

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA,
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

PROYECTO DE GRADO PARA LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO EN INGENIERÍA

“Estudio del estado del arte, modelamiento y simulación de
MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems) para el diseño de
un prototipo orientado al área de automatización y control.”

Autores:

Andrea Santana

Gabriela Verdezoto

SANGOLQUÍ - ECUADOR

2011

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente proyecto de grado, “Estudio del estado del arte, modelamiento y simulación de MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems) para el diseño de un prototipo orientado al área de automatización y robótica.”, fue desarrollado en su totalidad por las señoritas Andrea Santana y Gabriela Verdezoto, bajo nuestra dirección.

Atentamente,

Ing. Alejandro Chacón
Director

Ing. Vanessa Vargas
Codirectora

PRÓLOGO

Los Sistemas Micro-electro-mecánicos (MEMS) son dispositivos micrométricos que reúnen las capacidades computacionales, de comunicaciones y de control, e interactúan con el medio exterior. Las ventajas frente a otros dispositivos son el bajo costo, bajo consumo de energía, alto desempeño, confiabilidad, fácil adaptación e integración a sistemas actuales. Por lo tanto, se ha convertido en una de las áreas de más rápido crecimiento de la industria, generando un gran interés en el desarrollo de estos sistemas.

El estudio del estado del arte de los MEMS inicia con la historia de evolución de esta tecnología, elementos constituyentes, arquitectura y, aspectos que describen la importancia científica y el valor económico de este campo de investigación.

El rendimiento de los MEMS depende en gran medida de los materiales, los cuales deben poseer propiedades adecuadas para ser utilizadas en aplicaciones eléctricas, mecánicas, magnéticas, térmicas, ópticas o químicas de acuerdo a las especificaciones de diseño. En general, se usa el silicio como sustrato por sus excelentes propiedades físicas, mecánicas y capacidad para incorporar la funcionalidad electrónica. Sin embargo, se pueden utilizar un sin número de diferentes materiales como los compuestos de silicio, arseniuro de galio, cuarzo, polímeros, cerámicas. Además materiales con un alto potencial de aplicación en la actualidad tales como adhesivos, diamante y compuestos basados en carbono.

En la actualidad la tendencia hacia la miniaturización ha llevado al desarrollo de los dispositivos MEMS. Las razones por las cuales se utilizan estos dispositivos son: mejoras en las capacidades de procesamiento, integración de la electrónica y mecánica sobre un mismo sustrato, robustez y multifuncionalidad. Además de acuerdo al nivel de escalado se pueden mejorar las capacidades o incluso hacer posible aplicaciones que a macro escala son imposibles.

La transducción es la transformación de un tipo de señal o energía en otra de distinta naturaleza. En la actualidad se conocen varias técnicas empleadas en la tecnología MEMS tales como: piezo-resistiva, piezo-eléctrica, capacitiva, óptica, resonante. Estas técnicas relaciona el comportamiento de los materiales y sus propiedades físicas, mecánicas, químicas y eléctricas. Este conocimiento permitirá seleccionar el material más adecuado para cada aplicación.

Los procesos básicos para la producción de todos los dispositivos MEMS son la deposición de capas delgadas, transferencia de un patrón y la remoción de material. Las tres técnicas más utilizadas en la fabricación de MEMS son: LIGA (Litografía, Electrodeposición y Moldeo), micro-maquinado superficial y micro-maquinado volumétrico.

También se realiza una investigación en el desarrollo de micro-sensores; ya que estos dispositivos están adquiriendo gran relevancia por su rendimiento y viabilidad en aplicaciones automotrices, espaciales, médicas, automatización industrial, telecomunicaciones y de consumo. Los principales sensores en el mercado son de Presión, de Torque o Fuerza, Inerciales, de Flujo, Electrónicos e Inteligentes.

Con motivo de ampliar el estudio, se aporta con una descripción de algunos métodos de modelamiento matemático y simulación para el diseño y el análisis de MEMS, con la finalidad de determinar las herramientas adecuadas para la creación del dispositivo MEMS. Adicionalmente para consolidar los fundamentos teóricos y la aplicación de criterios de ingeniería, fomentando la inventiva y la creatividad para el diseño de nuevos dispositivos de alta tecnología, se diseña un Acelerómetro MEMS para aplicaciones automotrices.

Se realiza un análisis de pre-factibilidad para la implementación de un laboratorio de MEMS en la Escuela Politécnica del Ejército que cumpla las normativas necesarias. Se tiene la expectativa que en un futuro cercano se cuente con un laboratorio que tenga equipos de cómputo con un software especializado para diseñar y simular dispositivos MEMS. Además se adquiera una máquina para micro-fabricación de baja escala. La puesta en marcha y el acceso

a estos recursos hará posible en el Ecuador, la fabricación de sensores, actuadores y, diferentes micro-estructuras gracias al aporte investigativo de la Escuela Politécnica del Ejército en esta área.

Dado el avance tecnológico mundial es imprescindible que el Ecuador se fortalezca en el desarrollo de la micro-tecnología. De esta manera, la investigación realizada permite sentar las bases e incentivar la realización de futuros proyectos científicos y tecnológicos para profundizar el conocimiento y desarrollar programas de enseñanza de los MEMS que aporten al desarrollo económico, político y social del país.

ÍNDICE

CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUCCION A LOS MEMS	1
1.1. Historia y roadmap.....	1
1.2. Definición de MEMS	3
1.3. Arquitectura de los MEMS	6
1.4. Estado actual.....	8
1.5. Importancia.....	11
CAPÍTULO II.....	13
2. MATERIALES Y PROPIEDADES.....	13
2.1. Definición de oblea y sustrato.....	13
2.2. El silicio como sustrato	15
2.2.1. Propiedades mecánicas del silicio	19
2.3. Materiales usados en la fabricación de MEMS.....	20
2.3.1. Dióxido de silicio.....	20
2.3.2. Carburo de silicio	21
2.3.3. Nitruro de silicio	22
2.3.4. Silicio poli cristalino.....	22
2.3.5. Arseniuro de galio (GaAs)	24
2.3.6. Cuarzo	25
2.3.7. Polímeros	27
2.3.8. Cristales piezo-eléctricos	29
2.4. Empaquetado de MEMS.....	31
CAPÍTULO III.....	34
3. ESCALAMIENTO	34
3.1. Tendencia a la miniaturización	34
3.2. Escalamiento de sistemas mecánicos.....	37
3.2.1. Definición de los principios de escalamiento.....	37
3.2.2. Ecuaciones de escalamiento.....	38
3.2.3. Sistema de unidades.....	46
3.3. Ejemplos de escalamiento dimensional.....	49

3.3.1. Escalado de la deformación de una viga en voladizo al aplicar una fuerza en el eje z	49
3.3.2. Escalado de un dispositivo en voladizo basado en un sensor inercial	52
3.3.3. Escalado de actuadores electrostáticos.....	54
3.3.4. Escalado de actuadores térmicos	55
CAPÍTULO IV	59
4. TRANSDUCCIÓN.....	59
4.1. Técnica piezo-resistiva	59
4.2. Técnica piezoeléctrica	63
4.3. Técnica capacitiva	68
4.4. Técnica óptica.....	71
4.4.1. Intensidad	73
4.4.2. Fase	74
4.4.3. Longitud de onda	75
4.4.4. Posición espacial	76
4.4.5. Frecuencia.....	78
4.5. Técnicas resonantes.....	79
4.5.1. Mecanismos de activación/transmisión y detección de vibraciones..	82
4.6. Técnicas de actuación.....	90
4.6.1. Técnica electrostática	91
4.6.2. Técnica piezoeléctrica.....	93
4.6.3. Técnica térmica.....	94
4.6.4. Técnica magnética.....	96
CAPÍTULO V	99
5. TÉCNICAS DE MICRO-FABRICACIÓN.....	99
5.1. Introducción al proceso de micro-fabricación	99
5.2. Procesos para la fabricación de MEMS.....	101
5.2.1. Depósito de capas finas.....	103
5.2.2. Litografía	107
5.2.3. Grabado	109
5.3. Tecnologías de micro-fabricación.....	111
5.3.1. LIGA.....	111
5.3.2. Micro-maquinado superficial	113

5.3.3. Micro-maquinado volumétrico	118
5.4. ANÁLISIS COMPARATIVO	120
CAPÍTULO VI	122
6. MODELAMIENTO	122
6.1. Introducción al modelamiento de dispositivos MEMS	122
6.2. Etapas de modelamiento	123
6.2.1. Seleccionar del nivel de modelamiento.....	123
6.2.2. Establecimiento de parámetros y variables.....	124
6.2.3. Selección de métodos para el modelamiento de dispositivos MEMS 127	
6.2.4. Comparación entre los métodos de modelamiento.....	150
6.3. Desafíos para el modelamiento de un dispositivo MEMS.....	152
6.3.1. Accionamiento eléctrico e inestabilidad “pull in”.....	152
6.3.2. Micro-placas accionadas eléctricamente	154
6.3.3. Impactos y fricción	155
6.3.4. Interacción fluido-estructura (FSI “Fluid-Structure Interaction”).....	156
CAPÍTULO VII	157
7. SIMULACIÓN	157
7.1. Introducción a la simulación de dispositivos MEMS	157
7.2. Utilidad de la simulación	158
7.3. Importancia de la simulación en la ingeniería.....	159
7.4. Elementos para realizar una simulación	159
7.4.1. Modelo matemático.....	160
7.4.2. Hardware	160
7.4.3. Software	160
7.5. Modos de simulación	161
7.6. Etapas para realizar un estudio de simulación	164
7.7. Ventajas y desventajas de la simulación	166
7.8. Software de simulación de dispositivos MEMS.....	167
7.8.1. Comsol Multiphysics	167
7.8.2. Convector	170
7.8.3. ANSYS.....	172
7.8.4. MEMSPro.....	175
CAPÍTULO VIII	180

8.	SENSORES.....	180
8.1.	Sensores de presión.....	180
8.1.1.	Sensores de presión de tecnología MEMS	183
8.2.	Sensores de torque o fuerza	191
8.2.1.	Dispositivos resonantes y SAW (“Surface Acoustic Wave”).....	193
8.2.2.	Dispositivos capacitivos	194
8.2.3.	Dispositivos magnéticos.....	195
8.2.4.	Sensores táctiles.....	197
8.3.	Sensores inerciales	198
8.3.1.	Acelerómetros	198
8.3.2.	Giroscopios	204
8.4.	Sensores de flujo.....	205
8.4.1.	Sensores de flujo térmico.....	206
8.4.2.	Sensores de flujo por diferencia de presión	207
8.4.3.	Sensores de flujo por transferencia de fuerza.....	209
8.5.	Sensores inteligentes	213
8.5.1.	Arquitectura general de un sensor inteligente.....	214
8.6.	Laboratorios on-chip.....	215
8.7.	Aplicaciones de los micro-sensores.....	217
	CAPÍTULO IX	219
9.	MICRO-ACTUADORES Y MICRO-ROBOTS	219
9.1.	Micro-actuadores.....	219
9.1.1.	Características funcionales y criterios de selección	220
9.1.2.	Clasificación de los micro-actuadores	222
9.2.	Micro-robots.....	230
9.2.1.	Definición de micro-robots	230
9.2.2.	Utilidad de los micro-robots.....	232
9.2.3.	Fabricación de los micro-robots	233
9.2.4.	Dispositivos micro-robóticos.....	236
9.2.5.	Sistema multi-robot	244
	CAPÍTULO X	249
10.	FUTURO DE LOS MEMS	249
10.1.	Nuevos materiales.....	249
10.2.	Nuevas tendencias de fabricación.....	251

10.2.1. Mecanizado por haz de láser (LBM).....	251
10.2.2. Mecanizado por micro-electroerosión (MEDM).....	252
10.2.3. Mecanizado por haz de electrones (EBM).....	254
10.2.4. Mecanizado por haz de iones focalizados (FIB).....	254
10.2.5. Micro-maquinado de Alta relación de aspecto (HAR).....	255
10.3. Nuevas líneas tecnológicas.....	255
10.3.1. MEMS “novedosos”.....	255
10.3.2. Oportunidades futuras de la industria automotriz.....	260
10.3.3. PCB-MEMS.....	262
10.3.4. Teléfonos móviles.....	265
10.3.5. Bio-MEMS.....	266
10.4. Análisis y proyección de mercado.....	269
10.4.1. Consumo de MEMS en el mercado.....	272
10.4.2. Pronóstico de mercado: campos de aplicación y su crecimiento....	273
10.5. Futuro de las MEMS en la Escuela Politécnica del Ejército.....	274
CAPÍTULO XI.....	276
11. DISEÑO DE UN MEMS.....	276
11.1. Proceso de diseño de un dispositivo MEMS.....	276
11.1.1. Determinar la aplicación y sus requerimientos.....	277
11.1.2. Requerimientos y especificaciones.....	278
11.2. Modelamiento.....	285
11.2.1. Seleccionar el nivel de modelamiento.....	285
11.2.2. Establece los parámetros y sus variables.....	286
11.2.1.3. Seleccionar el método de modelamiento.....	288
11.2.3. Modelamiento matemático analítico.....	288
11.3. Simulación.....	300
11.3.1. Selección del software.....	300
11.3.2. Definición del sistema.....	301
11.3.3. Formulación del modelo.....	301
11.3.4. Colección de datos.....	302
11.3.5. Aplicación del modelo matemático y simulación.....	302
CAPÍTULO XII.....	320
12. LABORATORIO DE MICRO-MAQUINADO.....	320
12.1. Conocimientos previos para implementar un laboratorio MEMS.....	320

12.1.1. Componentes de un laboratorio.....	320
12.1.2. Normas	325
12.2. Análisis de pre-factibilidad del Laboratorio de MEMS	325
12.2.1. Máquinas disponibles en el mercado para la fabricación de dispositivos MEMS	326
12.2.2. Software recomendado para la simulación de MEMS	335
CAPÍTULO XIII	338
13. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	338
13.1. CONCLUSIONES.....	338
13.2. RECOMENDACIONES	340
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	343
ÍNDICE DE FIGURAS.....	354
ÍNDICE DE TABLAS	361
ÍNDICE DE ECUACIONES	366
GLOSARIO	369

CAPÍTULO I

INTRODUCCION A LOS MEMS

Introducción: Este capítulo trata del estudio del estado del arte de los Sistemas Micro-Electro-Mecánicos (MEMS), la historia de evolución de esta tecnología, elementos constituyentes, arquitectura y, aspectos que describen la importancia del análisis de este campo de estudio.

1.1. Historia y roadmap

La microelectrónica surge a partir de la invención de los siguientes dispositivos: el primer transistor unipolar en 1948, el transistor de juntura bipolar (BJT) en 1949 y, el transistor de juntura de efecto de campo (JFET) en 1953. Estos dispositivos son la base de los componentes electrónicos miniaturizados que abrieron el camino a la tecnología de los Circuitos Integrados (CI), los mismos que empezaron a desarrollarse a finales de los años cincuenta gracias a los descubrimientos de Kilby, Noyce, Moore y empresas como Texas Instruments y Fairchild Semiconductor [1].

Los CI son creados para incluir un circuito completo en una sola pastilla de semiconductor denominado chip. De esta manera, se reducen las dimensiones, peso y el costo con relación al número de elementos activos. A partir de la comercialización de los CI en 1961, se formuló la ley de Moore, que en esencia predecía que el número de transistores en un “chip” se duplicaría cada dos años aproximadamente. Lo más sorprendente de esta ley es que fue enunciada en los años 60, y sigue vigente hasta nuestros días y además es la base para las

planificaciones de las industrias de semiconductores. Esta ley se muestra en la Figura 1.1.

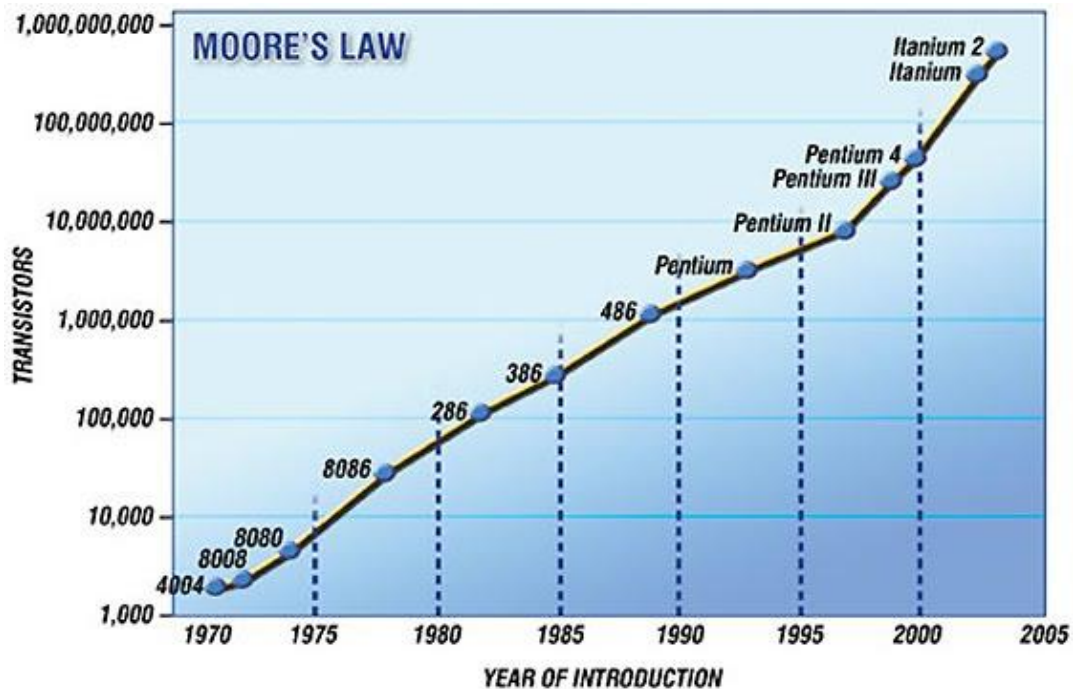


Figura 1.1 Ley de Moore¹

En 1982, el adelanto de los procesos de fabricación de los CI y los avances en el campo de los semiconductores, determinaron que el silicio es un material con excelentes propiedades físicas, mecánicas y con la capacidad para incorporar la funcionalidad electrónica. Por estas características se desarrolló la tecnología micro-electromecánica para una amplia variedad de aplicaciones [2].

En los años noventa, Howe and Muller realizaron investigaciones sobre el proceso de micro-mecanizado con superficie de poli silicio y el uso de esta técnica en la fabricación de MEMS. De esta manera grandes estructuras podrían ser ensambladas sobre sustratos planos, para dar a los MEMS un aspecto en 3 dimensiones. La comercialización de los MEMS empezó en varias industrias que producían partes de automóviles como IC Transducers, Foxboro ICT, Transensory Devices, IC Sensors y Novasensor [3]

¹ Tomado de: Coello H, "Impacto en la economía", Agosto, 2010. [Online]. Disponible <http://helkyncoello.wordpress.com/2008/09/04/como-desarrollar-software-y-no-morir-en-el-intento/> [Accesado: Agosto 6, 2010]

A partir de este momento, el objetivo fue crear sistemas miniaturizados inteligentes, los cuales integren sensores, procesadores o actuadores agrupados en un sustrato de silicio. En la figura 1.2 se presenta un road map para dar una visión general del desarrollo de la tecnología MEMS.

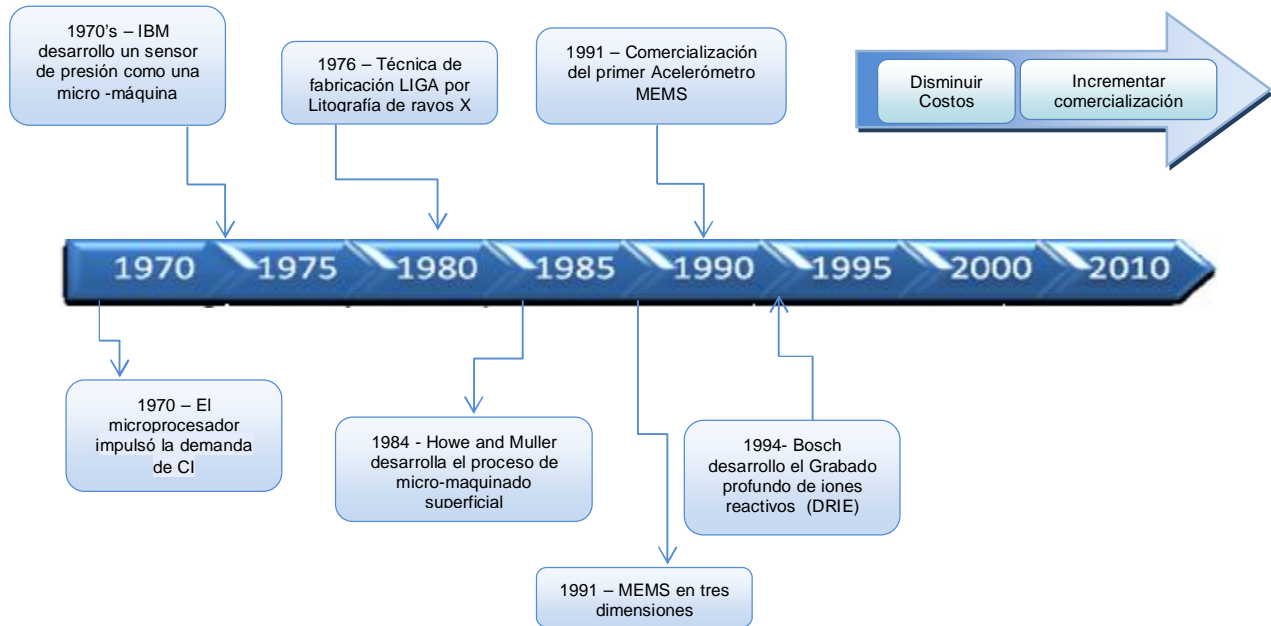


Figura 1.2 Road map de la micro-fabricación

1.2. Definición de MEMS

MEMS significa en inglés “Micro-Electro-Mechanical Systems”, que quiere decir: Sistemas Micro-Electro-Mecánicos. Los MEMS tienen diferentes nombres como: Micro-máquinas en Japón y Tecnología en Micro-Sistemas en Europa [4]. Los MEMS surgen de una mejora en los procesos de fabricación de los CI.

Los MEMS son fabricados en una base de silicio, permitiendo hacer posible la realización de “sistemas complejos en un chip”, los cuales pueden reunir capacidades computacionales, de comunicaciones o de control de micro-sensores y micro-actuadores para interactuar con el medio ambiente o el exterior. Están elaborados con componentes entre 1 a 1000 [um] y, los dispositivos totales miden generalmente cerca de 10 mm.

La Figura 1.3 ayuda a comprender las dimensiones de los dispositivos MEMS al compararlos con elementos de la naturaleza.

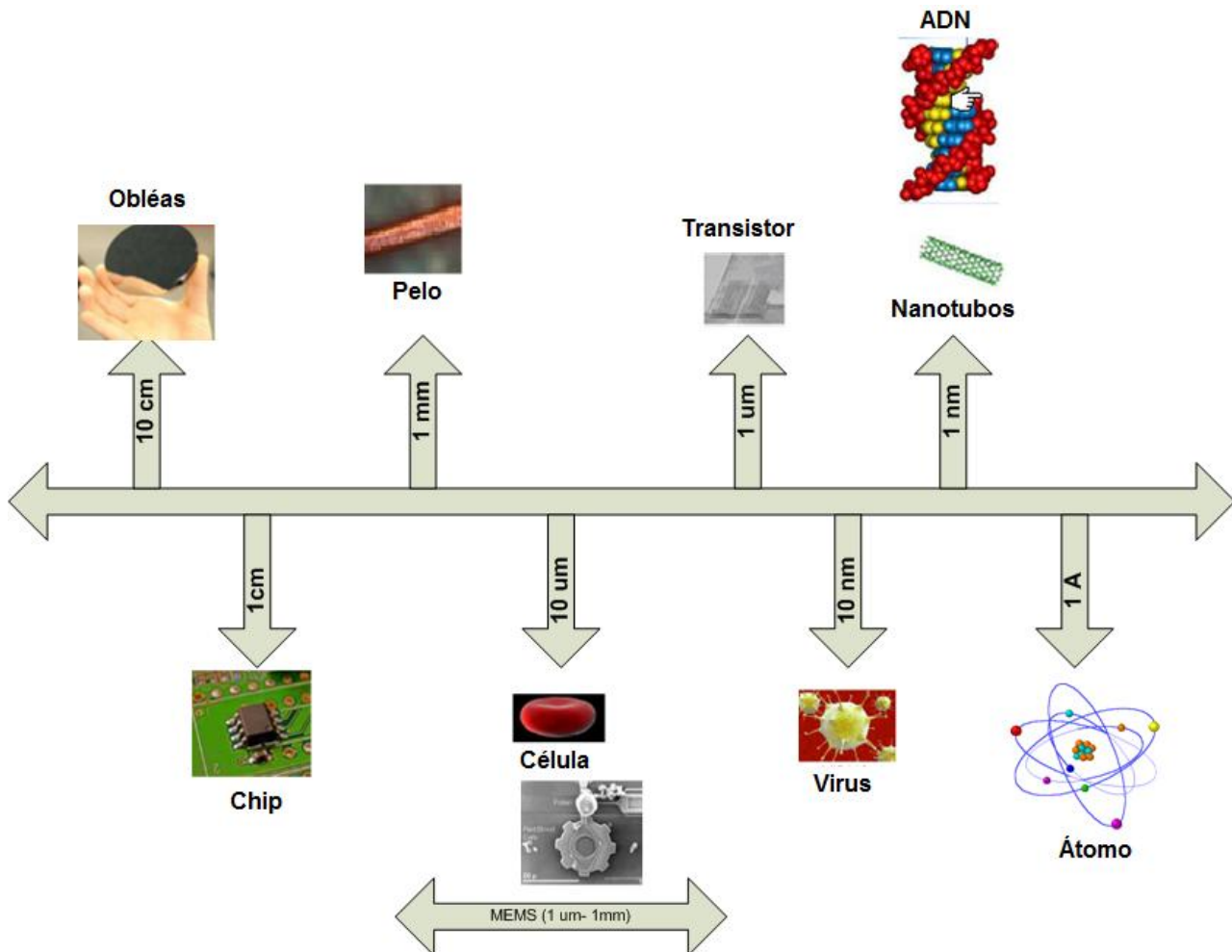


Figura 1.3 Comparación entre el desarrollo tecnológico y la naturaleza en escala métrica

La función principal de los MEMS es medir variables térmicas, eléctricas, magnéticas, biológicas, entre otros, para efectuar una acción en un dispositivo mecánico y controlar alguna variable, como se puede observar en la figura 1.4.

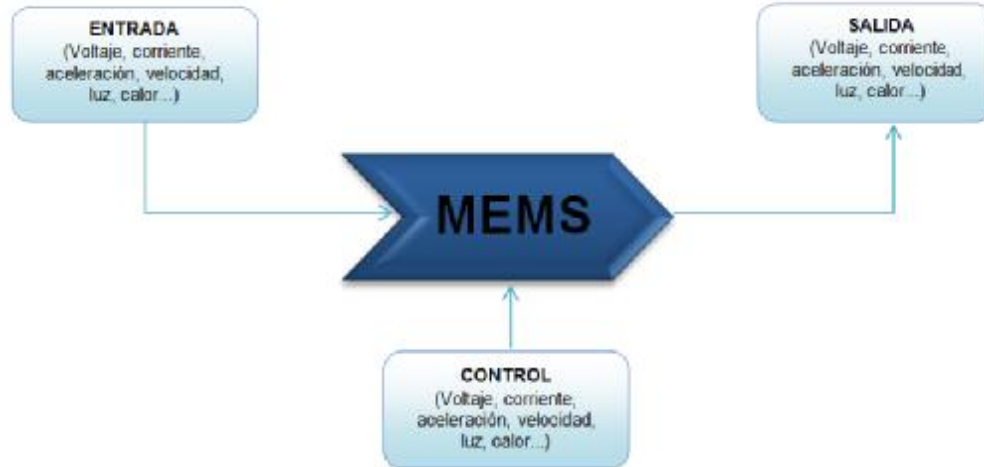


Figura 1.4 Variables de MEMS

En la Figura 1.5 se puede observar la tecnología MEMS en el diseño de un sensor de gas compuesto de una película sensible MOS (Semiconductor de óxido metálico) y SnO_2 (Óxido de estaño). Las ventajas de este tipo de sensor, respecto a los sensores tradicionales son: el bajo consumo de potencia eléctrica (del orden de 50 [mW] en relación con los de 2 [W]) y la baja inercia térmica debida al micro-calefactor montado sobre una membrana de 200 [nm] de Si_3N_4 (Nitruro de silicio). [5].

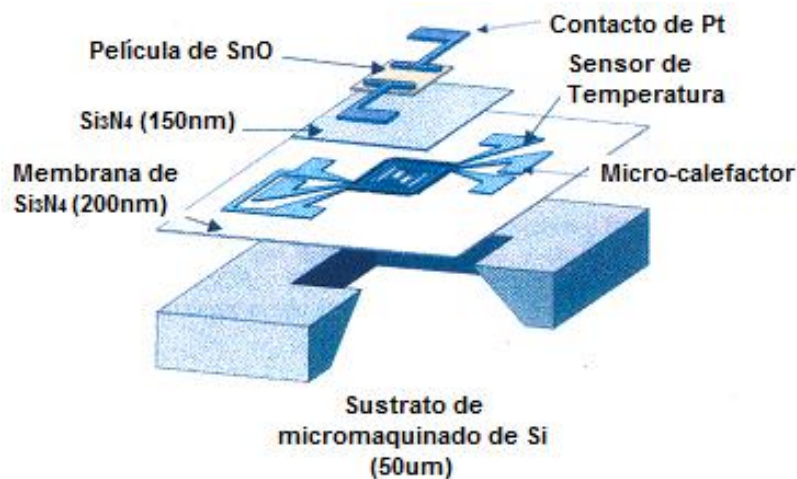


Figura 1.5 Sensor de gas MEMS²

² R.Marabini, C. Arrieta, S. Reich, M. Negri, L. Dori, J. Gimenez, A. Lamagna, "Preliminary results of a first prototype of an e-nose for indoor air quality control", IBERSENSOR2000, 2000

1.3. Arquitectura de los MEMS

Los MEMS pueden estar formados por uno o varios elementos mecánicos, sensores o actuadores, fabricados en una base de silicio similar a los CIs. La tecnología MEMS posee arquitecturas específicas para cada aplicación, dentro de las cuales se pueden integrar los siguientes elementos.

- Actuadores o sensores controlados por voltaje, corriente o por un campo electromagnético;
- Procesador y memoria,
- Buses de comunicación
- Entrada(s) y salida(s) del dispositivo
- Estructuras inteligentes
- Antenas [6].

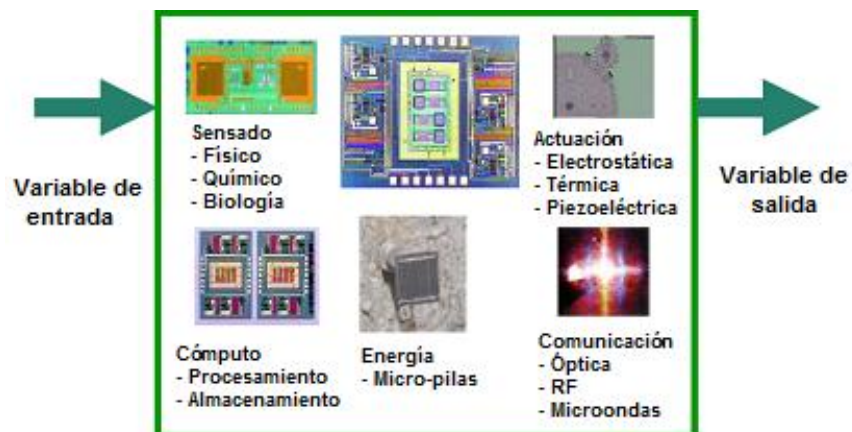


Figura 1.6 Elementos de una MEMS

El termino nodo hace refiere a los elementos que pueden conformar un MEMS. En la arquitectura de MEMS podemos reconocer dos tipos de nodos: el nodo primario y el nodo de gran escala los cuales se puede observar en la figura 1.7. El nodo primario es un elemento elemental micro-electromecánico que solo cumple las funciones de actuador o sensor. Mientras que el nodo de gran escala pueden integrar un procesador (toma de decisiones, control, procesamiento de señales y, capacidades de adquisición de datos), memorias, dispositivos de E / S,

bus de comunicación, circuitos, antenas, actuadores, sensores y, estructuras inteligentes [7].

