

Parte III

Diseño de sensores inerciales micromaquinados

Capítulo 7

Antecedentes

7.1. Sensores inerciales

Los sensores físicos son el área de aplicación más grande para la tecnología MEMS, en particular el ramo de los sensores inerciales. Un sensor inercial es un dispositivo capaz de convertir o transducir, los efectos de una fuerza en una señal registrable, normalmente, de tipo eléctrico. Los efectos provocados por la fuerza y registrados por los sensores inerciales generalmente son la aceleración lineal, en el caso de los acelerómetros, y el movimiento angular, sobre uno o varios ejes, en el caso de los giroscopios. Dichos efectos físicos se transforman en una salida de voltaje linealmente proporcional y se cuida que el proceso de transducción tenga una sensibilidad específica en función de la aplicación en la que son incluidos.

Los grados de desempeño de este tipo de sensores se muestran en la siguiente tabla:

Grados de desempeño para sensores inerciales [59]

Grado	Res. para acelerómetros	Res. para giroscopios	Costo USD
Estratégico	$< 1 \mu\text{g}$	$< 0.0001 \text{ }^\circ/\text{h}$	< 10 millones por unidad
Navegación	$10 - 50 \mu\text{g}$	$0.001 - 0.01 \text{ }^\circ/\text{h}$	< 100 mil por unidad
Táctico	$0.1 - 1 \text{ mg}$	$1 - 10 \text{ }^\circ/\text{h}$	< 30 mil por unidad
Instrumentación	$10 - 100 \text{ mg}$	$30 - 100 \text{ }^\circ/\text{h}$	$250 - 2$ mil por unidad

En la tabla se aprecian los rangos de resolución y el costo para los cuatro grados de desempeño. Los rangos de desempeño van de instrumentos inerciales grado estratégico empleados en misiles y submarinos a instrumentos grado instrumental empleados en los sectores automotriz y de aparatos electrónicos de consumo general. Actualmente, los sensores inerciales basados en Sistemas Microelectromecánicos están disponibles comercialmente en los grados instrumental y táctico.

Es interesante analizar los factores que condujeron al desarrollo y masificación del uso de sensores inerciales micromaquinados, en particular de los acelerómetros, por tal razón se abordará un pequeño resumen de la historia de estos dispositivos.

Los sensores inerciales micromaquinados fueron sujetos de investigación intensa en las últimas décadas desde que L. Roylance [60] reportó el primer acelerómetro micromaquinado en 1979, fecha a partir de la cual muchos autores publicaron trabajos sobre distintos tipos de acelerómetros micromaquinados. Por su parte, el desarrollo de giroscopios micromaquinados en silicio tiene apenas 18 años, el primero de ellos basado en tecnología MEMS fue reportado por Draper Labs en 1991 [61].

El primer acelerómetro MEMS fue desarrollado en un proceso de micromaquinado de volumen y aprovechaba las propiedades piezoresistivas de los materiales semiconductores. Pero no fue sino hasta finales de la década de 1980 que se incrementó el interés por los acelerómetros micromaquinados y se empezaron a utilizar

