

Parte I

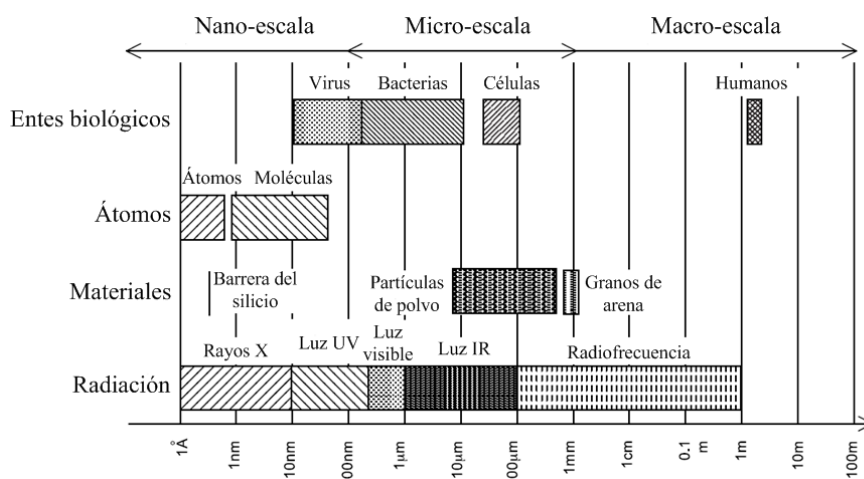
**Sistemas Microelectromecánicos
(MEMS)**

Capítulo 1

Definición y breve historia de los MEMS

Una primera definición general para los MEMS es que se trata de sistemas embebidos y especializados en miniatura que involucran uno o más componentes o estructuras micromaquinadas que actúan como sensores o actuadores para habilitar funciones en un nivel superior dentro de la estructura de un sistema más complejo.

En los Estados Unidos esta tecnología se conoce como Sistemas Microelectromecánicos (MEMS), en tanto que en Europa son llamados Tecnología de Microsistemas (MST). Para uno y otro polo de desarrollo tecnológico las diferencias de las denominaciones implican diferencias en las definiciones. En tanto que para los tecnólogos norteamericanos, los MEMS son principalmente dispositivos electromecánicos, fabricados mediante técnicas desarrolladas por la industria de la microelectrónica, cuyas dimensiones se encuentran en el orden de los μm , basados principalmente en estructuras de silicio y que tienen un cierto grado de integración con circuitos electrónicos desarrollados en este mismo material, para los tecnólogos europeos se trata primordialmente de sistemas con un alto nivel de integración y miniaturización (también en el orden de los μm) que emplean diferentes tecnologías y materiales para fabricar componentes que son combinados en una sola unidad funcional. Una forma de entender las diferencias en las definiciones en este campo de investigación y desarrollo es que se trata en realidad de un reflejo de la diversidad de aplicaciones y tecnologías que intervienen en el desarrollo de los MEMS y MST.

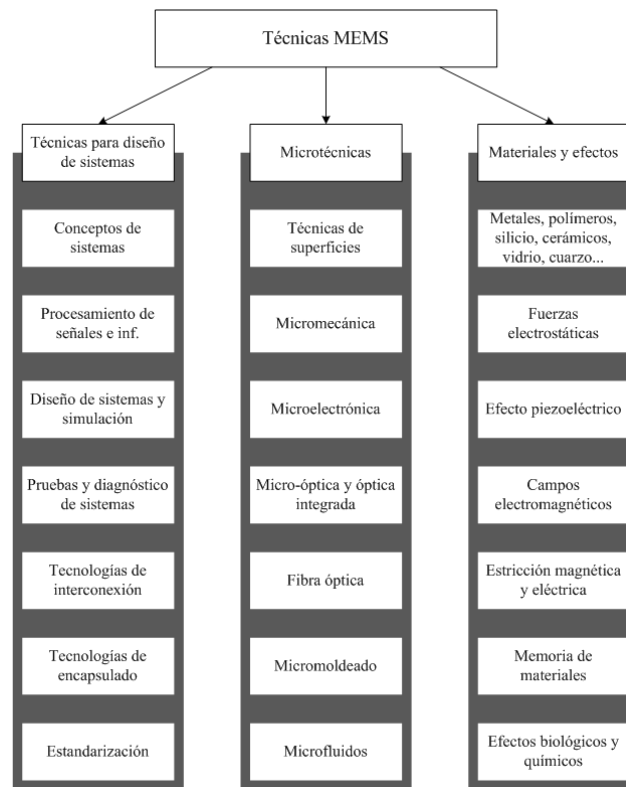


Una perspectiva de los tamaños de diversos elementos en el dominio nano, micro y macro.

Por esta razón, tal vez, la definición más acertada para MEMS y MST es la que proponen Nadim Maluf y Kirt Williams [1] en su texto *An Introduction to MEMS Engineering* pues afirman que se trata de un

conjunto de herramientas, un dispositivo físico y una metodología de desarrollo tecnológico, todo en uno. Así, los MEMS y MST son:

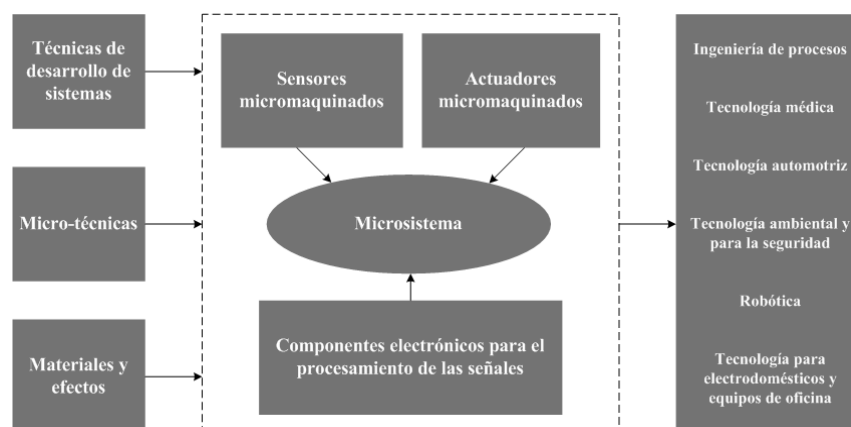
1. Un portafolio de técnicas y procesos para diseñar y crear sistemas en miniatura muchos de ellos heredados de la industria de la microelectrónica.
2. Un dispositivo físico generalmente especializado y con una única aplicación final que contiene al menos un elemento transductor en la escala de los μm creado con técnicas o procesos de micromaquinado.
3. Una forma de hacer las cosas. *Cosas* que reúnen funciones de registro y actuación con procesamiento y comunicación para controlar localmente parámetros físicos a microescala que provocarán efectos a mayores escalas.