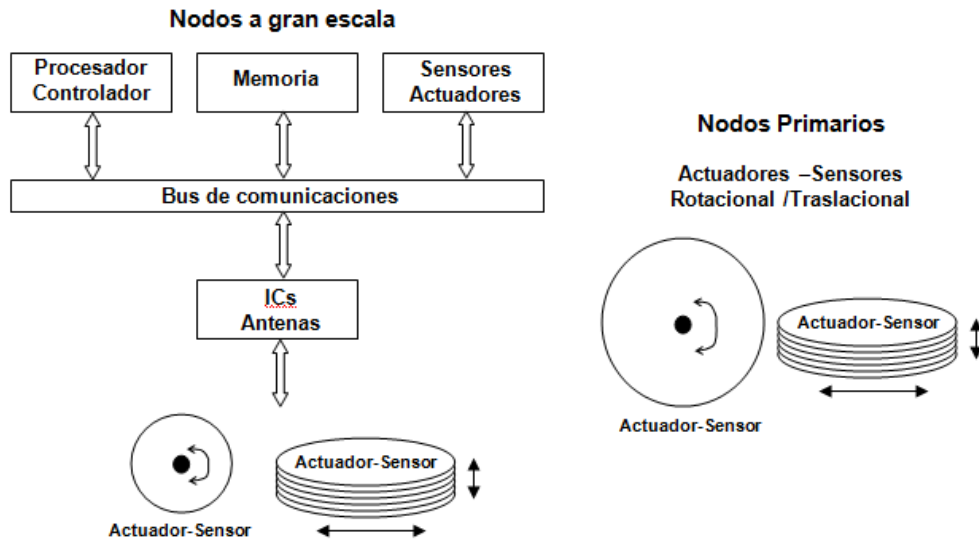


Figura 1.7 Nodos de gran escala y primarios

Estos elementos se relacionan a través de una arquitectura, la cual indica la distribución lógica de los componentes, dicha arquitectura puede ser lineal, en estrella, en anillo, en hipercubo, o una combinación de las anteriores. A continuación en la figura 1.8 se puede observar los distintos tipos de arquitecturas:

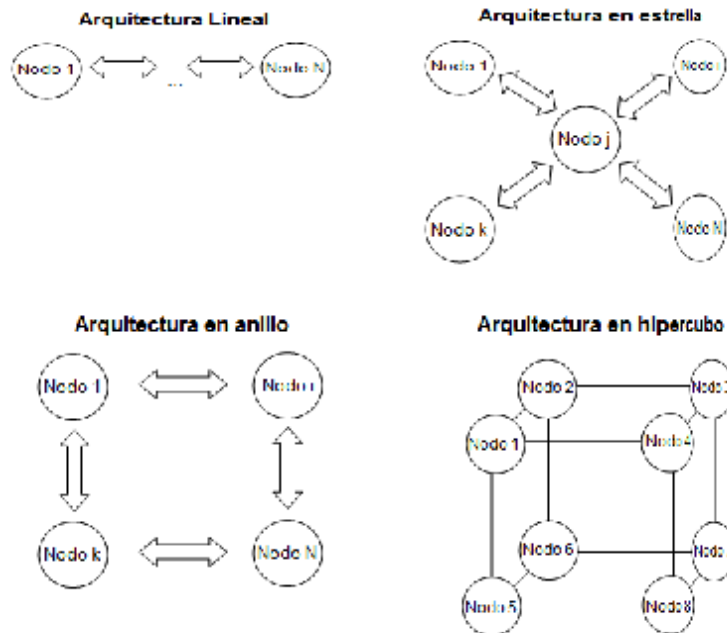


Figura 1.8 Tipo de arquitecturas MEMS

1.4. Estado actual

MEMS se ha convertido en una de las áreas tecnológicas de más rápido crecimiento de la industria y su rango de aplicaciones crece constantemente, generando un gran interés en el desarrollo de estos sistemas e impulsando de esta manera el mercado.

Los dispositivos MEMS presentan ciertas ventajas frente a otros dispositivos como son:

- Bajo costo
- Bajo consumo de energía
- Pequeñas dimensiones
- Alto desempeño
- Confiabilidad
- Fácil adaptación e integración a sistemas actuales
- Larga vida del producto.

La mayoría de los desarrollos de la microelectrónica han tenido su origen en países del primer mundo y/o países del lejano oriente. A nivel mundial el desarrollo de los MEMS se incrementa rápidamente, según el análisis de los siguientes puntos:

- a) La microelectrónica se está convirtiendo en el mercado más grande comercialmente. Cada estado puede intentar compartir y beneficiarse de esta enorme situación.

Según los reportes de la BBC, el mercado mundial de MEMS y equipos de producción fue de US \$ 7.2 billones en 2008, y US \$ 7.6 billones en el 2009. Este mercado alcanzará US \$13.2 dólares en 2014, una tasa de crecimiento compuesto anual (CAGR) del 11,8% entre 2009 y 2014, como se ilustra en la figura 1.9.

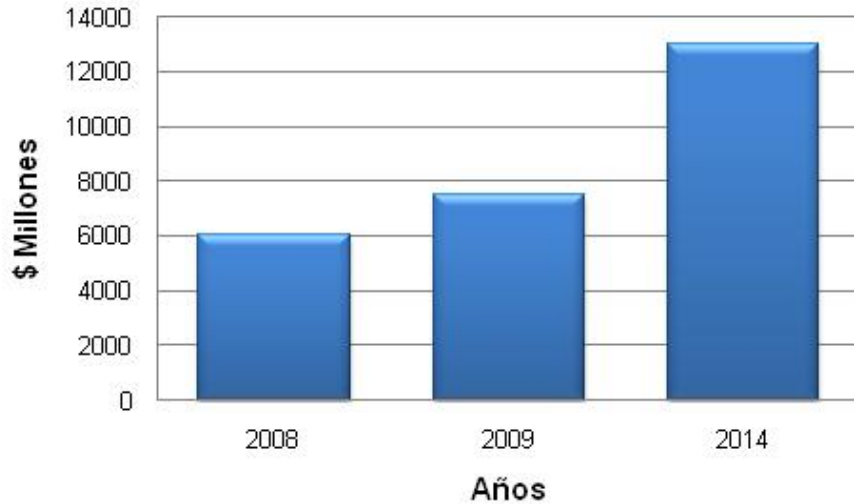


Figura 1.9 Proyección en el mercado de los MEMS, 2008-2014 ³

En la figura 1.10 se puede apreciar el mercado mundial de micro-sensores el cual aumento de \$ 2,7 billones en el 2007 a un estimado de \$ 3,2 billones a finales de 2008. Según las proyecciones llegará a 8,4 billones dólares en 2013, con una tasa de crecimiento compuesto anual (CAGR) del 21,3%. Para el 2013, los MEMS representarán un 72,8% del mercado de micro-sensores y, los Biochips aumentarán al 21,6%.

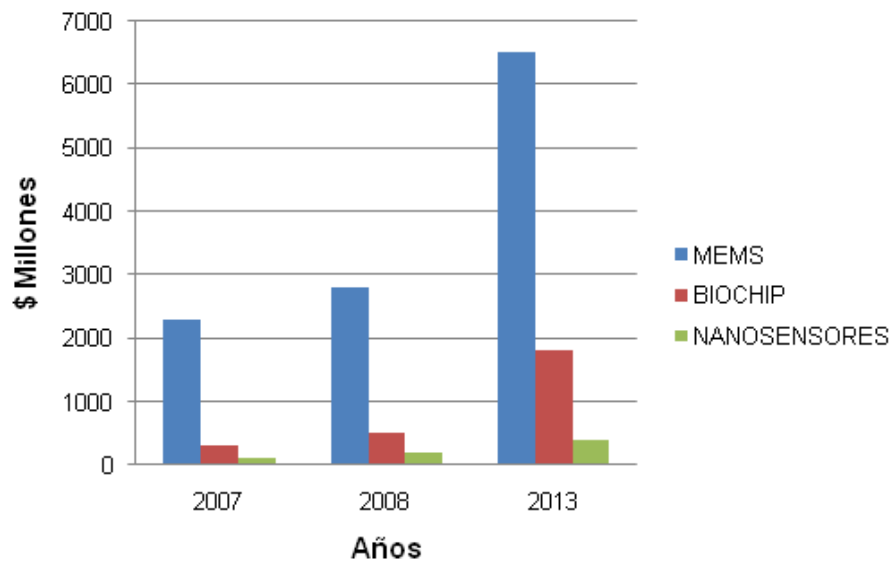


Figura 1.10 Proyección del mercado de los Micro-sensores ⁴

³ A. McWilliams, "Semiconductor Manufacturing: Microelectromechanical Systems (MEMS) Technology: Current and Future Markets," BBC Research, Report SMC051C, 2010. [Online]. Disponible: <http://www.bccresearch.com/report/SMC051C.html>. [Accesado: Agosto 31, 2010].

- b) La electrónica está penetrando en la mayoría de las actividades humanas. En el documento “Market Analysis for MEMS and Microsystems III”, de NEXUS se indica la consolidación de los sensores y actuadores basados en micro-tecnologías en aplicaciones informáticas como cabezales de lectura/escritura en impresoras. Adicionalmente crean nuevas oportunidades en áreas como micrófonos, memorias, fuentes de micro-energía y refrigeradores de chips. Por otra parte, las investigaciones de mercado en el sector automotriz tendrá un gran campo de aplicación para los dispositivos de seguridad, incluyendo airbags y sistemas de monitorización de presión de ruedas. [8]
- c) Las técnicas de micro-fabricación pueden ser aplicadas a otros dispositivos además de los electrónicos (sensores basados en micro-fluidos, ópticos, médicos, entre otros).

El incremento en el número de dispositivos, tecnologías y aplicaciones ha expandido el entorno de desarrollo de los MEMS. En el contexto de la microelectrónica, los requisitos actuales para la transferencia de patrones a materiales empleados en la fabricación de dispositivos son cada vez más rigurosos. Además, los requisitos de los procesos de grabado para MEMS son aún más estrictos. Estos demandan estructuras con alta selectividad de grabado, un control de la pendiente de las paredes de la estructura y una técnica de enmascaramiento compatible con la tecnología de CI. [2]

Las industrias aeroespacial y automovilística utilizan de forma generalizada componentes micro-mecanizados como sensores de presión y aceleración. Además los micro-sistemas se usan extensamente en un amplio rango de bienes manufacturados en varios sectores de la industria y la biomedicina. Compañías como Intel, trabajan arduamente hacia el desarrollo de conexiones ópticas para ser utilizados en los CI, operando en el rango de los terahercios. Al respecto se encuentra en estudio detectores en base de silicio para longitudes de onda de hasta 1.55 [μm], operando a frecuencias de hasta 45 [GHz]. [9]

⁴ A. McWilliams, “Instrumentation & Sensors: Microsensors: MEMS, Biosensors and Nanosensors,” BBC Research, Report IAS027A, 2008. [Online]. Disponible: <http://www.bccresearch.com/report/IAS027A.html>. [Accesado: Agosto 31, 2010].

Sin embargo, en el Ecuador no se han realizados estudios sobre MEMS, siendo necesario aplicar algunas medidas y acciones con la finalidad de difundir esta tecnología ofreciendo programas educativos multidisciplinarios en este campo de estudio.

1.5. Importancia

Los MEMS tiene un gran interés científico y de valor económico al punto de presentar un nuevo cambio de paradigma en las reglas de la tecnología y la economía global porque el mercado de esos componentes crece de manera exponencial, por lo cual nuestro país debe ingresar al desarrollo de estas micro-tecnologías.

La revolución tecnológica ha provocado que la microelectrónica sea un área estratégica para la innovación y competitividad industrial, donde grandes esfuerzos deben realizarse para aprovechar las oportunidades que nos ofrece. La tendencia hacia la miniaturización está llevando al desarrollo de dispositivos sofisticados, cuyo impacto en aplicaciones industriales y repercusión social podría ser muy fuerte.

A través de la interacción y experimentación con los distintos recursos educativos es necesario promover el interés y fortalecer los conocimientos en este campo. Esta acción permitirá una penetración en multitud de sectores como: automoción, aeronáutica, aeroespacial, la industria de las telecomunicaciones y, la tecnología biomédica. El avance tecnológico mundial y la globalización de los mercados hacen necesario fortalecer en el Ecuador el desarrollo del área tecnológica y específicamente el campo de la micro-electrónica para sentar las bases científico-tecnológicas, por las siguientes razones:

- La micro-fabricación no es mágica, pero de hecho, es factible en Ecuador.
- La micro-fabricación no solo es necesaria para la elaboración de microprocesadores y memorias.

- Existe un buen número de nichos de mercado.
- Nuevos tipos de dispositivos micro-estructurados pueden liderar los mercados.
- Un incremento en el apareamiento de nuevas industrias.
- Un incremento en el interés de los grandes corporativos para establecer plantas de micro-fabricación en la región, motivados por la disposición de recursos humanos altamente calificados.
- Posibilidad para proporcionar servicios de ingeniería alrededor del mundo, basado en un incremento de la economía global y disponibilidad eficiente de nuevas redes de comunicación.

Al estimular la comprensión de los MEMS en un ambiente donde se fomenta la inventiva y la creatividad para el diseño de nuevos dispositivos de alta tecnología, permitirá a los estudiantes y profesionales estar altamente capacitados para poder contribuir al desarrollo sustentado de la industria de la micro-fabricación a través de la generación, apropiación, innovación y actualización de tecnología.

CAPÍTULO II

MATERIALES Y PROPIEDADES

Introducción: El rendimiento de los MEMS depende en gran medida de los materiales, los cuales deben poseer propiedades adecuadas para ser utilizadas en aplicaciones eléctricas, mecánicas, magnéticas, térmicas, ópticas o químicas de acuerdo a las especificaciones de diseño. En general, se usa el silicio como sustrato por sus excelentes propiedades físicas, mecánicas y capacidad para incorporar la funcionalidad electrónica. Sin embargo, se pueden utilizar un sin número de diferentes materiales como los dióxido de silicio, carburo de silicio, nitruro de silicio, silicio poli cristalino, el arseniuro de galio, cuarzo, polímeros, y cristales piezoeléctricos; dependiendo del tipo de dispositivo a crearse y el sector comercial donde van a operar. Es precisamente el estudio de estos el objeto del presente capítulo. Además, se hablará acerca del encapsulado de un MEMS, su importancia y utilidad.

2.1. Definición de oblea y sustrato

La oblea es un disco obtenido al cortar una barra cilíndrica (lingote) de determinado material. Las obleas pueden ser de silicio o de otro material cristalino como el cuarzo o el arseniuro de galio. En la figura 2.1 se puede observar una oblea.

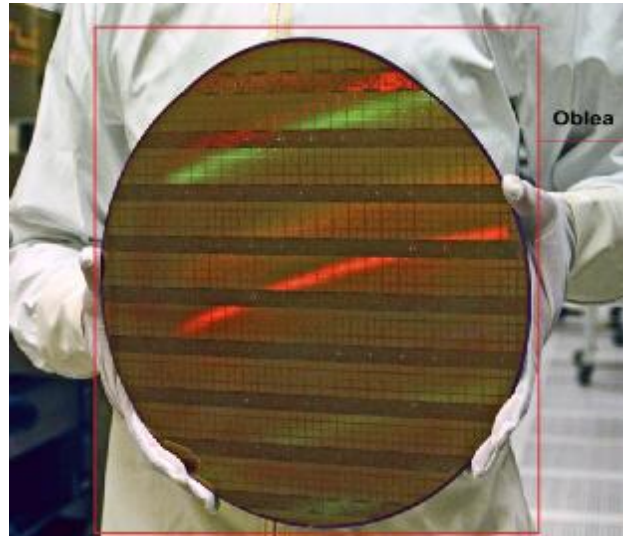


Figura 2.1 Oblea⁵

Un sustrato es un objeto plano macroscópico sobre el cual se llevará a cabo el proceso de micro-fabricación. En los microsistemas, un sustrato sirve con un propósito adicional: actuar como transductor de la señal o ayudar a otros transductores a convertir las acciones mecánicas en salidas eléctricas o viceversa.

Existen dos tipos de materiales de sustrato utilizado en lo MEMS:

1. Material de sustrato activo
2. Material de sustrato pasivo

1. Material de sustrato activo: Es un semiconductor. Se utiliza para los sensores, actuadores u otros componentes activos de los MEMS. A esta clasificación pertenecen: el silicio, el arseniuro de galio, germanio, y cuarzo. Han sido seleccionados como sustratos activos principalmente por: la estabilidad dimensional, y relativa insensibilidad a las condiciones ambientales. La estabilidad dimensional es un requisito crítico para los sensores y actuadores con alta precisión. En la tabla 2.1 se puede observar la resistividad eléctrica de estos elementos:

⁵ Tomado de: Intel Corporation, "Intel News Release", Santa Clara, California, Jan. 25, 2006. [Online] Disponible: <http://www.intel.com/pressroom/archive/releases/2006/20060125comp.htm>

MATERIALES	RESISTIVIDAD ELÉCTRICA APROXIMADA ρ , [Ω -cm]
Germanio (Ge)	$10^{-3} - 10^{1.5}$
Silicio (Si)	$10^{-3} - 10^{4.5}$
Arsénico de galio (GaAs)	$10^{-3} - 10^8$
Fósforo de galio (GaP)	$10^{-2} - 10^{6.5}$
Cuarzo	10^{18}

Tabla 2.1 Resistividad eléctrica típica de los semiconductores

2. **Material de sustrato pasivo:** Suele ser una cerámica (alúmina) o polímeros (plásticos). Se utiliza para la realización de los circuitos conocidos con el nombre de híbridos, en los cuales los chips de silicio se sueldan en pistas metálicas en el sustrato aislante y sobre estos se depositan películas gruesas o finas para la realización de otros componentes pasivos como son resistencias o condensadores

2.2. El silicio como sustrato

Para utilizar el silicio como material de sustrato en la fabricación de MEMS, este debe ser puro en forma de cristal. El Czochralski (CZ) parece ser el método más popular que se ha desarrollado para la producción de cristal de silicio puro.

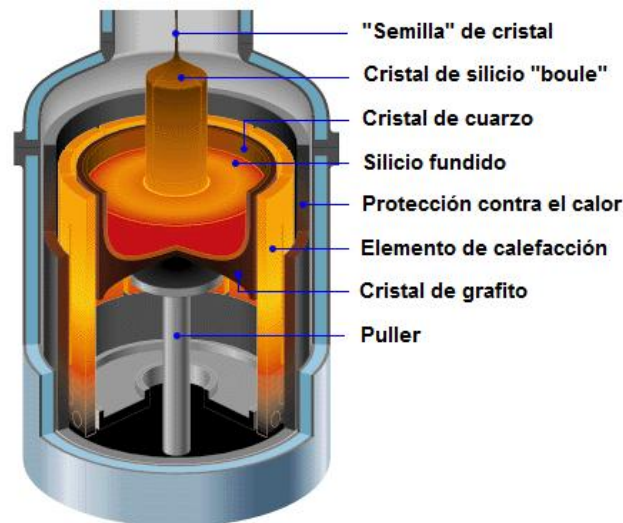


Figura 2.2 Horno utilizado en el método Czochralski para el cultivo de mono cristales⁶

⁶ Tomado de: Varios autores, "Así se fabrican las obleas de silicio para hacer microchips", 7 de octubre 2010. [Online] Disponible: <http://www.migui.com/ciencias/quimica/asi-se-fabrican-las-obleas-de-silicio-para-hacer-microchips.html>

El silicio en bruto, en forma de cuarcita se funde en un crisol de cuarzo, con el carbono (carbón, coque, astillas de madera, entre otros). El crisol es colocado en un horno de alta temperatura como se muestra en la Figura 2.2.

Una "semilla" de cristal, que se adjunta en la punta de un extractor ("puller"), se pone en contacto con el silicio fundido para formar un cristal más grande. Este es lentamente sacado a lo largo de una continua deposición de silicio fundido, el cual se derrite y se condensa en un gran lingote ("boule") en forma de silicio mono cristal. La figura 2.3 muestra un ejemplo de lo que produce este método.



Figura 2.3 Lingote de silicio mono cristal a 300 mm en un dispositivo de manipulación de materiales⁷

El lingote de cristal de silicio producido por el método CZ se tritura a un círculo perfecto en su superficie exterior. A continuación, se realiza rebanadas delgadas para formar los discos del espesor deseado por sierras de diamante fino, estos discos delgados son pulidos para formar los wafers.

⁷ Tomado de: Tai-Ran Hsu, "MEMS and microsystems: design, manufacture, and nanoscale engineering", Second Edition, 2008

Lingotes circulares de cristal de silicio puro son producidos por esta técnica en tres tamaños estándar:

- 100 [mm] (4 pulgadas),
- 150 [mm] (6 pulgadas) y
- 200 [mm] (8 pulgadas) en diámetro.

El diámetro de los lingotes varía entre 100 [mm] y 300 [mm]. En el estándar industrial el tamaño del wafer y espesores son las siguientes:

- 100 [mm] (4 pulgadas) de diámetro - 500 [m] de espesor
- 150 [mm] (6 pulgadas) de diámetro - 750 [m] de espesor
- 200 [mm] (8 pulgadas) de diámetro - 1 [mm] de grosor
- 300 [mm] (12 pulgadas) de diámetro - 750 [m] de espesor (provisional)

Los sustratos de silicio a menudo llevan cargas eléctricas, ya sea en determinadas zonas designadas o en todo el sustrato. El proceso de colocar las cargas eléctricas se conoce como dopaje p o n. Los dopantes comunes tipo n en un sustrato de silicio son el fósforo, arsénico y antimonio, mientras que el boro es el dopante tipo p más común [10].

El silicio tiene una estructura cristalina. La Figura 2.4 muestra un modelo tridimensional de esta. Dicha distribución tiene una cara cúbica centrada (FCC) de una celda unitaria. Una celda unitaria consiste en un arreglo de átomos situados en ubicaciones fijas definidas por líneas imaginarias denominada red.

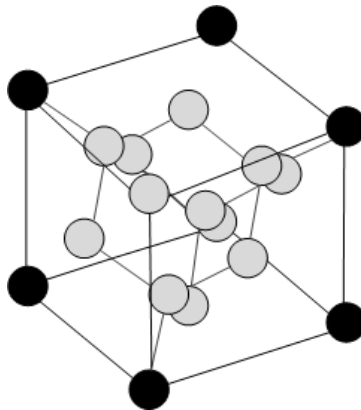


Figura 2.4 Estructura de un cristal de silicio

Existen cuatro átomos adicionales en el interior de la estructura FCC, que forman una célula sub-cúbica tipo diamante como se ilustra en la Figura 2.5. En una célula de silicio, la unidad cuenta con 18 átomos, distribuidos de la siguiente manera: 8 átomos en las esquinas más 6 átomos en las caras y otros 4 átomos de interior.

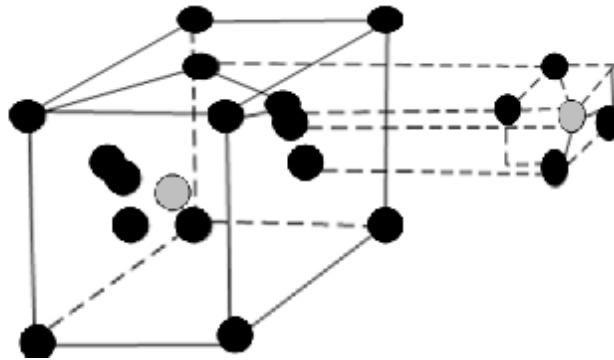


Figura 2.5 Célula sub-cúbica de una red de diamantes en un cristal de silicio

Se puede observar el cristal de silicio como capas apiladas en cubos repetidos. Cada cubo tiene un átomo en cada esquina y en el centro de cada cara. Estos cubos están entrelazados con cuatro cubos vecinos. Debido a la distancia asimétrica y no uniforme entre los átomos, las características térmicas, físicas y mecánicas deben ser comprendidas para incrementar los beneficios de la manipulación y fabricación. Estas características de los materiales dependen de la orientación y, se pueden expresar mediante el uso de los índices de Miller, siendo la notación cristalográfica (números enteros) que describe planos y direcciones respecto de un sistema de referencia cristalino definido.

El silicio mono-cristalino se utiliza por las siguientes razones:

- El silicio es un material estructural casi ideal. Tiene aproximadamente el mismo módulo de Young (coeficiente de elasticidad del material) como el acero (alrededor de 2×10^5 [MPa]), pero es tan ligero como el aluminio, con una densidad de masa de alrededor de $2,3$ [g/cm^3]. Los materiales con un alto módulo de Young pueden mantener una mejor relación lineal entre la carga aplicada y las deformaciones inducidas.

- Tiene un punto de fusión a 1400 [°C], dos veces más alta comparada con la de aluminio. Este alto punto de fusión hace de silicio dimensionalmente estable incluso a temperaturas elevadas.
- Su coeficiente de expansión térmica es de aproximadamente 8 veces más pequeño comparada con el acero, y 10 veces menor al del aluminio.
- Los “wafers” de silicio son muy planos y aceptan los recubrimientos y capas adicionales de película delgada para la construcción de la geometría micro-estructural o conductores de la electricidad.
- Hay una mayor flexibilidad en el diseño y la fabricación con silicio, los tratamientos y procesos de fabricación están bien establecidos y documentados [1].

2.2.1. Propiedades mecánicas del silicio

El silicio es un material elástico sin plasticidad o deslizamiento inferior a 800 ° C. Estas características únicas lo convierten en un material ideal para la detección y activación en los microsistemas. Sin embargo, es un material frágil, debido a la poca resistencia a cargas de impacto; lo cual debe ser considerado en el diseño. Los sustratos de silicio son anisótropos; esto significa que presentan más de un índice de refracción de la luz en función de la dirección de polarización de las ondas luminosas. En la Tabla 2.2 se detallan las propiedades del silicio:

MATERIAL	$\rho_y,$ 10 ⁹ [N/m ²]	$E,$ 10 ¹¹ [N/m ²]	$\rho,$ [g/cm ³]	$c,$ [J/g.°C]	$k,$ [W/cm.°C]	$\alpha,$ [10 ⁻⁶ /°C]	$T_M,$ [°C]
Si	7.00	1.90	2.30	0.70	1.57	2.33	1400

Leyenda: ρ_y = “yield strength”, E = módulo de Young, ρ = densidad de masa, c =calor específico, k = conductividad térmica, α = coeficiente de expansión térmica, T_M = punto de fusión

Tabla 2.2 Propiedades mecánicas y termofísicas del silicio⁸

⁸ Tomado de: Marc Madou , “Principal source for semiconductor material properties: Fundamentals of Microfabrication”, CRC Press, 1997

2.3. Materiales usados en la fabricación de MEMS

Existen varios materiales utilizados en la fabricación de MEMS como son:

1. Dióxido de silicio (SiO_2)
2. Carburo de silicio (SiC)
3. Nitruro de silicio (Si_3N_4)
4. Silicio poli cristalino
5. Arseniuro de Galio (GaAs)
6. Cuarzo
7. Polímeros
8. Cristales piezoeléctricos

A continuación se dará un breve vistazo a cada uno de estos compuestos y las funciones:

2.3.1. Dióxido de silicio

Hay 3 usos principales de óxido de silicio en los MEMS:

- Como aislante térmico y eléctrico,
- Como una máscara en el grabado de sustratos de silicio
- Como una capa en micro-mecanizado de superficie.

El óxido de silicio tiene mayor resistencia. Las propiedades más importantes del óxido de silicio están listadas en la Tabla 2.3 [10].

PROPIEDADES	VALOR
Densidad, [g/cm^3]	2.27
Resistividad, [$\Omega\text{-cm}$]	$\geq 10^{16}$
Permitividad relativa	3.9
Punto de fusión, [$^{\circ}\text{C}$]	~ 1700
Calor específico, [$\text{J}/\text{g}^{\circ}\text{C}$]	1.0

PROPIEDADES	VALOR
Conductividad térmica, [W/cm-°C]	0.014
Coefficiente de expansión térmica,[ppm/ °C]	0.5

Tabla 2.3 Propiedades del SiO₂⁹

2.3.2. Carburo de silicio

El carburo de silicio es un subproducto en el proceso de producción de silicio mono cristalino. La principal aplicación de carburo de silicio (SiC) en MEMS es su estabilidad dimensional y química a altas temperaturas. Tiene una resistencia muy fuerte a la oxidación, incluso a temperaturas muy altas. Películas delgadas de carburo de silicio a menudo se depositan sobre los componentes de MEMS para protegerlos de temperaturas extremas. Otro de los atractivos de la utilización de carburo de silicio en MEMS, es el grabado en seco con máscaras de aluminio. La película patrón de SiC se puede utilizar como una capa de protección en el micro-maquinado para el sustrato de silicio profundo, el carburo de silicio puede resistir grabadores (“etchants”) comunes, como KOH (hidróxido de potasio) y HF (ácido fluorhídrico).

En la tabla 2.4 se pueden encontrar las principales propiedades de este compuesto:

MATERIAL	ρ_y , [10 ⁹ N/ m ²]	E, [10 ¹¹ N/ m ²]	ρ , [g/cm ³]	c, [J/g.°C]	k, [W/cm.°C]	α , [10 ⁻⁶ / °C]	T _M , [°C]
SiC	21.00	7.00	3.20	0.67	3.50	3.30	2300

Leyenda: ρ_y = “yield strength”, E= módulo de Young, ρ = densidad de masa, c=calor específico, k= conductividad térmica, α = coeficiente de expansión térmica, T_M= punto de fusión

Tabla 2.4 Propiedades mecánicas y termofísicas del carburo de silicio¹⁰

⁹ Tomado de: Tai-Ran Hsu, “MEMS and microsystems: design, manufacture, and nanoscale engineering”, Second Edition, 2008

¹⁰ Tomado de: Marc Madou, “Principal source for semiconductor material properties: Fundamentals of Microfabrication”, CRC Press, 1997

2.3.3. Nitruro de silicio

El nitruro de silicio (Si_3N_4) es una sustancia dura, sólida, la cual se obtiene por la reacción directa entre silicio y nitrógeno a temperaturas altas. Tiene propiedades superiores frente a los compuestos de silicio mencionados en los anteriores puntos, lo que impulsan su uso en la fabricación de MEMS, las mismas que son enumeradas en la tabla 2.5.

PROPIEDADES	LPCVD	PECVD
Temperatura de deposición [°C]	700–800	250–350
Densidad [g/cm^3]	2.9–3.2	2.4–2.8
Capa de calidad	Excelente	Pobre
Permitividad relativa	6–7	6–9
Resistividad [$\Omega\text{-cm}$]	10^{16}	$10^6\text{--}10^{15}$
Índice de refracción	2.01	1.8–2.5
Coeficiente de Poisson	0.27	
Módulo de Young [GPa]	385	
Coeficiente de expansión térmica [$\text{ppm}/^\circ\text{C}$]	1.6	

Leyenda: LPCVD (Deposición de vapor químico a baja presión) y PECVD (Deposición de vapor químico mejorada de plasma)

Tabla 2.5 Propiedades del nitruro de silicio¹¹

Las aplicaciones del nitruro de silicio incluyen guías de onda ópticas, encapsulantes para prevenir la difusión del agua y otros líquidos tóxicos en el sustrato para evitar la corrosión e inestabilidad. También se usa como aislantes de alta resistencia eléctrica y máscaras de implantación iónica.

2.3.4. Silicio poli cristalino

El silicio poli cristalino o poli silicio está formado por pequeños cristales de silicio [11]. Es un material clave en la fabricación de sensores, pero no sólo como material estructural del MEMS sino también como material sensor.

¹¹ Tomado de: Tai-Ran Hsu, "MEMS and microsystems: design, manufacture, and nanoscale engineering", Second Edition, 2008

El poli silicio presenta un factor de galga (cociente entre la resistencia eléctrica y la tensión ϵ) menor al del silicio mono cristalino, y mayor al de los metales. Por ello, este material ha sido utilizado con frecuencia en la fabricación de piezo-resistencias sobre sustratos aislantes en sensores de presión, acelerómetros o resonadores [12]. En dichas aplicaciones se utiliza el poli silicio en forma de tiras delgadas tal como se ilustra en la Figura 2.6.

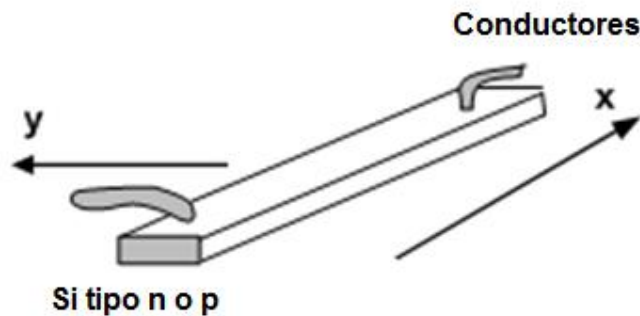


Figura 2.6 Calibradores de tensión de silicio

Una desventaja importante del silicio piezo-resistor es la dependencia a la temperatura. La sensibilidad de piezo-resistividad a la tensión aplicada se deteriora rápidamente con el aumento de la temperatura. La Tabla 2.6 presenta la variación de los coeficientes de piezo-resistividad con referencia a los a temperatura ambiente [10].

