

RF MEMS: conceptos, evolución y mercado

Aróztegui Walter J., Osio Jorge R., Rapallini José A., Ocampo Jesús M. F., Quijano Antonio A.
Centro de Técnicas Analógico Digitales (CeTAD)
Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de La Plata
Calle 48 y 116, La Plata 1900, Argentina
walter.artztegui@gmail.com

Palabras clave: microsistemas, RF-MEMs, microelectrónica, comunicaciones, componentes

RESUMEN

Una consecuencia fundamental de las Microtecnologías es el desarrollo de los sistemas microelectromecánicos (MEMS) y su aplicación a radiofrecuencias y microondas, que ha determinado la introducción de los denominados RF MEMS. Se realiza en este artículo una descripción general de esta tecnología y de sus posibilidades de generar componentes pasivos con prestaciones superiores, que pueden llegar a tener un profundo impacto en las comunicaciones inalámbricas. Se hace referencia a los conmutadores, inductores, capacitores y resonadores, a sus aplicaciones para obtener desplazadores de fase, filtros, líneas de transmisión, osciladores y antenas con la versatilidad y capacidad de reconfiguración que esta tecnología le proporciona. Se muestra el carácter multi-disciplinario de su diseño y aplicaciones, aún en la curva ascendente de su desarrollo y con posibilidades en crecimiento cada vez mayor en el mercado de elementos inalámbricos, esenciales para los dominios del hogar y del espacio, tales como los teléfonos celulares y otros sistemas de comunicaciones.

INTRODUCCIÓN

Las microtecnologías utilizan procesos de diseño y manufactura a escala micrométrica dando lugar a la creación de dispositivos microelectrónicos que sólo trabajan con variables eléctricas y por otra parte microsistemas que involucran además otro tipo de variables físicas (mecánicas, térmicas, químicas, ópticas, etc.)

Los MEMS (micro electro mechanicals systems) son microsistemas integrados en bloques que comprenden:

-Microdispositivos o microestructuras que involucran en su funcionamiento movimiento electromagnetismo o energía radiante y óptica, etc.

-Circuitaría de sensado y acondicionamiento.

-Circuitos integrados de procesamiento y control.

y que:

-Convierten estímulos físicos, eventos, y parámetros en señales eléctricas, mecánicas u ópticas, y viceversa.

-Realizan sensado, actuación y otras funciones.

-Ejecutan control (inteligencia, toma de decisiones, aprendizaje evolutivo, adaptación, reconfiguración, etc.), diagnósticos, procesamiento de señales y adquisición de datos.

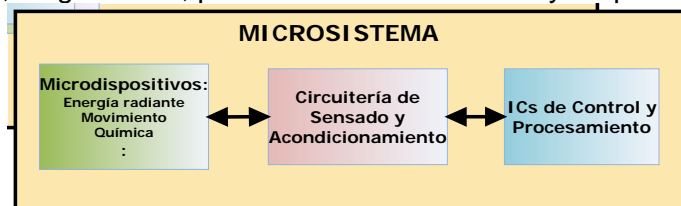


Figura. 1

Esquema en bloques de un microsistema típico

Los microsistemas dedicados a aplicaciones en el rango de frecuencias que se destinan a las comunicaciones, se encuadran en los denominados sistemas microelectromecánicos de radiofrecuencia o con sus siglas en inglés RF-MEMs, ya sean extrínsecos, intrínsecos o

reactivos de acuerdo a su localización y funcionamiento en el sistema de radiofrecuencia.[1][2][5][6]

EVOLUCIÓN Y APLICACIONES

Utilizando muy variados principios de transducción, sensado y actuación de las variables físicas se han desarrollado una cantidad de componentes MEMS para su utilización en radiofrecuencia, del tipo de capacitores, inductores, resonadores y conmutadores que son partes esenciales en desplazadores de fase, osciladores, líneas de transmisión, filtros y antenas.