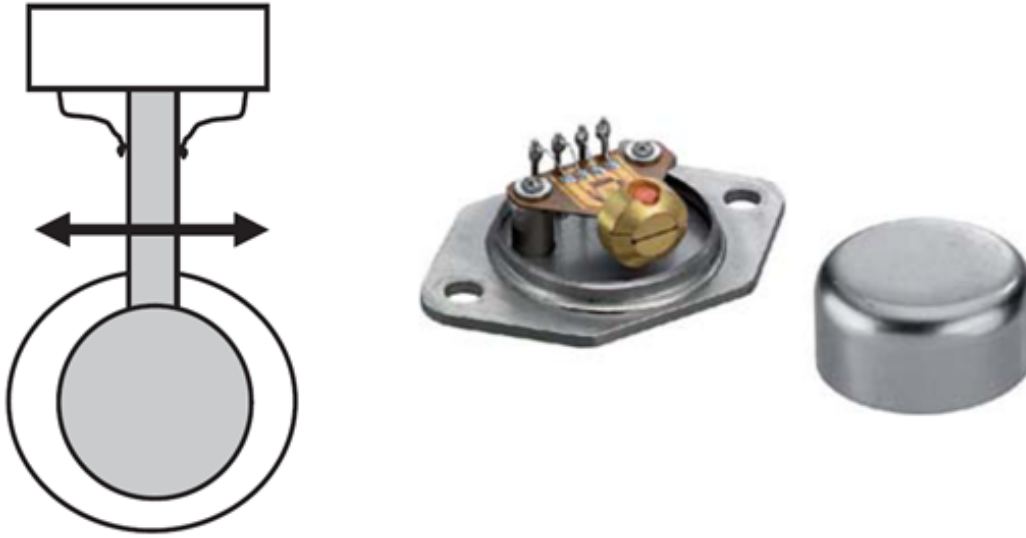


Figura 7.1: Esquema y fotografía del acelerómetro pendular diseñado y fabricado por la empresa Bosch.

varios mecanismos de registro, incluyendo piezoresistividad, generación piezoeléctrica, variación de capacitancia y efecto túnel, además de sensores térmicos y ópticos; y se experimentó con técnicas de micromaquinado de superficie y de volumen.

La necesidad que detonó el desarrollo de los acelerómetros micromaquinados fue la implantación de los dispositivos de seguridad para conductores y pasajeros en la industria automotriz (activación de las bolsas de aire y ajuste de los cinturones de seguridad) lo que demandó mantener costos bajos y mejoras en el desempeño y confiabilidad respecto de los acelerómetros mecánicos tradicionales ([62] y [63]). A mediados de la década de 1990, muchos acelerómetros micromaquinados comerciales fueron introducidos en el mercado principalmente para usos en el sector automotriz. Desde el inicio del nuevo siglo, el uso de acelerómetros micromaquinados se ha expandido rápidamente en diferentes campos tales como los aparatos electrónicos de consumo general, las consolas de videojuegos y los dispositivos biomédicos.

Antes de los acelerómetros micromaquinados, los mecanismos típicamente usados para medir la aceleración consistían de péndulos y extensímetros ([64] y [65]). Por ejemplo, uno de los primeros acelerómetros de la empresa Bosch usaba un resorte hecho a partir de una aleación de berilio-cobre, un extensímetro y una masa suspendida en aceite para su amortiguamiento (veáse la figura 7.1). Este acelerómetro, fue empleado en las primeras aplicaciones automotrices para medir la aceleración negativa y registrar un impacto que activara los sistemas de seguridad en los autos (bolsas de aire).

Los extensímetros con alta sensibilidad, creados a partir de silicio monocristalino dopado, fueron el mecanismo de transducción empleado en diversos diseños de acelerómetros en las últimas décadas [66]. Dado que el silicio monocristalino dopado es un material ampliamente disponible en la industria electrónica para la fabricación de circuitos integrados, se le ha explotado como material base en la construcción de acelerómetros. Kulite utilizó estematerial en algunos de los primeros acelerómetros piezoresistivos ([67]). El modelo mecánico de viga volada con carga en su extremo libre y un extensímetro en su extremo anclado fue empleado en diferentes tamaños y configuraciones para crear acelerómetros. La empresa SensorNor creó un acelerómetro que emplea un extensímetro en la parte superior y otro en la parte inferior de la viga volada de silicio y crea una conexión eléctrica mediante una aleación de oro y estaño. La viga estaba anclada en su base y una masa adicional fue colocada en su extremo libre. Las mejoras al diseño y encapsulado