CONCENTRACIÓN DE DOPAJE [$10^{18}/\text{cm}^3$]	TIPO p TCR % por [$^{\circ}\text{C}$]	TIPO p TCP % por [$^{\circ}\text{C}$]	TIPO n TCR % por [$^{\circ}\text{C}$]	TIPO n TCP % por [$^{\circ}\text{C}$]
5	0.0	-0.27	0.01	-0.28
10	0.01	-0.27	0.05	-0.27
30	0.06	-0.18	0.09	-0.18
100	0.17	-0.16	0.19	-0.12

*TCR = coeficiente de temperatura de la resistencia, TCP= coeficiente de temperatura de piezoresistividad

Tabla 2.6 Temperatura de la dependencia de la resistividad y piezoresistividad del silicio piezoresistor¹²

¹² Tomado de: Tai-Ran Hsu, "MEMS and microsystems: design, manufacture, and nanoscale engineering", Second Edition, 2008

Se puede tomar, como ejemplo, un piezo-resistor de silicio de tipo P con una concentración de dopaje de 10^{19} por cm^3 , la pérdida de piezo-resistividad es de 0,27% por $^{\circ}\text{C}$. El mismo piezo-resistor operando a $120 [^{\circ}\text{C}]$ ha perdido $(120 - 20) \times 0,27\% = 27\%$ del valor del coeficiente de piezo-resistividad. La adecuada compensación por esta pérdida debe ser considerada en el diseño de sistemas de acondicionamiento de señal. La concentración de dopaje para piezo-resistividad normalmente debe mantenerse por debajo de $[10^{19}/\text{cm}^3]$ [10].

Algunas propiedades fundamentales de poli silicio se presentan en la Tabla 2.7. [10].

MATERIALES	MÓDULO DE YOUNG	COEFICIENTE DE POISSON	COEFICIENTE DE EXPANSIÓN TÉRMICA, EN ppm / $^{\circ}\text{C}$
Poli silicio	160	0.23	2.8

Tabla 2.7 Propiedades mecánicas del poli silicio¹³

2.3.5. Arseniuro de galio (GaAs)

El GaAs es un compuesto semiconductor formado de Galio (Ga) y Arsénico (As). Este compuesto tiene varias ventajas como: la alta movilidad de electrones facilitando el flujo de corriente en el material, ser un aislante térmico con características de estabilidad a altas temperaturas, alto coeficiente de expansión térmica (CET), y es un excelente material para la integración de dispositivos electrónicos sobre un sustrato simple. Entre los aspectos negativos del GaAs se puede nombrar la conductividad térmica baja y su costo es relativamente caro, por lo cual no se utiliza en gran medida el GaAs en la industria de los MEMS. A continuación se detallan algunas propiedades termo-físicas en la Tabla 2.8:

PROPIEDADES	GaAs	Silicio
Opto-electrónico	Muy bueno	Malo
Efecto Piezoeléctrico	Si	No
Coeficiente Piezoeléctrico [$\text{pN}/^{\circ}\text{C}$]	2.6	-

¹³ Tomado de: Marc Madou, "Principal source for semiconductor material properties: Fundamentals of Microfabrication", CRC Press, 1997

PROPIEDADES	GaAs	Silicio
Conductividad térmica	Bajo	Alto
Adherirse a otros sustratos	Difícil	Fácil
Fractura	Frágil	Fuerte
Temperatura de operación.	Alto	Bajo
Optima temperatura de operación [°C]	460	300
Dureza [GPa]	7	10
Fracture strength [GPa]	2.7	6

Tabla 2.8 Comparación entre GaAs y Si en micromaquinado¹⁴

El GaAs se usa para fabricar dispositivos ópticos, láser y a frecuencias de microondas. Además, se extendió su uso en los nuevos mercados comerciales como: redes de área local inalámbricas (WLAN), sistemas de comunicación personal (PCS), transmisión en directo por satélite (DBS) y, sistemas de posicionamiento global (GPS).

2.3.6. Cuarzo

El cuarzo es un compuesto llamado Dióxido de Silicio (SiO_2), tiene forma de tetraedro con tres átomos de oxígeno en la base y un átomo de silicio en la ápice siendo el eje perpendicular al plano base el eje Z como se observa en la Figura 2.12. Además es incoloro en estado puro como se ilustra en la Figura 2.13 y al ser dopado adopta algunas tonalidades.

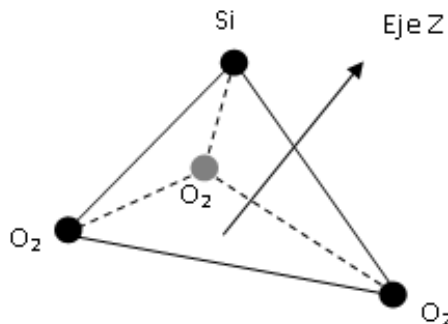


Figura 2.7 Forma del cuarzo

¹⁴ Tomado de: Marc Madou, "Fundamentals of Microfabrication", 2da Edición, CRC Press, 2002



Figura 2.8 Estructura del cuarzo¹⁵

Entre las propiedades del cuarzo se destaca su alta estabilidad con la temperatura, excelente aislante térmico y eléctrico, otras características se describen en la Tabla 2.9.

PROPIEDADES	VALOR Z	VALOR Z	DEPENDENCIA TEMPERATURA
Conductividad térmica [cal/cms°C]	29×10^{-3}	16×10^{-3}	↓ con T
Permitividad relativa	4.6	4.5	↓ con T
Densidad [kg/m ³]	2.66×10^3	2.66×10^3	
Coeficiente de expansión térmica [ppm/°C]	7.1	13.2	↑ con T
Resistividad eléctrica [Ω/cm]	0.1×10^{15}	20×10^{15}	↓ con T
Fractura [GPa]	1.7	1.7	↓ con T
Fuerza [GPa]	12	12	

Tabla 2.9 Propiedades del cuarzo¹⁶

¹⁵ Tomado de: Marc Madou , "Fundamentals of Microfabrication", 2da Edicion, CRC Press, 2002

¹⁶ Tomado de: Marc Madou , "Fundamentals of Microfabrication", 2da Edicion, CRC Press, 2002

Es un material ideal para sensores, se utiliza en muchos dispositivos piezoeléctricos, en giroscopios y acelerómetros.

2.3.7. Polímeros

Los Polímeros son una cadena carbonatada larga, con una variedad de estructuras moleculares, de los cuales se derivan los plásticos, fibras, adhesivos, recubrimientos, entre otros. Presentan resistencias muy elevadas por lo tanto su conductividad eléctrica es baja y son utilizados como aislantes. Tienen alta resistencia a la corrosión, alta flexibilidad en las estructuras y gran estabilidad. La principal desventaja está en relación a la pérdida de características mecánicas y geométricas con la temperatura, propiedades que se deben tomar en cuenta en el diseño de MEMS.

El desarrollo científico y tecnológico ha dado lugar a la utilización de polímeros conductores debido a su flexibilidad, resistencia, elasticidad y facilidad de producción, convirtiéndose en un área de investigación de la micro-tecnología. A los polímeros conductores se les conoce como metales sintéticos y son capaces de producir corriente eléctrica, deben su conductividad a propiedades intrínsecas del material o a modificaciones, por lo tanto se clasifican en 2 grupos:

1. Polímeros Intrínsecamente conductores
2. Polímeros Extrínsecamente conductores

1. **Polímeros Intrínsecamente Conductores:** Son materiales poliméricos cuyas moléculas son capaces de conducir la electricidad, siendo una propiedad intrínseca del material. Los más conocidos son: poliacetileno, polipirrol, politiofeno, polianilina
2. **Polímeros Extrínsecamente Conductores:** Deben su conductividad a la inclusión de materiales conductores tales como: metales o grafito.

Los dispositivos MEMS se pueden fabricar de polímeros por los procesos de moldeo por inyección, estampado o estereó litografía, algunas aplicaciones se describen a continuación:

- Las fotoresinas se utilizan para producir las máscaras para la creación de patrones deseados sobre sustratos por fotolitografía.
- Se utilizan polímeros conductores como sustratos orgánicos para MEMS y microsistemas.
- Los polímeros ferroeléctricos, se comportan como cristales piezoeléctricos, siendo utilizado como una fuente de actuación en microdispositivos como los de micropumping.
- Los polímeros con características únicas se utilizan como sustancias de revestimiento para tubos capilares para facilitar el flujo electro-osmótico en micro-fluídica.
- Las películas delgadas de polímero se utilizan como aislantes eléctricos en micro-dispositivos y como sustancias dieléctrico en micro-capacitores.
- Los polímeros son ampliamente utilizados para la interferencia electromagnética (EMI) y de radiofrecuencia (RFI) como protección en microsistemas.
- Son materiales ideales para la encapsulación de micro-sensores.

En la figura 2.9 se muestra una estructura esquemática de un sensor en el cual se utiliza el polímero como elemento de detección, cuya variación depende del gas.

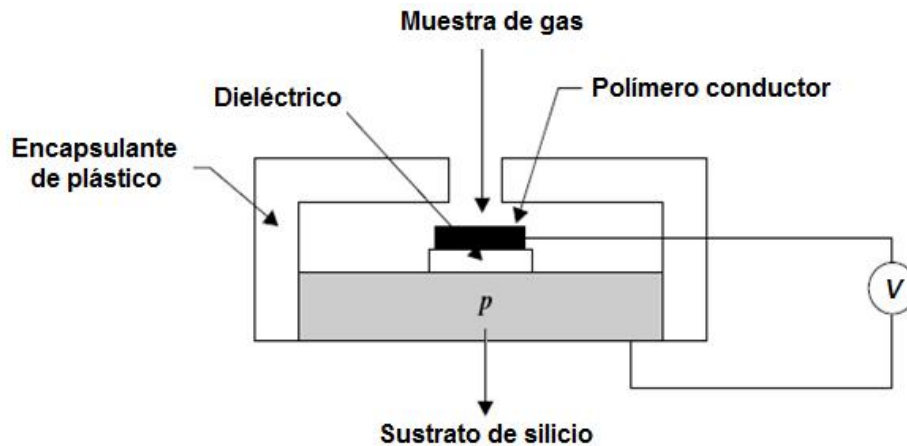


Figura 2.9 Micro-sensor utilizando polímeros

2.3.8. Cristales piezo-eléctricos

Los cristales piezoeléctricos son un material no semiconductor utilizado en los MEMS. Estos pueden producir una diferencia de potencial eléctrico (voltaje) entre ciertas caras del cristal cuando éste se somete a una deformación mecánica. Sin embargo, este efecto funciona también a la inversa cuando se aplica un campo eléctrico a ciertas caras de una formación cristalina, ésta experimenta distorsiones mecánicas. Este fenómeno físico presente en algunos cristales se denomina efecto piezoeléctrico y se ilustran en la Figura 2.10 [10]. Por lo tanto los materiales piezoeléctricos, pueden ser utilizados para convertir energía eléctrica en energía mecánica y viceversa.

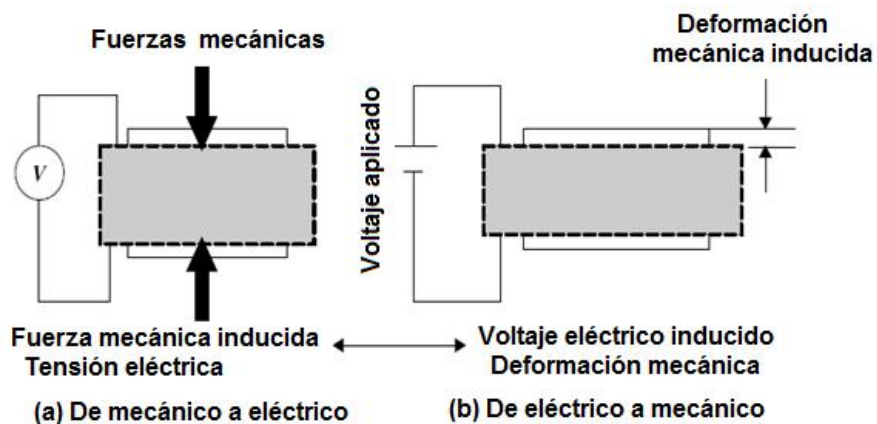


Figura 2.10 Conversión de energía mecánica a eléctrica y viceversa en los cristales piezoeléctricos

La eficacia de la conversión de energía mecánica en energía eléctrica y viceversa, se conoce como el factor de conversión electromecánica K y se define [13]:

$$C_{em}^2 = \frac{\text{Salida de Energía Mecánica}}{\text{Entrada de Energía Eléctrica}}$$

Ecuación 2.1 Factor de conversión de energía mecánica en eléctrica

$$C_{em}^2 = \frac{\text{Salida de Energía Eléctrica}}{\text{Entrada de Energía Mecánica}}$$

Ecuación 2.2 Factor de conversión de energía eléctrica en mecánica

Las siguientes relaciones matemáticas pueden ser utilizadas en el diseño de transductores piezoeléctricos [14]:

La fuerza produce un campo eléctrico:

$$\vec{E} = F \cdot b$$

Ecuación 2.3 Campo eléctrico generado en materiales piezo-eléctricos

Donde: $\vec{E} \rightarrow$ Campo Eléctrico generado [V/m]

$F \rightarrow$ Fuerza aplicada [Pa]

$b \rightarrow$ Constante

El campo eléctrico produce una deformación mecánica:

$$\varepsilon = d \cdot \vec{E}$$

Ecuación 2.4 Deformación en materiales piezo-eléctricos

Donde:

$\varepsilon \rightarrow$ Deformación [V/m]

$d \rightarrow$ Coeficiente Piezoeléctrico

$\vec{E} \rightarrow$ Campo Eléctrico

Los coeficientes f y d tienen la siguiente relación:

$$E = \frac{1}{f \cdot d}$$

Ecuación 2.5 Obtención del módulo de Young

Donde:

$E \rightarrow$ Modulo de Young del Cristal Piezoeléctrico

Muchas sustancias cristalinas poseen propiedades piezoeléctricas, pero solamente algunas se usan a escala industrial; entre éstas: el cuarzo, la Sal de Rochelle, el titanato de bario, el fosfato dihidrogenado de amonio (ADP). Sin embargo, se ha desarrollado materiales cerámicos ferro-eléctricos policristalinos como el BaTiO₃ y el Zirconato Titanato de Plomo (PZT). En la tabla 2.10 se mencionan algunos cristales piezoeléctricos con sus respectivos coeficientes y factor de conversión electromecánica.

CRISTALES PIEZOELÉCTRICOS	COEFICIENTE d [10 ⁻¹² m/V]	FACTOR DE CONVERSIÓN ELECTROMECAÁNICA C _{em}
Quartz (SiO ₂)	2.3	0.1
Titanato de Bario (BaTiO ₃)	100 – 190	0.49
Zirconato Titanato de Plomo PZT Pb(Zr, Ti)O ₃	480	0.72
PbZrTiO ₆	250	
PbNb ₂ O ₆	80	
Sal de Rochelle (NaKC ₄ H ₄ O ₆ - 4H ₂ O)	350	0.78
Polyvinylidene fluoride, PVDF	18	

Tabla 2.10 Propiedades de los cristales piezoeléctricos¹⁷

En microelectrónica son utilizados para nano-metrología, posicionamiento de obleas y máscaras, medición de dimensiones críticas, micro-litografía, sistemas de inspección y cancelación de vibración. Los cerámicos PZT, son utilizados en actuadores o sensores.

2.4. Empaquetado de MEMS

El empaquetado sirve para integrar todos los componentes necesarios para los MEMS, permitiendo:

1. Minimizar su tamaño, costo, masa y complejidad

¹⁷ Tomado de: S. Kasap, "Principles of Electronic Materials and Devices", McGraw-Hill Companies, 2005

2. Proporcionar la interfaz entre los componentes y el sistema general.
3. Brindar protección eléctrica:
 - Blindaje electrostático
 - Penetración de humedad
 - Interfaz de adhesión
 - Corrosión
4. Proveer de protección mecánica:
 - Rigidez, debe ser mecánicamente estable.
 - Peso, tamaño y forma para mayor comodidad en el manejo y operación.
5. Protegerlo del medio ambiente
 - Protección solamente mecánica
 - Protección Hermética
 - Protección No Hermética
6. Proteger la conexión eléctrica entre componentes del sistema.

A continuación, en la Tabla 2.11 se mencionan los materiales utilizados para el empaquetado de MEMS junto con algunas propiedades a tomar en cuenta en el proceso de empaquetado:

MATERIAL	CARACTERÍSTICAS
SILICIO	<ul style="list-style-type: none"> • Excelente para la encapsulación a corto plazo. • Fácil de aplicar y esterilizar. • Excelentes características de adherencia y flexibilidad.
POLÍMEROS	<ul style="list-style-type: none"> • Buenas propiedades eléctricas y mecánicas. • Baja permeabilidad a la humedad y los gases

MATERIAL	CARACTERÍSTICAS
	<ul style="list-style-type: none"> • Adherencia deficiente. • Muy utilizada en la microelectrónica.
ACRÍLICO	<ul style="list-style-type: none"> • Buenas propiedades eléctricas. • Duro, rígido y resistente.
CERÁMICA	<ul style="list-style-type: none"> • Químicamente inerte. • Frágil • Buenas propiedades eléctricas. • Excelente contra la humedad.
VIDRIO	<ul style="list-style-type: none"> • Dependiente del Coeficiente de dilatación térmica. • Alta resistencia, especialmente en la compresión. • Buenas propiedades eléctricas.
POLIURETANO	<ul style="list-style-type: none"> • Bueno ante la humedad. • Alta resistencia dieléctrica. • Buenas propiedades mecánicas y flexibles.
METAL	<ul style="list-style-type: none"> • Peso ligero. • Resistentes a la corrosión • Buenas propiedades mecánicas

Tabla 2.11 Materiales para empaquetado de MEMS

CAPÍTULO III

ESCALAMIENTO

Introducción: En este capítulo se estudiará la tendencia hacia la miniaturización. Además se revisará las leyes de escalamiento, con ejemplos para diferentes dispositivos macro; para esto se debe tener una muy buena comprensión sobre el dispositivo a dimensionar, considerando el diseño, los materiales y los procesos de fabricación involucrados. Finalmente se conocerán los beneficios de este procedimiento, permitiendo el incremento de la demanda en el mercado de los MEMS debido a su robustez, multifuncionalidad y, bajo costo.

3.1. Tendencia a la miniaturización

La microelectrónica representa una plataforma muy potente y flexible para la concepción y realización de estructuras miniaturizadas micro-mecánicas. De esta manera, abre el camino hacia la realización de sensores y actuadores MEMS. En la figura 3.1 se observa el ejemplo de un giroscopio miniaturizado.

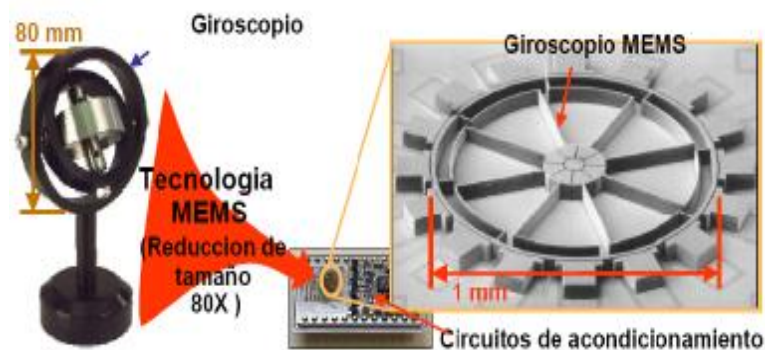


Figura 3.1 Escalamiento de un giroscopio

Los dispositivos micro-electrónicos se han caracterizado por el escalamiento de su tamaño real hacia dimensiones más pequeñas, este proceso se da por varias razones:

- Mejoras en las capacidades de procesamiento porque se integran un mayor número de componentes en un chip.
- Integración de la electrónica y mecánica sobre un mismo sustrato.
- Los MEMS pueden hacer posible aplicaciones ineficientes e inconcebibles en la macro-escala.
- Bajo costo en grandes volúmenes de fabricación.

En la micro-escala, los fenómenos físicos son los mismos de la macro-escala. Además, algunas aproximaciones pueden resultar válidas en la macro-escala pero no ser útiles o lo suficientemente exactas en la micro-escala. También es importante tener en cuenta las propiedades generadas a través de los procesos de manufactura en elementos macro porque resultan diferentes en el momento de tratar de generar componentes miniaturizados; debido a la disparidad entre los procesos y tamaños durante la fabricación. Por ejemplo, tomemos el caso de un motor eléctrico, este es realmente un motor magnético, donde casi todos los actuadores eléctricos a nivel macro utilizan campos magnéticos para generar fuerzas. Por lo tanto, sería evidente utilizar motores magnéticos en el diseño de micro-dispositivos. En la práctica, la mayoría de los micro-motores, trabajan con campos electrostáticos en lugar de campos magnéticos debido a las interferencias.

La miniaturización de los nuevos productos industriales, permite a los ingenieros hacer un esfuerzo cada vez mayor por razones de apariencia física, volumen, peso y la economía [10]. Gracias a la miniaturización se ha incrementado la demanda en el mercado de los MEMS por las siguientes características:

- Robustez.
- Rapidez de respuesta.

- Multifuncionalidad.
- Bajo costo.
- Aumento de la selectividad y la sensibilidad.
- Mayor rendimiento.
- Mejora de la reproducibilidad (fabricación por lotes).
- Mejora de la precisión y fiabilidad.

Se debe tomar en cuenta 5 factores en la reducción de escala de los dispositivos [15]:

1. Establecimiento de los parámetros de diseño

- ¿La solución MEMS proporciona una significativa reducción de costos?
- ¿Se permitirá una nueva funcionalidad o nivel de rendimiento?
- ¿Puede utilizarse las técnicas de maquinado convencional?

2. Entender la física básica y principios de funcionamiento, incluyendo leyes de escala.

- ¿Se estudiarán las relaciones de superficie y volumen?
- ¿Qué son las fuerzas de accionamiento?

3. Examinar el empaquetado de los MEMS:

- ¿Los empaques existentes pueden utilizarse o adaptarse?
- ¿Existe problemas de fiabilidad en este tipo de empaquetado?
- ¿Se requiere de protección eléctrica y mecánica?

4. Realización de pruebas al dispositivo

- ¿Qué pruebas son necesarias?
- ¿Cómo van a realizarse las pruebas?

5. Estimación del costo final

- ¿Qué cantidad se utiliza de material y cuál es su costo?
- ¿En qué volumen se fabrican?
- ¿Qué costo tiene el empaquetado?
- ¿Cuál es el costo de las pruebas y simulaciones?

3.2. Escalamiento de sistemas mecánicos

Para el diseño de MEMS es necesario conocer los siguientes 3 aspectos para entender la miniaturización de dispositivos con características mecánicas similares a los objetos en escala normal:

1. Principios de escalamiento
2. Ecuaciones de escalamiento
3. Sistema de unidades

3.2.1. Definición de los principios de escalamiento

Al tratar con dispositivos muy pequeños es necesario conocer el probable comportamiento del sistema cuando es reducido. Los 3 parámetros modificables cuando se realiza una miniaturización de la estructura son [17]:

1. Dimensiones (por ejemplo, longitudes de los componentes)
2. Materiales (por ejemplo, silicio, arseniuro de galio, cuarzo)
3. Diseño (por ejemplo, distribución de los elementos y su optimización)

Hay 2 principios de escalamiento aplicables en el diseño de los MEMS [15]:

- 1. Escalamiento por Geometría.-** Depende del tamaño físico de los objetos, relaciona el volumen y la superficie de los dispositivos MEMS.
- 2. Escalamiento por Comportamiento fenomenológico de los microsistemas.-** Depende de la caracterización de los materiales y el

fenómeno físico, eléctrico, mecánico, químico. Estos parámetro determinan el funcionamiento del dispositivo MEMS.

3.2.2. Ecuaciones de escalamiento

El factor de escalamiento se denota con la letra s , representa la escala lineal del sistema y expresa la reducción de medidas. El término s podría ser la separación entre las placas de un electrodo, o la longitud de la viga. Una vez elegido, todas las dimensiones del sistema son igualmente reducidos de tamaño a medida que se reduce s . Por ejemplo, si se tiene s^1 , y se indica que todas las dimensiones del sistema se reducen en un factor de diez, entonces se multiplica todos los parámetros por 0.1. A continuación, se explicarán 4 distintos tipos de escalamiento:

1. Escalamiento por geometría
2. Escalamiento en Fuerzas Electrostáticas
3. Escalamiento en Electricidad
4. Escalamiento en la Dinámica de Cuerpos Rígidos

3.2.2.1. Escalamiento por Geometría

El volumen (V) y la superficie (S) son dos parámetros físicos involucrados en el diseño del micro-sistema. El volumen se refiere a la masa y el peso de los componentes del dispositivo, tomando en cuenta la inercia mecánica y térmica (medida de la rapidez al calentar o enfriar un sólido). La superficie está relacionada con la presión y las fuerzas a las cuales el dispositivo puede estar sometido.

El termino s , para este ejemplo va a representar el largo de la estructura cúbica. Las dimensiones del sólido se observan en la figura 3.2 y, en la tabla 3.1 se mencionan los parámetros básicos con su respectivo factor de escala:

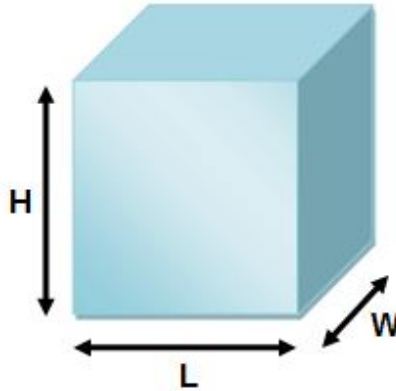


Figura 3.2 Dimensiones de un cubo

PARÁMETROS		SIMBOLO	FACTOR DE ESCALA
Longitud	Largo	L	s^1
	Ancho	W	
	Alto	H	
Densidad		ρ	s^0

Tabla 3.1 Escalamiento directo de magnitudes

Cuando la cantidad física se debe miniaturizar, se debe calcular la magnitud de las posibles consecuencias de la reducción tanto el volumen y la superficie del dispositivo. Para el ejemplo de la figura 3.2 se calculan mediante las fórmulas descritas en la tabla 3.2

MAGNITUD	FORMULA DE CALCULO	FACTOR DE ESCALA
El volumen	$V = L \cdot W \cdot H$	$V \Rightarrow s \cdot s \cdot s = s^3$
El área	$A = L \cdot W$	$A \Rightarrow s \cdot s = s^2$
Masa	$m = \rho \cdot V$	$m \Rightarrow s^0 \cdot s^3 = s^3$

Tabla 3.2 Fórmulas de cálculo de las magnitudes del escalamiento por geometría

Conclusión.- Una reducción de 10 veces en la longitud, implica una reducción de $10^3=1000$ veces en el volumen y de $10^2 = 100$ veces en la superficie del dispositivo MEMS.

3.2.2.2. Escalamiento en fuerzas electrostáticas

Cuando se tiene dos electrodos paralelos como se observa en la figura 3.3, el término s va a representar el tamaño de los electrodos. Además, se necesita conocer algunas magnitudes directamente escalables, las cuales están nombradas en la Tabla 3.3:

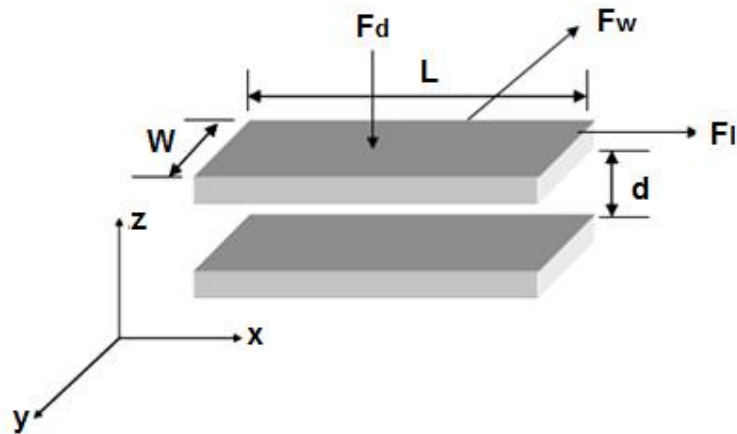


Figura 3.3 Placas paralelas conductoras

MAGNITUDES		SÍMBOLO	FACTOR DE ESCALA
Longitud:	Largo	L	s^1
	Ancho	W	
Distancia de separación de las placas		d	s^1
Voltaje		V	s^1
Permitividad del vacío		ϵ_0	s^0
Permitividad relativa		ϵ_r	s^0

Tabla 3.3 Magnitudes para escalamiento electrostático

Para calcular el factor de escala de la energía potencial y las fuerzas electrostáticas presentes entre las placas de un dispositivo MEMS, se realizan los pasos detallados en las tablas 3.4 y 3.5 respectivamente:

ENERGÍA POTENCIAL	
1. Escribir la fórmula de cálculo a macro-escala:	$U_p = -\frac{1}{2} C \cdot V^2 = -\frac{e_o \cdot e_r \cdot W \cdot L}{2 \cdot d} V^2$
2. Reemplazamos los factores de escala, sin tomar en cuenta los signos matemáticos y números:	$U_p = \frac{\begin{bmatrix} s^0 \\ s^0 \\ s^1 \\ s^1 \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} s^1 \end{bmatrix}} \begin{bmatrix} s^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s^3 \end{bmatrix}$
Conclusión.- Si se reduce 10 veces el tamaño de los electrodos, la energía potencial se reduce $10^3 = 1000$ veces.	

Tabla 3.4 Calculo del factor de escala de la energía potencial

FUERZAS ELECTROSTATICAS	
1. Escribir la fórmula de cálculo a macro-escala:	$F_d = \frac{\partial E_p}{\partial d} = -\frac{e_o \cdot e_r \cdot W \cdot L}{2 \cdot d^2} V^2$ $F_w = \frac{\partial E_p}{\partial w} = -\frac{e_o \cdot e_r \cdot L}{2 \cdot d} V^2$ $F_l = \frac{\partial E_p}{\partial l} = \frac{e_o \cdot e_r \cdot W}{2 \cdot d} V^2$
2. Reemplazamos los factores de escala, sin tomar en cuenta los signos matemáticos y números:	$F_d = \frac{\begin{bmatrix} s^0 \\ s^0 \\ s^1 \\ s^1 \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} s^2 \end{bmatrix}} \begin{bmatrix} s^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s^2 \end{bmatrix}$ $F_w = \frac{\begin{bmatrix} s^0 \\ s^0 \\ s^1 \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} s^1 \end{bmatrix}} \begin{bmatrix} s^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s^2 \end{bmatrix}$ $F_d = \frac{\begin{bmatrix} s^0 \\ s^0 \\ s^1 \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} s^1 \end{bmatrix}} \begin{bmatrix} s^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s^2 \end{bmatrix}$
Conclusión.- Si se reduce 10 veces el tamaño de los electrodos, la magnitud de las fuerzas electrostáticas se reduce $10^2 = 1000$ veces.	

Tabla 3.5 Calculo del factor de escala de las fuerzas electrostáticas

3.2.2.3. Escalamiento en electricidad

En la tabla 3.6 se indican las magnitudes eléctricas con su respectivo factor de escalamiento s.