Algunas de las técnicas fundamentales que deben dominarse para desarrollar MEMS.

Una definición alternativa para los MEMS y MST basada en la funcionalidad es la que proporciona Stephen Beeby [12] en su libro *MEMS Mechanical Sensors*, en la cual argumenta que un Microsistema debe comprender:

1. Un sensor que alimenta de información a un sistema externo más complejo.
2. Un circuito electrónico que acondiciona la señal producida por el sensor para ser enviada al exterior.
3. Y un actuador que responde a las señales eléctricas generadas por los circuitos internos y que puede interactuar con el sensor.



Descripción de las técnicas que convergen en el diseño de Sistemas Microelectromecánicos, los elementos de un MEMS y algunas de sus áreas de aplicación.

Si atendemos a esta definición es importante señalar que tanto sensores como actuadores son dos tipos de transductores cuya interacción con el exterior es parte intrínseca de su funcionalidad. Por lo tanto, es posible hablar de una clasificación de los MEMS a partir de una de sus características más críticas, el movimiento [2]. Así, la clasificación de los Sistemas Microelectromecánicos a partir de sus características de movimiento será:

1. Sin partes móviles. En esta categoría se encuentran los inyectores de tinta, los sensores de presión basado en galgas piezorresistivas, los secuenciadores de ADN y algunos RF MEMS.
2. Con partes móviles pero sin rozamiento ni superficies de impacto. En esta categoría se encuentran los acelerómetros, los giroscopios, los sensores de presión basados en diafragmas y capacitores variables, resonadores, algunos RF MEMS y ciertos mecanismos de actuación electrostáticos.
3. Con partes móviles y superficies de impacto. En esta categoría se encuentran los interruptores ópticos, los DMD (Digital Micromirrors Device), los microrrelevadores, las microválvulas, las microbombas y los dispositivos que requieren de microensamblado.
4. Con partes móviles, rozamiento y superficies de impacto. Mecanismos de actuación basados en engranes, mecanismos basados en vástagos y actuadores electrostáticos de efecto scratch.

Es innegable que la historia de los MEMS y MST está estrechamente vinculada con la historia de la microelectrónica, por ello, un buen punto de partida para fijar el origen de los Sistemas Microelectromecánicos es la invención del transistor. Así, con la creación en 1947 del primer transistor de punto de contacto por Bardeen y Brattain y su posterior evolución hacia el transistor de efecto de campo inventado por Shockley en 1952, los aparatos electrónicos basados en el tubo de vacío (bulbo), que fue creado en 1906 por Lee de Forest, cedieron su lugar a los compactos dispositivos basados en semiconductores. La invención del transistor fue un gran avance en la reducción de tamaño, consumo de energía, producción de calor y portabilidad en los aparatos e instrumentos electrónicos. Y ya en los días iniciales del desarrollo del transistor se estudiaron las propiedades piezorresistivas de los materiales semiconductores y se estableció un primer vínculo entre los materiales electrónicos (silicio y germanio) y la creación de sensores mecánicos.

A finales de la década de los 1950, ocurrieron muchos eventos clave que motivaron el desarrollo de la electrónica mucho más allá del modesto transistor. La invención del transistor planar de silicio y del proceso de fabricación planar sentaron las bases para el desarrollo de los procesos de fabricación y del equipamiento que harían posible alcanzar dispositivos electrónicos monolíticos (integrados en un mismo sustrato) a una escala de μm . El proceso de fabricación planar con silicio proporcionó una vía para integrar un gran número de transistores y crear diferentes dispositivos electrónicos y, a través del continuo avance técnico de las herramientas de fabricación (litografía, socavado, difusión e implantación), lograr una continua reducción en el tamaño de los transistores. Un claro ejemplo del potencial que la miniaturización alcanzó en pocos

años fue el desarrollo del microprocesador en 1970, logro que generó un efecto de realimentación al mejorar significativamente la resolución de los procesos de litografía [3].

De estos avances en los procesos de fabricación se verían beneficiados los MEMS y MST pues se hacía factible la fabricación monolítica o la integración de chips que no sólo registrarán ciertos fenómenos físicos, químicos o biológicos sino que tuvieran la capacidad de activar actuadores y acondicionar la señal proveniente del sensor para su posterior transmisión al mundo exterior, complementando así el ciclo de captación de información, procesamiento, transmisión y acción.

El consenso general de la comunidad que se dedica al desarrollo de los Sistemas Microelectromecánicos o Microsistemas ubica el momento fundacional de este campo multidisciplinario de investigación y desarrollo en la conferencia titulada *There's plenty of room at the bottom* (existe mucho espacio allá abajo), impartida el 29 de diciembre de 1959 por el Dr. Richard Feynman durante la reunión anual de la Sociedad Americana de Física en el Instituto Tecnológico de California. En ella el Dr. Feynman señaló con clarividencia las posibilidades que la miniaturización ofrecía como campo de desarrollo e investigación para los científicos e ingenieros de la postguerra, desde el reto de codificar y almacenar toda la información que la humanidad ha registrado a lo largo de su historia en libros, por todo el mundo, en un cubo de apenas el tamaño de un grano de polvo, hasta la miniaturización y mejora de las capacidades de procesamiento de las computadoras, pasando por la construcción de mejores microscopios y la invención y desarrollo de la endoscopia y la microcirugía. Al final de su elocuente conferencia, el Dr. Feynman ofreció premios para quienes resolvieran un par de retos tecnológicos que darían un gran impulso al desarrollo de la miniaturización, el primero de ellos era colocar todo el texto de una página en un área de 1/25,000 de pulgada cuadrada en una escala lineal, de modo que pudiera ser leído por un microscopio electrónico y el segundo para quien desarrollará un motor eléctrico funcional de apenas 1/64 de pulgada cúbica.