Los sistemas microelectromecánicos MEMS comenzaron a desarrollarse en los años '70 del pasado siglo, centrándose su aplicación en sensores de temperatura, presión y diversas variables físicas, acelerómetros, giróscopos y algunas aplicaciones más. Pasados los años '80 las investigaciones se ampliaron a conmutadores de baja frecuencia, como simples dispositivos en miniatura que utilizaban movimientos mecánicos para conseguir abrir o cerrar un circuito en una línea de transmisión y la aparición en el ámbito comercial de inyectores de impresoras. Es en finales de los '90 y el corriente siglo donde las aplicaciones de RF-MEMS empiezan a tener verdadero auge, principalmente en el área de comunicaciones por microondas, y a partir de aquí con el desarrollo de nuevas técnicas de integración y nuevos materiales, han aparecido cada vez más dispositivos de este tipo con capacidades para operar con más altas frecuencias, pasando fronteras imposibles hasta hace pocos años.

El consumo en comunicaciones, especialmente en el área inalámbrica (*wireless*), requiere productos más potentes, portátiles, con menores costos y capacidades de funcionalidad sin precedentes. Dispositivos que puedan proveer múltiples funciones simultáneas como telefonía, fax, computación, terminales de datos, y una amplia sofisticación en las técnicas de procesamiento de señales. Esta situación no es ajena tampoco al área de comunicaciones satelitales, donde lanzar dispositivos al espacio cuesta miles de dólares por kilo de peso, lo que hace indispensable la creación de dispositivos que puedan manejar múltiples tareas de diversos tipos, en dimensiones lo más reducidas posibles, con mínimos consumos de energía y a frecuencias muy elevadas (situación también derivada de la miniaturización de los circuitos).

Tabla I
Utilización de RF-MEMS en sistemas de comunicaciones inalámbricas

Componentes RF-MEMS en estaciones móviles					Componentes RF-MEMS en estaciones base				
Función en el sistema	Componentes MEMS				Función en el sistema	Componentes MEMS			
	Switch	Inductor	Capacitor/Varac.	Resonador		Switch	Inductor	Capacitor/Varac	Resonador
Antena-red de adaptación	x	x	x		Antena banda ancha/multibanda	x			
Conmutación T/R	x				Filtros de transmisores y receptores reconfigurables	x			x
Filtros duplexor/diplexor				x	Pre y Post selectores sintonizables		x	x	
Antenas inteligentes (desfasadores/combinación de potencia)	x				Sintetizador multibanda reconfigurable	x			
Reconfiguración de bandas	x	x	x	x	Filtros banda base reconfigurables		x	x	x
Transceptores(LNA,VC O,PA)	x	x	x	x	Adaptación de impedancias reconfigurables		x	x	
					Amplificadores de potencia multibanda	x	x	x	

La infraestructura creada para mantener una red de comunicaciones de este tipo, debe contemplar y de hecho lo hace, unidades portátiles o también llamadas *plataformas móviles*, con una potencia de emisión limitada, debido a la necesidad de un bajo consumo en equipos alimentados por baterías, estaciones que puedan ser nexos entre las unidades portátiles, llamadas estaciones bases cuando se encuentran sobre la superficie de la tierra y estaciones satelitales, cuando están emplazadas en satélites sobre la órbita terrestre, con capacidad de potencia mayores, fijas y que permitan un rango de usuarios amplio, multibandas (amplio rango de frecuencias de transmisión), multi-estándar (que contemple los distintos estándares de modulación y transmisión utilizados), y por último centrales que permitan la comunicación entre las estaciones con manejos de potencia altos, que conecten las transmisiones a grandes distancias, incluyendo las estaciones satelitales.

El desarrollo de variedad de estándares, muchos de los cuales conviven operativos, provoca la necesidad de sistemas de transceptores de arquitecturas reconfigurables que provean tal versatilidad funcional y en los que las RF-MEMS pueden desempeñar roles muy importantes en funciones como conmutación transmisión/recepción, filtrado, redes de adaptación y reconfigurabilidad.. En la tabla se indican componentes RF-MEMS que tienen utilización en las distintas funciones de un esquema general de sistemas de estaciones móviles y base, en la figura 2 se muestra un sistema de comunicaciones típico con bloques aplicables con tecnología RF-MEMS donde SP2T y SP3T son redes de conmutadores múltiples (Single Pole N Throw), en este caso una entrada y dos o tres salidas posibles conmutables.