MAGNITUD ELÉCTRICA	SÍMBOLO	FACTOR DE ESCALAMIENTO
Corriente	I	s^2
Voltaje	V	s^1
Resistencia	R	s^{-1}
Capacitancia	C	s^1
Inductancia	L	s^1
Campo Eléctrico	\bar{E}	s^{-1}
Tiempo	T	s^0
Densidad del material	P	s^0

Tabla 3.6 Magnitudes eléctricas y factor de escalamiento, valores (+) indican decremento y valores (-) indican incremento¹⁸

En la tabla 3.7 se nombran las principales relaciones para este tipo de escalamiento:

PARÁMETROS	ECUACIÓN	FACTOR DE ESCALA OBTENIDA
Resistencia Eléctrica	$R = \frac{\rho \cdot L}{A}$	$R \Rightarrow \frac{s^0 \cdot s^1}{s^2} \Rightarrow s^{-1}$
Pérdida de potencia resistiva	$P = \frac{V^2}{R}$	$P \Rightarrow \frac{(s^1)^2}{s^{-1}} \propto s^3$
Energía	$U = \frac{1}{2} \varepsilon \cdot \bar{E}^2$	$U \Rightarrow \frac{1}{2} \cdot s^0 \cdot s^{-2} \Rightarrow s^{-2}$
Capacitancia	$C = \varepsilon_0 \frac{A}{d}$	$C \Rightarrow s^0 \cdot \frac{s^2}{s} \Rightarrow s^1$
Carga	$Q = C \cdot V$	$Q \Rightarrow s^1 \cdot s^1 \Rightarrow s^2$
Frecuencia	$f = \frac{1}{t}$	$f \Rightarrow \frac{1}{s^1} \Rightarrow s^{-1}$

Tabla 3.7 Escalamiento de parámetros eléctricos

¹⁸ K. Drexler, "Nanosystems. Chapter 2, 'Classical Magnitudes and Scaling Laws", John Wiley & Sons, 1992

3.2.2.4. Escalamiento en la dinámica de cuerpos rígidos

En el caso de la miniaturización de estos componentes, es necesario comprender el efecto de la reducción en el tamaño de la potencia (P), fuerza (F) o la presión (p), y el tiempo (t). En la figura 3.4, se observa un grafico en el cual se relaciona cada una de las fuerzas con el tamaño de los dispositivos MEMS:

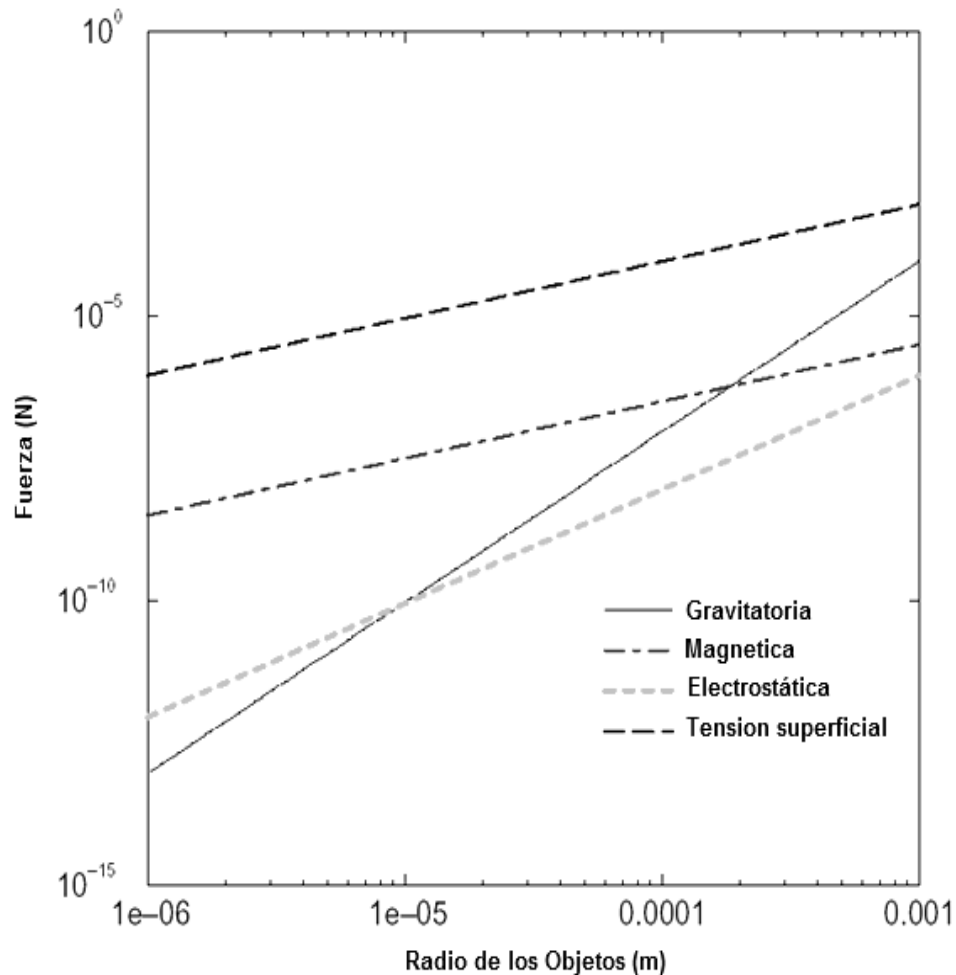


Figura 3.4 Relación de las fuerzas con respecto al tamaño de los objetos ¹⁹

William Trimmer en 1989 definió el vector de la ecuación 3.1 para representar las fuerzas de escalamiento. Este vector representa las cuatro leyes diferentes de fuerzas.

¹⁹ Tomado de: X. Feddema, Micro-Assembly Planning with van der Waals Force, 1999. [Online]. Disponible: <http://beams.ulb.ac.be/beams/teaching/meca-h-501/Notes/01-scaling-laws.pdf> [Accesado: Diciembre 5, 2010]

$$F = [s^F] = \begin{bmatrix} s^1 \\ s^2 \\ s^3 \\ s^4 \end{bmatrix}$$

Ecuación 3.1 Notación matemática de escalamiento

- Fuerza debida a la Tensión superficial s^1
- Fuerza debida a la Electrostática s^2
- Fuerza magnética s^3
- Fuerza gravitacionales s^4

Además permite establecer una relación con otros parámetros de la Dinámica como se describe en la Tabla 3.8:

ORDEN	ESCALA DE FUERZA (F)	ACELERACIÓN (a)	TIEMPO (t)	DENSIDAD DE POTENCIA (P/Vo)
1	1	-2	1.5	-2.5
2	2	-1	1	-1
3	3	0	0.5	0.5
4	4	1	0	2

Nota: $a = \frac{F}{m}$; $t = \sqrt{\frac{2 \cdot d}{a}}$; $P = \frac{F \cdot d}{t}$

Tabla 3.8 Relación con los parámetros de la dinámica ²⁰

La tabla 3.6 se interpreta de la siguiente manera al relacionar la fuerza aplicada con respecto al tiempo [16]:

²⁰ Tomado de: [15] "Chapter 6. Scaling Laws in Miniaturization", Lectures on MEMS and Microsystems Design and Manufacture, [Online]. Disponible: http://www.engr.sisu.edu/trhsu/ME189_Chapter%206.pdf. [Accesado: Septiembre 19, 2010]

- Si F tiene un factor de escala s^4 , entonces: un sistema 10 veces más pequeño puede realizar una operación en el mismo tiempo del macro-sistema.
- Si F tiene un factor de escala s^2 , un sistema 10 veces más pequeño puede realizar una operación diez veces más rápido ($t=s^{-1}$). Además, la densidad de potencia tiene un factor de escala s^{-1} , esto indica el su incremento en un factor de 10.

Con la finalidad de demostrar la utilidad de la tabla 3.8, se va a determinar los efectos de reducir el peso de un objeto en un factor de 10. Recordando $p=m \cdot g$ donde $m \Rightarrow s^3$, por lo tanto su orden es 3. En la tabla 3.8 se muestran los respectivos parámetros:

ORDEN	FUERZA	ACELERACIÓN	TIEMPO	DENSIDAD DE POTENCIA
3	3	0	0.5	0.5
Conclusión:				
<ul style="list-style-type: none"> • No hay una reducción en la aceleración (s^0) • Hay una reducción de $s^{0.5} = (10)^{0.5} = 3.16$ veces en el tiempo • Hay una reducción de $s^{0.5} = 3.16$ veces en la densidad de potencia • Por último, el volumen se reduce en un factor de 10. Entonces, el consumo de energía es igual a $P = 3.16 \cdot 0,1 \sim 0.3$ veces. 				

A continuación se va a ejemplificar el cálculo del factor de escalamiento para la densidad de potencia. Cuando se realiza el escalamiento de un dispositivo MEMS, se debe asegurar la reducción de la energía utilizada para accionarlo. En el proceso de diseño, la potencia se define como la energía producida por el dispositivo en una unidad de tiempo. La energía está relacionada con el trabajo, la cual es igual a la fuerza requerida para mover una masa en una distancia determinada.

$$\frac{P}{V_o} = \frac{F \cdot d}{t \cdot V_o} = \frac{F \cdot d}{\sqrt{\frac{2 \cdot d}{a}} V_o} = \frac{F \cdot d}{\sqrt{\frac{2 \cdot d \cdot m}{F}} V_o} = \frac{F^{1.5} \cdot d}{(d \cdot m)^{0.5} \cdot V_o}$$

$$\frac{P}{V_o} = \frac{[s^{1.5F}][s^1]}{\{[s^1][s^3]\}^{0.5}[s^3]} = [s^{1.5F}][s^{-4}] = [s^F]^{1.5}[s^{-4}]$$

$$\frac{P}{V_o} = \begin{bmatrix} s^1 \\ s^2 \\ s^3 \\ s^4 \end{bmatrix}^{1.5} [s^{-4}]$$

$$\frac{P}{V_o} = \begin{bmatrix} s^{-2.5} \\ s^{-1} \\ s^{0.5} \\ s^2 \end{bmatrix}$$

3.2.3. Sistema de unidades

Los sistemas de unidades para los sistemas micro-electromecánicos (MEMS) son los μMKSv (Sistema de unidades basado en el SI, y tiene como unidades base: la micra, el kilogramo, el segundo, y el voltio). Las tablas 3.9 a 3.12 listan los factores de conversión de unidades del sistema MKS (Sistema que tiene como base las unidades: metro, kilogramos y segundo) al μMKSv:

PARÁMETROS MECÁNICOS	UNIDAD MKS	DIMENSIÓN	MULTIPLIQUE POR ESTE NUMERO	UNIDAD μMKSv	DIMENSIÓN
Longitud	M	M	10 ⁶	μm	μm
Fuerza	N	(kg)(m)/(s) ²	10 ⁶	μN	(kg)(μm)/(s) ²
Tiempo	S	S	1	s	s
Masa	Kg	Kg	1	kg	kg
Presión	Pa	(kg)/(m)(s) ²	10 ⁻⁶	MPa	(kg)/(μm)(s) ²
Velocidad	m/s	m/s	10 ⁶	μm/s	μm/s
Aceleración	m/(s) ²	m/(s) ²	10 ⁶	μm/(s) ²	μm/(s) ²
Densidad	kg/(m) ³	kg/(m) ³	10 ⁻¹⁸	kg/(μm) ³	kg/(μm) ³
Modulo de	Pa	kg/(m)(s) ²	10 ⁻⁶	MPa	kg/(μm)(s) ²

PARÁMETROS MECÁNICOS	UNIDAD MKS	DIMENSIÓN	MULTIPLIQUE POR ESTE NUMERO	UNIDAD μ MKSv	DIMENSIÓN
Young					
Potencia	W	$(\text{kg})(\text{m})^2/(\text{s})^3$	10^{12}	pW	$(\text{kg})(\mu\text{m})^2/(\text{s})^3$

Tabla 3.9 Factores de conversión mecánica de MKS para μ MKSv²¹

PARÁMETROS MECÁNICOS	UNIDAD MKS	DIMENSIÓN	MULTIPLIQUE POR ESTE NUMERO	UNIDAD μ MKSv	DIMENSIÓN
Conductividad	W/m [°] K	$(\text{kg})(\text{m})/(\text{°} \text{K})(\text{s})^3$	10^6	pW/ $(\mu\text{m})(\text{°} \text{K})$	$(\text{kg})(\mu\text{m})/(\text{°} \text{K})(\text{s})^3$
Flujo de calor	W/(m) ²	kg/(s) ³	1	pW/ $(\mu\text{m})^2$	kg/(s) ³
Calor Especifico	J/(kg)(° K)	$(\text{m})^2/(\text{°} \text{K})(\text{s})^2$	10^{12}	pJ/(kg)(° K)	$(\mu\text{m})^2/(\text{°} \text{K})(\text{s})^2$
Calor unidad de volumen	W/m ³	$(\text{kg})/(\text{m})(\text{s})^3$	10^{-6}	pW/ $(\mu\text{m})^3$	kg/ $(\mu\text{m})(\text{s})$
Coefficiente de convección	W/(m) ² ° K	kg/(s) ²	1	pW/ $(\mu\text{m})^2 \text{°} \text{K}$	kg/(s) ²
Viscosidad dinámica	kg/(m)(s)	kg/(m)(s)	10^{-6}	kg/ $(\mu\text{m})(\text{s})$	kg/ $(\mu\text{m})(\text{s})$
Viscosidad cinética	(m) ² /s	(m) ² /s	10^{12}	$(\mu\text{m})^2/\text{s}$	$(\mu\text{m})^2/\text{s}$

Tabla 3.10 Factores de conversión térmica de MKS para μ MKSv²²

PARÁMETROS ELÉCTRICOS	UNIDAD MKS	DIMENSIÓN	MULTIPLIQUE POR ESTE NUMERO	UNIDAD μ MKSv	DIMENSIÓN
Corriente	A	A	10^{12}	pA	pA
Voltaje	V	$(\text{kg})(\text{m})^2/(\text{A})(\text{s})^3$	1	V	$(\text{kg})(\mu\text{m})^2/(\text{pA})(\text{s})^3$
Carga	C	(A)(s)	10^{12}	pC	(pA)(s)

²¹ Tomado de: ANSYS, "System of Units", SAS IP, 2001. [Online]. Disponible: http://research.me.udel.edu/~lwang/teaching/MEx81/ansyshelp/Hlp_UI_ANSYS_Rev.html. [Accesado: Septiembre 18, 2010]

²² Tomado de: ANSYS, "System of Units", SAS IP, 2001. [Online]. Disponible: http://research.me.udel.edu/~lwang/teaching/MEx81/ansyshelp/Hlp_UI_ANSYS_Rev.html. [Accesado: Septiembre 18, 2010]

PARÁMETROS ELÉCTRICOS	UNIDAD MKS	DIMENSIÓN	MULTIPLIQUE POR ESTE NUMERO	UNIDAD μ MKSv	DIMENSIÓN
Conductividad	S/m	$(A)^2(s)^3/(kg)(m)^3$	10^6	pS/ μ m	$(pA)^2(s)^3/(kg)(\mu m)^3$
Resistividad	Ω m	$(Kg)(m^3)/(A)^2(s)^3$	10^{-6}	T Ω μ m	$(kg)(\mu m)^3/(pA)^2(s)^3$
Permitividad[1]	F/m	$(A)^2(s)^4/(kg)(m)^3$	10^6	pF/ μ m	$(pA)^2(s)^2/(kg)(\mu m)^3$
Energía	J	$(kg)(m)^2/(s)^2$	10^{12}	pJ	$(kg)(\mu m)^2/(s)^2$
Capacitancia	F	$(A)^2(s)^4/(kg)(m)^2$	10^{12}	pF	$(pA)^2(s)^4/(kg)(\mu m)^2$
Campo Eléctrico	V/m	$(kg)(m)/(s)^3(A)$	10^{-6}	V/ μ m	$(kg)(\mu m)/(s)^3(pA)$
Densidad de Flujo Electrico	C/(m) ²	$(A)(s)/(m)^2$	1	pC/(μ m) ²	$(pA)(s)/(\mu m)^2$

Nota: [1] Permitividad del espacio libre es igual a $8,854 \times 10^{-6}$ pF / micras

Tabla 3.11 Factores de conversión eléctrica de MKS para μ MKSv²³

PARÁMETROS MAGNÉTICOS	UNIDAD MKS	DIMENSIÓN	MULTIPLIQUE POR ESTE NUMERO	UNIDAD μ MKSv	DIMENSIÓN
Flujo	Weber	$(kg)(m)^2/(A)(s)^2$	1	Weber	$(kg)(\mu m)^2/(pA)(s)^2$
Densidad de Flujo	Tesla	$kg/(A)(s)^2$	10^{-12}	Tesla	$kg/(pA)(s)^2$
Intensidad de campo	A/m	A/m	10^6	pA/ μ m	pA/ μ m
Corriente	A	A	10^{12}	pA	pA
Densidad de Corriente	A/(m) ²	A/(m) ²	1	pA/(μ m) ²	pA/(μ m) ²
Permeabilidad [2]	H/m	$(kg)(m)/(A)^2(s)^2$	10^{-18}	TH/ μ m	$(kg)(\mu m)/(pA)^2(s)^2$
Inductancia	H	$(kg)(m)^2/(A)^2(s)^2$	10^{-12}	TH	$(kg)(\mu m)^2/(pA)^2(s)^2$

Nota: [2] La permeabilidad del espacio libre es igual a $4 \pi \times 10^{-25}$ TH/ μ m.

Tabla 3.12 Factores de conversión eléctrica de MKS para μ MKSv²⁴

²³ Tomado de: ANSYS, "System of Units", SAS IP, 2001. [Online]. Disponible: http://research.me.udel.edu/~lwang/teaching/MEx81/ansyshelp/Hlp_UI_ANSYS_Rev.html. [Accesado: Septiembre 18, 2010]

²⁴ Tomado de: ANSYS, "System of Units", SAS IP, 2001. [Online]. Disponible: http://research.me.udel.edu/~lwang/teaching/MEx81/ansyshelp/Hlp_UI_ANSYS_Rev.html. [Accesado: Septiembre 18, 2010]

3.3. Ejemplos de escalamiento dimensional

A continuación, se va a tratar algunos de los efectos de escala y las ecuaciones de escalamiento de acuerdo a las estructuras primarias de los microdispositivos. Los ejemplos a estudiar son 4:

1. Deformación de una viga en voladizo al aplicar una fuerza en el eje z.
2. Dispositivo en voladizo basado en un sensor inercial.
3. Actuadores electrostáticos.
4. Actuadores térmicos.

3.3.1. Escalado de la deformación de una viga en voladizo al aplicar una fuerza en el eje z

En este ejemplo el factor de escalamiento a utilizarse será $s=10$. Como primer paso se considera una viga en voladizo como se observa en la figura 3.5, se realizan las siguientes consideraciones:

- Tipo de material uniforme e isótropo con las mismas propiedades físicas en todas las direcciones.
- Las dimensiones L sus dimensiones l , w y h (longitud, anchura y altura, respectivamente). El voladizo tiene L a lo largo del eje x, W a lo largo del eje y, H a lo largo del eje z.

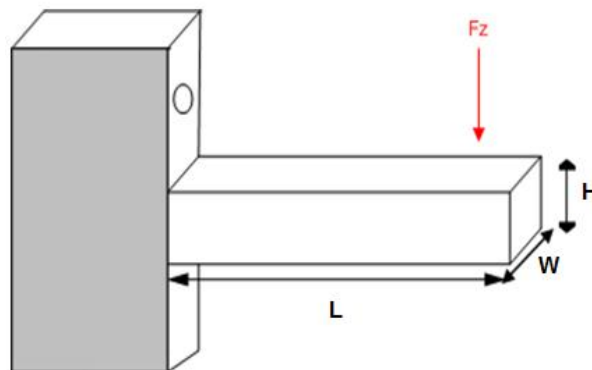


Figura 3.5 Viga voladiza

El siguiente paso es realizar el escalamiento de la masa y de la constante elástica en un factor de 10 para conocer la robustez de la viga miniaturizada, esto se encuentra en la tabla 3.13:

PARÁMETRO	FÓRMULA	FACTOR DE ESCALAMIENTO	PARÁMETRO ESCALADA
Masa de la viga	$M = \rho \cdot L \cdot W \cdot H$ $\rho =$ Densidad del material	$M = s^0 \cdot s^1 \cdot s^1 \cdot s^1$ $M = [s^3]$	$M' = 0.001M$
Constante elástica en la dirección z	$K_z = 12 \frac{E \cdot I}{L^3}$ $E =$ Módulo de Young del material (constante) $I =$ Impulso de la sección transversal de la inercia, proporcional a $W \cdot H^3$.	$K_z = \frac{s^0 \cdot s^4}{s^3}$ $K_z = [s^1]$	$K'_z = 0.1K_z$
Conclusión: Los tiempos del voladizo a escala lineal 10 es de 1000 veces más ligero, pero sólo 10 veces menos rígida con respecto a su equivalente, por lo tanto, la versión reducida tiene una robustez mecánica mejorada.			

Tabla 3.13 Resultados viga voladiza

Una excitación adecuada puede conducir al voladizo a vibrar en su propia frecuencia de resonancia. El voladizo puede ser utilizado como un sensor de masa mediante la medición de su cambio de frecuencia de resonancia con respecto a una referencia. A continuación, se analizará el efecto del escalamiento de la sensibilidad de la frecuencia de resonancia para el cambio de masa de la viga, esto se resume en la tabla 3.14:

PARÁMETRO	FÓRMULA	FACTOR DE ESCALAMIENTO	PARÁMETRO ESCALADO
Sensibilidad de la frecuencia de resonancia	$S = \frac{\partial \omega}{\partial m} = \frac{1}{2} \frac{\omega_0 / m_0}{\left(1 + m / m_0\right)^3}$	$S = \frac{s^{-1} / s^3}{\sqrt{\left(s^0 + s^3 / s^3\right)^3}}$ $S = [s^{-4}]$	$S' = 10\,000S$

PARÁMETRO	FÓRMULA	FACTOR DE ESCALAMIENTO	PARÁMETRO ESCALADO
	<p>m_0= "Masa de descarga"</p> <p>m=Variación de la masa</p> <p>ω_0= Frecuencia de resonancia con respecto a una referencia.</p> <p>ω= Frecuencia de resonancia</p> $\omega = \frac{\omega_0}{\sqrt{1 + \frac{m}{m_0}}}$		
<p>Conclusión: Un factor de escala lineal de 10 en las dimensiones de una viga en voladizo conduce a una mejora de 10 000 veces en la sensibilidad de la frecuencia de resonancia ante un cambio de masa.</p>			

Tabla 3.14 Sensibilidad de la frecuencia de resonancia de la viga

Finalmente se analiza la energía requerida para lograr un desplazamiento al aplicar una fuerza F en el extremo de la viga, a lo largo del eje z. En la tabla 3.15 se resume dichos cálculos.

PARÁMETRO	FÓRMULA	FACTOR DE ESCALAMIENTO	PARÁMETRO ESCALADO
Fuerza (Ley de elasticidad de Hooke)	<p>$Fz = K_z \cdot \delta$</p> <p>Fz= Fuerza aplica</p> <p>K_z=Constante elástica en la dirección z</p> <p>δ= Desplazamiento</p>	<p>$Fz = s^1 \cdot s^1$</p> <p>$Fz = [s^2]$</p>	$Fz' = 0.01F$
Energía requerida	<p>$U = Fz \cdot \delta$</p> <p>U=Energía requerida</p> <p>Fz= Fuerza</p> <p>δ= Desplazamiento</p>	<p>$T = s^2 \cdot s^1$</p> <p>$T = [s^3]$</p>	$W' = 0.001W$

Conclusión:

- La energía requerida (energía de actuación) para lograr un desplazamiento dado, en un voladizo 10 veces más pequeño es 1000 veces menor comparada con la macro-escala.
- El mismo desplazamiento relativo puede ser alcanzado en un voladizo 10 veces más pequeño con la disminución de una fuerza en 100 veces.

Tabla 3.15 Energía requerida para lograr un desplazamiento

3.3.2. Escalado de un dispositivo en voladizo basado en un sensor inercial

En este ejemplo se analiza el funcionamiento de un dispositivo en voladizo basado en un sensor inercial. Este sistema puede ser modelado desde un punto de vista mecánico, como un sistema masa-resorte-amortiguador de la figura 3.6.

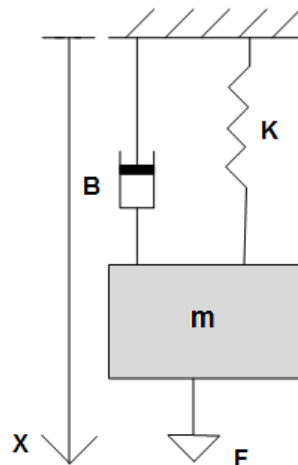


Figura 3.6 Modelado de un sensor inercial

Si el sistema experimenta una aceleración, la masa es sometida a una fuerza proporcional a la aceleración, la cual contrasta con la reacción elástica de amortiguación. En equilibrio, la aceleración produce un desplazamiento neto de la posición de la masa.

Para llegar a obtener la ecuación matemática de la sensibilidad de un sensor inercial se analiza el desplazamiento de masas con la ecuación 3.2:

$$m \ddot{x} + B \dot{x} + Kx = -m \cdot a$$

Ecuación 3.2 Desplazamiento de masas

Donde la aceleración tiene una dependencia sinusoidal en el tiempo, la ecuación anterior se puede resolver en el dominio de la frecuencia ($j\omega$) descrita en la ecuación 3.3:

$$-\omega^2 mx + j\omega Bx + Kx = -m \cdot a$$

Ecuación 3.3 Desplazamiento de masas en función de la frecuencia

La aceleración puede ser leída por la medición del desplazamiento de la masa de prueba (viga en voladizo) o por la tensión mecánica. Por lo tanto, la respuesta en frecuencia del sistema en términos de masa, se observa en la ecuación 3.4:

$$x = \frac{-m/K}{1 + j\omega \frac{B}{K} - \omega^2 \frac{m}{K}}$$

Ecuación 3.4 Respuesta en frecuencia del sistema

Y la frecuencia en resonancia del sistema se describe en la ecuación 3.5:

$$\omega_o = \sqrt{\frac{K}{m}}$$

Ecuación 3.5 Frecuencia de resonancia del sistema

Si la aceleración a es constante o varía lentamente con el tiempo, la ecuación anterior para la respuesta en frecuencia del sistema se puede aproximar de la siguiente manera:

$$x = -\frac{m}{K} a$$

Ecuación 3.6 Frecuencia del sistema aproximada

La sensibilidad de este tipo de sensores inerciales en términos de masa frente a la aceleración esta dado por la ecuación 3.7:

$$S = \frac{dx}{da} = -\frac{m}{K}$$

Ecuación 3.7 Sensibilidad de un sensor inercial

Al tener la ecuación matemática para hallar la sensibilidad inercial se puede establecer las ventajas del dispositivo escalado, resumiéndolo en la tabla 3.16:

PARÁMETRO	FÓRMULA	FACTOR DE ESCALAMIENTO	PARÁMETRO ESCALADO
Sensibilidad de un sensor inercial	$S = \frac{dx}{da} = -\frac{m}{K}$ <p>m= Masa K=Constante elástica</p>	$S = \frac{s^3}{s^0}$ $S = s^3$	S'= 0.001S
<p>Conclusión: Si la constante del sensor de inercia simple es reducido a un factor de 10, la sensibilidad a la aceleración tiene una reducción de 1000 veces, es decir, la misma aceleración produce una disminución del desplazamiento en 1000 veces menor.</p>			

Tabla 3.16 Sensibilidad de un sensor inercial

3.3.3. Escalado de actuadores electrostáticos

En el caso de un actuador electrostático basada en una configuración del condensador de placas paralelas, como se muestra en la figura 3.7, se debe conocer la energía máxima almacenada.

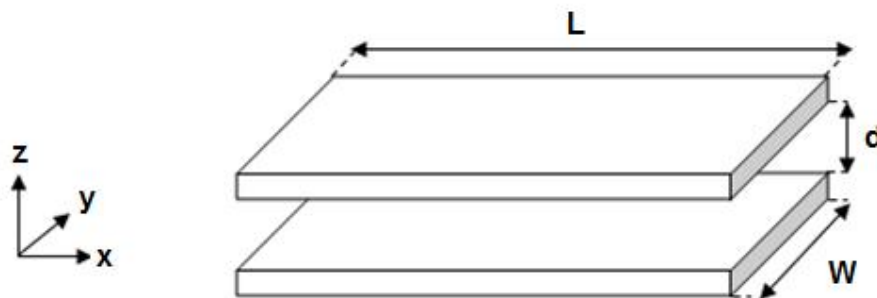


Figura 3.7 Condensador de placas paralelas

En la tabla 3.17 se resumen los parámetros:

PARÁMETRO	FÓRMULA	PARÁMETROS UTILIZADOS
Energía electrostática máxima	$U_{e,m} = \frac{1}{2} \cdot \epsilon_0 \cdot r_d \cdot V \cdot d \cdot C_b^2$	<p>C_b= Distribución del campo eléctrico</p> <p>d= Distancia entre placas</p> <p>ε₀= Permitividad eléctrica del vacío (constante)</p> <p>r_d= Rigidez dieléctrica del material (constante)</p> <p>V= Volumen del condensador</p>
Conclusión:		
<ul style="list-style-type: none"> • La energía electrostática almacenada en un condensador de placas paralelas está relacionada con su volumen. • La tensión máxima existente en una capa dieléctrica no depende de las dimensiones, lo cual produce una tensión de ruptura al ser escalado linealmente con el espesor del dieléctrico. Cuanto más fino sea el dieléctrico, menor es la tensión a soportar. Por lo tanto, menor será la energía a almacenar. Como consecuencia <u>la miniaturización de los dispositivos electrostáticos, y actuadores en particular, parece ser ineficaz.</u> 		

Tabla 3.17 Actuadores electrostáticos

3.3.4. Escalado de actuadores térmicos

El funcionamiento de los actuadores térmicos se basa en la expansión térmica de los sólidos o líquidos cuando experimenta un cambio de temperatura. A continuación se estudiarán las ecuaciones matemáticas utilizadas para un actuador térmico. Dicho análisis permitirá concluir si es beneficioso el escalamiento en este tipo de dispositivos.

El actuador térmico más simple se puede especificar por el volumen **V** de un material con coeficientes finitos de intercambio térmico y capacidad térmica. En los cambios de temperatura de **T** a **T+ΔT**, el volumen se expanda una cantidad

ΔV . Una viga en voladizo con una dimensión más elevada, es decir, **$L \gg W$** (**ancho**) y **$L \gg H$** (**espesor**), la expansión térmica puede ser considerada como un alargamiento térmico **ΔL** , calculado mediante la ecuación 3.8:

$$\Delta L = L \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

Ecuación 3.8 Expansión térmica

Donde:

α = Coeficiente de expansión térmica.

ΔL = Alargamiento térmico

L= Longitud

ΔT = Variación de temperatura

La expansión térmica es contrarrestada por las fuerzas elásticas, la energía potencial elástica se plantea en la ecuación 3.9:

$$\Delta U_k = -\frac{1}{2} K \Delta L^2$$

Ecuación 3.9 Energía potencial elástica

Donde:

K= Constante elástica.

ΔL = Alargamiento térmico

La fuerza ejercida por el actuador térmico en la dirección de la expansión térmica está dada por la ecuación 3.10:

$$F = -\frac{\delta U_k}{\delta L} = K(\alpha \Delta T)^2 L$$

Ecuación 3.10 Fuerza ejercida por el actuador térmica

Donde:

K= Constante elástica.

L= Longitud

ΔT = Variación de temperatura

α = Coeficiente de expansión térmica.

Los actuadores térmicos, la energía térmica U_{th} almacenada, se calcula mediante la ecuación 3.11:

$$U_{th} = c \cdot \rho \cdot V \cdot \Delta T$$

Ecuación 3.11 Energía térmica

La densidad de energía térmica almacenada en el actuador se expresa en la ecuación 3.12:

$$DU_{th} = c \cdot \rho \cdot \Delta T$$

Ecuación 3.12 Densidad de energía térmica

El dispositivo debe completar un ciclo entre dos temperaturas límite, por lo tanto, el calor tiende a ser eliminado, y estas transferencias están determinadas por la constante de tiempo térmica T_{th} , la cual se define en la ecuación 3.13:

$$T_{th} = \frac{\rho \cdot c \cdot V}{h_c \cdot A}$$

Ecuación 3.13 Constante de tiempo térmica

Donde:

h_c = Coeficiente de intercambio de calor, depende de los fenómenos de intercambio de calor (conducción, convección o radiación)

A = Superficie a través del cual se intercambia el calor.

Con este ejemplo, se puede concluir que:

- El escalamiento de los actuadores térmicos no es sencillo.
- La escala en actuadores térmicos y electrostáticos son equivalentes en cierta medida.

- La fuerza que un actuador puede ejercer está relacionado con la cantidad de energía que almacena. Por este motivo la comparación puede ser mejor realizado en términos de la densidad de la energía almacenada.
- La densidad de energía tiene en cuenta la eficiencia de un sistema de almacenamiento de actuación determinado.
- Los actuadores térmicos permiten una mayor densidad de energía, incremento en las fuerzas y desplazamientos.
- Para un material dado, la densidad de energía térmica está limitado por su temperatura de fusión, o una temperatura por encima del cual sus propiedades físicas cambian significativamente.
- La escala de tiempo térmica es una constante lineal con las dimensiones del sistema y por lo tanto los actuadores térmicos deben obtener una ganancia en términos de la velocidad de la miniaturización.

CAPÍTULO IV

TRANSDUCCIÓN

Introducción: La transducción es la transformación de un tipo de señal o energía en otra de distinta naturaleza. En la actualidad se conocen varias técnicas tales como: piezo-resistiva, piezo-eléctrica, capacitiva, óptica, resonante; las cuales se analizarán en este capítulo. También se estudiarán algunas técnicas de actuación.

4.1. Técnica piezo-resistiva

La piezo-resistividad deriva su nombre de la palabra griega "piezin" que significa "prensa". Es una propiedad que poseen diversos materiales, en los que al aplicar presión muestran un cambio de la resistividad. Este efecto fue descubierto por Lord Kelvin en 1856, quien señaló que la resistencia de cobre y alambres de hierro aumenta con la presión.

Cuando se utiliza semiconductores como cintas extensométricas en lugar de metal y la deformación provoca en este caso una variación de la resistencia específica. Este efecto piezo-resistivo con semiconductores es de un factor 10 hasta 100 veces mayor que con metal.

Las cintas metálicas pueden colocarse en cualquier material en tanto las cintas semiconductoras están incorporadas en la micro-estructura como una membrana. Por lo tanto las cintas extensométricas y el cuerpo expuesto a la deformación están compuestas del mismo material. Normalmente se incorpora

cuatro cintas en una membrana de silicio formando un puente de Wheatstone. Un medidor de deformación de hoja metálica típica se muestra en la figura 4.1.

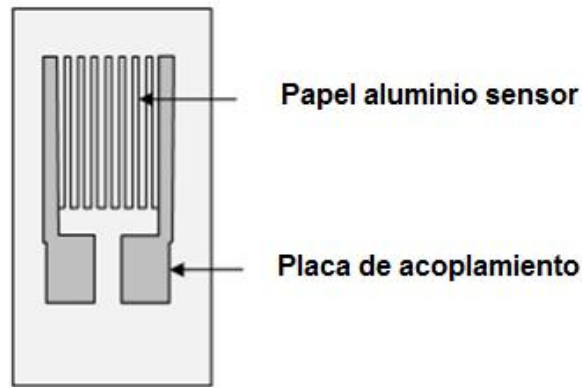


Figura 4.1 Medidor de deformación de papel de aluminio.

