

## Introducción

La primera década del siglo XXI ha sido denominada por algunos como la “Década de los Sensores”. Con un incremento considerable en los sensores y sus aplicaciones desde hace 15 años aproximadamente, de cierta forma, estos dispositivos están al borde de una revolución similar a la experimentada por las microcomputadoras en los 80’s. Solo en los automóviles las necesidades de sensado han crecido a pasos agigantados y las tecnologías de sensado usadas son tan variadas como las aplicaciones. Enormes avances han sido desarrollados y muchos más están en el horizonte. [1]

Entender el diseño y operación de un sensor frecuentemente requiere de una formación multidisciplinaria, abarcando campos como lo son la ingeniería mecánica, la ingeniería eléctrica, la física, la química, la biología, etc; ya que las últimas tecnologías en sensores abarcan desde los piezo materiales hasta los micro y nanosensores.

Para el propósito de este trabajo, se considera que un *sensor* es un dispositivo que detecta variaciones en una magnitud física y las convierte en señales útiles, escaladas linealmente y con una sensibilidad específica, para un sistema de medida o control; donde dicha magnitud puede ser, por ejemplo: temperatura, distancia, aceleración, presión, fuerza, humedad, pH, etc. Como tal, un sensor representa la interfaz entre el mundo físico y el mundo de los dispositivos eléctricos, tales como las computadoras. [1]

Con el propósito de reducir costos, logrando una producción en grandes volúmenes, diversos investigadores proponen el uso de las técnicas de microfabricación de circuitos integrados basadas en el silicio para el desarrollo de sensores y actuadores. Esta propuesta se basa en las excelentes propiedades eléctricas, estudiadas desde hace años, y mecánicas del silicio. Así surgen los Sistemas Micro Electro-Mecánicos (MEMS), los cuales son la integración de elementos mecánicos y componentes electrónicos, que actúan como sensores y/o actuadores, sobre un sustrato de silicio simple o cualquier otro material compatible con las técnicas de microfabricación.

Los componentes electrónicos son fabricados usando secuencias de procesos de circuitos integrados (por ejemplo procesos CMOS, Bipolar o BICMOS), mientras que, los elementos mecánicos son fabricados usando un proceso de micromaquinado compatible, que selectivamente ataca una oblea de silicio, o cualquier otro material para maquinado, o permite agregar nuevas capas estructurales, para formar los dispositivos mecánicos y electromecánicos. Estos procesos de micromaquinado proporcionan mejores características en comparación con los dispositivos convencionales, sobre todo en relación a la reducción de dimensiones, costo, consumo de energía; a la mejora en el desempeño y confiabilidad; y a la facilidad de interconexión con múltiples sistemas.

Los productos MEMS poseen un gran número de características distintivas, entre ellas, el que son sistemas miniatura involucrando uno o mas componentes, o estructuras micromaquinadas, que van desde los micrometros hasta los milímetros. La operación de un transductor microelectromecánico esta basada en el movimiento de una estructura mecánica y el sistema para sensar el movimiento de la estructura. El resultado está, por lo general, dado como una señal eléctrica.

Las aplicaciones de los productos MEMS impactan una amplia gama de sectores, como el automotriz, la informática, las telecomunicaciones, la medicina y, en general, aquellos que utilizan sistemas de automatización como herramienta o producto. Es así como esta tecnología ha permitido la interacción entre campos no relacionados como la biología y la microelectrónica. De esta manera, muchas aplicaciones MEMS nuevas surgirán, expandiéndose más allá de aquellas que son actualmente conocidas.

La utilidad de un producto MEMS puede estar limitada si no se le instala en la situación adecuada; por ejemplo, un sensor de presión micromaquinado colocado en la mano es inútil, pero, dentro de una máquina, controla la mezcla de aire-combustible del motor de un auto. Los MEMS frecuentemente integran pequeñas funciones dentro de un encapsulado que tiene mayores utilidades (por ejemplo, unir un sensor de aceleración con un circuito electrónico para autodiagnósticos). Además, pueden traer beneficios en costo, ya sea, directamente a través de su precio unitario, o indirectamente reduciendo el costo del servicio y mantenimiento. [2]

Los sensores de presión de silicio fueron los primeros transductores microelectromecánicos en ser desarrollados. Desde su desarrollo inicial en los 60's han mejorado en su desempeño y las nuevas aplicaciones han llevado a su producción en grandes volúmenes. Actualmente, el número de microtransductores de presión vendidos en el mercado mundial es de varios millones de unidades al año.