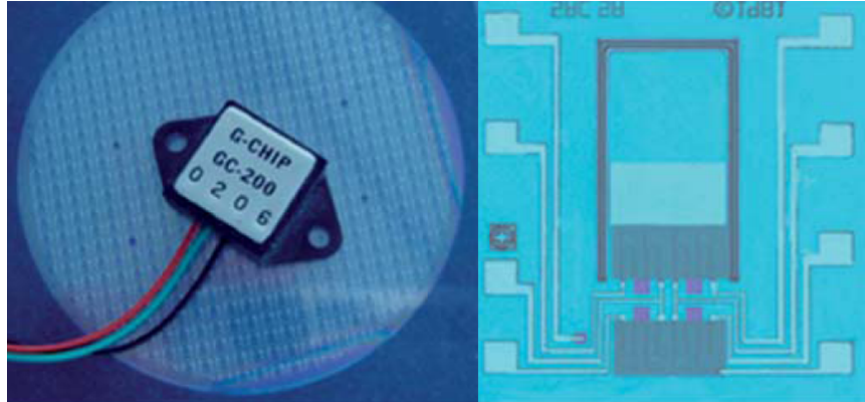


Figura 7.2: Fotografía del llamado G-Chip desarrollado por la empresa Insouth Microsystems.

derivaron en una estructura micromaquinada y un encapsulado plástico lleno de aceite que fue llevado a una escala de producción masiva a principios de la década de 1990 [66]. El acelerómetro basado en una viga volada reportado por L. Roylance [60] empleaba una masa de silicio creada mediante socavado (grabado) anisotrópico desde la parte inferior de la oblea; la oblea fue tratada con difusión de Boro y metalización de oro en la parte superior para crear una oblea monolítica.

El enfoque para la creación de Sistemas Microelectromecánicos monolíticos fue desarrollado posteriormente en un producto comercial de Insouth Microsystems en 1979, empleando metalización de aluminio y un puente completo piezoresistivo que fue conocido como el Chip G. El acelerómetro de silicio con socavado anisotrópico por ambos lados fue montado en un encapsulado LCC (Leadless Chip Carrier) y combinado con la circuitería de amplificación y compensación eléctrica, como se muestra en la figura 7.2.

Los acelerómetros piezoresistivos anisotrópicamente socavados diseñados y fabricados por Delphi, IC Sensors, Nova Sensors, Denso, Bosch y Endevco, entre otros, estaban dirigidos a los sectores automotriz y de instrumentación en los primeros años de la década de 1990 [66]. Debido a la demanda para aplicaciones automotrices, especialmente para los sistemas de bolsas de aire, muchas empresas entraron al campo de los acelerómetros con diseños innovadores. A finales de la década de 1980 y principios de 1990, el uso de polisilicio como material para la creación de todos los elementos mecánicos de un acelerómetro (resorte y masa) fue investigado por múltiples grupos universitarios de investigación, tales como: la Universidad de California en Berkeley ([68] y [69]), la Universidad de Wisconsin ([70]) y la Universidad de Berlín ([71]). El polisilicio es un material comúnmente empleado en el proceso CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) para las compuertas de los transistores y por lo tanto es nativo del proceso de fabricación de circuitos integrados. Los primeros trabajos que aprovecharon este material para la creación de los elementos mecánicos de un acelerómetro fueron desarrollados por Analog Devices Inc. a finales de la década de 1980. El resultado de su trabajo fue el ADXL50, primer acelerómetro que integró el transductor electromecánico micromaquinado en un proceso superficial y la electrónica de control y acondicionamiento de señales. En la figura 7.3 se muestra un acelerómetro ADXL50. El acelerómetro de Analog Devices emplea electrodos intercalados para formar un capacitor diferencial (*comb fingers*) que mide los desplazamientos de la masa sostenida con resortes y a la cual están acoplados la tercera parte de los electrodos. Al desplazarse la masa, se desplazan los electrodos y se genera una variación en la capacitancia. Este enfoque en el desarrollo del dispositivo hizo posible agregar circuitos con funciones adicionales y múltiples ejes de medición a partir de pequeños cambios en la plantilla de diseño mecánico y electrónico manteniendo el proceso común de fabricación.

El registro del desplazamiento de una estructura de polisilicio mediante variaciones en la capacitancia fue desarrollado e introducido por Motorola en los primeros años de la década de 1990 [72]. Esta estructura desarrollada por Motorola empleó varias capas de silicio policristalino, una celda G (como la mostrada en la figura 7.4) y estaba encapsulada junto con la circuitería de control y tratamiento de las señales eléctricas.

