2006 Proyección \$M	Tasa de Crecimiento %
Medición inercia	350-540	700-1400	10-20
Microfluidos	400-550	3000-4450	25-35
Ópticos	25-40	440-950	40-60
Medición de presión	390-760	1100-2150	10-20
Dispositivos RF	10-20	40-120	10-20
Otros	510-1050	1230-2470	10-20
Total	1675-2940	6500-11540	20-30

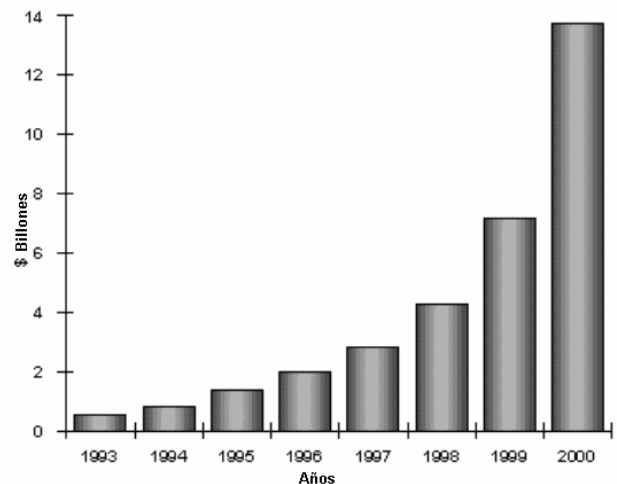


Figura 4. Mercado mundial de los MEMS hasta el año 2000 (NEXUS 2005).

Finalmente, cabe mencionar la presencia de MEMS en muchos otros sectores, como son el medioambiental, doméstica, electrodomésticos o máquina-herramienta. En todos ellos, existen numerosas aplicaciones para todo tipo de microdispositivos: micromotores, sensores de presión, giróscopos, microespectrómetros, y muchos otros (Butler, 2005).

Seguidamente, se describirán someramente algunas de las principales aplicaciones de los microsistemas en los distintos sectores.

### 7.1 Automotriz

El sector automotriz vive hoy en día una revolución impulsada por las microtecnologías tanto a nivel mecánico como electrónico. Actualmente, todos los vehículos incorporan un microsensado de presión en el sistema de control electrónico del motor y un acelerómetro en el airbag. Se estima que en un futuro no muy lejano, los sensores y la electrónica representarán aproximadamente el 30% del valor de un automóvil (Maseeh et al, 2005).

Se pueden distinguir tres áreas principales de aplicación de MEMS en este sector: 1) seguridad y confort, 2) sistemas informáticos y de comunicación dentro del vehículo, y 3) gestión del motor y consumo.

En cuanto a seguridad y confort, para evitar accidentes, es necesario que el conductor sea capaz de controlar el

vehículo en situaciones críticas. Los vehículos más modernos, equipados con microsensores, inteligentes procesadores de señales y rápidos actuadores, son capaces de reconocer situaciones de peligro, ayudar al conductor a mantener el vehículo bajo control, y mejorar la seguridad pasiva.

Los sensores de presión son otro ejemplo de microsistemas para seguridad en el vehículo. Son usados para la medición de presión/temperatura en el neumático, control de presión de cilindro de freno, etc (Butler, 2005). Otro MEMS frecuentemente utilizado en aplicaciones de seguridad es el acelerómetro. Éste es un componente clave de los sistemas de airbag, siendo el responsable de su activación al detectar un choque.

Otros ejemplos de MEMS en aplicaciones de seguridad en el automóvil son los microdispositivos de medición y control de la suspensión y adherencia a la calzada, sistemas de frenada asistida y estabilizadores, sistemas inteligentes para el control de la intensidad de los faros delanteros por medición de las condiciones ambientales, sensores radares y de distancia para la detección de obstáculos, etc.