En el gráfico 4.2 se observa la relación entre la deformación unitaria vs esfuerzo.

Donde:

$$\varepsilon = \text{deformación unitaria} = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\delta}{L} \text{ [adimensional]}$$

$$\sigma = \text{esfuerzo o tensión} = \left[\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} \right]$$

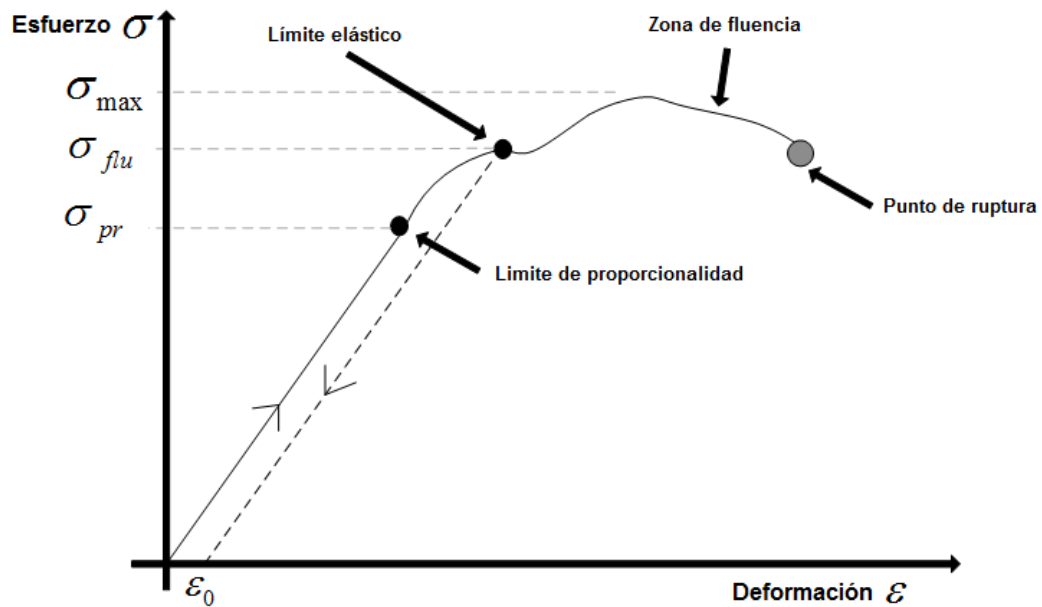


Figura 4.2 Deformación vs. Esfuerzo

La interpretación de la figura 4.2 es:

- Cuando se sobrepasa el límite elástico, y se suprime el esfuerzo aplicado, el material queda permanentemente deformado, este hecho se indica en el gráfico por medio de las flechas.
- El valor ϵ_0 , indica la magnitud de la deformación permanente.
- El punto de fluencia se define como la intersección de una paralela a la línea de la zona elástica que pasa por el punto de deformación permanente.

Con σ y ϵ se puede obtener el módulo de elasticidad del material, E, esta relación se representa en la ecuación 4.1.

$$E = \frac{\text{esfuerzo}}{\text{deformación unitaria}} = \frac{\sigma}{\epsilon} = \left[\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} \right]$$

Ecuación 4.1 Módulo de elasticidad o módulo de Young

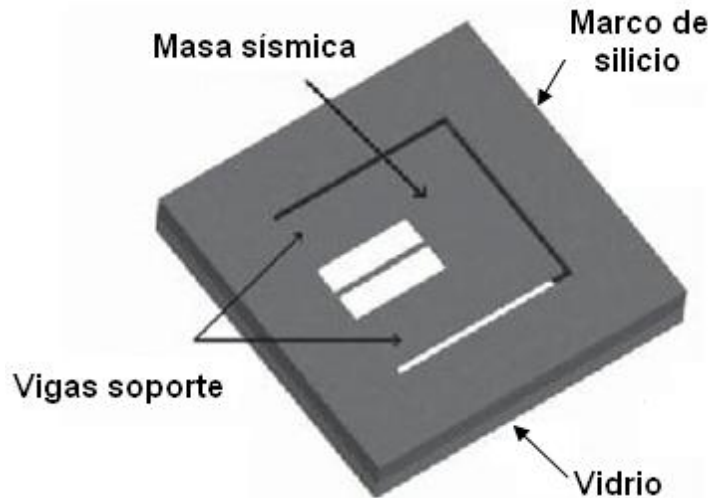
En la tabla 4.1 se explican los parámetros utilizados en los materiales piezo-resistivos y como se los obtiene:

PARÁMETRO	DEFINICIÓN	FÓRMULA
Factor de galga	Parámetro que define la sensibilidad de un medidor de deformación (galga).	$GF = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = \frac{\Delta R/R}{\epsilon} = [\text{adimensional}]$ <p>R=resistencia inicial del medidor de deformación ΔR=cambio en la resistencia. ε=esfuerzo</p>
Módulo de Poisson	Es la relación entre la deformación transversal y la longitudinal.	$m = \frac{\text{deformación lateral}}{\text{deformación axial}} = [\text{adimensional}]$

PARÁMETRO	DEFINICIÓN	FÓRMULA
Resistencia de un material	Propiedades de los materiales que les permite resistir la acción de las fuerzas externas.	$R = \frac{\rho \cdot L}{A} = [\Omega]$ <p> ρ=resistividad volumétrica del material [Ωcm] L=longitud [cm] A=área transversal [cm] </p>

Tabla 4.1 Parámetros de los materiales piezo-resistivos

Como ejemplo de un dispositivo que utiliza esta técnica de transducción se tiene el acelerómetro piezo-resistivo ilustrado en la figura 4.3. Cuando se ejerce una presión sobre su eje sensible, la masa experimenta un desplazamiento que ocasiona deformaciones en la viga. Esta deformación afecta al elemento piezo-resistivo provocándole un cambio en su resistencia eléctrica. Esta variación es detectada por un puente de Wheatstone que emite dicha señal de salida eléctrica. [20]

Figura 4.3 Vista isométrica superior de un acelerómetro piezo-resistivo²⁵

En dicha estructura el transductor piezo-resistivo se localiza en el inicio de la viga como se observa en la figura 4.4, donde la concentración de esfuerzos mecánicos es máxima.

²⁵ Tomado de: A. L.Herrera May, A. R. Cortés Pérez, L. A. Aguilera Cortés, "Los micro-acelerómetros en la actualidad", Mayo-Agosto, año/vol. 18, número 002 [Online]. Disponible: <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/html/416/41618204/41618204.html>

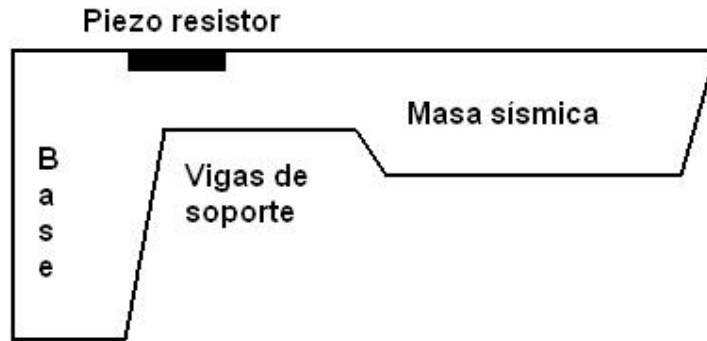


Figura 4.4 Sección transversal de un micro-acelerómetro piezo-resistivo.

En la tabla 4.2 se indica los beneficios y desventajas de utilizar la técnica piezo-resistiva:

BENEFICIOS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> ü Simplicidad de sus estructuras. ü Procesos simples de fabricación. 	<ul style="list-style-type: none"> ü Elevada sensibilidad a efectos de temperatura ü Requiere una compensación de temperatura individual para cada sensor.

Tabla 4.2 Características de la técnica: piezo-resistiva

4.2. Técnica piezoeléctrica

El efecto piezoeléctrico, es un fenómeno físico que presentan algunos cristales. Fue descubierto por primera vez en el cuarzo por Jacques y Pierre Curie en 1880. En la piezoelectricidad aparece una diferencia de potencial eléctrico (voltaje) entre ciertas caras del cristal cuando éste se somete a una deformación mecánica y se denomina efecto piezo-eléctrico directo. Este efecto funciona también a la inversa: cuando se aplica un campo eléctrico a ciertas caras de una formación cristalina, ésta experimenta distorsiones mecánicas (efecto piezo-eléctrico inverso).

Cuando se comprime el cristal, los átomos ionizados (cargados) presentes en la estructura de cada celda de formación del cristal se desplazan, provocando

una polarización eléctrica. Debido a la regularidad de la estructura cristalina, estas cargas se suman y se produce una acumulación de la carga eléctrica, produciendo una diferencia de potencial eléctrico entre determinadas caras del cristal. Como sucede con cualquier carga inducida, al cabo de un cierto tiempo se pierde. Como consecuencia, la tensión de salida en función del tiempo presenta una forma similar a la de la figura 4.5.

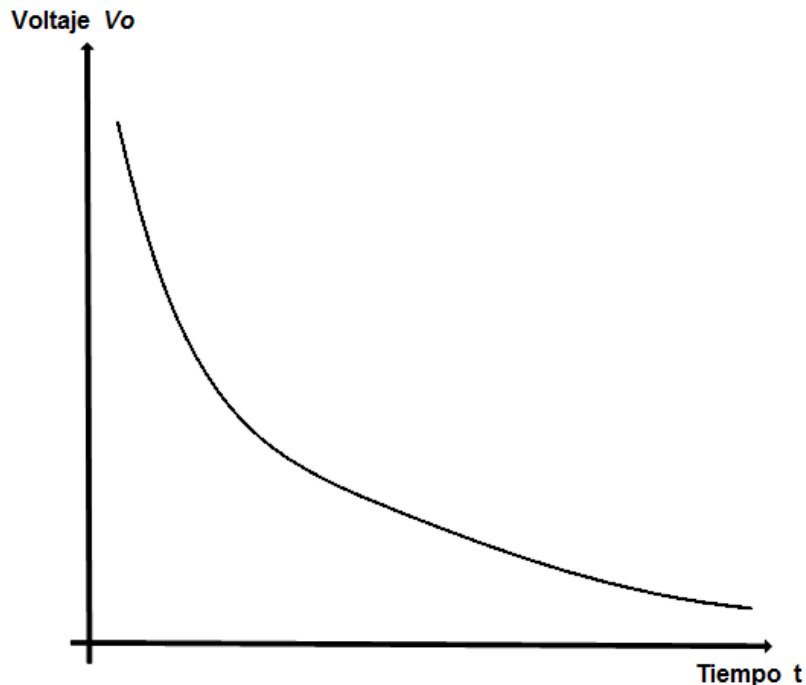


Figura 4.5 Tensión de salida en función del tiempo para un transductor piezoeléctrico

Según la figura 4.5, se tiene que:

- El tiempo en el cual la tensión de salida se mantiene es muy pequeña. Por esta razón, los transductores piezoeléctricos no son apropiados para medir desplazamientos lentos. Sin embargo, la constante de tiempo del sensor puede incrementarse conectándole un condensador en paralelo.

Una aproximación de circuito eléctrico equivalente de un material piezoeléctrico se muestra en la figura 4.6. El circuito representa un sistema resonante serie-paralelo.

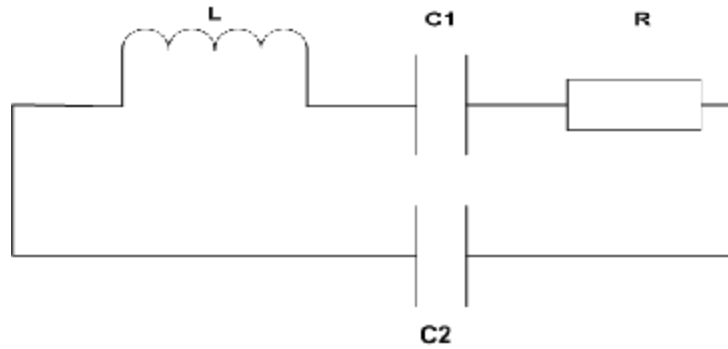


Figura 4.6 Circuito eléctrico equivalente de un material piezo-eléctrico

En la figura 4.7 se muestran los picos de impedancia resonante y antiresonante en frecuencias distintas.

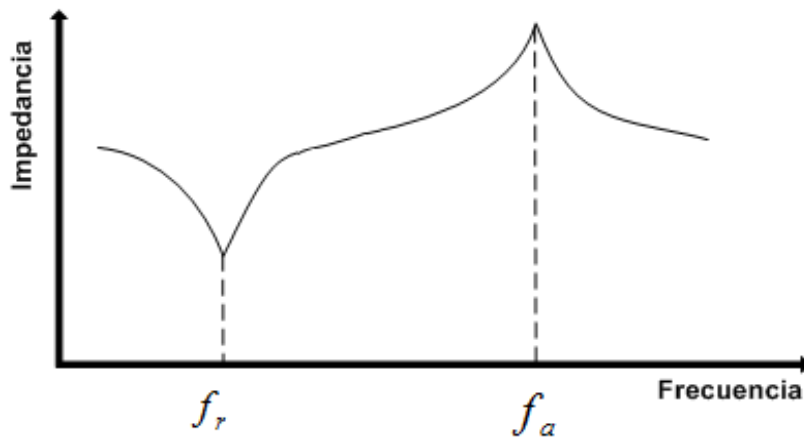


Figura 4.7 Curva de respuesta frecuencia vs. Impedancia de un material piezo-eléctrico

La interpretación de las figuras 4.6 y 4.7 es:

- La resonancia mecánica del dispositivo está representada por el inductor (L), el condensador (C1) y la resistencia (R) y estos son el equivalente de la masa, el resorte y amortiguador, respectivamente.
- El material piezo-eléctrico es un dieléctrico con electrodos y tendrá una capacitancia en paralelo asociados a C_2 .
- El circuito resonante en serie es responsable del pico de resonancia (f_r). El circuito en paralelo da lugar al comportamiento antiresonante (f_a).

- El circuito se comporta como un condensador simple en frecuencias inferiores a f_r , como un inductor entre f_r y f_a y después de f_a la impedancia disminuye con la frecuencia.

Las dos frecuencias de resonancia se calculan como nos indica la siguiente ecuación:

$$f_r = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{L \cdot C_1}} \quad \text{y} \quad f_a = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{L \cdot C_1 \cdot C_2}}$$

Ecuación 4.2 Frecuencia de resonancia y de anti-resonancia

El efecto piezoeléctrico depende de la dirección de polarización y de la fuerza aplicada. En la figura 4.8, el eje de referencia denominado eje 3 es paralelo a la dirección de la fuerza. Los ejes 1 y 2 se definen arbitrariamente con el fin de formar un sistema particular de coordenadas con el eje 3. Además 4, 5 y 6 representan los movimientos de corte en torno a los ejes 1, 2 y 3, respectivamente. Al definir estos ejes se determina el tipo de deformación que sufre el material. Esta deformación puede ser axial, transversal o flexión.

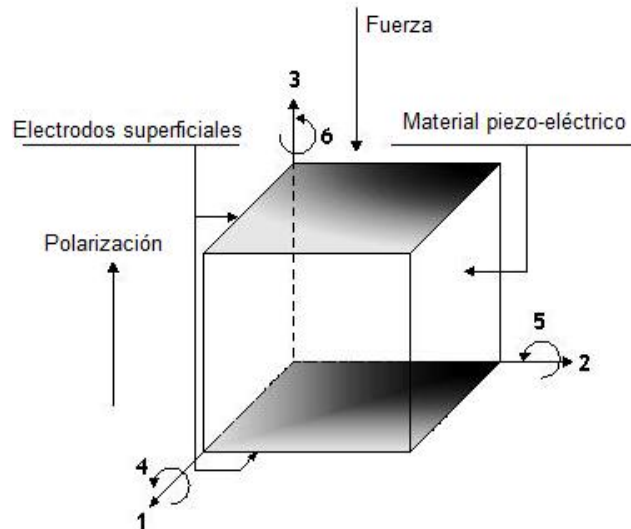


Figura 4.8 Ejemplo del efecto piezo-eléctrico

Un parámetro piezo-eléctrico importante es el coeficiente de carga d_{ij} [C/N]. Este relaciona la cantidad de carga generada en la superficie del material en el eje i de la fuerza aplicada sobre el eje j . Si una fuerza, F_3 , se aplica a la muestra piezo-eléctrica, se generan las constantes piezo-eléctricas del material observadas en la tabla 4.3:

CONSTANTE	FÓRMULA
Carga generada	$Q_3 = d_{ij} \cdot F_3$ d_{ij} = Coeficiente de carga piezo-eléctrica F_3 = Fuerza aplicada
Tensión generada	$V_3 = \frac{d_{ij} \cdot F_3 \cdot H}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}$ A = Área del bloque H = Grosor del bloque ϵ_r = Permitividad relativa ϵ_0 = Permitividad de espacio libre
Coeficiente de tensión piezo-eléctrica	$g_{ij} = \frac{d_{ij}}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r}$ d_{ij} = Coeficiente de carga piezo-eléctrica ϵ_r = Permitividad relativa ϵ_0 = Permitividad de espacio libre

Tabla 4.3 Constantes piezo-eléctricas del material

Dada su capacidad de convertir la deformación mecánica en voltaje eléctrico, y el voltaje eléctrico aplicado en deformación mecánica, los cristales piezoeléctricos encuentran un amplio campo de aplicaciones en:

- Transductores de presión
- Agujas para los reproductores de discos
- Micrófonos.
- Cristales resonadores para los relojes y en osciladores electrónicos de alta frecuencia.

En la tabla 4.4 se indica los beneficios y desventajas de utilizar la técnica piezoeléctrica:

BENEFICIOS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> ü Utilizan muy baja potencia. ü Tienen una integración compacta con el circuito electrónico. ü Alta sensibilidad a pequeños desplazamientos. 	<ul style="list-style-type: none"> ü Dependen de los coeficientes piezoeléctricos del material sensible. ü Son dependientes de la temperatura.

Tabla 4.4 Características de la técnica piezoeléctrica

4.3. Técnica capacitiva

Las técnicas capacitivas, se basan en la medida del cambio de la capacitancia entre dos electrodos cuando uno de ellos se desplaza o deforma debido a la fuerza aplicada. Existen diferentes formas de medir el cambio inducido en una capacitancia. Por ejemplo, se puede medir con un puente de impedancia, un oscilador controlado por un capacitor o un circuito de medida de carga. En el figura 4.9 se observa la relación entre la carga y la variación de voltaje.

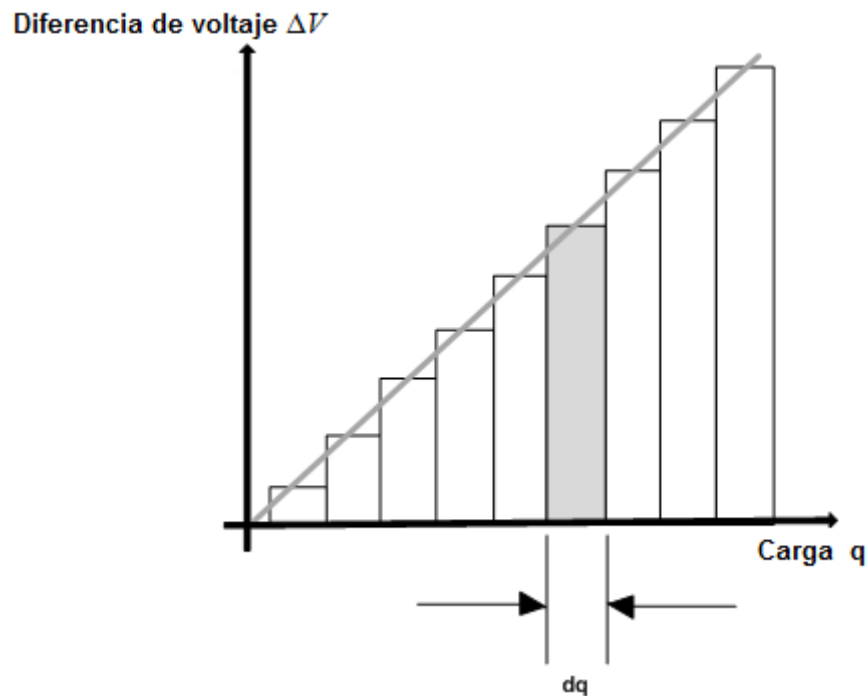


Figura 4.9 Diferencia de voltaje vs carga

Al analizar la figura 4.9, se tiene:

- Para una capacitancia dada, la energía almacenada aumenta a mientras la carga se incrementa y conforme crece la diferencia de potencial. En la práctica hay un límite para la energía (o carga) máxima, el cual produce una descarga entre las placas. Por esta razón, los capacitores suelen etiquetarse con un voltaje de operación máximo.
- El resultado de esta gráfica se aplica a cualquier capacitor, sin importar su geometría.

El valor de la capacitancia está dado por la ecuación 4.3. [22]

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{d}$$

Ecuación 4.3 Capacitancia de un condensador de placas paralelas

Donde:

ϵ_0 = Permitividad del espacio libre.

ϵ_r = Permitividad relativa del material entre las placas.

A= Área de superposición entre los electrodos.

d= Separación entre los electrodos.

La figura 4.10 ilustra tres configuraciones de un capacitor. La Figura 4.10 (a) muestra el caso sencillo donde se fija el electrodo inferior y se mueve el electrodo superior. En este caso, la separación, d , está cambiando y por lo tanto, la capacitancia varía de un modo no lineal. La Figura 4.10 (b) muestra un dispositivo en el que se fija la separación y el área de superposición es variada. En esta configuración, existe una relación lineal entre la capacitancia y el área de superposición. La Figura 4.10 (c) muestra una estructura con una distancia fija entre los electrodos y el área de superposición.

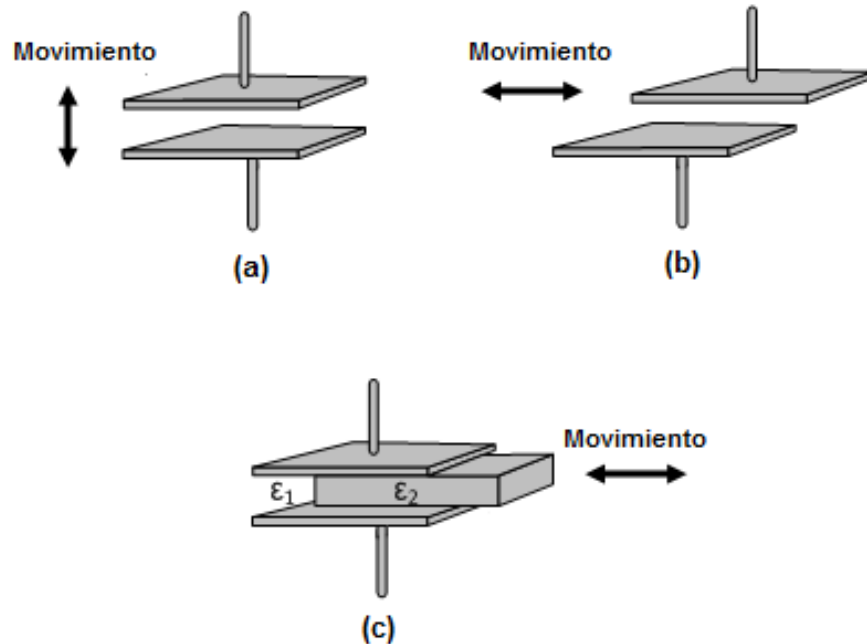


Figura 4.10 Ejemplos de sensores de desplazamiento de capacitancia: (a) placa móvil, (b) de área variable, y (c) se mueve el dieléctrico.

La Figura 4.11 muestra un sensor de capacitancia diferencial, similar en naturaleza a un sensor capacitivo de placa en movimiento, sin embargo, tiene un electrodo fijo adicional.

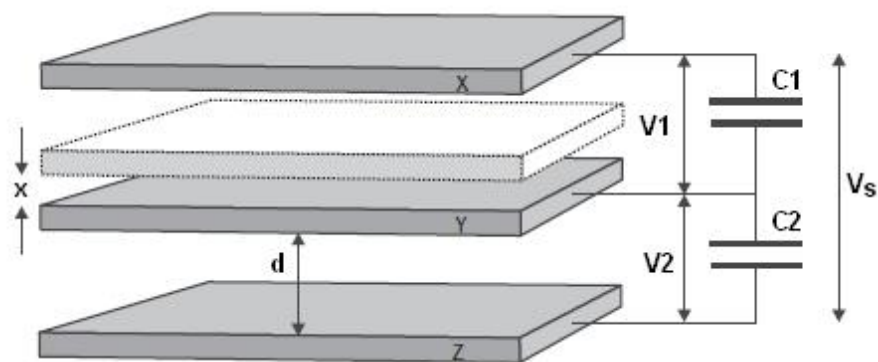


Figura 4.11 Sensor de capacitancia diferencial

Si se supone que los dos electrodos exteriores (X y Z) son fijos y el electrodo interno (Y) es libre de moverse en una dirección paralela a la X, entonces la brecha entre las placas X e Y se reducirá y la distancia entre Y y Z aumenta. Si la distancia d es la distancia nominal entre el electrodo central y se

mueve por una distancia x , entonces la relación entre la tensión de salida diferencial y la deflexión está dada por la ecuación 4.4 [19]:

$$V_2 - V_1 = V_s \left(\frac{x}{d} \right)$$

Ecuación 4.4 Relación entre tensión de salida diferencial y la deflexión

Donde:

V_s = Voltaje de la fuente.

V_1 = Voltaje entre X-Y.

V_2 = Voltaje entre Y-Z.

x = Distancia que se mueve el electrodo central

d = Distancia nominal entre el electrodo central (Y)

En la tabla 4.4 se indica los beneficios y desventajas de utilizar la técnica capacitiva:

BENEFICIOS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> ü Tienen una baja dependencia a la temperatura a diferencia de los piezo-resistivos. ü Alta sensibilidad. ü Baja disipación de potencia y una estructura simple. ü Son relativamente menos ruidosas que las basadas en la piezo-resistencia debido a la falta de ruido térmico. 	<ul style="list-style-type: none"> ü Alta sensibilidad a la interferencia electromagnética. ü Necesita un sistema de protección a través del empaquetado.

Tabla 4.5 Características de la técnica capacitiva

4.4. Técnica óptica

Las técnicas ópticas de detección se basan en la modulación de las propiedades de una onda electromagnética. En el caso de sensores ópticos, la magnitud directamente modula las propiedades de la onda electromagnética. En

el caso de micro-sensores con interfaz óptica, este interactúa con el mensurando. La magnitud entonces modula la característica de la señal óptica con el fin de proporcionar un indicador de la magnitud sometida a medición.

Podemos distinguir entre técnicas que proporcionan una medida directa de la distancia o desplazamiento del objeto, como la triangulación o el tiempo de vuelo. También existen técnicas indirectas como la interferometría y sensibilidad de la amplitud. Las técnicas interferométricas son ampliamente usadas por su gran resolución. Las técnicas de amplitud sensitiva son simples pero requieren calibración durante su ciclo de operación.

En las técnicas ópticas se emplean diferentes tipos de fotodetectores, incluyendo los fotoconductores, los fototransistores, los diodos PIN, los fotodiodos de avalancha y los fotomultiplicadores.

En la tabla 4.4 se indica los beneficios y desventajas de utilizar la técnica óptica:

BENEFICIOS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> ü Inmunidad a la interferencia electromagnética. ü Capacidad de operar en ambientes con alta temperatura. ü Bajas pérdidas de transmisión. 	<ul style="list-style-type: none"> ü Complicado proceso de fabricación. ü Necesidad de un empaquetado especial.

Tabla 4.6 Características de la técnica óptica

Las propiedades a modular en una onda electromagnética son las 6 siguientes:

1. Intensidad
2. Fase
3. Longitud de onda
4. Posición espacial

5. Frecuencia
6. Polarización

A continuación se explican las técnicas utilizadas para detectar cada propiedad de la onda electromagnética.

4.4.1. Intensidad

Las variaciones de la intensidad son detectadas por fotodiodos o por fototransistores. Por lo tanto, si el micro-sensor permite variar la intensidad de una señal óptica, podrán ser observadas con un fotodetector.

El fotodetector es un transductor de luz que proporciona una señal eléctrica como respuesta a la radiación óptica incidente sobre la superficie sensora. La Figura 4.12 ilustra un arreglo transmisivo simple, aunque también se puede recibir en arreglos de foto-receptores.

La fuente óptica se muestra como un diodo emisor de luz (LED). Las fuentes ópticas alternativas pueden ser un láser, fibra óptica, o, una lámpara incandescente.

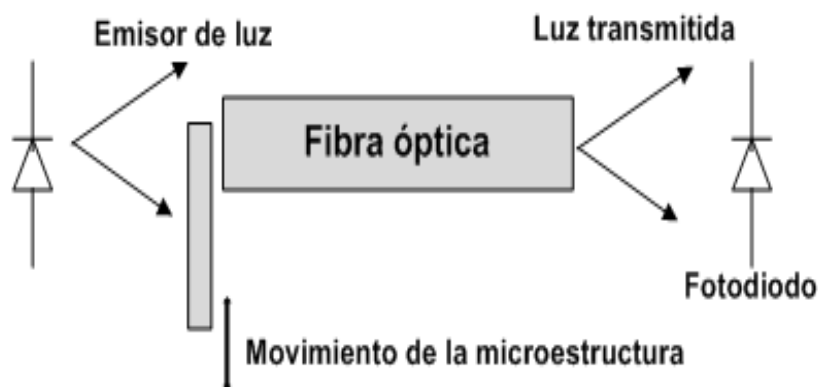


Figura 4.12 Sistema de detección de la intensidad modulación

La curva de respuesta de este tipo de sensor se observa en la figura 4.13.

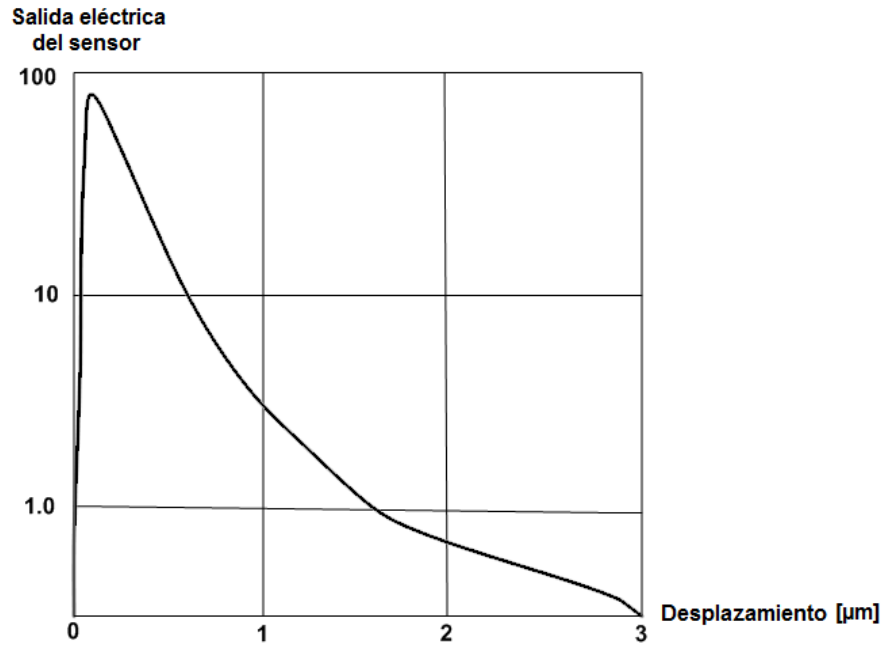


Figura 4.13 Curva de respuesta

La interpretación del gráfico 4.13 es:

- La salida eléctrica del sistema decrece de forma exponencial cuando aumenta la separación respecto de la superficie reflectora. La intensidad de los rayos de luz emitidos puede ser constante, variable de forma senoidal o emitirse en forma de pulsos. Su elección depende del tiempo de respuesta del sensor y de la aplicación.

La salida de una fuente óptica puede variar con el tiempo y la temperatura. Por esta razón, los sensores basados en intensidad a menudo incorporan alguna medida de referencia de la intensidad de la fuente óptica y una relación entre la intensidad medida, antes y después de aplicada la modulación por el micro-sensor.

4.4.2. Fase

Dado que los fotodetectores no responden directamente a la variación de fase, es necesario convertir una variación de fase en una variación de intensidad para medirla con el fotodiodo. Esto se consigue normalmente mediante el uso de un interferómetro. Este instrumento emplea la interferencia de las ondas de luz

para medir con gran precisión longitudes de onda de la luz. La interacción con el micro-sensor tiene el efecto de modificar la longitud del camino óptico de ese haz y por tanto su fase. Este efecto sólo puede lograrse mediante la reflexión regular del haz óptico a través de un espejo. En la figura 4.14 se presenta la estructura de este dispositivo.