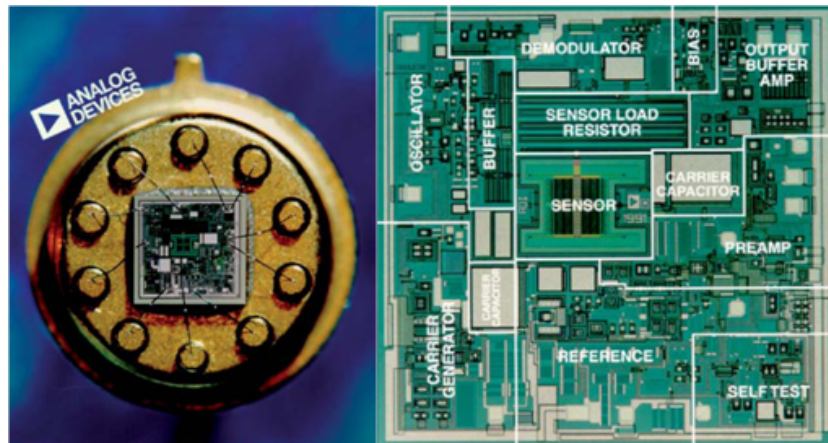


Figura 7.3: Fotografía del acelerómetro ADXL50 desarrollado y comercializado por la empresa Analog Devices Inc.

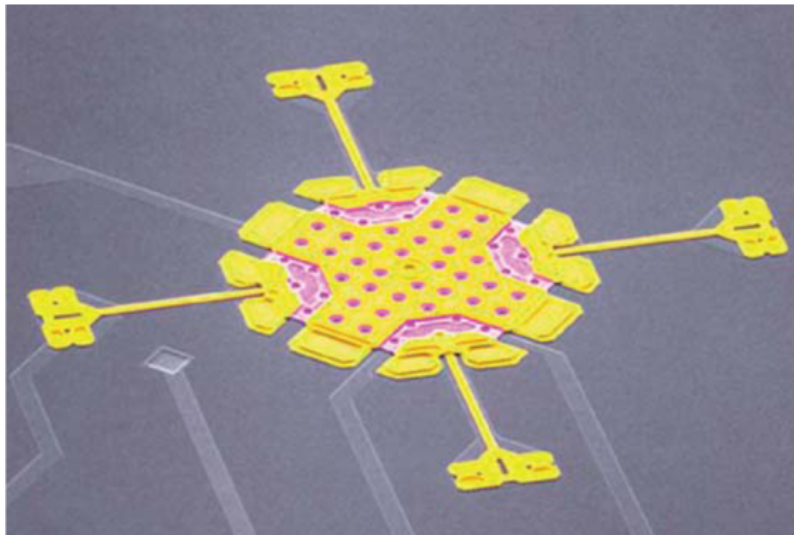


Figura 7.4: Fotografía retocada de una celda G desarrollada por Motorola.

Los acelerómetros capacitivos fabricados en procesos de micromaquinado de volumen fueron desarrollados también en los primeros años de la década de 1990 por diversas empresas y universidades, entre ellas: Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique [73], Litton [74], Applied MEMS (a finales de la década de 1990) y la Universidad de Michigan [75]. En la siguiente tabla se muestra un resumen de los acelerómetros desarrollados mediante procesos de micromaquinado de volumen.