Asimismo, los sensores de humedad, sistemas de control de la temperatura en el interior del vehículo, o microsistemas para el filtrado de aire contaminado permiten incrementar el confort de los ocupantes del automóvil.

Los sistemas informáticos y de telecomunicación aplicados al sector automotriz proporcionan también un amplio rango de posibilidades para los microsistemas, especialmente para los basados en microelectrónica y optoelectrónica: integración del PC en el automóvil, sistemas de comunicación inteligente, etc (Koester et al 1996).

La integración de un PC en el vehículo proporciona numerosas ventajas: información en tiempo real sobre el estado del tráfico y de las carreteras proporcionando al conductor una ruta alternativa, ajuste automático de la radio o de la temperatura, entretenimiento de los ocupantes, etc. Los sistemas de comunicación de manos libres, y los sistemas de reconocimiento de voz permiten comunicarse al conductor sin necesidad de usar las manos aumentando el confort y la seguridad del mismo.

La implantación en el vehículo de sistemas de comunicación inteligentes (telefonía, sistemas de navegación, servicios de internet, etc.) contribuye a una conducción mucho más cómoda y segura.

La gestión del motor es otro de los grandes campos de aplicación de los MEMS en el automóvil (Maseeh et al, 2005). Los sistemas de ignición electrónica han provocado la aparición de complejos sistemas de gestión del motor. Las unidades de control electrónicas modernas, equipadas con diversos sensores, permiten que los motores de inyección sean más potentes y económicos, emitiendo menor volumen de gases que los antiguos motores.

Los nuevos sistemas de inyección electrónicos, con avanzados microdispositivos capaces de inyectar durante el ciclo de admisión microgotas de combustible con tamaños tan pequeños como 10 micras, permiten la construcción de motores con menor consumo de combustible y menor emi-

sión de gases (Maseeh et al, 2005).

Los avances en tecnología de circuitos integrados, y el desarrollo y evolución de componentes electrónicos inteligentes de bajo coste, permiten el desarrollo e integración en el propio motor de sensores y dispositivos de proceso de señales y otras funciones con menor costo y mayor eficiencia.

### 7.2 Aeronáutico y defensa

El sector aeronáutico se caracteriza por su necesidad de instrumentación y sistemas de medida precisos. Una gran variedad de microsistemas es integrada hoy en día en aplicaciones de aeronáutica. Entre ellos, cabe mencionar medidores de presión de aire, de aceleración, sensores de humedad, presión, gas, temperatura, estabilizadores, etc (Butler, 2005).

En el sector aeroespacial, la microtecnología es la clave en la fabricación de sistemas robustos, efectivos y miniaturizados para la exploración del espacio.

Otras aplicaciones en el sector espacial son: microinstrumentos y microelectrónica para misiones espaciales, microhigrómetros, micromotores de propulsión, fotodetectores de infrarrojo, microrobots, etc (Malshe et al, 1999).

### 7.3 Medio ambiente y agricultura

Entre los sistemas basados en microtecnologías aplicables a este sector, se pueden mencionar equipos de metrología, sensores químicos para medir los niveles de contaminación, monitorización medioambiental y de la agricultura, o microsistemas para mediciones meteorológicas.

Un área de aplicación cuya importancia se verá fuertemente incrementada en un futuro cercano, y en el que los microsistemas jugarán un papel crítico, es el control de contaminación medioambiental (Maseeh et al, 2005).

Los microsensores pueden ser utilizados también para el control de pureza de alimentos, empleando instrumentación que integra espectrómetros de infrarrojo, dispositivos de análisis de color, o microsensores de aleaciones con memoria para registrar la temperatura de alimentos congelados.

Los MEMS también son usados en el sector energético, por ejemplo dentro del control y gestión de los parámetros de extracción de pozos de petróleo (Koester et al, 1996).

### 7.4 Medicina

Tanto la medicina como la bioquímica, sectores en los que la miniaturización es esencial, están registrando una vertiginosa penetración dentro del campo de las microtecnologías (Butler, 2005).