Cinco años después, en 1964, H.C, Nathanson y sus colegas en Westinghouse produjeron el primer sistema microelectromecánico, el transistor de compuerta resonante (transistor de efecto de campo que incorpora una viga volada de oro que vibra a una frecuencia específica de entre 1 a 100 khz para discriminar señales de alta frecuencia), empleando procedimientos estándar de fabricación microelectrónica en silicio.

El rápido desarrollo de la tecnología microelectrónica fue comprendido y explicado por Gordon Moore en 1965 en un artículo en el que predice el rápido crecimiento de la microelectrónica. En aquel año, la microelectrónica producía circuitos integrados con 50 transistores en una oblea de 1 pulgada cuadrada, los cuales debían estar separados por 50 μm y el silicio emergía como el material de la microelectrónica debido a la facilidad en la producción de capas de dióxido de silicio estables y de alta calidad (esenciales para la fabricación de transistores). En su artículo Moore establece lo que hoy se conoce como la ley que lleva su nombre:

"...la complejidad del componente (microelectrónico) de menor costo se ha incrementado en un factor de dos por año aproximadamente. En lo inmediato se espera que esta tendencia se mantenga o se incremente. Y en el largo plazo, la tasa de incremento es un poco incierta, aunque no existe razón para creer que no se mantendrá más o menos constante, al menos, por los próximos diez años."

En la gráfica 1.1 puede apreciarse el ritmo de desarrollo de la microelectrónica en los últimos 45 años.

En los días iniciales de la microelectrónica y a lo largo de la década de 1970, se desarrollaron diversas técnicas de micromaquinado de volumen ex-profeso, las cuáles empleaban técnicas de socavado a profundidad en el sustrato para la creación de sensores de presión y microacelerómetros.

Para 1979, el primer acelerómetro basado en tecnología MEMS fue desarrollado por investigadores de la Universidad de Stanford. El microacelerómetro fue el primer Sistema Microelectromecánico en convertirse en un éxito comercial, para el año 2000 más de 30 millones de microacelerómetros fabricados en silicio habían sido vendidos en todo el mundo [4].

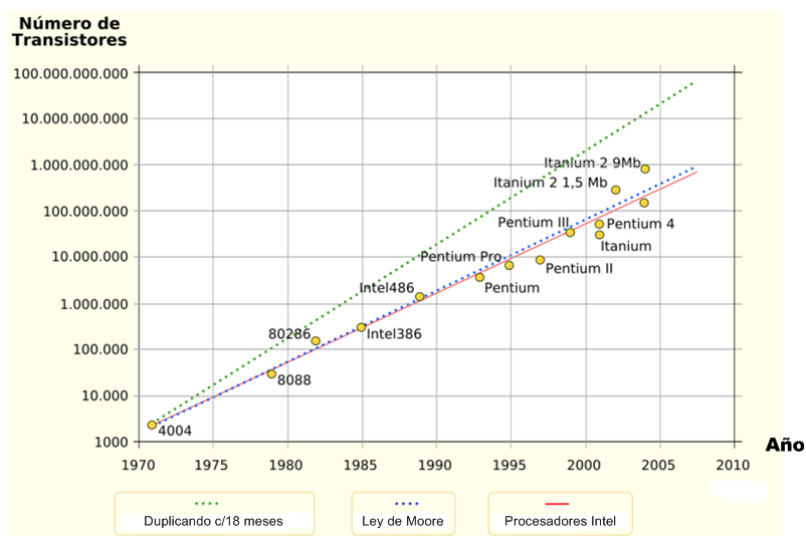


Figura 1.1: La Ley de Moore expresa el incremento de la densidad de transistores por unidad de superficie en la fabricación microelectrónica a lo largo de los últimos 45 años.

En 1982, Kurt E. Petersen escribió su artículo germinal "Silicon as a Mechanical Material". A partir de su publicación, el silicio fue considerado y empleado para una mayor cantidad de aplicaciones que incluían la producción de sensores con elementos mecánicos, tales como masas inerciales y diafragmas de presión, y mecanismos de transducción mecánico-eléctricos. También es resultado del micromaquinado de volumen la manufactura de microinyectores de tinta, los cuáles se convertirían en un enorme mercado, gracias a la extensión del uso de las computadoras personales y a la demanda de impresoras de bajo costo.

En 1983, R. T. Howe y R. S. Muller desarrolló el esquema básico para el micromaquinado de superficie, éste utiliza dos tipos de materiales (uno estructural y otro de sacrificio) y las herramientas desarrolladas por la microelectrónica para crear una tecnología de fabricación capaz de producir elementos mecánicos complejos sin la necesidad de ningún tipo de ensamble posterior a la fabricación. Muchos de los elementos mecánicos y de actuación esenciales en los MEMS fueron construidos en los años siguientes al desarrollo de esta técnica de fabricación.

También en la década de 1980, el proceso LIGA (Lithographie Galvanoförmung Abförmung) fue desarrollado en Alemania. El conjunto de materiales que el proceso LIGA emplea son significativamente diferentes de los usados en los procesos de maquinado de volumen y maquinado de superficie, los cuales tienden a usar las herramientas y técnicas que la microelectrónica desarrolla. El proceso LIGA puede ser usado para crear partes o moldes a partir de materiales electrodepositados o utilizar los moldes para inyectar plástico.