Resumen de acelerómetros capacitivos fabricados en procesos de micromaquinado de volumen

Desarrollador	Año	Estructura y proceso usado	Umbral mínimo de ruido
F. Rudolf	1990	Multicapas de cristal de silicio	$1 \mu\text{g Hz}^{-1/2}$
W. Henrion	1990	Multicapas de cristal de silicio Grabado húmedo en múltiples pasos	$1 \mu\text{g Hz}^{-1/2}$
K. Warren	1994	Separación por implantación de oxígeno	N. D.
J. Bernstein	1999	Fusión de capas de cristal de silicio Doble cara Combinación de grabado en seco y húmedo Detención automática de grabado húmedo	$1 \mu\text{g Hz}^{-1/2}$
H. Kulah	2000	Combinación de micromaquinado de volumen y de superficie Liberación húmeda	$0.23 \mu\text{g Hz}^{-1/2}$
J. Chae	2002	Silicio sobre vidrio Fusión de capas de cristal de silicio Silicio refinado por planarización química y mecánica Liberación en seco	$100 \mu\text{g Hz}^{-1/2}$
N. Yazdi	2003	Combinación de micromaquinado de volumen y de superficie Liberación húmeda	$0.18 \mu\text{g Hz}^{-1/2}$
Applied MEMS	- - -	Micromaquinado de volumen Fusión de capas	$0.25 \mu\text{g Hz}^{-1/2}$

El diseño de un acelerómetro chapado en metal fue creado por Silicon Designs a principio de la década de 1980 empleando una masa de prueba fuera de balance y un resorte de torsión para registrar la aceleración mediante cambios en la capacitancia de un arreglo diferencial [76]. Ford convirtió este diseño en una estructura mecánica de polisilicio y la incluyó por un tiempo en sus automóviles como sensor de disparo de las bolsas de seguridad para padajeros. Los diseños de acelerómetros capacitivos se hicieron populares debido a que sus mediciones no se ven afectadas de forma significativa por variaciones en la temperatura a diferencia de lo sucedido en los acelerómetros basados en elementos piezoresistivos y porque permite aplicar un diferencial de potencial sobre las placas del capacitor (representadas por los electrodos intercalados o por las placas suspendidas paralelas) para realizar un procedimiento de auto-prueba [77].

Las condiciones bajo las que operarán los sensores inerciales lineales y angulares definen la elección de la tecnología de micromaquinado, el diseño del transductor y la arquitectura del sistema. La mayoría de los mecanismos de registro y tecnologías de micromaquinado han sido aplicados en el diseño y fabricación de acelerómetros y giroscopios, por supuesto, las características de cada tecnología han influido en el diseño del transductor, del sensor y del sistema completo.

Este capítulo presentará una breve discusión sobre los parámetros de diseño característicos de un acelerómetro micromaquinado. Posteriormente abordará una propuesta de diseño en el proceso Polymumps y simulará mediante diversas técnicas su respuesta y comportamiento. Se presentará una propuesta de control en lazo cerrado para el acelerómetro y se expondrán las conclusiones. Finalmente, se esbozará el rumbo del trabajo futuro.

7.2. Aplicaciones

Tres características que frecuentemente influyen sobre las áreas de aplicación de los dispositivos micromaquinados son: volumen del encapsulado, costo del sistema y desempeño. Frecuentemente estas tres características no pueden satisfacerse al cien por ciento eligiendo una sola tecnología. Normalmente el volumen de encapsulado o tamaño de todo el sistema es un requisito fácil de cumplir para los sensores inerciales micromaquinados frente a sus contrapartes macroscópicas. Las tecnologías de micromaquinado son capaces de reducir el transductor electromecánico y toda su circuitería de control y acondicionamiento de señal a un sólo chip o dos en un encapsulado plástico o cerámico. El costo del sistema es también un requisito importante para los sensores inerciales micromaquinados. Debido a su relación natal con la industria de la microelectrónica, los sensores micromaquinados pueden ser fabricados por lotes, compartiendo el costo del proceso de fabricación entre grandes volúmenes de sensores, reduciendo significativamente las restricciones económicas que representa la implantación de un proceso de fabricación basado en semiconductores. En tanto que muchos procesos individuales pueden ser significativamente más caros que sus contrapartes macroscópicas, debido a que los beneficios de la escala de producción pueden ser aplicados, el impacto se reduce significativamente.