Debido a los MEMS, las nuevas técnicas en este sector tienden a ser menos invasivas, más baratas y con una mayor rapidez de diagnóstico.

En relación con las áreas de medicina, bioquímica, clínico-química y farmacéutica, se han abierto en los últimos años, numerosas líneas de aplicación novedosas, entre las que se incluyen las siguientes:

- Descubrimiento, desarrollo y producción de medicamentos: microrreactores, matrices para muestras con un número elevado de microceldas, etc.
- Sistemas de dosificación de medicamentos: píldoras inteligentes, jeringuillas sin aguja, bombas implantables, inhaladores, etc.
- Análisis de ADN para diagnóstico, terapia genética, caracterización e ingeniería genética y medicina forense.
- Diagnóstico in vitro, análisis y monitorización, etc.

El mayor volumen de mercado de microsistemas en medicina se produce en audífonos y marcapasos. Otros sistemas similares, aunque menos frecuentes, son los integrados en órganos artificiales, microsistemas de estimulación de nervios y músculos, etc (Butler, 2005).

Los MEMS permiten asimismo obtener información del cuerpo humano: microsensores de visión, medidores de glucosa, de presión sanguínea, de oxígeno en sangre, endoscopios, sistemas de diagnóstico genética, etc. Los sistemas de medición de glucosa en la sangre modernos, por ejemplo, son capaces de trabajar con muestras de tan sólo 3 microlitros, integrando microcapilares y microelectrodos (en el caso de sensores electroquímicos).

Otra área en la que los MEMS dan lugar a importantes mejoras es la cirugía mínimamente invasiva. Esto es posible gracias a los nuevos dispositivos e instrumentos miniaturizados, que incorporan microestructuras mecánicas, componentes microópticos y de fibra óptica, microsensores táctiles y de presión, etc. Los motores lineales para microcirugía controlan la posición de instrumentos quirúrgicos a muy pequeña escala (en el orden de la micra) mejorando los resultados de la mayoría de las técnicas quirúrgicas actuales (Maseeh et al, 2005).

### 7.5 Máquinas herramientas

La introducción de MEMS en el sector de la máquina-herramienta ha posibilitado la apertura de novedosas líneas de trabajo, en las que han aparecido nuevas posibilidades de aplicación para microrrobots, micromáquinas-herramienta y micromoldes (Maseeh et al, 2005).

Los microrrobots son elementos fundamentales para el ensamblado y manipulación de microelementos, siendo utilizados principalmente en:

- Ensamblado y empaquetado de chips híbridos, microsensores y micromáquinas.
- Posicionado, alineamiento y ensamblado de dispositivos optoelectrónicos.

Por otra parte, numerosos microdispositivos son integrados hoy en día en sistemas de control y supervisión de procesos industriales. Sensores de presión o temperatura, detectores de presencia, o sensores de gas en la industria química y petroquímica, etc. (Takashi et al, 2005).

### 7.6 Telecomunicaciones

Dentro de las telecomunicaciones, la microtecnología desempeña un papel fundamental. La rápida expansión de los sistemas de telecomunicación basados en fibra óptica ha provocado un espectacular crecimiento tanto en el número como en el tipo de fabricantes de dispositivos y componentes ópticos (Jaime et al 1999).

Debido a la alta precisión requerida para las conexiones ópticas y a la sensibilidad que presenta esta tecnología a los desalineamientos de posición y angulares, los microsistemas son de gran importancia en los sistemas de fibra óptica. Gracias a ellos, es posible posicionar fibras de entrada y salida mediante canales micromecanizados, sin necesidad de realizar complejas y costosas operaciones de alineamiento activo. Además, se fabrican numerosas microestructuras como elementos ópticos pasivos (interruptores ópticos, guías de onda, divisores de haz, etc.) (Lorenz et al, 1997), (Ayon, et al, 1997)

En el contexto de la radiofrecuencia, la aplicación de los microsistemas tiene también un creciente interés. Las ventajas ofrecidas por los microsistemas en términos de reducción de tamaño, consumo energético, compatibilidad e integrabilidad son investigadas para el desarrollo de microcomponentes de radio frecuencia, tales como filtros, microinterruptores y antenas (Hyman et al, 1999).