Un dato curioso en la historia de los Sistemas Microelectromecánicos es que el acrónimo MEMS fue oficialmente adoptado durante la realización del Micro Tele-Operated Robotics Workshop en Salt Lake City en 1989, después de una acalorada discusión sobre el nombre que debía adoptar este nuevo campo de investigación, el Dr. Roger Howe de la Universidad de California en Berkeley propuso el acrónimo y generó consenso entre los participantes [5].

La década de 1990 vio el surgimiento de productos comerciales que requerían la integración de las tecnologías de fabricación de MEMS mecánicos y eléctricos (IMEMS) debido a las necesidades de alta resolución en el registro de datos provenientes de elementos mecánicos o a la actuación y conducción de largos arreglos de elementos mecánicos. La empresa Analog Devices Inc. desarrolló una tecnología MEMS que facilitaba el desarrollo de sensores inerciales (acelerómetros y giroscopios) para aplicaciones automotrices. Texas Instruments desarrollo otra tecnología para producir enormes arreglos (en el orden de millones) de espejos

empleados en proyectores, cines y televisión. En esta misma década, la National Science Foundation de los Estados Unidos financió diversos proyectos de desarrollo e investigación en MEMS a través de su Iniciativa de Tecnologías Emergentes y la Agencia de Investigación Avanzada en Proyectos de Defensa (DARPA por sus siglas en inglés) invirtió más de 200 millones de dólares en el desarrollo de este campo tecnológico. Para 1997 el número de patentes por año en tecnología MEMS era de 160 en los Estados Unidos, existían 80 compañías dedicadas a este sector y el mercado internacional representaba 2 mil millones de dólares.

Otros desarrollos, de los años 80 y 90 del siglo pasado, que estimularían aún más el interés por la micro y la nanotecnología son: la aparición del microscopio de efecto túnel en 1982, el desarrollo del microscopio de fuerza atómica en 1986, el descubrimiento de los nanotubos de carbón en 1991 y el desarrollo de la técnica Smalley para la producción uniforme de nanotubos en 1996.

Cronología de los Sistemas Microelectromecánicos

Año	Evento
1940	La invención del radar impulsa el desarrollo de los semiconductores.
1947	Se inventa la computadora ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer) en la Universidad de Pennsylvania.
1947	John Bardeen, Walter Brattain y William Shockley inventan el transistor de unión bipolar en los Bell Telephone Laboratories
1954	Charles S. Smith de los Bell Telephone Laboratories descubre los efectos piezoresistivos en el germanio y en el silicio.
1958	Kulite Semiconductor desarrolla los primeros extensómetros comerciales basados en silicio.
1959	El Dr. Richard Feynman ofrece su famosa conferencia <i>There's plenty of room at the bottom</i> en el Caltech.
1960	William McLellan del Caltech construye un motor eléctrico de 2000 rpm, 1/64 de pulgada cúbica y 250 microgramos, logro con el cual reclama el premio que el Dr. Feynman había ofrecido un año antes en su conferencia ante la Sociedad Americana de Física.
1960	Se inventa el proceso de fabricación planar por lotes (en serie y empleando una misma máscara) sobre silicio.
1961	Kulite Semiconductor desarrolla a nivel experimental un sensor de presión basado en silicio.
1964	H.C. Nathanson y su equipo producen en Westinghouse el transistor de compuerta resonante, considerado el primer sistema microelectromecánico.
1965	Gordon Moore formula la famosa ley que lleva su nombre. En ella establece la tendencia a largo plazo entre la densidad de transistores por unidad de área en la fabricación microelectrónica.
1970	Se inventa el microprocesador y se incrementa enormemente la demanda de circuitos integrados.
1974	National Semiconductor desarrolla el primer sensor comercial de presión basado en tecnología MEMS.
1977	IBM y Hewlett-Packard desarrollan la primera cabeza de inyección de tinta empleando tecnología MEMS.
1979	El acelerómetro micromaquinado es desarrollado por la Universidad de Stanford.
1981	Aparece el artículo <i>Protein design as a pathway to molecular manufacturing</i> de K. Eric Drexler, constituyéndose en el primer artículo técnico sobre nanotecnología que es publicado.
1982	Se inventa el microscopio de efecto túnel.
1982	Kurt E. Petersen publica su famoso artículo <i>Silicon as a mechanical material</i> , en el cual analiza las propiedades mecánicas del silicio a la escala de fabricación de los Microsistemas.
1982	Honeywell desarrolla un transductor de presión sanguínea empleando tecnología MEMS.
1984	El proceso de micromaquinado superficial en silicio policristalino es desarrollado en la Universidad de California en Berkeley por R. T. Howe y R. S. Muller. Los circuitos electrónicos y los Sistemas Microelectromecánicos pueden ser fabricados juntos por primera vez.

Cronología de los Sistemas Microelectromecánicos (continuación...)

Año	Evento
1985	La Buckyball (nanoestructura formada por 60 átomos de carbono con extraordinarias características mecánicas y eléctricas) es descubierta.
1985	T. Newman y R. F. W. Pease emplean litografía mediante un haz de electrones para imprimir la primera página de la novela <i>A Tale of Two Cities</i> en un cuadrado de 5.9 micras, hito con el cual ganan el premio ofrecido por el Dr. Feynman en 1959 durante su conferencia en el Caltech.
1986	El microscopio de fuerza atómica es inventado.
1986	Es inventado el proceso LIGA de fabricación de microsistemas por el Dr. E. W. Becker y el Dr. W. Ehrfeld del Instituto de Ingeniería Nuclear del Centro de Investigación Karlsruhe en Alemania.
1987	Larry Hornbeck y William E. Nelson de Texas Instruments inventan el dispositivo digital de microespejos o DMD.
1989	Es inventado el actuador electrostático conocido como peine electrostático lateral.
1991	Es inventada la bisagra de polisilicio en procesos de maquinado superficial.
1991	El nanotubo de carbón es descubierto.
1993	Analog Devices introduce en el mercado su acelerómetro micromaquinado ADXL50.
1996	Texas Instruments introduce en el mercado su DLP que contiene un DMD desarrollado por la propia empresa.
1996	Richard Smalley desarrolla una técnica para producir nanotubos de carbón de diámetro uniforme.
2002	Analog Devices introduce en el mercado su giroscopio micromaquinado ADXRS.