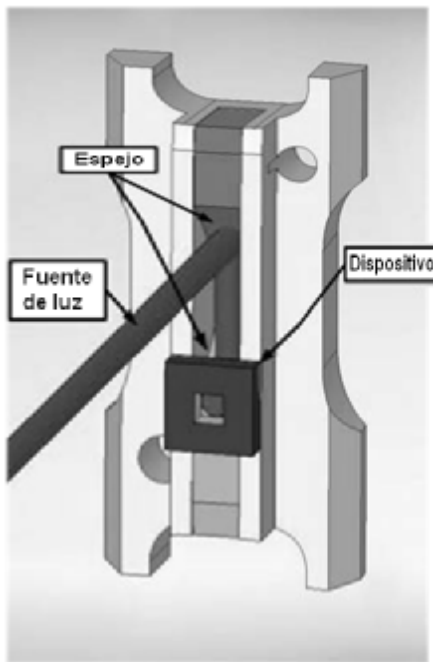


Figura 4.14 Micro-sensor óptico²⁶

En los dispositivos basados en la detección de fase, la salida del interferómetro es periódica. Por lo tanto, es necesario establecer el punto de inicio y su respectiva posición. Entonces se requiere elementos de referencia más complejos para disminuir los errores en la inicialización del sistema. [21].

4.4.3. Longitud de onda

La detección de la longitud de onda utiliza su espectro. La luz del micro-sensor se divide en segmentos del espectro y los mismos van a un fotodetector para la medición de su intensidad. A continuación se representa en la figura 4.15 un dispositivo que nos permite medir las longitudes de onda de una fuente de luz.

²⁶ J. Duarte, F. Fernández, M. Moreno Sereno, "Técnicas de medida para pequeños desplazamientos", Junio 2009. [Online]. Disponible: <http://redalyc.uaemex.mx/pdf/496/49612069017.pdf> [Accesado: Septiembre 22, 2010]

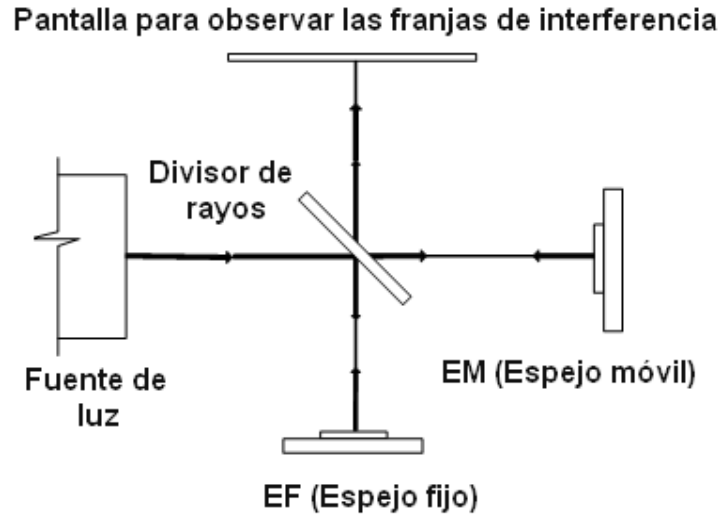


Figura 4.15 Interferómetro de Michelson

Según la figura 4.15, se puede decir:

- El haz proveniente de EM es reflejado hacia la pantalla, y el proveniente de EF es transmitido hacia la pantalla. Como ambos haces provienen de una única fuente láser mantienen una absoluta coherencia entre sí, y van a interferir al actuar simultáneamente sobre la pantalla.

Los sensores basados en la longitud de onda pueden ser insensibles a la variación de la intensidad, porque afectan a todo el espectro de la misma manera. Por lo tanto, la medición de una longitud de onda sin absorción puede ser utilizada para hacer referencia a la longitud de onda absorbida, compensando las variaciones de intensidad. Un buen ejemplo de un sensor basado en la longitud de onda es el de la absorción de gas. Este dispositivo tiene una alta longitud de onda específica de acuerdo a la cantidad de gas presente.

4.4.4. Posición espacial

El principio de posición espacial es conocida como triangulación utilizado para detecta el desplazamiento de la micro-estructura empleando un haz de luz. Este principio se ilustra en la figura 4.16.

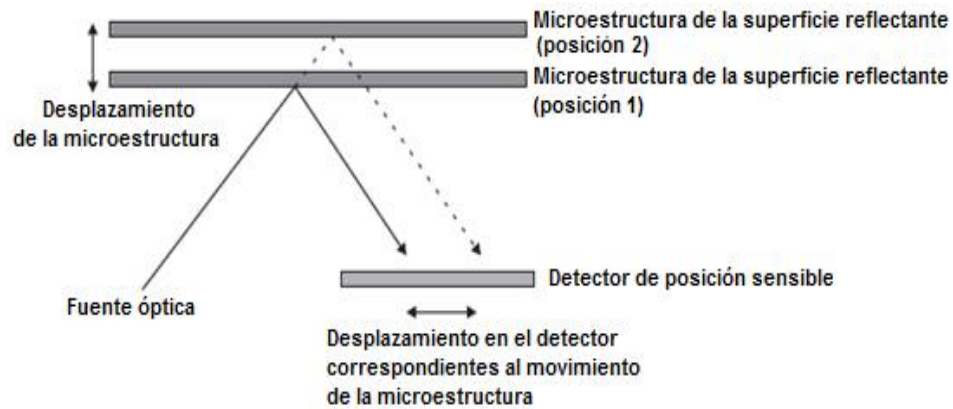


Figura 4.16 Sistema de medida de la posición espacial

De acuerdo a la geometría de la figura 4.17, esta técnica consiste en determinar las posiciones (a,b,c) sobre un sensor de la proyección de un punto luminoso sobre el objeto, el cual requiere propagación en el espacio libre. Un haz láser sale reflejado de la superficie de la muestra y es detectado usando un fotodetector. El haz láser se refleja con un ángulo oblicuo desde la superficie de la muestra, esto produce que la muestra sea más pequeña comparada con el diámetro del haz láser. Por lo tanto, se requiere un espejo más grande que la anchura del haz láser en la reflexión. De esta manera se evita los efectos de difracción indeseables [21].

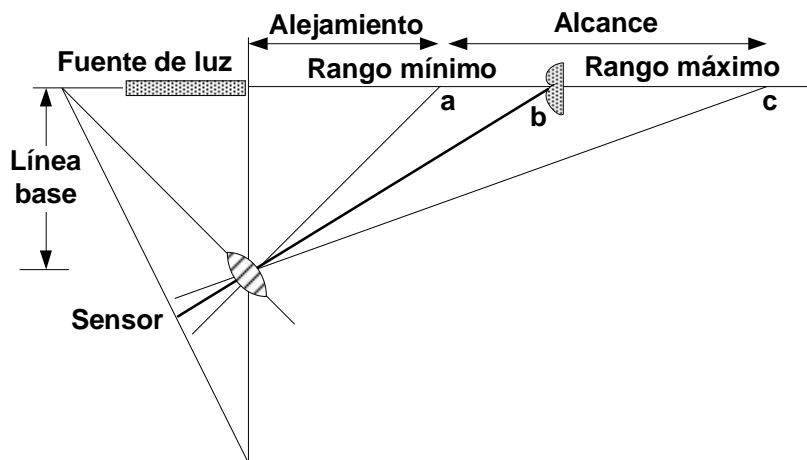


Figura 4.17 Geometría de un sistema de triangulación óptica²⁷

²⁷ Tomado de: J. Duarte, F. Fernández, M. Moreno Sereno, "Técnicas de medida para pequeños desplazamientos", Junio 2009. [Online]. Disponible: <http://redalyc.uaemex.mx/pdf/496/49612069017.pdf> [Accesado: Septiembre 22, 2010]

La figura 4.18 ilustra la curva de calibración del sensor a tres distancias distintas del objeto sobre el cual se proyecta la luz siendo estas: a,b,c. De esta manera nos permite observar tres posiciones del objeto o imagen.

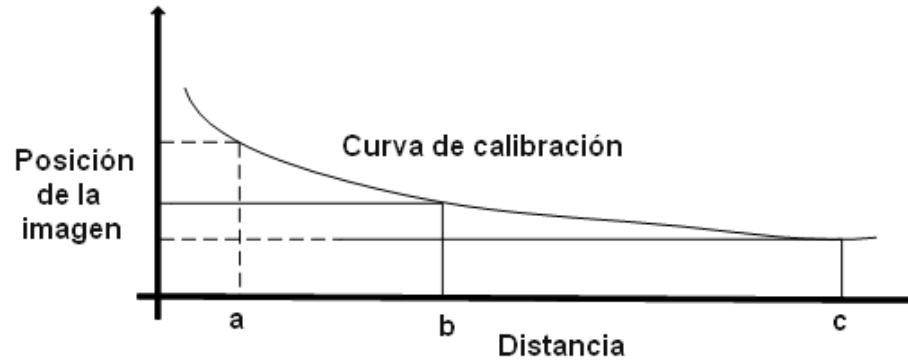


Figura 4.18 Curva de calibración de un sistema de triangulación óptica:
Distancia vs. Posición de la imagen

Estos dispositivos presentan facilidad de implementación e inmunidad a las variaciones de intensidad de la fuente. Entre las desventajas de la triangulación se tiene la no-linealidad. De esta manera, el movimiento del objeto y la posición de la imagen sobre el sensor no se mueven en incrementos iguales. Sin embargo, para rangos pequeños se puede considerar lineal.

4.4.5. Frecuencia

La radiación óptica a una frecuencia f es incidente sobre un cuerpo en movimiento a una velocidad v . Entonces la radiación reflejada por el cuerpo en movimiento parece tener una frecuencia f_1 . Esta frecuencia se calcula con la ecuación 4.5:

$$f_1 = \frac{f}{1 - \frac{v}{c}} \approx f \left[1 + \frac{v}{c} \right]$$

Ecuación 4.5 Frecuencia de una radiación óptica

El cambio de la frecuencia Doppler de un blanco puede ser utilizado como la base de una técnica de detección de la velocidad del objetivo. La variación de

frecuencia se convierte en la variación de intensidad al utilizar interferometría. El principio fundamental de la interferometría consiste en la interacción de dos ondas luminosas que se encuentran una con otra.

Cuando la cresta de una onda coincide con el valle de la otra, la interferencia es destructiva y las ondas se anulan; cuando coinciden las dos crestas o los dos valles, las ondas se refuerzan mutuamente. Además proporciona una buena resolución y no requiere un contacto físico directo con la superficie sometida a estudio. Un ejemplo de este principio se observa en la figura 4.19. [21]

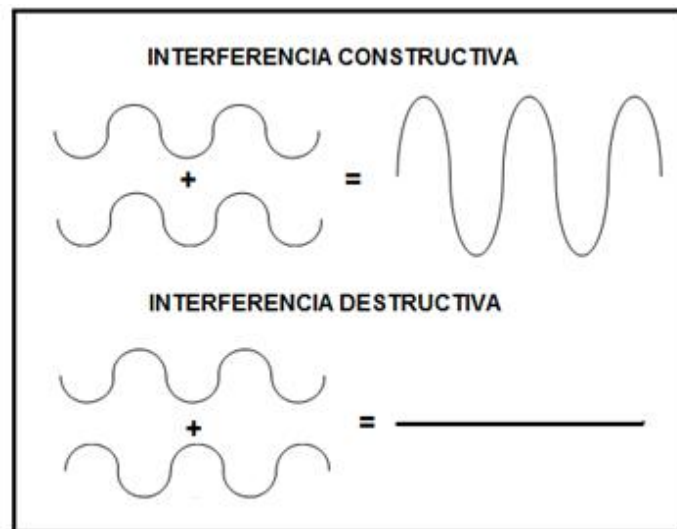


Figura 4.19 Ejemplo del principio de superposición de 2 ondas iguales en magnitud y frecuencia. Cuando se presenta la interferencia, las ondas se suman constructiva o destructivamente.

4.5. Técnicas resonantes

Un resonador es una estructura mecánica con la capacidad de comportarse de manera resonante. Es decir oscila a una determinada frecuencia llamada frecuencia de resonancia con una amplitud más grande al compararla con otras. En la figura 4.20 se observa el diagrama de bloques de dichas estructuras.

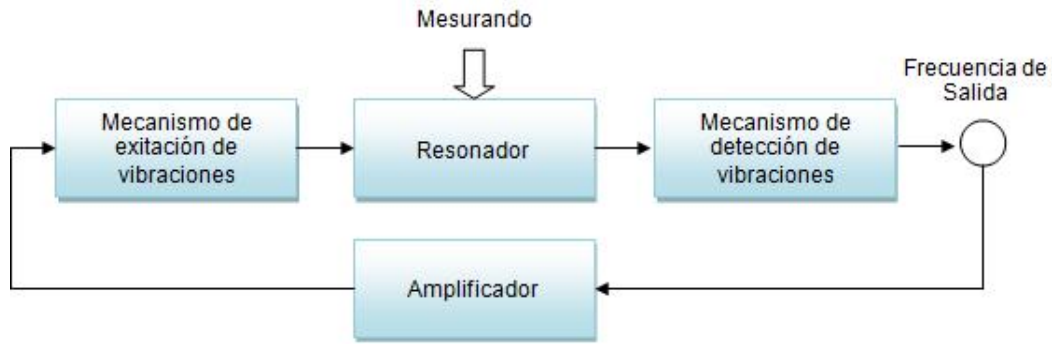


Figura 4.20 Diagrama de Bloques de un Sensor Resonante

Los sensores resonantes tienen un elemento vibrante. Este elemento cambia su frecuencia de resonancia al ver alterado alguno de los parámetros como: la masa, la temperatura, la tensión mecánica, el campo eléctrico o la fuerza. Dichas variables constituyen la magnitud a medir.

Existen varias configuraciones de los elementos de resonancia, tales como vigas, diafragmas o membranas, estructura "mariposa", estructura en H, tubos, cilindros, cadenas, barras, o micro-piezas mecanizadas de cuarzo. En la figura 4.21 se muestra un esquema de una viga simple y una viga con un elemento detector de vibraciones en su extremo.

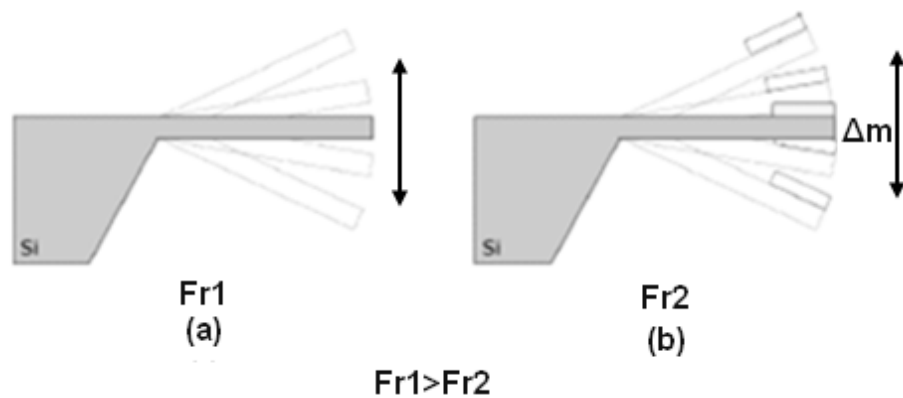


Figura 4.21 Esquema del principio de actuación del sensor resonante. (a) Sin elemento sensor y (b) con elemento sensor

El factor de calidad mecánica (factor Q) es un parámetro que mide la relación entre la energía reactiva que almacena y la energía que disipa durante un

ciclo completo de la señal o en otras palabras, una medida de la amortiguación mecánica en un sistema, como se observa en la figura 4.22

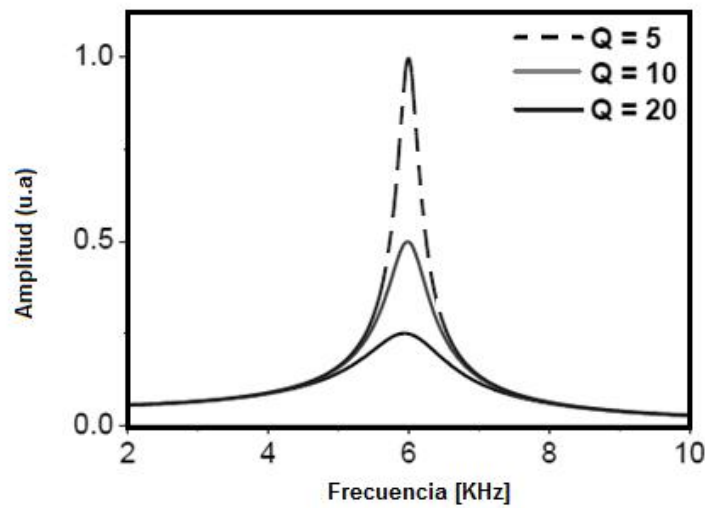


Figura 4.22 Curva característica de un Sistema de Resonancia

La interpretación del gráfico 4.22 es:

- El factor de calidad Q determina la amplitud y el ancho del pico en la resonancia. Donde a mayor valor en el factor Q menor será su amplitud.
- Se analizaron sistemas con diferente factor Q y con la misma frecuencia de resonancia. De esta manera si Q=20 (curva negra) su amplitud es de 0.25, Q=10 (curva ploma) amplitud es de 0.5 y Q=5 (curva de línea entrecortada) su amplitud es de 1.

La ecuación 4.6 se utiliza para calcular el factor de calidad:

$$Q = \frac{f_o}{\Delta_f}$$

Ecuación 4.6 Factor de calidad relacionando la frecuencia de resonancia

Donde:

f_o = Frecuencia de resonancia a la amplitud máxima (a_{max})

Δ_f = Diferencia de frecuencia: $f_2 - f_1$. Las frecuencias f_1 y f_2

corresponden a amplitudes de vibración por debajo de los 3 dB.

El comportamiento no lineal puede afectar negativamente a la exactitud del sensor resonante. Este efecto es evidente en amplitudes de vibración alta cuando la fuerza de restauración del resonador se convierte en una función no lineal de acuerdo a su desplazamiento.

4.5.1. Mecanismos de activación/transmisión y detección de vibraciones

Otro componente de los sensores resonantes son los mecanismos de accionamiento y detección de vibración. El mecanismo de accionamiento excita las vibraciones en la estructura; mientras, el mecanismo de detección censa estas vibraciones. Estos elementos son muy importantes porque se utilizan para determinar la frecuencia de resonancia.

Los criterios que determinan el tipo de mecanismos de excitación y detección a utilizar son:

- El rendimiento y el comportamiento de los resonadores.
- Las propiedades del material como: fatiga, expansión térmica, relación señal-ruido y la interferencia de otras señales.
- El tipo y la cantidad de materiales utilizados para la fabricación.
- El costo.

Los mecanismos de excitación y detección resonantes más utilizadas son las 6 siguientes:

1. Excitación electrostática y detección capacitiva
2. Excitación y detección magnética
3. Excitación y detección piezoeléctrica
4. Excitación electro-termal y detección piezo-resistiva
5. Excitación opto-termal y detección óptica
6. Excitación y detección dieléctrica

A continuación, se analizan los principios básicos de cada uno de estos mecanismos:

4.5.1.1. Excitación electrostática y detección capacitiva

Se considera un sistema en el que el sensor tiene 2 placas o electrodos en donde el sustrato es la carga de conducción. Para la excitación se aplica un voltaje y aparece una fuerza electrostática que las acerca. Se opone una fuerza elástica empujándolas hacia la posición de equilibrio original. Entonces, la detección capacitiva consiste en medir las variaciones de capacidad eléctrica entre un electrodo fijo y otro móvil para censar su desplazamiento.

Como se observa en la figura 4.23, un esquema de este tipo de mecanismo se da cuando se tiene dos capacitores de placas paralelas con una capacidad eléctrica dada. Donde x es la mitad del ancho de la placa superior, y g es la separación entre ellas. Cuando no se aplica voltaje, la placa móvil es paralela a estos y la capacitancia no cambia. Cuando se aplica un voltaje, dicha placa rota un ángulo, dejando de ser paralelas, en este momento se mide la variación de capacitancia.

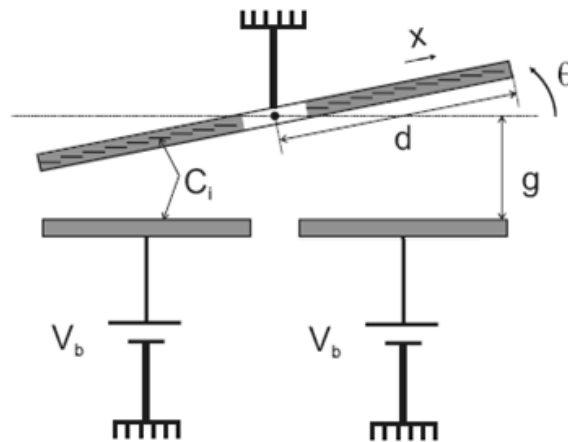


Figura 4.23 Esquema del mecanismo de excitación electrostática y detección capacitiva ²⁸

En la tabla 4.7 se indica los beneficios y desventajas de utilizar la técnica resonante con el mecanismo de excitación electrostática y detección capacitiva:

²⁸ Tomado de: Elwenspoek, M. and Wiegerink, R. "Mechanical Microsensors", Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2001.

BENEFICIOS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> ü Bajo consumo. ü Buena sensibilidad. ü Facilita la fabricación de los resonadores y su integración con la electrónica. 	<ul style="list-style-type: none"> ü Alta impedancia. ü Presencia de componentes parásitos y acoples electrostáticos. ü La señal de salida es muy pequeña porque la capacitancia es pequeña.

Tabla 4.7 Características de la Técnica: excitación electrostática y detección capacitiva

4.5.1.2. Excitación y detección magnética

Un campo magnético externo se puede utilizar para la excitación magnética como se observa en la figura 4.24. Cuando la viga vibra, el flujo magnético pasa a través del bucle de corriente e induce un voltaje en el circuito. Dicha variable proporciona la señal de detección.

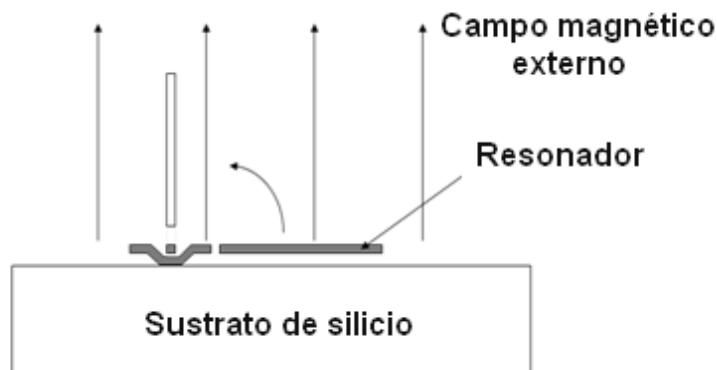


Figura 4.24 Esquema del mecanismo de excitación y detección magnética

En la tabla 4.8 se indica los beneficios y desventajas de utilizar la técnica resonante con el mecanismo de excitación y detección magnética:

BENEFICIOS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> ü El método de fabricación es simple. 	<ul style="list-style-type: none"> ü Dificultad en integrar un imán cerca del resonador. ü Esfuerzo de compresión axial

BENEFICIOS	DESVENTAJAS
	inducido por los resonares debido a la expansión térmica. ü Frecuencia de resonancia baja.

Tabla 4.8 Características de la técnica: excitación y detección magnética

4.5.1.3. Excitación y detección piezoeléctrica

Para la excitación se utiliza el efecto piezoeléctrico inverso, mediante el cual a través de un campo eléctrico se produce una deformación mecánica. Para la detección se aprovecha el efecto piezoeléctrico directo, donde aparece un voltaje cuando éste se somete a una deformación mecánica.

La figura 4.25 muestra una viga en voladizo multicapa formada por un material no piezoeléctrico (capa estructural) sobre la que se apoya un material piezoeléctrico (situado entre 2 electrodos metálicos). La aplicación de un campo eléctrico entre los electrodos produce una extensión o contracción longitudinal de la lámina piezoeléctrica proporcional al coeficiente piezoeléctrico. La capa estructural resiste la deformación generando una tensión mecánica. Por lo tanto, la estructura experimenta un movimiento perpendicular a la tensión generada por un par de fuerzas internas. De esta manera, se produce la deformación del piezoeléctrico y el voltaje generado es la medida para detectar las vibraciones.

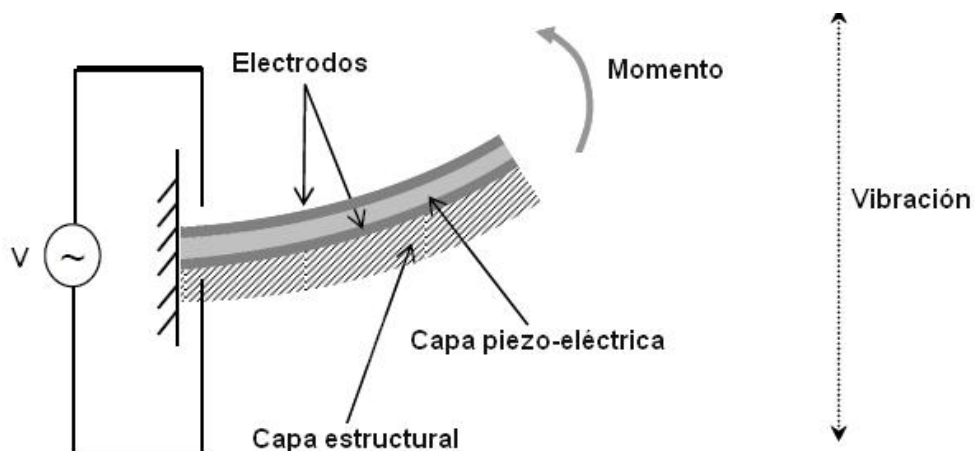


Figura 4.25 Esquema de un resonador con excitación y detección magnética

En la tabla 4.9 se indica los beneficios y desventajas de utilizar la técnica resonante con el mecanismo de excitación y detección piezoeléctrica:

BENEFICIOS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> ü Alta precisión y repetitividad. ü Bajo costo de producción. ü Bajo consumo de energía. 	<ul style="list-style-type: none"> ü Para aumentar la eficiencia se debe ser cuidadoso con la geometría de los electrodos.

Tabla 4.9 Características de la técnica: excitación y detección piezoeléctrica

4.5.1.4. Excitación electro-termal y detección piezo-resistiva

El efecto electro-termal consiste en el movimiento de partículas cargadas en un medio conductor provocando micro-vibraciones, las cuales asociadas a las fuerzas friccionales originan la producción de calor. Mientras la temperatura aumenta, el átomo constitutivo del material vibra con amplitudes más grandes y se incrementa la separación entre sus moléculas. Por lo tanto, la viga sufre un tipo de deformación llamada flexión debido a la expansión térmica como se observa en la figura 4.26, el cual se utiliza para excitar los resonadores.

El mecanismo de detección se basa en el efecto piezo-resistivo. Dicho efecto permite detectar la variación de resistencia de la viga.

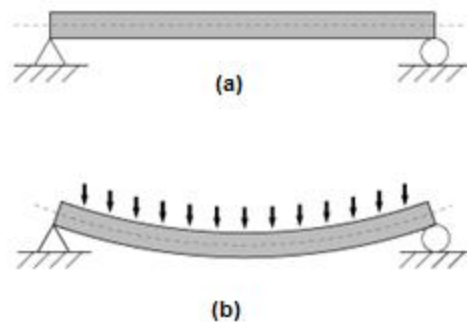


Figura 4.26 (a) Viga en condiciones iniciales. (b) excitación electro-termal produce elevación de temperatura y por lo tanto flexión mecánica

En la tabla 4.10 se indica los beneficios y desventajas de utilizar la técnica resonante con el mecanismo de excitación electro-termal y detección piezo-resistiva:

BENEFICIOS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> ü Las tecnologías estándares de procesamiento de CI puede ser utilizado para fabricar estos resonadores. 	<ul style="list-style-type: none"> ü Sensibilidad baja. ü El calor disipado puede afectar a la frecuencia de resonancia por lo que sería necesario realizar el control del flujo de calor.

Tabla 4.10 Características de la técnica: excitación electro-termal y detección piezo-resistiva

4.5.1.5. Excitación opto-termal y detección óptica

La excitación opto-termal utiliza un mecanismo similar a la excitación electro-térmica. Pero la fuente de calor es proporcionada a la absorción de luz del silicio o de una capa absorbente. Para la detección óptica se utilizan sensores de proximidad o desplazamiento óptico y se puede integrar la técnica interferométrica.

Como se observa en la figura 4.27, los haces de luz reflejados en la paleta y en el sustrato interfieren entre si y producen máximos o mínimos de intensidad dependiendo de la posición de la paleta.

En esta configuración, el haz que incide desde el laser es reflejado en la paleta y en el sustrato. Luego el haz pasa por el divisor de haz, desviando una parte del haz reflejado hacia el lente donde está instalado el fotodiodo. Al moverse la paleta respecto del sustrato el patrón de interferencia entre los haces reflejados en estos dos niveles se modifica, produciéndose cambios en la intensidad detectada por el fotodiodo. Se puede utilizar un amplificador conectado a la salida del fotodiodo para medir la señal con el doble de amplitud. Entonces, para pequeñas oscilaciones comparables a la longitud de onda del laser, la señal es proporcional al desplazamiento.

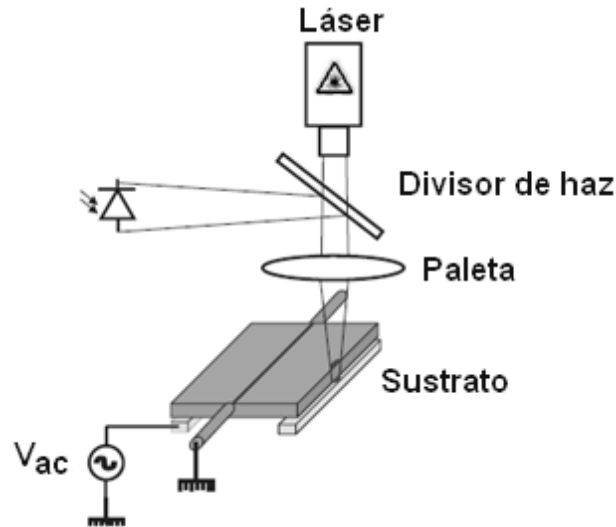


Figura 4.27 Esquema del mecanismo de excitación opto-termal y detección óptica²⁹

En la tabla 4.11 se indica los beneficios y desventajas de utilizar la técnica resonante con el mecanismo de excitación opto-termal y detección óptica:

BENEFICIOS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> Evita cualquier tensión eléctrica en el sensor. 	<ul style="list-style-type: none"> Dificultades en la integración de la óptica en la fabricación del resonador.

Tabla 4.11 Características de la técnica: excitación opto-termal y detección óptica

4.5.1.6. Excitación y detección dieléctrica

El principio de excitación se da cuando se aplica un voltaje entre los electrodos produciendo una fuerza electrostática dando lugar a la deformación lateral de la capa del dieléctrico. En el mecanismo de detección, se mide el cambio de la capacitancia del condensador. La estructura de este tipo de dispositivo se observa en la figura 4.28.

²⁹ Tomado de: M. Morata, "Estructura fabricada en tecnología superficial ", Junio 2007. [Online]. Disponible http://www.tdr.cesca.es/TESIS_UAB/AVAILABLE/TDX-0117105-172237/mmc1de3.pdf [Accesado: Diciembre 15, 2010]

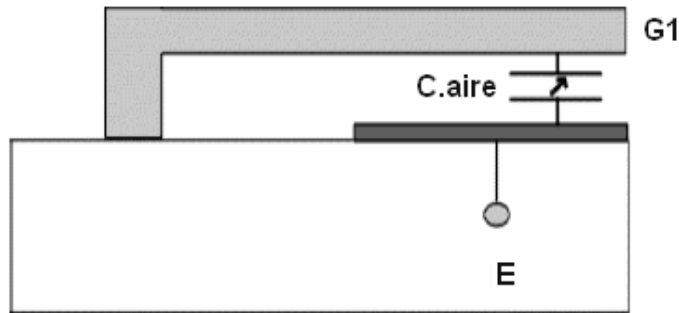


Figura 4.28 Esquema del principio de excitación y detección dieléctrico

En la tabla 4.12 se indica los beneficios y desventajas de utilizar la técnica resonante con el mecanismo de excitación y detección dieléctrica:

BENEFICIOS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • Bajo consumo 	<ul style="list-style-type: none"> • Trabaja con señales muy pequeñas, aunque para superar este problema se está utilizando materiales con una constante dieléctrica muy alta.