### 7.7 Domótica – Edificios inteligentes

Los microsistemas incorporados en aplicaciones de domótica pueden ser tan simples como detectores de fugas de gas, o sensores de presión con función de autoencendido similares a los utilizados en balanzas (Butler, 2005). Sin embargo, los sistemas multifuncionales que se desarrollan hoy en día están enfocados a aplicaciones más complejas como control de olores en cocina, análisis de polución, medición y ajuste de temperatura, luminosidad y humedad, etc.

Las futuras necesidades de la domótica incluyen la incorporación de microsistemas en aplicaciones dirigidas a los siguientes objetivos (Maseeh et al, 2005):

- Aumentar el confort y la seguridad: cámaras de seguridad, llaves inteligentes, células de infrarojos, detectores de pérdidas en conducciones de agua y de gas, etc.
- Reducir el consumo: control óptimo de calefacción, luz, electrodomésticos, etc., en función de las necesidades en cada momento. Los detectores de presencia permiten conocer la existencia o no de personas en cada habitación, evitando que queden aparatos encendidos cuando no hay nadie.
- Realizar operaciones autónomas y remotas. Permiten realizar operaciones de forma automática: encender la luz al entrar en la casa, poner en funcionamiento la calefacción a determinada hora, etc. Estas operaciones pueden ser programadas también de forma remota.

Todo esto requiere el uso de MEMS para el desarrollo de los sensores y actuadores, llaves inteligentes y cámaras

de seguridad, la electrónica y sistemas de comunicación asociados, etc.

### 7.8 Electrodomésticos

La reducción del consumo de energía, agua y detergente, son objetivos primordiales para la industria de los electrodomésticos. Las características requeridas en los sensores y actuadores utilizados para este fin son bastante exigentes: bajos costes, altas características técnicas y larga duración. Esto es sólo posible mediante el desarrollo e introducción de MEMS en este sector, ya que son los únicos capaces de proporcionar características técnicas óptimas con un bajo coste (Butler, 2005).

### 7.9 Tecnologías de la información

El mercado de tecnologías de la información es el que mayor volumen de MEMS integra y factura. La clave de su éxito se encuentra en la miniaturización, integración y bajo coste de la microelectrónica asociada (Butler, 2005).

Numerosas microestructuras con funciones mecánicas, magnéticas y ópticas, entre otras, forman parte de los dispositivos de almacenamiento de datos (discos duros, lectoras de CD-ROM, etc.) y de los periféricos de entrada y salida de datos (monitores, escáners, lectoras de código de barras, displays de pantalla plana, etc.). Los cabezales magnéticos de discos duros y ópticos para CD-ROMs, junto con los cabezales de inyección de tinta para impresoras y los displays, constituyen las principales aplicaciones de los MEMS dentro de este sector (Ehrfeld et al., 2000).

El desarrollo de nuevos y mejores MEMS permitirá mejorar factores como calidad de color y resolución en impresoras, así como nitidez de imagen en pantalla, aumentará la densidad de datos y velocidad de procesamiento en dispositivos de almacenamiento de datos, y finalmente, permitirá reducir el tamaño y peso de los dispositivos, disminuyendo asimismo su coste.

## 8 Conclusiones

Los MEMS han demostrado su aplicabilidad y potencialidad durante los últimos años. Estos microsistemas han sido integrados en productos comerciales desde sensores para el airbag en la industria automotriz hasta sistemas de proyección digital en el campo de tecnologías de la información. El potencial de los MEMS apenas se está comenzando a explotar, su aplicabilidad en la industria es inevitable, la evolución de los sensores actualmente utilizados tienden a converger en el uso de tecnologías más pequeñas y la nanotecnología representa el próximo paso hacia la miniaturización de los sistemas y procesos de medición.