Como vemos en la tabla I, un reducido conjunto de componentes RF-MEMS puede intervenir en la mayor parte de los subsistemas de comunicaciones y las características de éstos pueden generar una mejora considerable en su desempeño, incluyendo el punto de vista económico de su desarrollo.[3][7][10][12]

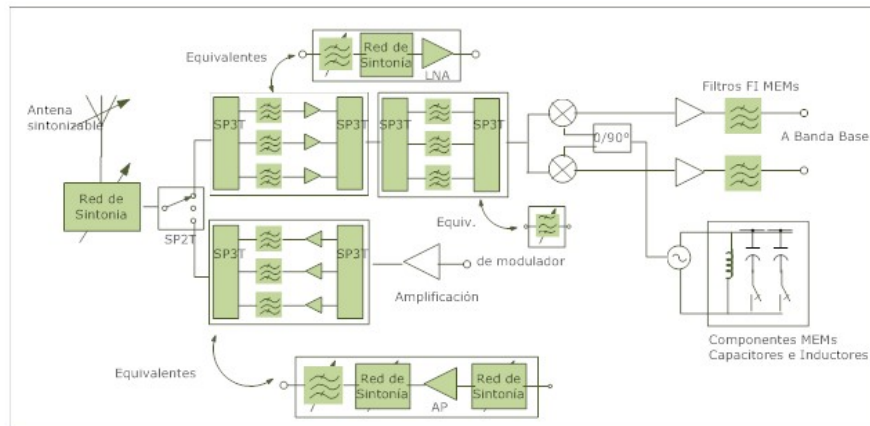


Figura. 2
Esquema general de un sistema multibanda

COMPONENTES Y DISPOSITIVOS RF-MEMS

El conmutador (switch) quizás sea el componente MEMS más desarrollado, simple pero vital en un sinnúmero de aplicaciones electrónicas. Es simplemente un dispositivo para cerrar o abrir un circuito eléctrico, con la importancia que esto implica. Desde mitad del siglo pasado se desató un continuo crecimiento en las capacidades y performance de computadoras. Este avance creciente fue de la mano del desarrollo de las técnicas de procesos basados en el silicio. Millones de transistores, pudiendo conmutar desde una posición de desconexión (off) a conexión (on) en función de una señal de control, conformando un arreglo de conmutadores altamente integrados. Pero, para aplicaciones de RF estos conmutadores de estado sólido continúan teniendo serias desventajas tales como el manejo de potencias bajas y las elevadas

pérdidas resistivas. Los conmutadores electromecánicos, por contraste, son dispositivos de potencia elevada pero útiles en bajas frecuencias de RF y su velocidad de operación es muy lenta. Los sistemas micro electromecánicos MEMS han podido conjugar las buenas aptitudes de cada uno de estos grupos y han logrado superar muchas de sus desventajas. Los conmutadores MEMS presentan muy bajas pérdidas resistivas, consumo de potencia despreciable, buen aislamiento y capacidad para manejar potencias elevadas, se pueden fabricar en tamaños mínimos, livianos y rápidos, poseen además una muy alta relación de impedancia entre estados de corte y activación. La mayoría de los dispositivos MEMS son compatibles con las avanzadas técnicas de fabricación del silicio, pues este tiene propiedades mecánicas que facilitan la fabricación de componentes y dispositivos miniaturizados de alta precisión, principalmente conmutadores. Precisamente la capacidad de fabricar MEMS en los mismos sustratos que los circuitos normales, creando microsistemas completos integrados en un mismo chip, es lo que eclosiona esta tecnología.

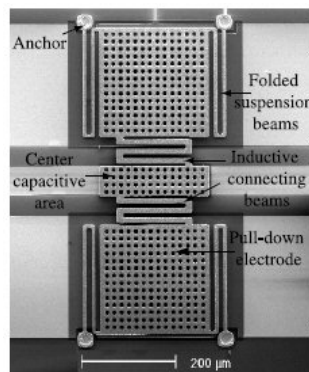


Figura. 3
Foto de un conmutador paralelo de la Univ. de Michigan - USA (COPYRIGHT IEEE)

Los mecanismos de actuación más usados en conmutadores MEMS incluyen los electrostáticos, electromagnéticos, magnéticos, piezoeléctricos y térmicos. El mecanismo más usado es el electrostático debido a la total compatibilidad de la fabricación de estructuras con este tipo de actuación y el resto de la circuitería electrónica del dispositivo, pues como mencionamos pueden manufacturarse en el mismo chip con los mismos materiales y los mismos procesos de fabricación, lo que se dificulta más en la utilización de mecanismos electromagnéticos, por ejemplo, ya que involucra otro tipo de materiales distintos a los que conforman los circuitos integrados convencionales.