Tabla 4.12. Características de la técnica: excitación y detección dieléctrico

A continuación, se tiene un cuadro comparativo de las principales características de las técnicas de transducción de los sensores:

TÉCNICA	SENSIBILIDAD	COSTO	FABRICACIÓN	DEPENDENCIA A LA TEMPERATURA
PIEZO-ELÉCTRICA	Media	Medio	Media	Alta
PIEZO-RESISTIVA	Alta	Bajo	Simple	Alta
CAPACITIVA	Alta	Bajo	Simple	Baja
ÓPTICA	Alta	Alto	Complejo	Baja

TÉCNICA		SENSIBILIDAD	COSTO	FABRICACIÓN	DEPENDENCIA A LA TEMPERATURA
RESONANTE	Excitación Electrostática y Detección Capacitiva	Alta	Medio	Media	Baja
	Excitación y Detección Magnética	Media	Medio	Media	Baja
	Excitación y Detección Piezoeléctrica	Media	Medio	Simple	Baja
	Excitación Electro-termal y Detección Piezo-resistiva	Baja	Medio	Media	Alta
	Excitación Opto-termal y Detección Óptica	Alta	Alto	Compleja	Media
	Excitación y Detección Dieléctrica	Alto	Bajo	Simple	Bajo

Tabla 4.13 Comparación entre las técnicas de transducción

4.6. Técnicas de actuación

Un actuador es un dispositivo que responde a las señales eléctricas dentro del sistema de transducción. Un actuador mecánico traduce una señal eléctrica en una señal mecánica. Los actuadores micro-mecánicos ofrecen una eficiencia de entre el 5% y 35%.

Las técnicas de actuación más conocidas son 4:

1. Electrostática
2. Piezoeléctrica
3. Térmica
4. Magnética

A continuación se describirá cada uno de los principios de transducción utilizados en los actuadores:

4.6.1. Técnica electrostática

Se basa en la aplicación de una tensión entre dos placas paralelas siendo una de las placas fija y la otra móvil como se muestra en la figura 4.29. Entre las placas aparece una fuerza de atracción electrostática provocando que la placa móvil se aproxime a la fija mientras la tensión se incrementa. El dispositivo colapsa a una determinada tensión denominada tensión de actuación o de “pull-in”.

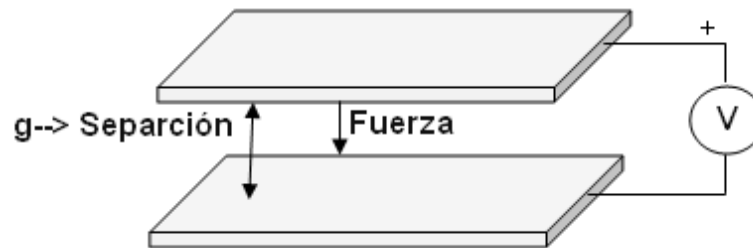


Figura 4.29 Principio de actuación electrostática

Para determinar las limitaciones de rendimiento de la técnica de actuación electrostática, se debe analizar la curva de Paschen que se muestra en la Figura 4.30.

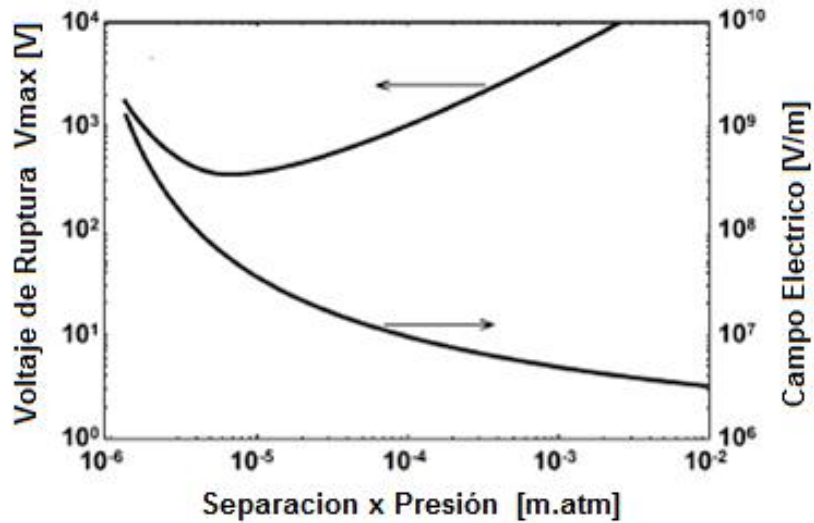


Figura 4.30 Curva de Paschen

El análisis de la figura 4.30 es:

- La tensión de ruptura alcanza un valor mínimo en una separación de varios micrómetros entre las placas a la presión atmosférica. Cuando se reduce dicha separación, el voltaje de ruptura aumenta rápidamente, mientras que la intensidad del campo eléctrico disminuye.

En la tabla 4.14 se indica los beneficios y desventajas de utilizar la técnica de actuación electrostática:

BENEFICIOS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> ü Reducido tamaño de electrodos. ü Bajo consumo. ü Tiempo de respuesta relativamente bajo. 	<ul style="list-style-type: none"> ü Trabaja con voltajes altos para producir la actuación del dispositivo.

Tabla 4.14 Características de la técnica: actuación electrostática

4.6.2. Técnica piezoeléctrica

Si se aplica un voltaje a un material piezoeléctrico, se genera una fuerza produciendo el doblamiento de la estructura mecánica. Este comportamiento se describe en la figura 4.31.

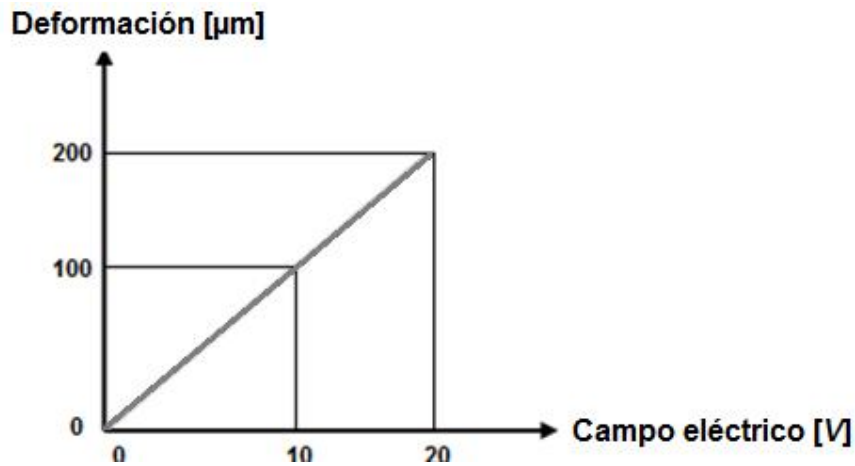


Figura 4.31 Comportamiento de un actuador piezoeléctrico

La interpretación del gráfico 4.31:

- Ante la presencia de un campo eléctrico, el material se deforma y lo hace proporcionalmente al valor del campo eléctrico.
- Para un campo eléctrico de 10[V] se puede tener una deformación de 100[μm] y para un campo de 20[V] se puede deformar 200[μm].

Los actuadores piezoeléctricos se utilizan para accionar micro-bombas, capaces de bombear desde unos pocos nano-litros a unos pocos micro-litros de fluido, como se observa en la figura 4.32. Estos dispositivos se utilizan en impresoras de chorro de tinta y en aplicaciones de análisis químico.

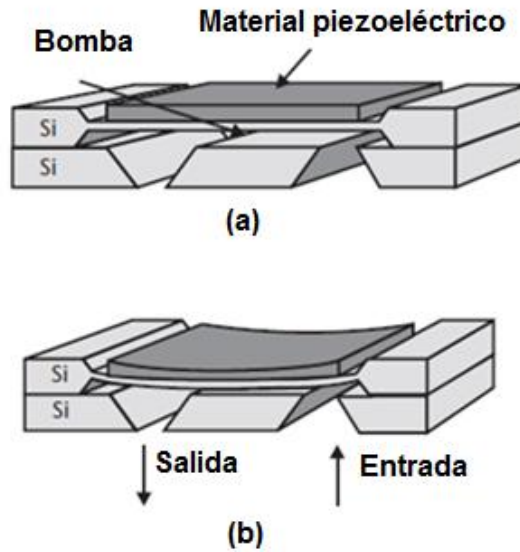


Figura 4.32 Una micro-bomba simple con un actuador piezoeléctrico: (a) sin aplicar tensión, y (b) el efecto de la aplicación de un voltaje a la capa piezoeléctrica.³⁰

En la tabla 4.15 se indica los beneficios y desventajas de utilizar la técnica de actuación piezoeléctrica:

BENEFICIOS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> ü Requiere tensiones de accionamiento bajas con consumos despreciables. ü Tiempo de respuestas cortos. 	<ul style="list-style-type: none"> ü Las películas deben ser suficientemente gruesas para aplicar suficiente voltaje, y no originar el rompimiento de la película.

Tabla 4.15 Características de la técnica: actuación piezoeléctrica

4.6.3. Técnica térmica

Estos actuadores son del tipo "bimetálico". Un actuador bimetálico posee una pieza formada por dos láminas de metales con diferente coeficiente de dilatación térmica (α). Cuando ambos materiales son calentados, uno de ellos se expande más rápido que el otro, provocando que la viga se doble, dicho comportamiento se muestra en la figura 4.33. El calentamiento puede ser realizado haciendo circular una corriente eléctrica a través del dispositivo.

³⁰ Tomado de: S. Beeby, G. Ensell, M. Kraft, N. White, "MEMS Mechanical Sensors", Artech house, 200

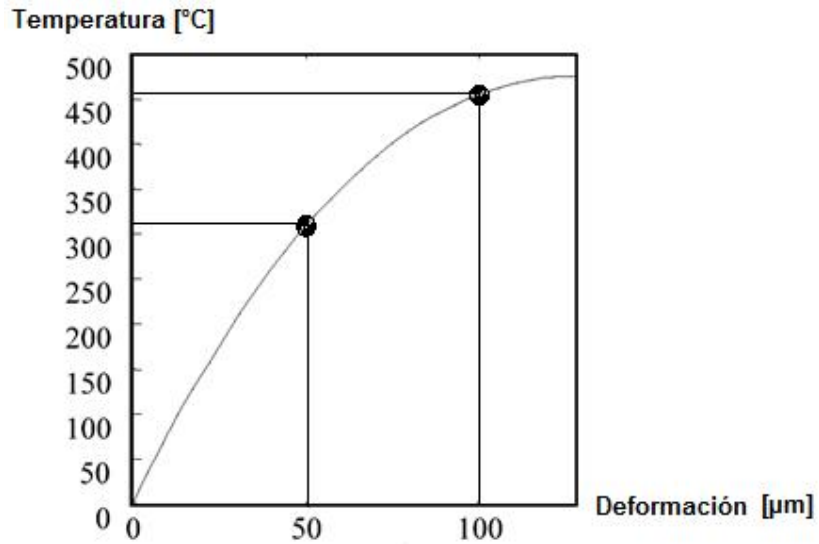


Figura 4.33 Comportamiento de un actuador térmico

La interpretación de la figura 4.33 es:

- La flexión depende de la diferencia de los coeficientes de expansión térmica y también de la temperatura.
- A una temperatura de 310°C se tiene una deformación de $50\mu\text{m}$. Mientras para una temperatura de 455°C se tiene una deformación de $100[\mu\text{m}]$. Entonces a mayor temperatura mayor deformación se producirá.

En la tabla 4.14 se indica los beneficios y desventajas de utilizar la técnica de actuación térmica:

BENEFICIOS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • Las fuerzas generadas son mayores. • Accionamiento lento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Consume más energía que los métodos electrostático y piezoeléctrico.

Tabla 4.16 Características de la técnica: actuación térmica

4.6.4. Técnica magnética

Si un elemento de corriente se coloca dentro de un campo magnético, se produce una fuerza en dirección perpendicular a la corriente y al campo magnético. La magnitud de la fuerza producida es proporcional a la longitud actual del elemento y el campo magnético. En el siguiente ejemplo, se utiliza una viga delgada que actúa como un resorte, permitiendo en el extremo alcanzar desviaciones superiores a 90° en esta configuración.

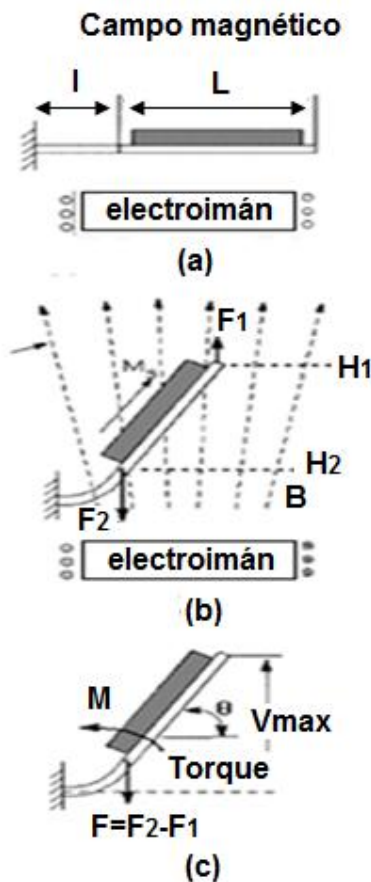


Figura 4.34 Comportamiento de un actuador magnético³¹

En la figura 4.34 se muestra el movimiento del actuador en respuesta al campo magnético creciente. El actuador está en una posición inicial cuando el campo magnético es nulo como se muestra en la figura 4.34 (a). Cuando se

³¹ Tomado de: Varios Autores, "Magnetic Sensors & Actuators", University of Victoria. [Online]. Disponible: <http://www.engr.uvic.ca/~mech466/MECH466-Lecture-15.pdf> [Accesado Diciembre 13, 2010]

aplica el campo magnético provoca el doblamiento de la punta del actuador en sentido del flujo magnético como se observa en la figura 4.34 (b). Entonces se inducen las fuerzas magnéticas F_1 y F_2 en el borde superior e inferior de la placa. Un sistema de fuerzas simplificado contiene torque (M) y fuerza (F) actuando en los extremos libres de las vigas en voladizo, como se visualiza en la figura 4.34 (c).

En la tabla 4.17 se indica los beneficios y desventajas de utilizar la técnica de actuación magnética:

BENEFICIOS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • Grandes fuerzas y grandes desplazamientos. • Bajo voltaje y alta corriente. 	<ul style="list-style-type: none"> • Consumo Elevado. • Baja eficiencia. • Difícil fabricación.

Tabla 4.17 Características de la técnica: actuación magnética

Mediante la tabla 4.18 se resume los principales parámetros de las 4 técnicas de actuación:

TÉCNICA	POTENCIA	RANGO DE VOLTAJE	RANGO DE CORRIENTE	FUERZA GENERADA	RANGO DE DEFLEXION	VELOCIDAD DE RESPUESTA	COMPLEJIDAD ESTRUCTURAL
Termal	Alto	1-10 [V]	[mA] – 10[mA]	Moderada	Pequeña	[mS]	Baja
Electrostática	Bajo	10-100[V]	[nA] – [μA]	Moderada	Moderado	[μS]	Media
Magnética	Medio	1-5[V]	~100[mA]	Alta	Grande	[μS] – [mS]	Alta
Piezoeléctrico	Bajo	1-20[V]	[nA] – [μA]	Moderado	Moderado	[μS]	Media

Tabla 4.18 Características de los métodos de actuación

CAPÍTULO V

TÉCNICAS DE MICRO-FABRICACIÓN

Introducción: En este capítulo se estudiará la fabricación de MEMS. Los procesos básicos para la producción de todos los dispositivos MEMS son la deposición de capas delgadas, transferencia de un patrón y la remoción de material. También se describe las 3 técnicas más utilizadas, estas son: LIGA (Litografía, Electrodeposición y moldeo), micro-maquinado superficial y micro-maquinado volumétrico.

5.1. Introducción al proceso de micro-fabricación

La micro-fabricación se refiere al empleo de técnicas de miniaturización. La fabricación específica de MEMS crea características físicas en las obleas de silicio. Dicho procesamiento puede fusionar obleas en una pila para crear un dispositivo multicapa más grande o tener características en ambos lados de la oblea. En algunos procesos, se requiere una serie de pasos de grabado para labrar las características deseadas, en otros, un determinado material se deposita en la superficie de una oblea y luego se graba selectivamente, dejando características complejas de múltiples capas en la superficie [27].

Los procesos de fabricación de MEMS se observa en la figura 5.1, se requiere una precisión muy alta en todas y cada una de sus etapas. Por lo tanto, es necesario desarrollar complejos sistemas sensorizados capaces de controlar, monitorear y supervisar las características y evolución de dichos procesos.

Para asegurar la precisión y funcionalidad del micro-dispositivo producido, es necesario someterlo a numerosas pruebas una vez finalizada su fabricación. Por ejemplo el test de hermeticidad, el test de integridad eléctrica, entre otros. [28].

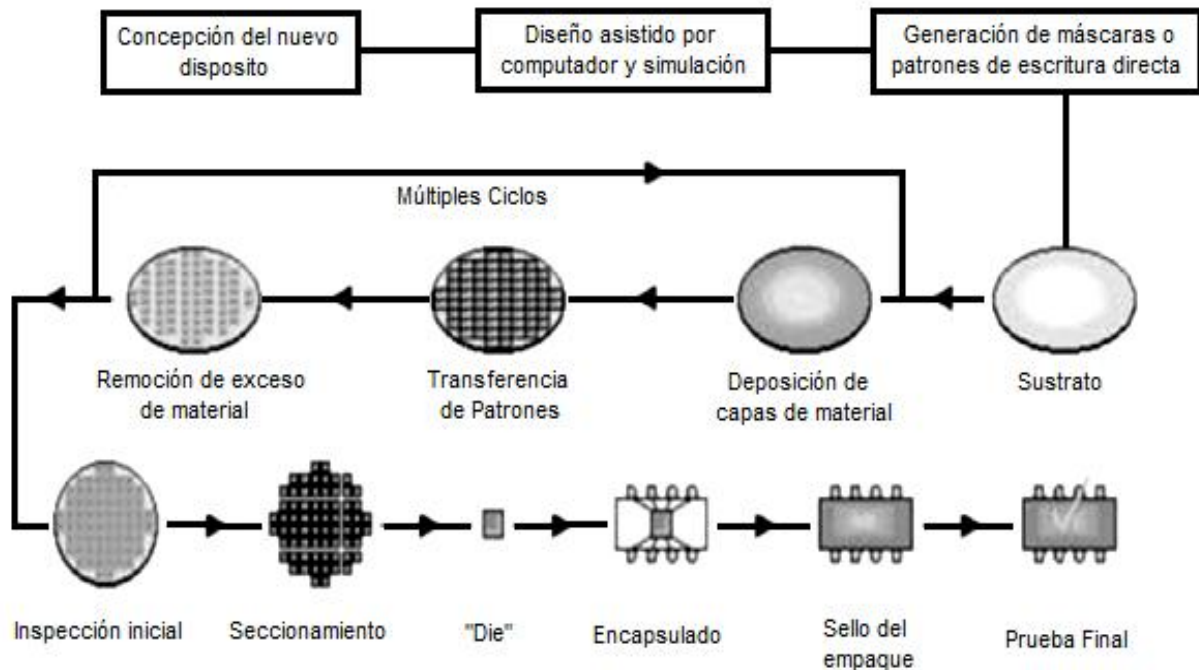


Figura 5.1 Proceso de micro-fabricación ³²

En sectores distintos de la microelectrónica, se ha adoptado el término MET (Tecnologías de Micro-Ingeniería) para referirse a la fabricación de productos con geometría 3D de gran precisión [29].

Se han dado a conocer algunas clasificaciones respecto a las tecnologías de micro-fabricación. Mazusawa, por ejemplo, clasificó las tecnologías de micro-mecanizado en base al principio de trabajo o fenómeno producido en cada una de ellas. La Tabla 5.1 muestra esta clasificación teniendo en cuenta las interacciones entre proceso y material.

³² Tomado de: A. Malshe, C. O'Neal, S. Singh, W. Brown, W. Eaton y W. Miller, "Challenges in the packing of MEMS", International Journal of Microcircuits and Electronic Packaging, Vol. 22, 1999.

PRINCIPIO DE TRABAJO	MATERIALES		
	SUSTRATIVO	ADITIVO	DE UNION
Fuerza Mecánica	“Cutting”		
	“Grinding”		
	“Blasting”		Ultrasónico
Vaporización (Térmico)	Micro-maquinado ultrasónico		
	EDM(Mecanizado por descarga eléctrica)	CVD (Deposición Física de Vapor)	“Soldering”
	LBM (Mecanizado por rayo laser)	PVD (Deposición Física de Vapor)	“Bonding”
Ablación	EBM (Mecanizado con un haz de electrones)		
	LBM (Mecanizado por rayo laser)		
Disolución	ECM (Mecanizado Electroquímico)		
	Grabado isotrópico y anisotrópico		
Solidificación	Grabado reactivo de iones		
		“Casting”	
Polimerización		Esteo-litografía	
		Foto-formado	“Gluing”
		Deposición de polímeros	

Tabla 5.1 Revisión de las tecnologías de fabricación de micro-productos por Mazusawa³³

5.2. Procesos para la fabricación de MEMS

El proceso de micro-fabricación de MEMS empieza con la deposición de capas o películas delgadas sobre una base de sustrato; usualmente de silicio. Luego, se utiliza una máscara fotolitográfica, definiendo el material a ser

³³ Tomado de: T. Masuzawa, State of the art of micromachining, Annals of CIRP 49:473–88, 2000.

removido y el material que debe permanecer en la oblea. Por último el material se remueve selectivamente o bien se protege de acuerdo con la máscara litográfica.

Se enumeran varios métodos para la consecución de cada uno de estos pasos, los cuales pueden reiterarse varias veces hasta satisfacer los requisitos de diseño.

Las técnicas principales de micro-fabricación de MEMS tienen 3 procesos básicos que son:

1. Deposición de Capas Finas
2. Litografía
3. Grabado

Las fases del proceso de micro-fabricación de MEMS se muestra en la figura 5.2.

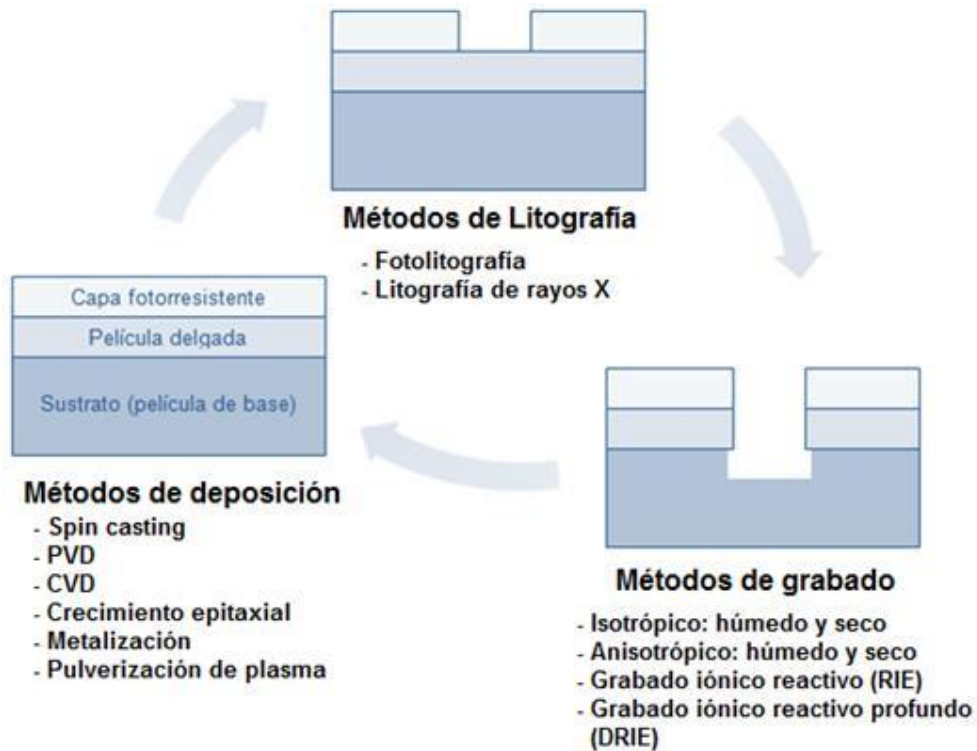


Figura 5.2 Diagrama de flujo típico para la fabricación de MEMS³⁴

³⁴ Tomado de: D. Angelescu, E. Donzier, A. Goodwin, M. Manrique, Y. Tai, "Un mundo pequeño pero comprometedor", Oilfield Review, 2007

5.2.1. Depósito de capas finas

Consiste en construir microsistemas mediante sucesivas etapas de deposición de finas capas superficiales.

Los métodos de deposición más comunes son 2:

1. Método de “Spin Casting”
2. Deposición de capas de material en fase gaseosa.

5.2.1.1. Método “spin casting”

Dicho proceso se realiza típicamente en un lado del sustrato y es particularmente utilizado para aplicar capas fotosensibles como los polímeros. El material a depositar se disuelve en forma líquida en un disolvente. La solución se aplica al sustrato, que luego gira a alta velocidad. La rotación permite extender la solución de manera uniforme sobre la superficie. Mientras el disolvente se evapora dejando una capa delgada de material en el sustrato, como se observa en la figura 5.3.

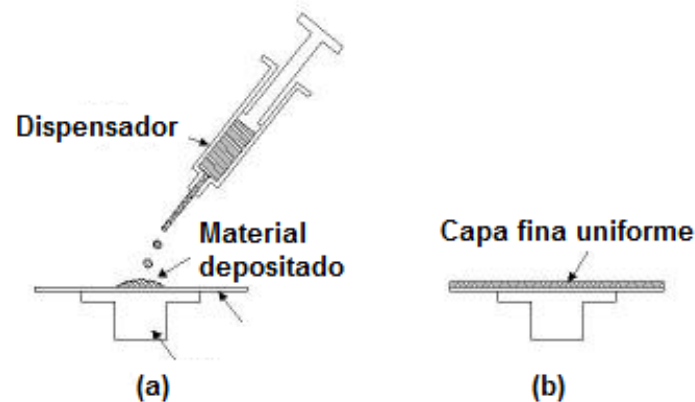


Figura 5.3 (a) antes y (b) después de la aplicación del método spin-casting ³⁵

³⁵ Tomado de: MEMS, Tiny Products, “Design & Manufacturing”, 2004. [Online]. Disponible: http://ocw.mit.edu/courses/mechanical-engineering/2-008-design-and-manufacturing-ii-spring-2004/lecture-notes/12tinyprod_6_f_1.pdf, [Accesado: Octubre 15, 2010]

5.2.1.2. Deposición de capas de material en fase gaseosa.

Los métodos más utilizados se mencionan a continuación:

- a. PVD (Deposición Física de Vapor)
- b. CVD (Deposición Química de Vapor).
- c. Crecimiento Epitaxial
- d. Metalización
- e. Pulverización de plasma

a) PVD (Deposición Física de Vapor).

Esta técnica se basa en la formación de un vapor del material a depositarse como capa delgada. Para ello, el material en forma de sólido es sometido bien sea a un proceso de calentamiento hasta la evaporación (Evaporación Térmica) o se 'pulveriza' mediante un bombardeo intenso con partículas cargadas en forma de iones (Bombardeo Catódico o "Sputtering"). En este último caso, los iones proceden de una descarga eléctrica entre dos electrodos en forma de plasma, utilizando un gas generalmente inerte (argón). También es posible bombardear la muestra con un haz de iones procedentes de una fuente externa de iones. Esta técnica permite variar la energía y la intensidad de los iones, los cuales alcanzan la superficie del material a depositar [30].

Alternativamente, es posible utilizar la fuente de iones para bombardear directamente la superficie del sustrato durante el proceso de evaporación. De esta manera, se imparte más energía a los átomos evaporados y se mejora las propiedades de la capa depositada (adherencia, densidad, etc.). Esta técnica, denominada deposición asistida mediante haces de iones (IBAD) es utilizada para depositar capas de carbono o sus compuestos [30].

b) CVD (Deposición Química de Vapor).

La técnica de CVD consiste en la reacción de una mezcla de gases en el interior de una cámara de vacío (reactor) a elevadas temperaturas por encima de

300°C. Este proceso requiere una atmósfera controlada para producir un depósito de capas dieléctricas o metálicas delgadas de alta calidad. Los subproductos de la reacción son evacuados hacia el exterior mediante un sistema de alta velocidad de bombeo. En la figura 5.4 se muestra el proceso explicado anteriormente.

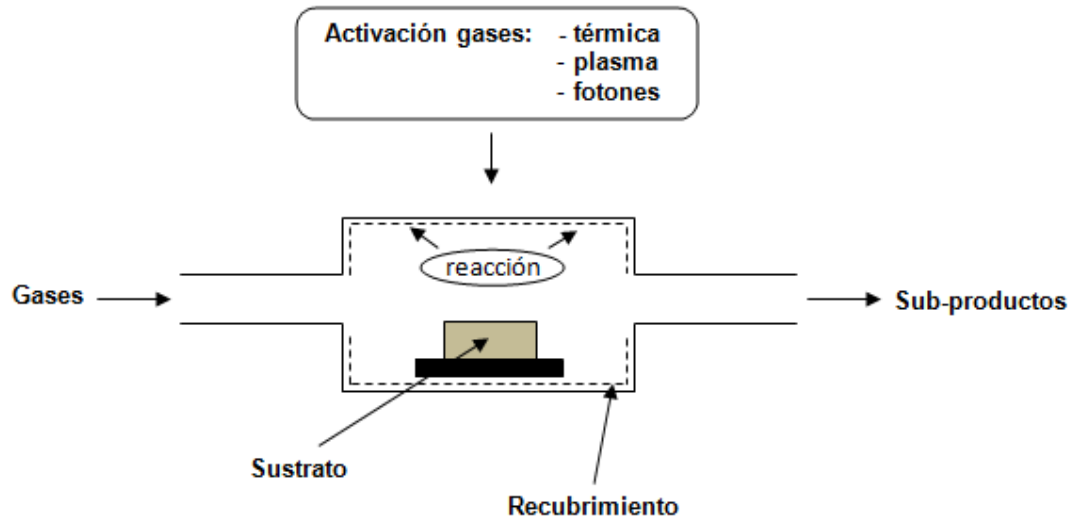


Figura 5.4 Deposición química en fase de vapor

c) Crecimiento Epitaxial

Es un método de deposición cristalino en el cual se consigue depositar finas capas de material sobre un sustrato como se observa en la figura 5.5. El nombre de este procedimiento viene del griego epi (capas) y taxis (ordenadas). La principal característica de este método es conseguir la misma estructura cristalina del sustrato después de la deposición.

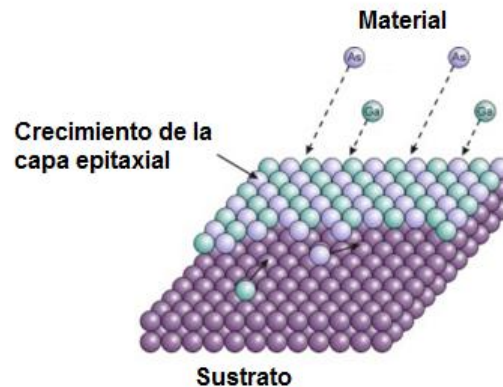


Figura 5.5 Crecimiento epitaxial

La epitaxia se clasifica en 2 métodos según el material a depositar :

1. Homoepitaxia.- donde la deposición es del mismo material del sustrato donde se deposita las nuevas capas.

2. Heteroepitaxia.- por el contrario el material se deposita en un sustrato de diferente material.

Para realizar este procedimiento se debe calentar el semiconductor hasta casi su punto de fusión. Luego se pone en contacto con el material base y al enfriarse, recristalice con la estructura de interés. Una ventaja de esta técnica es la alta tasa de crecimiento del material, permitiendo la formación de películas con un espesor considerable mayor a los 100 μ m. Esta técnica se utiliza para la producción de sustratos SOI "Silicon on Insulator".

d) Metalización

Es el depósito de capas de metal mediante la electrolisis o reducción química controlada de sales minerales por un agente reductor en presencia de un catalizador adecuado como se observa en la figura 5.6.

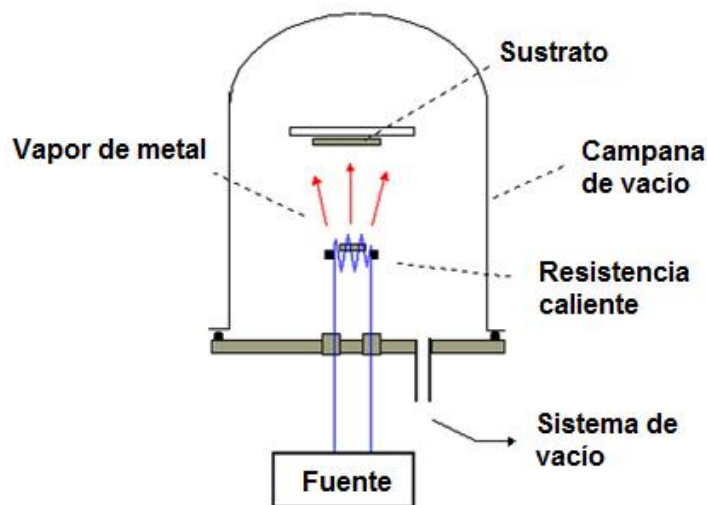


Figura 5.6 Crecimiento epitaxial

Este método es de gran utilidad para aplicaciones donde la metalización selectiva de un sustrato no permite la utilización de procesos fotolitográficos estándares y no se requieren precisiones muy altas. Por ejemplo: re-metalización de los contactos superiores de aluminio en determinados dispositivos para permitir su posterior soldadura o para la definición de pistas sobre sustratos, etc.

e) Pulverización de plasma

En esta técnica se origina un plasma mediante la ionización de un gas, generalmente argón o helio. Una vez formado alcanza una temperatura superior a 30 000 °K. El material se inyecta en forma de polvo justo a la salida de la boquilla y es arrastrado por el plasma que sale a gran velocidad. El material se funde sobre el sustrato debido a la alta temperatura. En la figura 5.7 se ilustra la técnica de pulverización de plasma.