## Referencias

Ayon, AA, Bayt RL, y Breuer KS, 1997, A Performance

- Evaluation of MEMS-based Micronozzles. AIAA 97-3169.
- Bustillo J, Howe RT, y Muller RS, 1998, Surface micromachining for microelectromechanical systems, Proceedings of the IEEE, Vol. 86, No. 8, pp. 1552-1574.
- Celik-Butler Z, 2005, Introduction to micro electro mechanical systems (mems) and devices. Electrical Engineering Department, University of Texas at Arlington.
- Fujita H, 1996, Future of actuators and microsystems, sensors and actuators, A56, pp. 105-111.
- Fujita H, 1998, Microactuators and micromachines, Proc. IEEE, Vol. 86, No. 8, pp.721-1732.
- Griffin JL, Schlosser SW, Ganger GR y Nagle DF, 2000 Modeling and performance of MEMS based storage devices, Proc. of ACM SIGMETRICS, pp. 56-65.
- Hagelin PM, Krishnamoorthy U, Arft CM, Heritage JP y Solgaard O, 1999, Scalable fiber optic switch using micromachined mirrors, Proc. 10th Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators (Transducers'99), Sendai, Japan.
- Hyman D. et al., 1999, Surface-Micromachined RF MEMS switches on GaAs substrates, Int. J. RF and Microwave CAE, Vol. 9, No. 4, pp. 348-361.
- Jamie Z, Chen S, Eshelman S, Denniston D y Goldsmith C, Micromachined low-loss microwave switches, 1999, IEEE J. Microelectromec. Syst., Vol. 8, No. 2, pp. 129-134.
- Janson SW y Helvajian H, 1999, MEMS, Microengineering and Aerospace Systems. AIAA 99-3802
- Koester A, Mahadevan R y Markus KW, 1996, Multi-user MEMS processes (MUMPs): Introduction and design rules, rev. 4, Technical Report, MCNC MEMS Technical applications center, 3021 Cornwallis Road, Research Triangle Park, NC 27709.
- Kovacs GTA, Maluf NI y Petersen, KE, 1998, Bulk micromachining of silicon, Proc. IEEE, Vol. 86, No. 8, 1536-1551.
- Lorenz H, Despont M, Fahrnl N, LaBianca N, Renaud, y Vettiger P, 1997, SU-8: A low-cost negative resist for MEMS, Journal of Micromechanics and Microengineering, vol. 7, No. 3, pp. 121-124.
- Malshe AP, O'Neal C, Singh SB, Brown WD., Eaton WP y Miller WM, 1999, Challenges in the packaging of MEMS, International Journal of Microcircuits and Electronic Packaging, Vol. 22, No. 3, pp. 233-241.
- Maseeh F, Swiecki Andrew y Finch Nora, 2005, Reducing MEMS product development and commercialization time, IntelliSense Corporation.
- Petersen KE, 1982, Silicon as a mechanical material, Proceedings of the IEEE, Vol. 70, No. 5, pp. 420-457.
- Petersen KE, 2000, Micromechanical membrane switches on silicon, IBM J. Res. Develop., Vol. 23, No. 4, pp. 376-385.
- Ehrfeld W, et al., 2000, Fabrication of microstructures using the LIGA process, Proceedings IEEE Micro Robots and Teleoperators Workshop.
- Takashi Y, Motoki T, Yuji S y Nobuhide K, 2005, Toward development of feedback control system for wall turbulence with MEMS sensors and actuators.



---

Trimmer W (Ed.), 1996, *Micromechanics and MEMS: classic and seminal papers*, IEEE Press, New York, NY.