Es claro que los Sistemas Microelectromecánicos (MEMS) son en buena medida el resultado del desarrollo de la microelectrónica para satisfacer las necesidades tecnológicas y comerciales de la última parte del siglo XX y deben parte de su crecimiento al impulso que la miniaturización ha motivado en la innovación técnica a lo largo de la historia humana. La habilidad para incrementar la miniaturización de los circuitos electrónicos, a lo largo de más de 45 años, y previsiblemente por al menos otros 20 años más, es lo que ha hecho posible la consolidación técnica y comercial de los MEMS. El desarrollo de ésta tecnología ha generado una gran sinergia que realimenta la extensión de los métodos de fabricación y los materiales empleados por la industria de electrónica.

Los MEMS son el resultado de una larga historia de desarrollo tecnológico que inicia con las máquinas y procesos iniciales de fabricación humana y tiene una de sus cúspides en el surgimiento de la microelectrónica. De hecho en un continuo de dispositivos y procesos de fabricación, los MEMS ocupan el rango que va de 1 mm a 1 μm .

Tabla con las definiciones de las escalas.

Tamaño de la escala	Tecnología de fabricación	Dispositivos
Macroescala (> 10 mm)	Maquinado convencional	Máquinas y dispositivos convencionales
Mesoescala (10 mm <-> 1 mm)	Maquinado de precisión	Motores, dispositivos y partes miniatura
Microescala (1 mm <-> 1 μm)	Proceso LIGA, micromaquinado de volumen y micromaquinado de superficie	Dispositivos MEMS
Nanoescala (1 μm <-> 1 nm)	Ingeniería bioquímica	Dispositivos a escala molecular

1.1. Aplicaciones y mercados

El mercado actual para los MEMS se encuentra principalmente en los sensores inerciales y de presión, las cabezas inyectoras de tinta (segmento que es dominado por Hewlett.Packard) y las pantallas digitales de alta

resolución (con Texas Instruments como el líder indiscutible). Las aplicaciones emergentes y futuras incluyen sensores de presión para neumáticos, dispositivos para RF y comunicaciones inalámbricas, componentes para fibra óptica, dispositivos de manejo y procesamiento de fluidos para microanálisis químico, diagnósticos médicos y suministro automático de medicamentos. Aunque las estimaciones sobre los mercados para MEMS varían considerablemente de fuente a fuente, todas coinciden en mostrar un crecimiento presente y futuro muy importante, alcanzando volúmenes agregados de varios miles de millones de dólares para el año 2012. En los últimos años el mercado de los MEMS ha tenido un crecimiento promedio anual del 25%. En el futuro, el crecimiento esperado provendrá principalmente de la diversificación de las aplicaciones en las que son empleados los MEMS (sector de la construcción, robótica, sector de la energía y el transporte, entre otros), de mayores innovaciones técnicas (mayor funcionalidad e integración) y de la aceptación y demanda de ésta tecnología por parte de un mayor número de usuarios finales y consumidores (productos electrónicos de consumo general: teléfonos, cámaras, consolas de video juegos, computadoras y relojes entre otros). Una tasa de rápida aceptación de los MEMS para microfluidos, RF y óptica provocaría que estas aplicaciones crecieran a un paso más rápido que los sensores de presión y acelerómetros. Como resultado, el porcentaje de ganancias provenientes de aplicaciones automotrices, sector que consume grandes volúmenes de sensores de presión y acelerómetros, está previsto que decrezca comparativamente hablando, en un escenario de incremento del volumen general del mercado de los MEMS.

Hasta ahora la inmensa mayoría de los MEMS disponibles comercialmente pueden clasificarse como componentes o subsistemas, pero una nueva tendencia se está imponiendo al integrar cada vez más funciones dentro del chip. Un ejemplo notable es la evolución de los sensores para las bolsas de aire anti-impacto en los automóviles. Estos sensores fueron al principio simples interruptores mecánicos que evolucionaron hacia sensores micromecánicos que cuantificaban directamente la desaceleración provocada por algún choque. Hoy en día, se trata de dispositivos que integran toda la electrónica de acondicionamiento de señal junto con el sensor microelectromecánico para incorporar funciones de autodiagnóstico y salidas digitales. La siguiente generación sin duda avanzará en la incorporación de toda la electrónica necesaria para el manejo de las bolsas de aire, sin necesidad de una etapa posterior de tratamiento de las salidas del dispositivo.

Otra dirección de crecimiento del mercado de los MEMS se encuentra en las nuevas aplicaciones. Hasta ahora la gran mayoría de los usos dados a los Sistemas Microelectromecánicos han sido las que se podrían considerar como obvios a partir de la miniaturización de los sensores, pero aún existen áreas completas de desarrollo y negocio que poco a poco se revelan, como parte del proceso de evolución de ésta tecnología. Un ejemplo de ello es el uso de MEMS para el control térmico en microsatelites. Hasta hace muy poco, el control térmico de los satelites se hacía abriendo y cerrando unos pequeños respiraderos con el propósito de variar la cantidad de calor irradiado al espacio. Pero en 2002, la NASA en cooperación con otros centros norteamericanos de investigación, desarrollaron un nuevo tipo de dispositivo basado en tecnología MEMS con funcionalidad similar a los dispositivos mecánicos convencionales empleados en los satelites hasta ese momento. El dispositivo MEMS consistían de un actuador electrostático que movía unas persianas para controlar la apertura de los respiraderos y la cantidad de superficie expuesta del satélite, variando así su emitancia.