Mejorar el desempeño de un dispositivo, con suficientes posibilidades de éxito, también requiere de mejoras en los costos de producción por unidad. Uno de los factores en la mejoría de la relación costo/desempeño es un mejor aprovechamiento de la superficie de fabricación (dado). Al maximizar la densidad por unidad de área en el proceso de fabricación y en el diseño del dispositivo, se minimiza el área necesaria en el dado. Los requisitos para los sensores actualmente empleados en los sistemas de seguridad automotriz permitieron la incorporación de tecnologías de micromaquinado de superficie desde el inicio del uso de estas características en los automóviles. Las tecnologías de micromaquinado de superficie hacen uso de un proceso de depósito sucesivo de capas de sacrificio y estructurales para producir un dispositivo de silicio policristalino cuyo espesor estructural regularmente es menor a los tres micrómetros. Estas tecnologías han sido exitosas en función de las especificaciones de diseño actuales, pero ya han empezado a ser reemplazadas por otras tecnologías que han demostrado flexibilidad en su aplicación y mejoras importantes en el aprovechamiento del área del dado.

Al integrarse a un sistema completo de control, los sensores micromaquinados pueden ver afectada su sensibilidad y rango de operación con mayor facilidad que sus contrapartes macroscópicas. Curiosamente, las metodologías de tratamiento de señales usadas para los sensores inerciales macroscópicos pueden emplearse para resolver estas complicaciones en los sensores micromaquinados. Los compromisos entre tamaño del sistema, costo y desempeño están normalmente imbricados entre sí. Las tecnologías de micromaquinado han sido exitosas en aquellas aplicaciones en las que el tamaño y el costo tienen mayor preponderancia y la resolución mantiene exigencias mínimas, tal es el caso de los usos en automóviles.

Las aplicaciones en el sector automotriz motivaron la mayoría de los esfuerzos para el desarrollo de la tecnología necesaria en la creación de sensores inerciales micromaquinados. Los acelerómetros representan uno de los mayores porcentajes de dispositivos micromaquinados; su uso en los mecanismos de disparo de las bolsas de aire y en el ajuste automático de los cinturones de seguridad impulsó la demanda de grandes volúmenes de acelerómetros de bajo costo y alto desempeño. Inicialmente reemplazaron al interruptor mecánico que podía detectar una aceleración negativa y activar las bolsas que hasta ese momento dominaba el mercado. El acelerómetro micromaquinado proporcionó mayor información a un precio significativamente bajo, además, este dispositivo podía emplearse en todos los sistemas y vehículos sin importar su marca con apenas unos cambios en el software de control. La adición de más bolsas de aire en los automóviles (para los pasajeros y las dedicadas a los impactos laterales) hizo necesaria la colocación de una mayor cantidad de acelerómetros

por vehículo, lo cual, a su vez, impulso aún más la demanda de estos sensores inerciales, hasta niveles de crecimiento por encima del 20 % anual en la demanda durante la última década.

Los dispositivos diseñados para los sistemas de bolsas de aire, requieren típicamente de sensibilidades de 20 a 100 gravedades para las bolsas de aire contra impactos frontales y de 100 a 250 gravedades para las bolsas de aire contra impactos laterales (donde una gravedad representa la aceleración debida a la gravedad de la tierra). Las regulaciones exigen actualmente mayores márgenes de seguridad en los vehículos automotores de uso general, razón por la que los sistemas que aseguran a los pasajeros han aumentado las cantidades requeridas de sensores para cumplir con la normatividad y hacer más inteligente la respuesta del sistema a las condiciones de un eventual impacto. Entre las condiciones de un impacto que son deseables conocer se encuentran: la localización de la zona de impacto, la posición y peso de los ocupantes, el uso o no de los cinturones de seguridad y la severidad del impacto. Los sistemas de seguridad estándar, en el futuro cercano, emplearán muchos transductores multieje distribuidos alrededor del vehículo para determinar si una bolsa de aire debe inflarse y con que rapidez debe hacerlo. Aunque en la actualidad ya se comercializan algunos vehículos de lujo con alguna de esta funcionalidad la complejidad y costo de los sistemas los hace prohibitivos para su incorporación en los vehículos más económicos, en unos pocos años, muchos de estos sistemas se fusionarán en uno sólo, con el fin de incrementar la capacidad de control del vehículo, acotar su complejidad y abaratar su costo.