Por otro lado, existen muchas aplicaciones en un amplio rango de frecuencias en las que los capacitores controlan los parámetros eléctricos críticos y las dificultades en implementar capacitores variables de alto Q con procesos estándar de silicio, hacen que muchas veces estos componentes deban diseñarse de manera externa al circuito, dificultad que últimamente ha logrado subsanarse mediante dispositivos de silicio micromaquinados. Los capacitores MEMS permiten posicionar y reposicionar membranas suspendidas y *cantilevers* con muy bajos voltajes de actuación variando sus parámetros físicos y dimensiones a través de medios electromecánicos. Este tipo de estructuras de capacidades variables, con mayor aceptación aquellas que utilizan mecanismos electrostáticos por la misma razón que la que señalamos en el caso de los conmutadores, se utilizan también para conformar una variedad de dispositivos, tal es el caso de resonadores con su aplicación en osciladores y filtros conformados por redes de estructuras de capacidades variables tipo peine (comb drive) (figura 5). Éste es el mecanismo de variación más utilizado, en el que se modifica el área de enfrentamiento entre las placas del capacitor, de manera similar a los antiguos sintonizadores de receptores de radio y en los que se puede combinar también la variación de dieléctrico. En una de estas estructuras

interdigitales, uno de los peines se mantiene fijo y el otro es móvil. Cuando un voltaje es aplicado entre ellos, la fuerza electrostática entre los dientes actúa lateralmente y desplaza estos dientes, cambiando así el área de solapado, mientras la distancia entre ellos se mantiene en equilibrio. El número de “dientes” en los peines permite obtener altas resoluciones de variación y perfectamente controladas prácticamente sin limitaciones, lo que hace que se utilicen en un sinnúmero de dispositivos de variado tipo.

En el caso de inductores integrados, las tecnologías planares con que se manufacturan solo permiten la obtención de bajas inductancias y factores de calidad también relativamente bajos. En función de ser un componente altamente dependiente de la geometría, los mayores valores solo pueden conseguirse con películas delgadas de metalización en forma de espiral depositadas sobre un sustrato dieléctrico. La conductividad finita de la capa de metal así como las pérdidas en el dieléctrico, producen pérdidas en el inductor, disminuyendo la calidad del mismo. Si bien no son componentes estrictamente electro-mecánicos es común que se los incluya entre los MEMS debido a que los sistemas de fabricación de éstos permiten conseguir inductores ampliamente superiores a los convencionales, asociados a una configuración tridimensional en contraposición a las dos dimensiones de la tecnología planar.

Figura. 4
Microfotografía de inductancias micromaquinadas (COPYRIGHT IEEE)

El micromaquinado posibilita la creación de diversas estructuras de inductores en tres dimensiones, tal es el caso de toroides, solenoides y hasta transformadores con núcleos de materiales magnéticos integrados. En la figura 4 pueden verse microfotografías de un solenoide y un transformador integrados.

Idealmente, los resonadores son dispositivos que vibran a una frecuencia específica con pérdidas de energía despreciables y donde es específicamente una condición deseable que ésta se mantenga aún cuando se produzcan cambios en la temperatura, carga del circuito, envejecimiento, etc. Como es bien conocido, hasta frecuencias de aproximadamente 100 Mhz. los resonadores se realizan con inductores y capacitores conectados en serie o paralelo, pero a frecuencias altas, las dimensiones físicas de éstos se acercan al orden de la longitud de onda de las señales y cuando ocurre de tal manera, el retardo de las señales que atraviesan estos elementos no puede considerarse despreciable frente al período de las señales, por lo que corrientes y voltajes en los inductores y capacitores no pueden ser tomados como constantes en toda su extensión sino que las ecuaciones de Maxwell de la propagación espacial de señales deben resolverse para conocer la distribución de corrientes y voltajes, de manera que entramos en lo que se conoce como régimen de circuito distribuido. En tales circunstancias, la similitud entre longitudes de onda de señales y dimensiones físicas de componentes dispara importantes efectos de radiación (principio de antenas) haciendo que los circuitos en lugar de almacenar energía, la disipen, ocasionando pérdidas.