Este es tan sólo un ejemplo de los nuevos y fértiles campos en los que los MEMS incursionarán en el futuro inmediato y harán realidad en breve la visión expresada por Picraux y McWhorter (S.T. Picraux y P.J. McWhorter, *The broad sweep of integrated microsystems*, IEEE Spectrum, 35(12), 24–33, diciembre 1998), quienes vislumbraban que las aplicaciones en las que los MEMS tomarían parte, serían para lograr que los sistemas piensen, sensen su medio, actuen, se comuniquen y se auto-propulsen [6].

Ejemplos de áreas de aplicación presentes y futuras para los Sistemas Microelectromecánicos.

Aplicaciones comerciales	
	Sensores biomédicos invasivos y no invasivos.
	Instrumentos miniatura para análisis bioquímicos.
	Sistemas de manejo cardiaco.
	Sistemas para suministro automático de medicamentos.
	Corrección de desórdenes neurológicos.
	Control de motores y propulsión.
	Sistemas de seguridad, frenado y suspensión automotriz.
	Interruptores y componentes para fibra óptica en telecomunicaciones.
	Sistemas de almacenamiento masivo de datos.
	Componentes para RF y comunicación inalámbrica.
	Sensores distribuidos para supervisión y atención médica.
	Control distribuido de sistemas aerodinámicos e hidrodinámicos.
Aplicaciones militares	
	Sistemas inerciales para guía de municiones y navegación personal.
	Componentes microoptomecánicos integrados para la identificación de sistemas amigos y enemigos.
	Dispositivos de almacenamiento masivo de datos, de alta densidad y bajo consumo de energía.
	Sensores y actuadores para diagnóstico y mantenimiento de equipos y maquinaria.
	Sistemas integrados para el manejo de fluidos en propulsores miniatura y control de combustión.
	Sistemas integrados para la detección temprana de amenazas de agentes biológicos y químicos.
	Procesamiento electromecánico de señales para comunicación inalámbrica en distancias cortas y bajo consumo de energía.
	Superficies activas conformables para control aerodinámico distribuido de aeronaves.

Al analizar la información del mercado de los Sistemas Microelectromecánicos a nivel mundial debe tenerse en consideración que se trata en realidad de un conjunto de mercados especializados. Este grupo de nichos comerciales reflejan en buena medida la variedad de aplicaciones en las que intervienen los MEMS y son también una muestra indirecta del gran número de compañías medianas y pequeñas que están involucradas en el desarrollo de ésta tecnología.

De acuerdo con iSuppli, empresa norteamericana dedicada al análisis de mercado en los sectores tecnológicos, el mercado de los Sistemas Microelectromecánicos pasará de 6 mil 100 millones de dólares en 2006 a 8 mil 800 millones de dólares para el año 2012. Esta empresa afirma que las cabezas inyectoras de tinta y los Procesadores Digitales de Luz finalmente entregarán la estafeta de liderazgo en los MEMS a los sensores basados en esta tecnología para crear la siguiente gran expansión de mercado. La nueva ola expansiva esta fundada en el rápido crecimiento de las aplicaciones para MEMS en el sector de la electrónica móvil y de consumo general (sensores de movimiento para consolas de videojuegos, teléfonos celulares, cámaras fotográficas y computadoras portátiles entre otros). Otro sector del que se espera fuertes ingresos es el de los dispositivos de manos libres para teléfonos celulares pues tendra una tasa anual de crecimiento del 23% en los próximos años hasta alcanzar un mercado general de 925 millones de dólares en 2012 [8].

El mercado global para acelerómetros, giroscopios, micrófonos, sensores de presión, sensores de flujo, chips para manejo y análisis de microfluidos, pilas térmicas y osciladores crecerá a una tasa anual del 11%.

Cuatro son los segmentos que en conjunto representarán poco más del 60% del total del mercado de los MEMS en 2012: electrónica móvil y de consumo general, el sector automotriz, los dispositivos de manos libres para teléfonos celulares y los sensores para el control de procesos industriales. Se espera también un renovado crecimiento del sector automotriz, principalmente por las nuevas regulaciones de seguridad y emisiones contaminantes en Norteamérica y Europa [8].

Información proveniente de esta misma empresa de análisis de mercado, señala que los Sistemas Microelectromecánicos han hecho la mayor incursión en el mundo de la electrónica móvil y de consumo general de los últimos años. Como resultado de ello, el volumen de MEMS para este sector se espera que crezca de mil 100 millones de dólares en 2006 a 2 mil 600 millones de dólares para 2012. Durante 2008, el líder en el mercado de MEMS para dispositivos electrónicos móviles y de consumo general es la empresa STMicroelectronics que duplicó sus ingresos por concepto de ventas de acelerómetros, giroscopios y sensores de presión al exceder los 200 millones de dólares. Texas Instruments, empresa que había ocupado la primera posición por muchos años en este sector, en 2008 se ubicó en segundo lugar. Otros proveedores de MEMS que vieron crecer sus ingresos en el sector de electrónica móvil y de consumo general fueron: Epson Toyocom, que incrementó sus ventas en un 75% gracias a su nueva generación de giroscopios para aplicaciones de videojuegos y navegación y Bosch Sensortec que aumentó en un 167% sus ventas gracias a los dispositivos de manos libres para teléfonos celulares que emplean MEMS [7].

Por otra parte, la empresa de análisis de mercado Yole Développement, afirma en su estudio para el sector de sensores inerciales basados en tecnología MEMS que para el año 2013 el mercado será de más de 3 mil millones de dólares y representará poco más de un millón 500 mil unidades [9].

Geográficamente, los Estados Unidos y Europa encabezan la manufactura de productos basados en MEMS, con Japón en crecimiento y entrando con fuerza a la competencia.