Por otra parte, también con fines de seguridad se ha incrementado la capacidad de control sobre la dinámica de los vehículos en los últimos años. La mezcla funcional de suspensiones activas, controles de tracción, sistemas de rodamiento, acelerómetros de sensibilidad media, sensores de giro y de inclinación se utiliza dentro del motor, en la dirección y en el sistema antibloqueo de frenos tiene como propósito devolver el control del vehículo al conductor en una situación en la que típicamente lo perdería. El uso de sensores micromaquinados en estas tareas ha sido posible gracias a la mejora en la resolución de los dispositivos. Así, compañías como VTI, LETI, BOSCH, Denso y Analog Devices han cubierto este subsector del gran mercado automotriz con el diseño y fabricación de acelerómetros cuyas sensibilidades se encuentran en el rango de unas cuantas fracciones de gravedad a diez gravedades.

Las aplicaciones en el sector automotriz para los sensores inerciales se enlistan en la siguiente tabla.

Aplicaciones de sensores inerciales en el automóvil [79]

Característica	Rango	Aplicaciones
	$\pm 1 g$	Anti-bloque de frenos, control de tracción y realidad virtual
	$\pm 2 g$	Movimiento vertical de cuerpos
	$\pm 50 g$	Activación de bolsas de aire frontales y movimiento de ruedas
	$\pm 100 - 250 g$	Activación de bolsas de aire laterales
	$\pm 100 - 250 \text{ }^\circ/\text{s}$	Control de seguridad y estabilidad (guiñada y alabeo)
Resolución	$< 0.1 \%$	Todas las aplicaciones
Linealidad	$< 1 \%$	Todas las aplicaciones
Ruido de salida	$< 0.005 - 0.05 \%$ $\text{Hz}^{-1/2}$	Todas las aplicaciones
Corrimiento por deriva	$< 1 g/\text{s}$	Acelerómetro
	$< 0.1 \text{ }^\circ/\text{s}^2$	Giroscopio
Rango de temperatura	-40 a 85 $^\circ\text{C}$	Condiciones operacionales
	-55 a 125 $^\circ\text{C}$	Condiciones de almacenamiento
Sensibilidad	< 1 a 3 %	Dependiente de la aplicación
Respuesta en frecuencia	DC a 1 - 5 kHz	Activación de las bolsas de aire
	DC a 10 - 100 Hz	Giroscopios y acelerómetros de 1 a 2 gravedades
Sobrevivencia ante impacto	$> 500 g$	Energizados todos los ejes de medición
	$> 1500 g$	Sin energizar los ejes de medición

Los sensores inerciales angulares asociados con las mediciones de variación en los ángulos de navegación de distintos tipos de vehículos, requieren de una sensibilidad significativamente mayor que la de los acelerómetros análogos. Tales dispositivos muestran resoluciones en el rango que va de unas cuantas micro-gravedades hasta las mili-gravedades con el fin de registrar mediciones confiables de rotaciones con velocidades angulares menores a un grado por minuto. Las consideraciones de diseño para tales dispositivos son satisfechas con las mismas tecnologías de fabricación de micromaquinado de superficie que las empleadas en acelerómetros pero agregan una cantidad significativa de complejidad para alcanzar dispositivos estables y confiables.

La introducción de acelerómetros de una pocas gravedades para el sector automotriz, abrió un nuevo y amplio rango de aplicaciones en el campo de los aparatos electrónicos de consumo general. Acelerómetros capaces de medir inclinaciones y movimiento se han empleado en controles inalámbricos para computadoras y consolas de videojuegos. También se han abierto aplicaciones en el sector deportivo con sistemas que permiten a los entrenadores de golf, tenis y béisbol usar acelerómetros para registrar y analizar los movimientos de sus jugadores. Una aplicación muy popular en computadoras portátiles es la protección de los discos duros y sus datos frente a un impacto. Con la disponibilidad de acelerómetros de tres ejes con precios por debajo de los dos dólares, la viabilidad de agregar detección de movimiento a un amplio rango de dispositivos portátiles se ha hecho una realidad. Teléfonos celulares, con la habilidad de reconocer movimientos y realizar análisis basados en la situación para adecuar la orientación de las imágenes desplegadas en pantalla o poner a salvo sus partes móviles frente a un impacto inminente representan un mercado potencial de 700 millones de dispositivos al año. Lo cual combinado con las aplicaciones en el sector automotriz y otros sectores, representan un mercado para los acelerómetros con expectativas de crecimiento cercanas a mil millones de dispositivos por año.