Si bien desde los años 70 del pasado siglo se pudieron ver microresonadores mecánicos con cantilevers, del tipo de los Transistores de Puerta Resonante (o Resonant Gate Transistor RGT) con un transductor de entrada que convertía la señal eléctrica en mecánica, un microresonador

mecánico y un transductor de salida que volvía a generar una señal eléctrica, el tema de microresonadores compatibles con CI cobró renovado interés en los últimos años, con las ventajas de los nuevos procesos de maquinado, los nuevos materiales, y siendo uno de los objetivos de las líneas de investigación, de conseguir resonadores compatibles con CI que puedan desplazar los resonadores de cristal de cuarzo, normalmente ubicados fuera de los chip (off-chip). Los resonadores de baja frecuencia de mejor desempeño son los que utilizan las estructuras tipo peine de desplazamiento lateral descritas antes (*comb-drives* electrostáticos). Consisten de estructuras electrodos de entrada-salida fijos, que se suelen denominar estatores y una estructura compuesta central, formada por una barra móvil dividida y por una serie de dientes secundarios, que también se los menciona como rotores (en analogía a las piezas de un motor eléctrico), engarzados con los dientes de los estatores (figura 5). Su funcionamiento parte de un voltaje de alterna, junto con un voltaje de continua de polarización, aplicados entre el estator de entrada y un electrodo de referencia (no necesariamente conectado a tierra), que evita que el desbalance de las fuerzas verticales de estator y rotor, generen una tendencia a levitar excesiva de la estructura central, pero que alcance para actuar como “lubricante”. El voltaje eficaz aplicado entonces al estator ejerce fuerzas electrostáticas sobre el rotor. El rotor adherido a la estructura central de barra móvil, transfiere a ésta la fuerza y por tanto el movimiento a las barras móviles, excitándolas en una vibración lateral. Como la vibración de los peines de entrada y salida son complementarios, esto es, cuando uno se encaja, el otro se desencaja, los dientes del electrodo de salida sienten las vibraciones inducidas en el rotor y como ya vimos, la capacitancia de una estructura peine es lineal con respecto al desplazamiento, la fuerza resulta independiente de la amplitud de vibración, tan larga como sea esta.

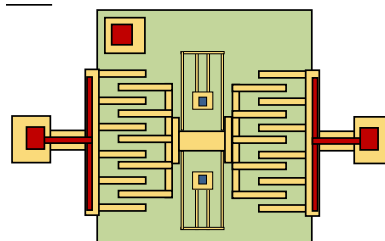


Figura. 5
Esquema de un resonador serie formado por estructuras tipo peine

En altas frecuencias no es posible la utilización de estas estructuras de masas móviles por lo que se aplican técnicas de cavidades resonantes, cavidades que pueden conseguirse por micromaquinado en los mismos sustratos de los circuitos integrados.

A partir de estas estructuras es posible conseguir filtros de diferentes características acoplando resonadores en redes en serie o paralelo de la misma manera que se utilizan redes de capacitores e inductores en la electrónica convencional. Así, realimentando un dispositivo resonante, ya sea de movimiento o de cavidad resonante, de manera que se compense la energía disipada en sus pérdidas internas se obtienen osciladores que vibran en forma ideal a la frecuencia natural del resonador. La performance de los osciladores se caracteriza por la potencia de la señal de salida que es capaz de producir y por la estabilidad en la frecuencia a la que oscila, características que dependen esencialmente del factor de calidad del dispositivo, a mayor factor de calidad más estable será la frecuencia en el oscilador y como ya señalamos, pueden conseguirse altos factores de calidad con la tecnología de MEMs.