Distribución geográfica mundial de las instalaciones para la fabricación de MEMS [10]

Región geográfica o país	Número de fundidoras
Estados Unidos y Canadá	139
Alemania	34
Francia	20
Reino Unido	14
Benelux (Bélgica, Holanda y Luxemburgo)	17
Scandinavia (Suecia, Noruega y Dinamarca)	20
Suiza	14
Resto de Europa	10
Japón	41
Resto de Asia	31

Sin embargo, las proyecciones de mercado deben tomarse con precaución. En la década de los 90 las estimaciones del sector de control de bolsas de aire rondaba los 500 millones de dólares, lo que impulsó a muchas compañías para ingresar en este segmento, pero la competencia mantuvo los precios de los dispositivos bajos y se exageró el tamaño del mercado, que en realidad alcanzó los 150 millones de dólares, situación que llevó a diversas empresas a abandonar sus programas de desarrollo unos años más tarde. Otro ejemplo de falla en las proyecciones de mercados, lo representa la rápida deflación de la burbuja económica de las telecomunicaciones en 2001. En medio de la burbuja, los gigantes de las telecomunicaciones adquirieron pequeñas compañías con desarrollos innovadores en interruptores ópticos y láseres ajustables (área que se estimaba muy pronto rebasaría los 10 mil millones de dólares). Nortel Networks de Ontario, Canada, compró por 3 mil 250 millones de dólares a Xros, una joven compañía en Sunnyvale, California, que desarrolló un interruptor óptico basado en MEMS, sin embargo, el mercado de los interruptores ópticos nunca maduró y Nortel terminó por cerrar su división dedicada a este sector. En el mismo periodo, JDS Uniphase de San José, adquirió Cronos Integrated Microsystem de Research Triangle Park en North Carolina, una fundidora de MEMS, por 700 millones de dólares. JDS Uniphase vendió posteriormente esta división a MEMScap de

Grenoble, Francia, por aproximadamente 5 millones de dólares. La industria de los Sistemas Microelectromecánicos ha forjado tres modelos de negocio: la fabricación, el diseño y la integración de sistemas. En 2006, existían alrededor del mundo 368 instalaciones (en su mayoría empresas: 340) para la producción de MEMS, los centros más importantes se encontraban ubicados en Norteamérica, Europa y Japón. Y en ese mismo año, estaban documentadas más de 130 aplicaciones para Microsistemas en los sectores médico, automotriz y de aparatos electrónicos de consumo general.

Análisis de los mercados globales de MEMS (en millones de dólares) [11]

	2002	2012
MEMS para microfluidos	1,404	2,241
MEMS ópticos	702	1,826
MEMS para RF	39	249
Otros actuadores	117	415
Sensores inerciales	819	2,526
Sensores de presión	546	913
Otros sensores	273	830
Total	3,900	9,000

1.2. Publicaciones periódicas, conferencias y sitios electrónicos

Un indicador de la importancia y madurez que un campo de investigación y desarrollo tecnológico ha alcanzado, lo representa el número y la calidad de las publicaciones y reuniones periódicas en las que se dan a conocer los nuevos aportes y propuestas de la comunidad que trabaja en dicho campo. El campo de los MEMS ha crecido de forma significativa en los últimos diez años, en este lapso ha consolidado una importante pléyade de publicaciones propias y comparte un espacio significativo en publicaciones de campos vinculados o afines. También, se ha incrementado de forma notable el número de libros que abordan el campo como una materia unitaria en dónde conviven distintas ramas de la ingeniería, la física, las matemáticas, la biología, la química y la medicina. Además, son cada vez más los centros de desarrollo e investigación asociados con universidades y los programas de posgrado existentes para adquirir la formación y conocimientos necesarios para desarrollarse en el campo de los MEMS.

La lista de publicaciones, conferencias y sitios electrónicos especializados enfocados hacia los MEMS, Microsistemas y Nanotecnología sigue en crecimiento año con año. Entre los sitios electrónicos, destaca por la calidad de su información y su cada vez mayor importancia el sitio MEMSnet. Este sitio es un repositorio de información sobre MEMS patrocinado por la Corporation for National Research Initiatives de Reston, Virginia y Nexus Association de Grenoble, Francia (una organización sin fines de lucro con fondos de la Comisión Europea).

En cuanto a las revistas y publicaciones periódicas sobre MEMS, Microsistemas y Nanotecnología, la mayoría de ellas son editadas en los Estados Unidos y Europa. Algunos ejemplos de éstas publicaciones son:

1. *Sensors and Actuators. (A, B & C)*: publicación científica sancionada por especialistas (los artículos son revisados por pares antes de ser incluidos) y publicada por Elsevier Science de Amsterdam, Holanda.
2. *Journal of Micromechanical Systems (JMMS)*: publicación científica sancionada por especialistas (los artículos son revisados por pares antes de ser incluidos) y publicada por el IEEE de Piscataway, New Jersey, en colaboración con la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME) de Nueva York, NY.
3. *Microsystem Technologies*: publicación científica sancionada por especialistas (los artículos son revisados por pares antes de ser incluidos) y publicada por Springer Verlag de Berlín, Alemania.
4. *Journal of Micromechanics and Microengineering (JMM)*: publicación científica sancionada por especialistas (los artículos son revisados por pares antes de ser incluidos) y publicada por el Instituto de Física de Bristol, Gran Bretaña.

5. *Sensors Magazine*: publicación periódica comercial con énfasis en aplicaciones y usos industriales. Es publicada por Helmers Publishing Inc., de Peterborough, NH.
6. *MST News*: periódico bimestral sobre Microsistemas y MEMS que es publicado por VDI/VDE Technologiezentrum Informationstechnik GbmH de Teltow, Alemania.
7. *Micro/Nano Newsletter*: suplemento de R&D Magazine con noticias y actualizaciones sobre dispositivos micromaquinados y nanotecnología. Es publicado por Reed Business Information de Morris Plains, NJ.
8. *Small Times Magazine*: publicación bimestral comercial sobre MEMS, Microsistemas y Nanotecnología. Es publicada por Small Times Media, una subsidiaria de Ardesta LLC originaria de Ann Arbor, Michigan.
9. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS and MOEMS*: publicación trimestral que aborda los últimos avances en procesos de litografía, Sistemas Microelectromecánicos y Sistemas Microoptoelectromecánicos. Es publicada por la International Society for Optical Engineering, con sede en Bellingham, Washington.
10. *Microelectronic Engineering*: publicación trimestral que aborda diversos temas relacionados con los procesos de microfabricación y el desarrollo de Sistemas Microelectromecánicos. Es publicada por Elsevier Science de Amsterdam, Holanda.