Al día de hoy, entre los sistemas MEMS más utilizados se encuentran los sensores inerciales, los cuales están diseñados para convertir, o transducir, una fuerza inercial en una cantidad medible.

Uno de los sistemas inerciales micromaquinados de mayor éxito es el acelerómetro de silicio, el cual ha sido producido desde finales de los 80's y usado en grandes volúmenes en la industria automotriz. Debido a su gran impacto, los acelerómetros MEMS están reemplazando rápidamente a los acelerómetros convencionales para sistemas de despliegue de bolsas de aire en automóviles, llegando a ser la segunda aplicación de producción en volumen de ventas de esta tecnología. El uso convencional de acelerómetros macroscópicos hechos de componentes discretos, montados en la parte frontal del auto, con la electrónica separada, cerca de la bolsa de aire, tienen un costo aproximado por automóvil de \$ 50 dólares; sin embargo, la tecnología MEMS ha hecho posible integrar el acelerómetro y la electrónica dentro de un simple chip de silicio con un costo entre \$5 y \$10 dólares. Estos acelerómetros MEMS son mucho más pequeños, más funcionales, más ligeros, más confiables y producidos por una fracción del costo de los acelerómetros a escalas convencionales.

Otro transductor micromecánico, que esta bajo continuo desarrollo y producción en grandes volúmenes, es el sensor de velocidad angular (giroscopio).

La investigación y desarrollo de los transductores microelectromecánicos depende del conocimiento del comportamiento dinámico de la estructura micromecánica (o *microdinámica*), el tipo de sensado y la física de operación de los sensores. Si bien muchos de los principios requeridos no son nuevos, estos no son simples aplicaciones de las teorías existentes. [3]

## 1.1 ¿Por que los MEMS?

Como cualquier otra tecnología emergente con gran potencial, cualquier usuario que considere desarrollar una solución MEMS o incorporar una a un diseño irremediamente llegara a la pregunta de “¿Por qué los MEMS?”. Para aplicaciones que se benefician de los productos MEMS comerciales (sensores de presión o aceleración), la respuesta radica en el conocimiento de las especificaciones requeridas y el precio del diseño o solución. Pero la mayoría de las aplicaciones requieren soluciones únicas que, frecuentemente, necesitan de una evaluación o programa de desarrollo. Bajo tal situación es fácil establecer una respuesta.

En la práctica, una solución MEMS es atractiva si habilita una nueva función o provee una reducción de costo significativa o ambas, en el mejor de los casos. Por ejemplo, las aplicaciones médicas generalmente buscan agregar o habilitar funcionalidad e incrementar el desempeño, mientras que las aplicaciones automotrices frecuentemente buscan reducciones de costos. La reducción de dimensiones puede jugar un factor importante. Naturalmente, la confiabilidad es siempre un factor requerido. El proceso de toma de decisión es más complicado por el hecho de que los MEMS no son una simple tecnología, sino un conjunto de tecnologías (por ej. micromaquinado superficial contra micromaquinado volumétrico). Por tanto, es bueno que el usuario conozca las capacidades y limitaciones en particular de cualquier tecnología MEMS seleccionada para la aplicación en mente.

Las compañías que buscan soluciones MEMS frecuentemente contratan instalaciones especializadas para el diseño y manufactura del producto. Otras seleccionan primero la evaluación de diseños básicos a través de compañías especializadas, “foundries”.<sup>⊗</sup> Unas pocas deciden adentrarse al desarrollo completo del diseño. En el último de los casos, hay un riesgo considerable, resultando en grandes desafíos para la producción.

Ahora bien, la falta de un producto MEMS dominante (o familia de productos) y los requerimientos técnicos únicos de cada aplicación han resultado en el surgimiento de múltiples procesos de fabricación y ensamblado. Por lo tanto, los estándares son guiados por las necesidades de las aplicaciones a grandes volúmenes, las cuales son pocas en MEMS. Sucesivamente, la falta de estándares forma parte de la divergencia de demandas de las aplicaciones emergentes. [2]

---

<sup>⊗</sup> Un “foundry” es una compañía que facilita la fabricación de prototipos MEMS o de circuitos semiconductores. Además, los “foundries” ofrecen procesos de fabricación estandarizados y unos pocos cuentan con servicios de manufactura hechos a la medida del diseño del cliente.

A pesar de cuan excitante y prometedora pueda ser la tecnología MEMS, su realización es invariablemente dependiente de los éxitos económicos. El usuario debe justificar la tecnología en base al valor agregado, incremento de la productividad, o costos de competición, y la fabricación debe mostrar beneficios y utilidades.