Otro de las más importantes aplicaciones de RF-MEMs y que puede considerarse como un componente esencial, es el desplazador de fase. Un desplazador de fase es un circuito que idealmente produce en su salida una réplica de la señal aplicada a su entrada pero con la fase modificada, en sí una red de dos puertos en la que la diferencia de fase entre las señales de

entrada y salida puede ser controlada por otra señal, típicamente un voltaje continuo de polarización. Desplazadores de fase o desfasadores con bajas pérdidas de inserción, baja potencia de accionamiento y un bajo costo de producción son la clave del desarrollo de los arreglos de antenas graduales, capaces de redirigir los lóbulos de haces de ondas sin mover físicamente los elementos de las antenas. Una típica antena de arreglo puede conformarse con cientos de elementos alimentados cada uno por un desplazador de fase. Generalmente se pueden encontrar en dos modos, los digitales, en los que los corrimientos de fase pueden efectuarse sólo en unos pocos valores discretos y predeterminados tales como 90°, 45°, 22.5°, 11.25°, etc. y analógicos en los que los corrimientos pueden ser continuos. Los desfasadores con conmutadores MEMS tienen significativamente menores pérdidas, buena aislación a alta frecuencia, muy bajo consumo de potencia de continua y muy baja distorsión por intermodulación, en comparación con los desfasadores en base a conmutadores semiconductores, del tipo de diodos PIN y transistores de efecto de campo FET. Tienen además una considerable ventaja respecto a aquellos construidos con materiales de ferrite, en cuanto a costo de fabricación, complejidad y limitaciones de frecuencia.

Otros tipos de antenas reconfigurables construidas con MEMS son las antenas micro-tira cuya placa metálica puede girarse sobre un punto de apoyo, direccionando el haz, por ejemplo, antenas grabadas sobre cuarzo fundido sobre un sustrato de silicio, suspendido por un par de resortes de torsión, en la que la rotación se consigue por fuerzas electrostáticas a través de la activación de electrodos fijos sobre el sustrato y las que utilizan actuadores para ajustar los ángulos de los brazos de antena V típicas, donde al cambiar el ángulo entre los brazos se modifica la forma del haz de radiación y cuando ambos brazos se rotan juntos en la misma dirección, el haz efectúa un barrido.[5][6][7][8][10][11][13]

EVOLUCIÓN EN EL MERCADO

Aunque un poco más tardía que MEMs en general del tipo de inyectores de impresión y sensores inerciales (giróscopos, acelerómetros, etc.), la inserción en el mercado y el desarrollo de componentes y dispositivos con base en RF-MEMs es cada vez más acentuada. Actualmente, sigue siendo relativamente reducida su comercialización pero como señalamos, a medida que los requerimientos de los microsistemas de comunicaciones aumentan en cuanto a miniaturización, bajo consumo, desempeño y capacidades de reconfiguración, más espacios para llenar encuentran estos dispositivos y más promisorio se presenta su mercado.

Si bien son tecnologías que se conocen e investigan desde los años '80 del pasado siglo puede considerarse el año 2002 como el principio de su fabricación en serie, de la mano de resonadores de onda acústica en volumen (BAW, FBARs y SMRs) y a partir de aquí ha crecido sin parar, inclinándose paulatinamente la atención del mercado hacia dispositivos con base en conmutadores y capacitores variables.

En las figuras 8 y 9, puede verse el crecimiento mencionado del mercado mundial de RF-MEMs, referido en millones de dólares, en función de las distintas aplicaciones en las que se utilizan en comparación con otros dispositivos MEMs y alguna prospección para los próximos años promediando valores de datos y perspectivas de distintas fuentes, a modo de ilustración de la tendencia en los últimos tiempos. Puede notarse cómo el crecimiento esperado en los próximos años es mayor en el campo de los RF-MEMs que en el resto de las sub-clases.

En la figura 8 se muestra la evolución según su área de aplicación, puede verse la tendencia claramente creciente en lo que hace a dispositivos móviles de telefonía. Tal tendencia va de la mano de la pronunciada miniaturización y mayor complejidad que se ha ido consiguiendo en este tipo de aplicaciones y como hemos señalado, la tecnología de RF-MEMs se va haciendo óptima para estas aplicaciones de bajo consumo.