En cuanto a las conferencias y reuniones anuales de especialistas, existen varios eventos de gran prestigio a escala mundial que reúnen a la comunidad dedicada al desarrollo de esta tecnología. A continuación se mencionan algunos ejemplos:

1. *Micro Electro Mechanical Systems Workshop (MEMS)*: una reunión anual internacional patrocinada por el IEEE.
2. *Micromechanics Europe Workshop*: reunión anual europea patrocinada por universidades y empresas vinculadas a los Microsistemas.
3. *International Conference on Micro and Nano Engineering*: llevada a cabo cada año con la participación de investigadores de todo el mundo y el patrocinio de empresas y centros de investigación del campo de los Microsistemas.
4. *Micro Total Analysis Systems (μ TAS)*: una conferencia dedicada a los sistemas microanalíticos y químicos. Es de carácter anual y la sede se alterna entre Norteamérica y Europa.
5. *International Society for Optical Engineering (SPIE)*: serie regular de conferencias impartidas en los Estados Unidos y patrocinada por la SPIE de Bellingham, Washington.
6. *International Conference on Solid-State Sensors and Actuators*: llevada a cabo cada dos años (en años impares) y cuya sede se rota secuencialmente entre Norteamérica, Asia y Europa.
7. *Solid-State Sensor and Actuator Workshop*: llevado a cabo cada dos años (en años pares) en Hilton Head Island, Carolina del Sur, y patrocinado por la Transducers Research Foundation de Cleveland, Ohio.
8. *IEEE Sensors Conference*: llevada a cabo cada año con la convocatoria y auspicio del IEEE en diversos países del mundo.
9. *Euroensors*: conferencia dedicada a los nuevos desarrollos e investigaciones en sensores. Es de carácter anual y se lleva a cabo en alguna ciudad del viejo continente.
10. *Symposium on Sensors, Micromachines & Applied Systems*: simposium llevado a cabo cada año en Japón con el auspicio de Institute of Electrical Engineers of Japan, Japan Society of Mechanical Engineers y Japan Society of Applied Physics.

Lista de sitios electrónicos de organizaciones oficiales y no gubernamentales vinculadas al tema de los Sistemas Microelectromecánicos

Organización	Ubicación	Descripción	Sitio electrónico
MEMSnet	Reston, VA	Repositorio auspiciado por el gobierno norteamericano	www.memsnet.org
MEMS Exchange	Reston, VA	Broker intermediario para servicios de fabricación	www.mems-exchange.org
MEMS Industry Group	Pittsburg, PA	Consorcio industrial	www.memsindustrygroup.org
NIST	Gaithersburg, MD	Proyectos gubernamentales financiados por los EEUU	www.atp.nist.gov
DARPA	Arlington, VA	Proyectos gubernamentales financiados por los EEUU	www.darpa.mil
IDA	Alexandria, VA	Inserción en aplicaciones militares	mems.ida.org
NEXUS	Grenoble, Francia	Red de Microsistemas de la Unión Europea	www.nexus-mems.com
VDI/VDE-IT	Teltow, Alemania	Asociación de Ingenieros Alemanes	www.mstonline.de
AIST-MITI	Tokio, Japón	El proyecto <i>Micromáquina</i> en Japón	www.aist.go.jp
ATIP	Albuquerque, NM	Proyecto Asiático en Tecnologías de la Información	www.atip.org
Centro de Sensores y Actuadores en Berkeley	Berkeley, CA	Centro de investigación cooperativa entre Universidad e Industria de la NSF	www-bsac.eecs.berkeley.edu
Sandia National Laboratories	Albuquerque, NM	Centro de investigación y desarrollo propiedad del gobierno norteamericano operado por la empresa Lockheed Martin	www.mems.sandia.gov
Mems Industry Group	Pittsburgh, PA	Esfuerzo unitario de empresas como Honeywell, Intel y Freescale para la comercialización de MEMS y la definición de tendencias en el desarrollo de este sector tecnológico	www.memsindustrygroup.org
Yole Development	Lyon, Francia	Investigación de mercado y consultoría estratégica para empresas dedicadas a los MEMS.	www.yole.fr

Lista de sitios electrónicos de empresas dedicadas al diseño y fabricación de Sistemas Microelectromecánicos

Organización	Ubicación	Descripción	Sitio electrónico
Fairchild Semiconductor	South Portland, ME	Fundidora que la implantado el proceso SUMMiT para la fabricación de MEMS.	www.fairchildsemi.com
Analog Devices	Norwood, MA	Empresa desarrolladora de MEMS comerciales (acelerómetros, giroscopios, sensores de efecto hall y de temperatura).	www.analog.com
Texas Instruments	Dallas, TX	Empresa de tecnología desarrolladora del Procesador Digital de Luz (DLP).	www.ti.com
Kulite Semiconductor	Leonia, NJ	Empresa líder en el desarrollo de tecnología para transductores de presión.	www.kulite.com
MEMSCap	Research Triangle Park, NC	Empresa gala desarrolladora de procesos estándar de bajo costo para la fabricación de MEMS y herramientas de software para su diseño.	www.memscap.com
Coventor	Cary, NC	Empresa desarrolladora de herramientas de diseño y modelado para MEMS y semiconductores.	www.coventor.com
ANSYS	Irving, CA	Empresa desarrolladora de herramientas de análisis de fenómenos multifísicos a través del método de elemento finito.	www.ansys.com
Intellisense	Woburn, CA	Empresa desarrolladora de software de diseño y modelado para Sistemas Microelectromecánicos.	www.intellisensesoftware.com