No obstante a lo previamente mencionado, el presente trabajo esta motivado por la necesidad de adquirir experiencia en el campo de los MEMS y el interés por determinar posibles puntos de investigación básica en este campo; sin perder de vista el interés mostrado por diversas instituciones de la UNAM y del país para el desarrollo de estos sistemas.

## 1.2 Mercados y Aplicaciones

Actualmente los mercados principales son: los sensores de presión, los sensores inerciales, los sistemas de impresión vía inyección de tinta, dominado por Hewlett-Packard Company de Palo Alto, California, y las pantallas digitales de alta resolución desarrolladas por Texas Instruments de Dallas, Texas. Entre las aplicaciones relativamente nuevas se tienen los sensores de presión en neumáticos, la electrónica inalámbrica y de RF, los componentes de fibra óptica, y los dispositivos para procesamiento de fluidos y microanálisis químico, para diagnósticos médicos, y dosificación de medicamentos. En la tabla 1.1 se muestran ejemplos de aplicaciones para MEMS.

<p><b>Aplicaciones Comerciales</b></p>	<p>Sensores biomédicos invasivos y no-invasivos Instrumentos analíticos bioquímicos miniatura Sistemas cardiacos (marcapasos, catéteres) Sistemas para dosificación de medicinas (insulina, analgésicos) Seguridad en automóviles, frenos y sistemas de suspensión Componentes de fibra óptica e interruptores para telecomunicaciones Sistemas de almacenamiento de datos Electrónica inalámbrica y de RF Sensores distribuidos para mantenimiento y monitoreo Control distribuido de sistemas aerodinámicos e hidrodinámicos</p>
<p><b>Aplicaciones Militares</b></p>	<p>Sistemas inerciales para navegación personal Componentes integrados microoptomecánicos para sistemas de reconocimiento de individuos Dispositivos de baja potencia y alta densidad para almacenamiento de datos Procesamiento de señales electromecánicas para comunicaciones inalámbricas de baja potencia Sistemas miniatura de fluidos para una pronta detección de amenazas de agentes biológicos y químicos Superficies conformables para control aerodinámico, distribuido, de naves aéreas</p>

Tabla 1.1 Ejemplos de áreas de aplicaciones presentes y futuras para MEMS. [2]

Aunque los mercados para MEMS varían considerablemente, todos estos tienen un presente y un futuro en crecimiento, donde se estima un volumen de ventas en muchos billones de

dólares para este 2010. La expectativa de crecimiento es el resultado de las innovaciones técnicas y de la aceptación de esta tecnología por parte de los usuarios finales. Debido a la diversidad en los requerimientos técnicos del usuario final, no existe un solo mercado MEMS, dicho de otra forma, hay una diversidad de mercados, muchos de los cuales son considerados nicho de mercados,<sup>⊗</sup> comparado especialmente a sus parientes los semiconductores. Esta fragmentación de todos los mercados se refleja como un gran número de pequeñas y diversas compañías trabajando en MEMS, como se muestra en la Tabla 1.2.

Tipo de Producto	2002	2007
Microfluidos	1404	2241
MEMS ópticos	702	1826
RF MEMS	39	249
Otros actuadores	117	415
Sensores inerciales	819	1826
Sensores de presión	546	913
Otros sensores	273	830
<b>Total</b>	<b>3900</b>	<b>8300</b>

Tabla 1.2 Análisis y pronóstico del mercado mundial para MEMS (Cifras dadas en millones de dólares). [2]

Una investigación hecha a través de internet en Julio del 2003 revela que, geográficamente, los Estados Unidos y Europa lideran el mundo en la manufactura de productos MEMS, con Japón siguiéndolos, incluyendo corporaciones multinacionales como TRW Novasensor, Analog Devices, Motorola, Honeywell, SensoNor, Melexis, Infineon, y Mitsubishi, así como pequeñas compañías para pruebas, Tabla 1.3.

Región	Numero de Fabricas
Norte América	139
Alemania	34
Francia	20
Reino Unido	14
Benelux	17
Escandinavia	20
Suiza	14
Resto de Europa	10
Japón	41
Resto de Asia	31

Tabla 1.3 Distribución geográfica. [2]

No obstante, la humanidad siempre ha sido bastante cautelosa cuando se acerca a algo nuevo. Este comportamiento se traduce en una baja aceptación de las nuevas tecnologías y productos derivados, así como de su introducción dentro de la sociedad. La aceptación de MEMS no ha sido la excepción.