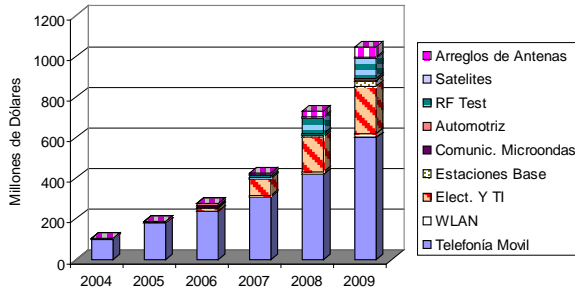


Figura. 8
Evolución del mercado global por aplicaciones de RF-MEMS

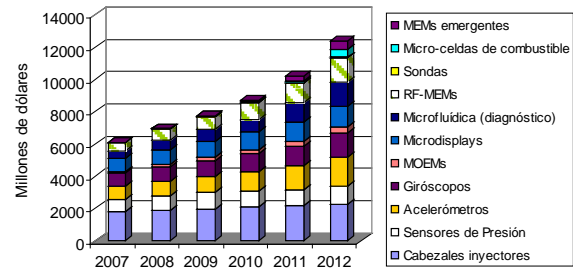


Figura. 9
Evolución del mercado global para distintas clases de MEMs

El crecimiento de dispositivos de comunicaciones se presenta mucho más pronunciado que otras aplicaciones como la automotriz que si bien aún está en aumento se basa mayormente en la utilización de otros tipos de MEMs como variedad de sensores y unidades inerciales. Precisamente esto se nota en la figura 9, donde se discrimina el mercado en cuanto a clases de MEMs y dónde vemos una meseta en aquellos dispositivos de más antiguo desarrollo como sensores de presión, inyectores, giróscopos, acelerómetro (abajo en las barras del gráfico) frente al marcado crecimiento, principalmente de RF-MEMs (a rayas en el gráfico) y microceldas de combustible (arriba en las barras del gráfico). Además se muestra la prospección de crecimiento de otros tipos de MEMs que denominamos emergentes, muchas de las cuales no se han volcado aún al mercado sino que su desarrollo se encuentra en investigación. Esta relación de crecimiento puede hacerse más evidente si considerásemos datos de fabricación en lugar de volúmenes de dinero, digamos por ejemplo, millones de unidades fabricadas por año, pues también debe considerarse la disminución en los costos de manufactura dado que esta se perfecciona año a año y la relación de precio por unidad disminuye paulatinamente, generando para montos de dinero iguales en mercado incrementos más pronunciados de producción. [4][14]

Bibliografía

- [1] *Advanced Micro and Nanosystems. Vol. 2. CMOS – MEMS. Edited by H. Baltes, O. Brand, G. K. Fedder, C. Hierold, J. Korvink, O. Tabata - Copyright © WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim – 2005.*
- [2] *Advanced Micro & Nanosystems Volume 6 Reliability of MEMS - Edited by Osamu Tabata and Toshiyuki Tsuchiya, Copyright © WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim – 2008.*
- [3] *Bowick C., RF Circuit Design, Newness – 2008.*
- [4] J. Bouchaud, *RF MEMS Market II 2005-2009, analysis, forecasts and Technology Review*, October 2005.
- [5] *De Los Santos, H. J., RF MEMS circuit design for wireless communications.p. cm..(Artech House microelectromechanical systems library) – 2002.*
- [6] *De Los Santos, H. J., Introduction to Microelectromechanical Microwave Systems Second Edition p. cm.(Artech House)- 2004.*
- [7] *Jha, A. R.MEMS and nanotechnology-based sensors and devices for communications, medical and aerospace applications, 2008.*
- [8] *MEMS/NEMS: Handbook Techniques and Applications, Edited by Cornelius T. Leondes –2005.*
- [9] *MEMS : a practical guide to design, analysis, and applications, edited by Jan G. Korvink and Oliver Paul.- 2006.*
- [10] *Pozar D. Microwaves engineering, John Wiley & Sons, Inc – 2005.*
- [11] *Rebeiz, G. M. RF MEMS: Theory, Design, and Technology, John Wiley & Sons, Inc., 2003.*
- [12] *RF and microwave passive and active technologies, Ed. Mike Golio, Taylor & Francis Group, LLC – 2008.*
- [13] *Varadan, V. K. Vinoy, K. J. and Jose, K. A., RF MEMS and their applications, John Wiley & Sons Ltd, 2003.*
- [14] *Microelectromechanical Systems (MEMS) Technology: Current and Future Markets - Electronics Industry Market Research and Knowledge Network - <http://www.electronics.ca/publications> - 2010*