Quedó atrás la época en que los sensores inerciales estaban restringidos para aplicaciones en las cuales el costo de dichos sensores era un factor secundario, como son los casos de los sistemas militares y aeroespaciales. Con la consolidación del micromaquinado como tecnología estándar de fabricación de sensores inerciales en el rango de la baja y mediana resolución, sobrevino la producción a un costo muy bajo y se abrieron campos de aplicación fuera de los sectores automotriz y del transporte, antes inimaginables: monitoreo de pacientes, estabilización de cámaras fotográficas y de video, la extensión de las aplicaciones militares hacía la guía autónoma de vehículos y proyectiles y su uso en distintos tipos de juguetes inteligentes. Muchas otras aplicaciones están en fase de desarrollo o en sus primeras versiones comerciales, tal es el caso de:

- Equipo para realidad virtual e inmersión (Head Mounted Display y Datagloves).
- Sistemas de respaldo para GPS.
- Monitoreo de impactos durante el embalado de equipo delicado.
- Dispositivos de entrada para computadoras basados en detección de movimiento.
- Sistemas de control de movimiento para robots industriales.
- Sistemas de navegación para vehículos a escala.
- Sistemas de control para robots móviles y humanoides.

Los sensores micromaquinados siguen siendo una tecnología con un enorme potencial comercial. Los requisitos para muchas de las nuevas aplicaciones siguen siendo los mismos que los planteados para la industria automotriz: que los sensores sean baratos, que puedan colocarse en un pequeño volumen y que su consumo de potencia sea muy bajo. Los dispositivos micromaquinados deberán mejorar de forma continua su cumplimiento de estos requisitos para mantener el dominio del voluminoso mercado de sensores inerciales para aplicaciones civiles y de propósito general.

La siguiente tabla muestra algunas aplicaciones actuales y futuras para acelerómetros y giroscopios, respectivamente. Los valores típicos de ancho de banda, resolución y rango dinámico son únicamente referencias.

Aplicaciones típicas para acelerómetros micromaquinados [80]

Aplicación	Ancho de banda	Resolución	Rango dinámico
Disparo de bolsas de aire	0 - 0.5 kHz	< 500 mg	$\pm 250 g$
Sistemas de control activo de estabilidad	0 - 0.5 kHz	< 10 mg	$\pm 2 g$
Suspensión activa	0 - 1 kHz	< 10 mg	100 g
Navegación inercial	0 - 100 Hz	< 5 μg	$\pm 1 g$
Embalado de bienes frágiles	0 - 1 kHz	< 100 mg	$\pm 1 kg$
Medición de microgravedad en el espacio	0 - 10 Hz	< 1 μg	$\pm 1 g$
Monitoreo de pacientes	0 - 100 Hz	< 10 mg	$\pm 100 g$
Monitoreo de vibraciones	1 - 100 kHz	< 100 mg	$\pm 10 kg$
Realidad virtual	0 - 100 Hz	< 1 mg	$\pm 10 g$
Guía inteligente de proyectiles	10 Hz a 100 kHz	1 g	$\pm 100 kg$

Cómo puede apreciarse en la tabla, los requisitos típicos de desempeño para cada aplicación son considerablemente diferentes, lo que implica que en el futuro inmediato será imposible utilizar un sólo tipo de sensor inercial en todas las áreas de aplicación; razón por la que los sensores inerciales seguirán siendo diseñados y fabricados para aplicaciones específicas, aumentando la variedad en los tipos de sensor disponibles en el mercado.