---

⊗ Por nicho de mercados se entiende como el hueco que se encuentra en un mercado, en relación a las necesidades, deseos, demanda y/o competidores.

En la actualidad, los MEMS y sus productos asociados generan mucho entusiasmo pero no sin escepticismo. Las compañías exploran por vez primera la incorporación de soluciones MEMS en sus sistemas con temor e inquietud. Con muchos sensores micromaquinados de silicio incrustados en muchos autos y en numerosos instrumentos médicos, y con más productos MEMS encontrando su campo dentro de nuestra vida diaria, la barrera psicológica parece ir desapareciendo.

### 1.3 Objetivo y Estructura de este Trabajo

El objetivo del presente trabajo es diseñar, modelar y simular un microacelerómetro, usando tecnología MEMS, para aplicaciones en diversos sectores de la industria y la investigación. La tarea primordial es tener un microdispositivo que cuente con altas prestaciones en cuanto a su desempeño; tales, como: un amplio ancho de banda útil, alta inmunidad al ruido, amplio rango dinámico, buena linealidad y gran versatilidad. Se propone la construcción utilizando un proceso de fabricación comercial MUMPs.

Primeramente, se seleccionará y optimizará una estructura particular para lograr el propósito deseado, siguiendo las reglas y consideraciones de diseño del proceso de fabricación empleado, con ayuda de una paquetería de cómputo para diseño de MEMS, siendo Coventor la que se utilizará. Se analizarán los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas en Coventor, para después determinar si estos satisfacen los objetivos. En caso de no satisfacer los objetivos planteados, se evaluarán los resultados obtenidos para determinar las modificaciones a realizar a la estructura.

Finalmente, la simulación, el análisis y la evaluación de los resultados se realizarán de forma iterativa hasta obtener un diseño que satisfaga de la mejor manera posible los objetivos planteados en el presente trabajo.

En este trabajo, el microacelerómetro a desarrollar será del tipo torsional, capacitivo y vertical, el cual detecta la aceleración aplicada a través del sensado de la capacitancia diferencial entre ambos lados de la masa de prueba. Un acelerómetro, del tipo de sensado de capacitancia diferencial, está compuesto de una masa de prueba, dos resortes torsionales y dos electrodos externos.

A continuación se mencionarán los puntos más importantes que se tratarán durante el desarrollo del presente trabajo, el cual consta de 6 capítulos.

Como se ha observado, en el primer capítulo se hace una breve revisión histórica de la tecnología MEMS, sus campos de aplicación, los productos más importantes, así como algunos de los principales factores que propician o justifican el diseño e implementación de estos dispositivos MEMS.

En el segundo capítulo se mencionan los materiales más utilizados en micromaquinado, así como algunas de las propiedades del silicio y de otros materiales comúnmente empleados en microfabricación; se describen las técnicas básicas para la construcción de este tipo de dispositivos y se abordan algunos procesos de fabricación comerciales o estándar; así como

algunas de las ventajas y desventajas de emplear un proceso de fabricación estándar y no estándar. Por último, se describe de forma amplia el proceso a utilizar en el diseño del microacelerómetro, el cual es el SOIMUMPs

El tercer capítulo se dedica al estudio del acelerómetro como un sistema masa, resorte y amortiguador; así como determinar los parámetros de diseño que debe satisfacer un acelerómetro para lograr un desempeño óptimo, como lo son: el primer modo de vibración, el ancho de banda y el factor de amortiguamiento de la estructura. Además, se revisan las leyes de escalamiento, las cuales son una guía que permite saber qué elementos son importantes en el microdominio.

En el cuarto capítulo se hace una revisión de la fuerza electrostática en las microestructuras, como lo es el efecto *pull-in*; además, se revisan las ventajas que ofrece el sensado capacitivo diferencial, así como algunas de las técnicas utilizadas en este tipo de sensado. También se propone y analiza un circuito electrónico para sensar los cambios en capacitancia del microdispositivo.

En el quinto capítulo, se mencionan las principales especificaciones de un acelerómetro y considerando la teoría vista en capítulos anteriores se define el proceso de fabricación a emplear y se diseña el microacelerómetro, tanto mecánicamente como electrónicamente, basándose en el TXL, previamente desarrollado.

Finalmente, en el sexto capítulo se presentan y comparan los resultados obtenidos durante el presente trabajo, tanto en Coventor como de la teoría previamente estudiada. Por último, se concluye acerca de este trabajo y se mencionan algunos puntos en los cuales habría la necesidad de profundizar.