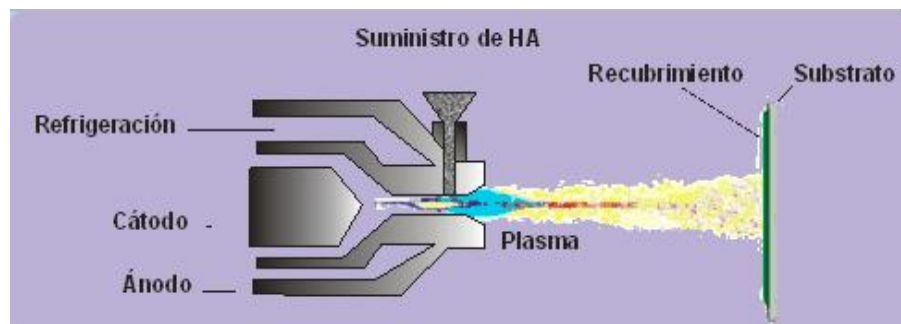


Figura 5.7 Proceso de pulverización de plasma³⁶

5.2.2. Litografía

El segundo paso general en la fabricación de los dispositivos MEMS es la transferencia de figuras y patrones en un polímero fotosensible. Este procedimiento cambia las propiedades químicas al ser expuesto ante radiación ultravioleta. La litografía puede ser utilizada en la producción de máscaras, moldes, o guías para procesos posteriores de micro-fabricación como se observa

³⁶ Tomado de: MEMS, Tiny Products, "Design & Manufacturing", 2004. [Online]. Disponible: http://ocw.mit.edu/courses/mechanical-engineering/2-008-design-and-manufacturing-ii-spring-2004/lecture-notes/12tinyprod_6_f_1.pdf, [Accesado: Octubre 15, 2010]

en la figura 5.8. Para lograr una transferencia de patrones exitosa se debe tomar en cuenta:

- La longitud de onda de la radiación
- La dosificación de la radiación por unidad de volumen depende del tipo de material que se encuentra debajo de la capa foto-resistente, su espesor y si esta es reflectante o adsorbente.

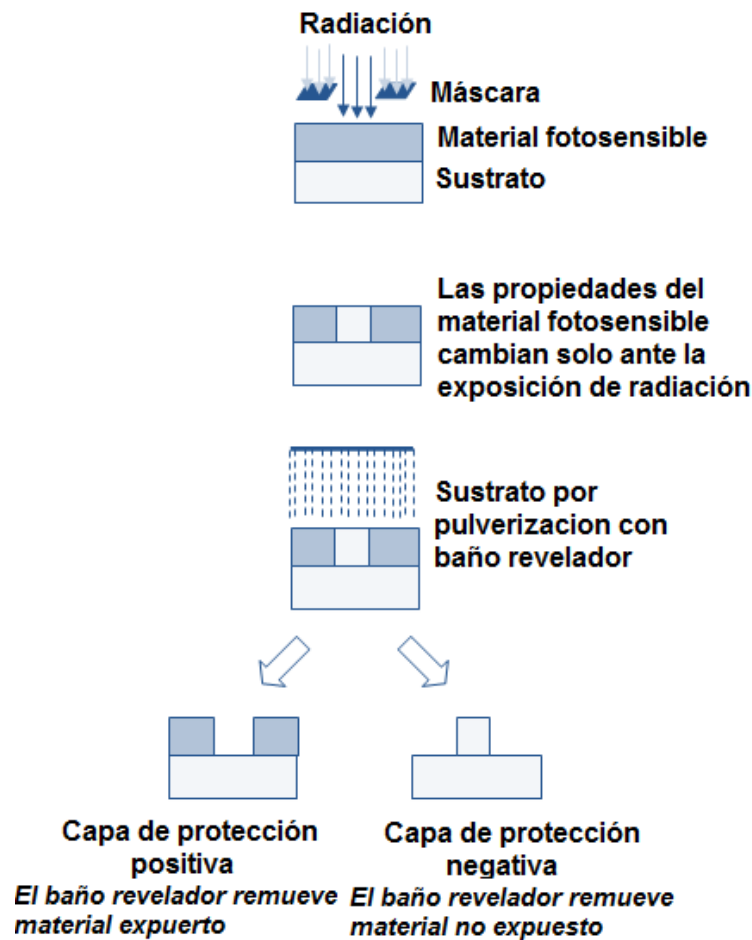


Figura 5.8 Proceso de litografía

No se recomienda la sobreexposición y la sub-exposición porque puede afectar la calidad del grabado, puesto que la excesiva remoción afecta la funcionalidad del dispositivo.

5.2.3. Grabado

El tercer proceso del micro-maquinado es el grabado, en el cual se realiza la remoción selectiva del material en patrones definidos por la capa fotorresistente. La elección puede depender de los siguientes factores:

- El material a grabarse.
- El material utilizado para las máscaras.
- El tipo de formas grabadas requeridas para el diseño de MEMS.
- El costo del proceso.

Existen 2 tipos de técnicas de grabado, se observa con mayor detalle en la figura 5.9:

- **Isotrópico**.- Cuando el grabado puede tener lugar en todas las direcciones a la misma velocidad
- **Anisotrópico**.- Cuando el grabado se produce más rápido en una dirección que en las otras.

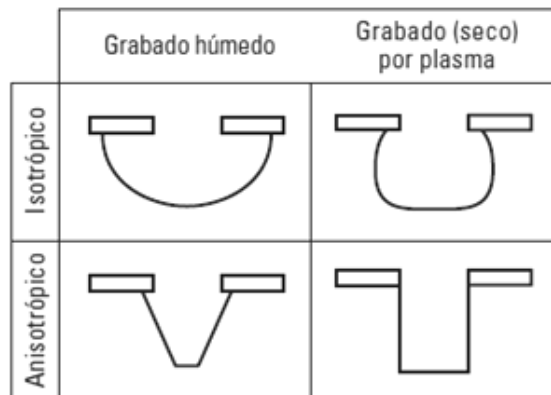


Figura 5.9 Perfiles de grabado.³⁷

Se distinguen 2 tipos de métodos para el grabado del material:

1. Húmedo
2. Seco

³⁷ Tomado de: D. Angelescu, E. Donzier, A. Goodwin, M. Manrique, Y. Tai, "Un mundo pequeño pero comprometedor", Oilfield Review, 2007

5.2.3.1. Grabado Húmedo

La técnica de grabado húmedo es la más simple. Esta técnica consiste en la remoción de material por inmersión de un sustrato dentro de una solución a disolverse.

Para el grabado húmedo del silicio se pueden utilizar los siguientes ácidos: una mezcla de ácido fluorhídrico (HF), ácido nítrico (HNO₃) y ácido acético (CH₃COOH). Para el grabado húmedo del nitruro de silicio y los metales, se suele utilizar mezclas que contienen ácido fosfórico. En las aplicaciones que utilizan la técnica de grabado anisotrópico en el silicio, se utiliza hidróxido de potasio (KOH).

5.2.3.2. Grabado Seco

Esta técnica es utilizada cuando en el diseño se requiere perfiles de grabado verticales bien definidos y/o de rasgos con dimensiones laterales reducidas. En general, el grabado seco es más caro en comparación al grabado húmedo. Pero otorga más precisión a los fabricantes de dispositivos MEMS sofisticados [31]. Dentro de esta técnica se pueden nombrar:

- a) Grabado por iones reactivos (RIE)
- b) Grabado profundo de iones reactivos (DRIE)

a) Grabado por iones reactivos (RIE)

Utiliza una mezcla de plasma gaseoso dentro de un reactor y a través de procesos tanto físicos como químicos se remueve el material con precisión. En este proceso los gases se exponen a un campo eléctrico, creando iones y plasma. En la superficie del sustrato se produce una reacción química, permitiendo el bombardeo físico en el grabado del material. Es necesario equilibrar las interacciones físicas para el grabado isotrópico y químicas para el grabado

anisotrópico, para producir la superficie deseada obteniendo formas verticales o redondeadas. [31].

b) Grabado profundo de iones reactivos (DRIE)

DRIE es una versión más compleja en comparación al grabado por iones reactivos. Existen dos tecnologías principales: criogénicos y Bosch. El proceso de Bosch es el más aplicado, utiliza una base química del plasma de flúor para grabar el silicio. Además combina un proceso de plasma de carbono para mejorar la selectividad a los materiales. Puede fabricar paredes verticales con un ángulo de 90°, pero a menudo las paredes son ligeramente cónicas, por ejemplo, 88 ° o 92 °

5.3. Tecnologías de micro-fabricación

La micro-fabricación de MEMS se divide actualmente en 3 tecnologías principales:

1. LIGA o micro-moldeo.
2. Micro-maquinado superficial.
3. Micro-maquina volumétrico.

5.3.1. LIGA

El método LIGA se desarrolló en Alemania y significa Lithographie (Litografía), Galvanoformung (Electrodeposición) y Abformung (Moldeo). En este proceso se obtienen las micro-estructuras a partir de moldes creados mediante fotolitografía de rayos X seguida de metalizado. Se parte de un capa de material resistente a la luz como la resina, colocada encima de un substrato metálico. Sobre esta capa se coloca una máscara y se transmite el patrón utilizando radiación X de una fuente sincrotrón. Esta fuente presenta una radiación con gran intensidad, gran brillantez y polarización. Además debido a la longitud de onda se puede conseguir una penetración profunda.

Después el molde obtenido de resina se replica gracias a un proceso de electrodeposición (“electroplating”), donde los agujeros del molde se llenan de metal (Ni, Cu, Au o distintos tipos de aleación). Una vez realizado el molde metálico, éste puede utilizarse para replicar la pieza en plástico, metal o cerámica con un bajo costo. Un esquema del proceso se observa en la figura 5.10.

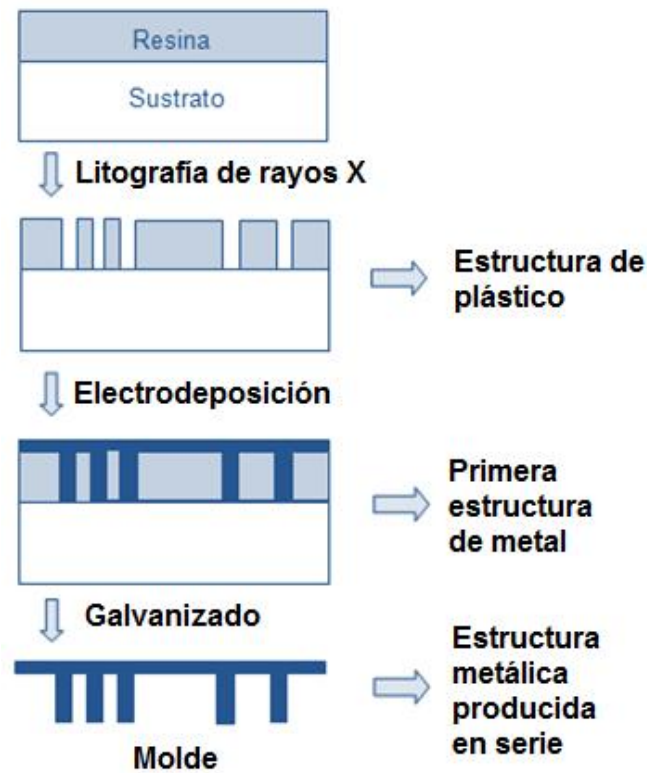


Figura 5.10 Proceso LIGA

La fabricación de un micro-engrane se ilustra en la figura 5.11. En el paso 1 se aplica una capa gruesa de material y se exposición a los rayos X. En el paso 2 se remueve el material expuesto. En el paso 3, se aplica el proceso de electrodeposición para llenar las aberturas. Finalmente, en el paso 4 se produce el desprendimiento del material para obtener el molde.

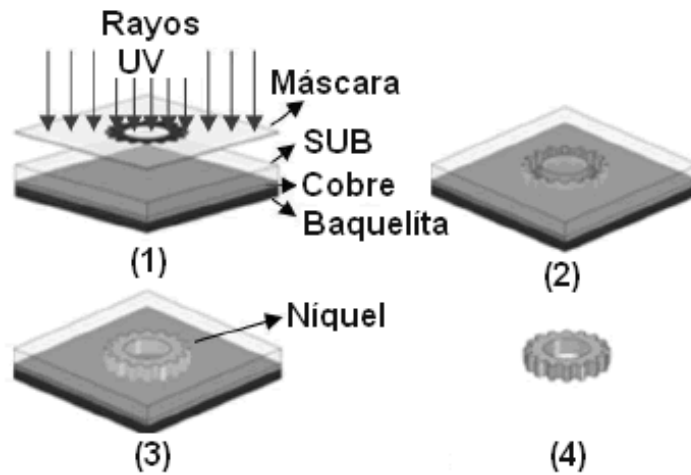


Figura 5.11 Fabricación de un micro-engrane³⁸

5.3.2. Micro-maquinado superficial

El micro-maquinado superficial se creó a fines de los 80 para hacer el micro-maquinado de silicio compatible con la tecnología del circuito integrado (CI). De esta manera se puede combinar MEMS y circuitos integrados en la misma oblea de silicio.

Esta es una técnica de fabricación aditiva para construir micro-estructuras sobre la superficie del sustrato. El proceso empieza con sucesivas deposiciones de capas finas, luego transmisión de patrones utilizando litografía y por último un grabado selectivo. Se aplica un grabado seco para definir las características de la superficie en el plano XY. También se puede utilizar un grabado húmedo isotrópico para liberar las capas. El proceso del micro-maquinado superficial se puede observar en la figura 5.12. [35]

³⁸ Tomado de: L. Hernandez, "Técnicas de Micro-fabricación", Sistemas Avanzados de Manufactura, 2008.

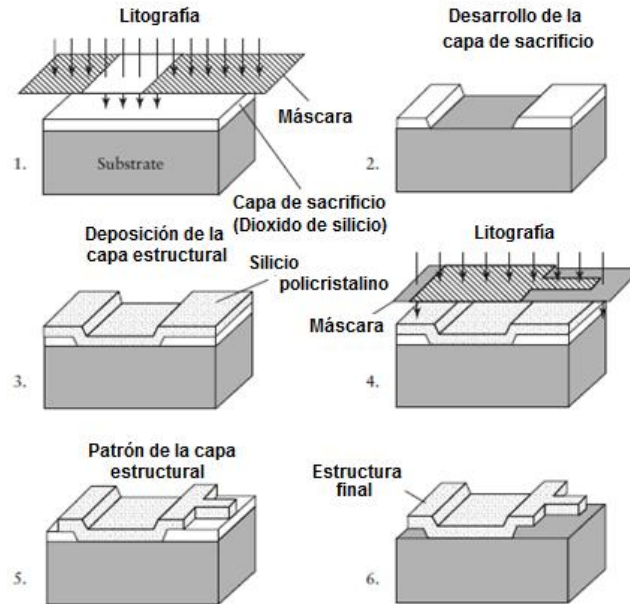


Figura 5.12 Micro-maquinado superficial ³⁹

Las dimensiones de las estructuras producidas al utilizar el micro-maquinado superficial pueden ser más pequeñas que las estructuras del micro-maquinado volumétrico. Generalmente son estructuras planas o de dos dimensiones. Con esta tecnología por ejemplo, se produce la manufactura de acelerómetros de bajo costo para sistemas de bolsas de aire para automóviles (Air-bags) entre otras aplicaciones.

El micro-maquinado superficial requiere materiales estructurales compatibles con los materiales de sacrificio y con los decapantes químicos. Los materiales estructurales deben poseer propiedades físicas y químicas adecuadas para la aplicación. Además deben cumplir con las propiedades mecánicas, por ejemplo: alto rendimiento y buena resistencia al desgaste. Así también, los materiales de sacrificio también deben tener buenas propiedades mecánicas para evitar fallas en el dispositivo durante la fabricación. Además, deben poseer una buena adherencia y bajas tensiones residuales para evitar la formación de grietas. Para remover el material de sacrificio sin afectar a los materiales estructurales se utiliza un grabado selectivo [37]. Los materiales utilizados en el micro-maquinado superficial que son compatibles con los CI se especifican en la tabla 5.2:

³⁹ Tomado de: S. Fatikow, U. Rembold, "Microsystems Technology and Microrobotics", Springer, New York, 1997

MATERIAL	MATERIAL ESTRUCTURAL	MATERIAL DE SACRIFICIO	PROCESO
Dióxido de Si/Silicio	Poli-Silicio	Por LPCVD: Silicio	El óxido se disuelve fácilmente en una solución de alta frecuencia sin afectar el poli-Si. El nitruro de silicio es usado para el aislamiento eléctrico.
Poliamida/aluminio	Poliamida	Aluminio	Ácido-base utilizada para disolver la capa de Al.
Nitruro de silicio/poli-silicio	Nitruro de silicio	Poli-silicio	KOH y EDP usados para disolver el Poli-silicio
Tungsteno / Dióxido de Silicio	Por (CVD): Tungsteno	Óxido	Solución de HF

Tabla 5.2 Materiales utilizados en el micro-maquinado superficial

5.3.2.1. Proceso para realizar el micro-maquinado superficial

Existen 2 posibilidades de implementación de esta tecnología [38]:

1. Una máscara
2. Dos máscaras

a. Proceso de 1 máscara

A continuación, en la tabla 5.3 se detalla los pasos de este proceso:

PROCESO DE 1 MÁSCARA	
PASO	PROCESO
1	Se coloca sobre el sustrato una primera capa de sacrificio. Luego será eliminada y sobre esta se deposita una capa estructural.
2	Sobre la capa estructural se define el patrón de la estructura.
3	Mediante un grabado húmedo se elimina la capa de sacrificio y así se libera la estructura.

Tabla 5.3 Proceso de micro-maquinado superficial de 1 máscara

En las figura 5.13 se presenta un esquema del proceso de micro-mecanizado de superficie de una máscara

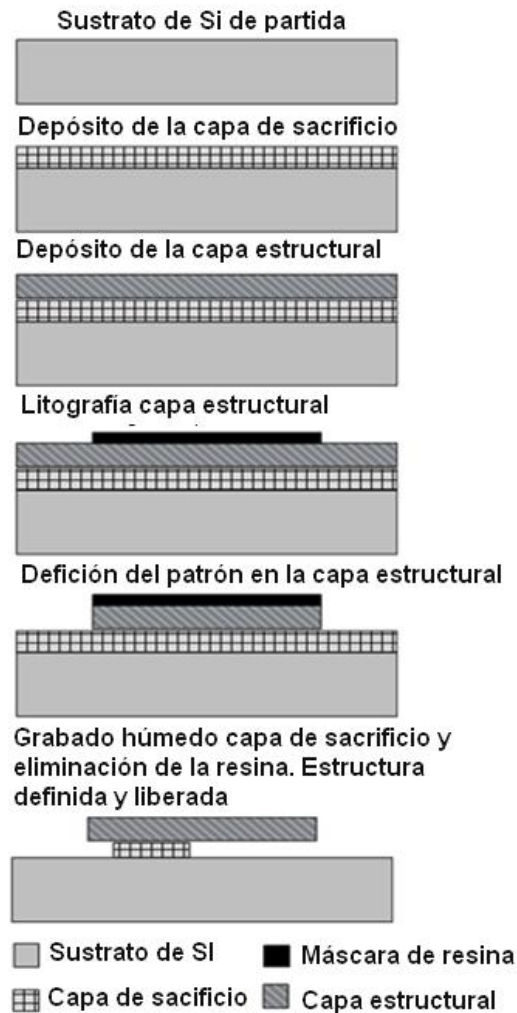


Figura 5.13 Proceso de micro-maquinado superficial de 1 máscara

b. Proceso de 2 máscaras

A continuación, en la tabla 5.4 se detalla los pasos de este proceso:

PROCESO DE 2 MÁSCARAS	
PASO	PROCESO
1	Se deposita la capa de sacrificio y sobre esta se define un patrón. Dicho patrón será el contacto de la capa estructural con el sustrato y a la vez hará de anclaje de la estructura.
2	Se deposita la capa estructural, sobre la cual se define la estructura final.

PROCESO DE 2 MÁSCARAS

- 3 Mediante un grabado húmedo se elimina la capa de sacrificio y así se libera la estructura.

Tabla 5.4 Proceso de micro-maquinado superficial de 2 máscaras

En las figura 5.14 se presenta un esquema del proceso de micro-mecanizado de superficie de una máscara

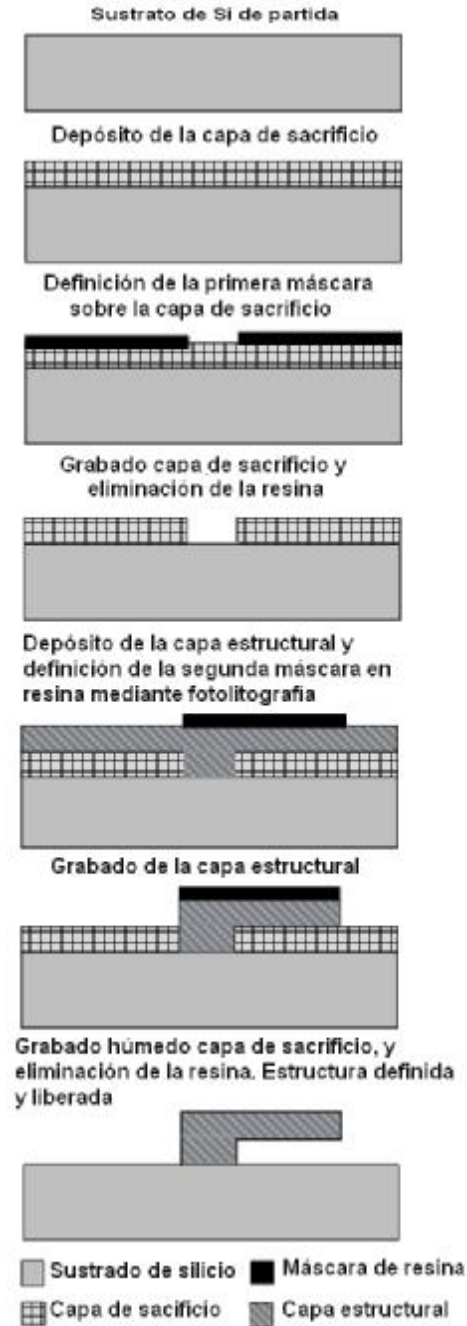


Figura 5.14 Proceso de micro-maquinado superficial de 2 máscaras

5.3.3. Micro-maquinado volumétrico

El micro-maquinado volumétrico es una de las tecnologías de micro-fabricación de silicio más populares. Surgió en la década de 1960 y se ha utilizado para realizar estructuras con volumen. Se utiliza en la fabricación de la mayoría de dispositivos comerciales como sensores de presión, válvulas de silicio y el 90% de los acelerómetros de silicio.

Es una técnica de fabricación substractiva para construir micro-estructuras por eliminación de material sobrante de un substrato base, mediante el mecanizado de canales y carriles.

Este proceso permite eliminar de forma selectiva cantidades significativas de silicio, generalmente en la cara inferior. Además se pueden obtener cavidades útiles en la fabricación de membranas y otro tipo de transductores para la fabricación de sensores.

Este tipo de micro-mecanizado atraviesa prácticamente toda la oblea. Las micro - estructuras fabricadas utilizando el micro-maquinado volumétrico pueden tener dimensiones de entre 200 a 500 micras [37].

5.3.3.1. Proceso para realizar el micro-maquinado volumétrico

En los procesos de micro-maquinado volumétrico parte de la pieza inicial (substrato) se elimina con el fin de crear estructuras mecánicas libres de contacto. Por ejemplo: estructuras en voladizo o membranas, o estructuras tridimensionales como cavidades o agujeros. Estos elementos atraviesan la oblea mediante el uso de reactivos dependientes de la orientación (isotrópicos) y/o independientes de la orientación (anisotrópicos). El micro-maquinado en volumen se puede aplicar en piezas de silicio, vidrio, arseniuro de galio u otros materiales [39].

En la tabla 5.5 se encuentra la explicación de dicho proceso.

BULK MICRO-MACHINING	
PASO	PROCESO
1	En la cara superior del “wafer” se definen estructuras o contactos. El número de capas y niveles definidos dependerá de la estructura y la tecnología utilizada. Además puede tener lugar hasta un proceso CMOS completo.
2	Se define una máscara en la cara dorso del sustrato. La máscara puede ser de aluminio, óxido, nitruro o resina según el tipo de grabado.
3	Se realiza la remoción de volumen de casi toda la profundidad del sustrato a través del grabado anisótropo o isótropo. Si es necesario se realiza más procesos en la cara de componentes o en la cara dorso.

Tabla 5.5 Micro-maquinado volumétrico

En la figura 5.15 se muestra las etapas de fabricación de un proceso de micro-maquinado de volumen.

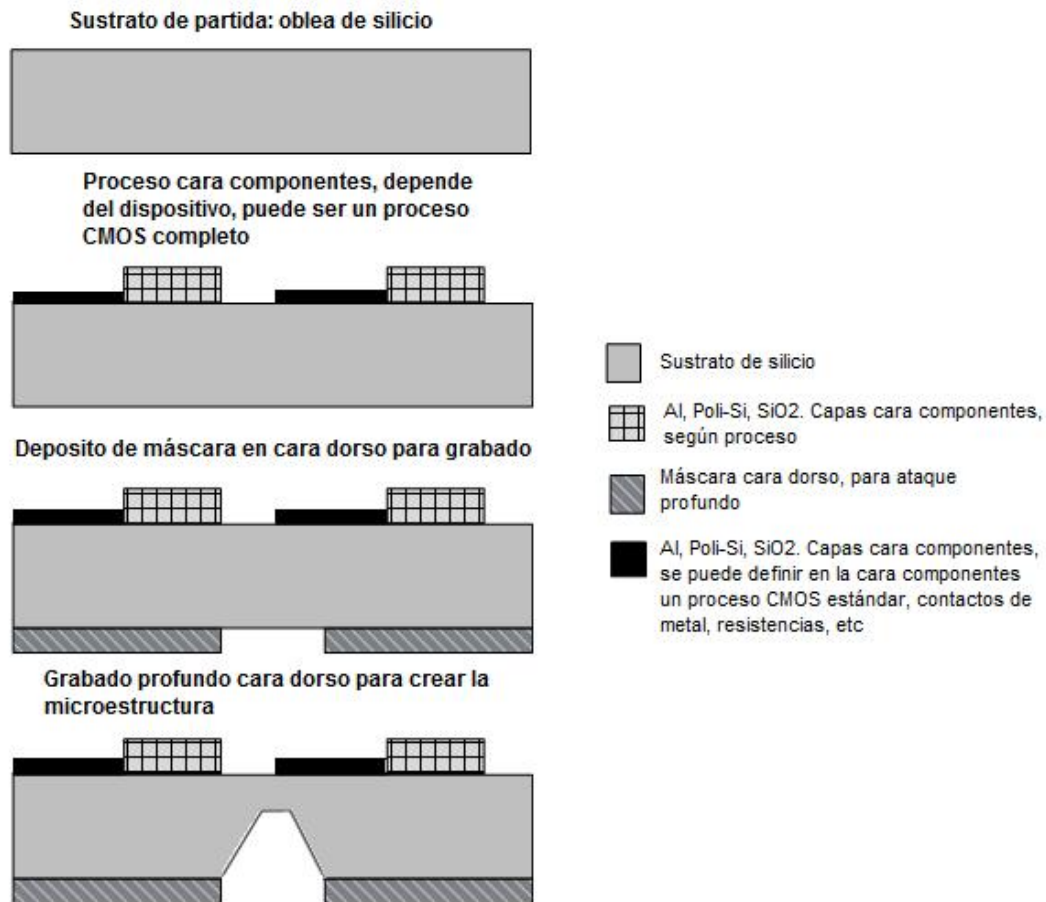


Figura 5.15 Micro-maquinado volumétrico

En esta técnica se utilizaba grabados húmedos. En tanto que en la actualidad los avances en los grabados por iones reactivos (“Reactive Ion Etching”, RIE) permiten tener el control de la velocidad de remoción y la profundidad consiguiendo paredes verticales [38].

5.4. ANÁLISIS COMPARATIVO

En la tabla 5.6 se realiza una comparación entre las técnicas de micro-fabricación superficial y volumétrico:

CARACTERÍSTICAS	MICRO-MAQUINADO SUPERFICIAL	MICRO-MAQUINADO VOLUMÉTRICO
Técnica	Aditiva	Substractiva
Dispositivos	De pequeños rasgos con bajo espesor y masa.	De grandes rasgos con considerable masa y grosor
Oblea	Utiliza un lado	Utiliza los dos lados
Mecanismos de detección	<ul style="list-style-type: none"> • Capacitivos • Resonantes 	<ul style="list-style-type: none"> • Piezo-resistivos • Capacitivos.
Compatibilidad con los CI	Si	No

Tabla 5.6 Comparación entre las técnicas de micro-maquinado superficial y volumétrico

En la tabla 5.7 se realiza un análisis comparativo de las 3 técnicas utilizadas en la micro-fabricación de MEMS:

TÉCNICA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
LIGA	<ul style="list-style-type: none"> • Es posible un rango amplio en los tamaños de las piezas, con alturas 	<ul style="list-style-type: none"> • LIGA usa exposición a rayos x, por lo que afecta la salud humana.

TÉCNICA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
	<p>que van de los micrómetros a los centímetros.</p> <ul style="list-style-type: none"> Alta precisión. 	<ul style="list-style-type: none"> LIGA es un proceso muy costoso, requiere grandes cantidades de fabricación para justificar su utilización.
MICRO-MAQUINADO SUPERFICIAL	<ul style="list-style-type: none"> Permite combinar los circuitos integrados con los MEMS en una sola oblea. 	<ul style="list-style-type: none"> Requiere una limpieza al final del proceso
MICRO-MAQUINADO VOLUMÉTRICO	<ul style="list-style-type: none"> Se pueden fabricar MEMS en 3 dimensiones. 	<ul style="list-style-type: none"> Las obleas pueden ser frágiles, cerca del final de la producción.

Tabla 5.7 Análisis comparativo de las 3 técnicas de micro-fabricación de MEMS

CAPÍTULO VI

MODELAMIENTO

Introducción: En este capítulo se realiza una descripción del modelamiento general de los MEMS. Además se abordará los diferentes métodos matemáticos y se reforzará con ejemplos para facilitar la comprensión de los mismos.

6.1. Introducción al modelamiento de dispositivos MEMS

En el modelado de MEMS se pone énfasis sobre el diseño y optimización de un micro-sistema. Si bien las técnicas de modelado de dispositivos y sistemas macros están bien establecidas y probadas, el modelado de micro-dispositivos plantea todavía algunos retos. A continuación se describen algunas características a tener en cuenta en el modelamiento: [42]

- Ser lo suficientemente preciso para representar de la manera más real posible.
- Ser eficiente y simulable.
- Permitir el establecimiento de todos los parámetros de diseño importantes, a fin de garantizar la aplicabilidad general del modelo.
- Describir el comportamiento estático y dinámico.
- Ser capaz de formular la conservación y la disipación de la energía en relación con la aplicación.

6.2. Etapas de modelamiento

En el desarrollo del modelamiento se pueden distinguir 3 etapas, las cuales se muestran en la figura 6.1:

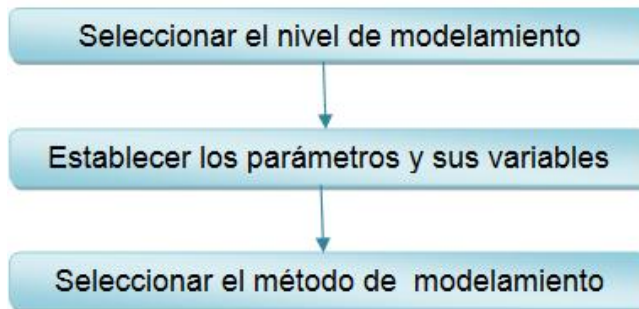


Figura 6.1 Etapas de modelamiento

6.2.1. Seleccionar del nivel de modelamiento

Existen 3 niveles de modelamiento, en la tabla 6.1 se describen sus características:

NIVEL	DESCRIPCIÓN
Nivel de sistema	<ul style="list-style-type: none"> • Más alto nivel de abstracción. • Los modelos de MEMS utilizan los diagramas de bloque con entradas y salidas de señal (similar al enfoque de procesamiento de señales y control).
Nivel de subsistema	<ul style="list-style-type: none"> • Los modelos utilizados son llamados "modelos de red". • Se utilizan los simuladores de circuitos, los cuales pueden representar los subcomponentes de los MEMS a través de sistemas de ecuaciones diferenciales ordinarias. • Las soluciones de las ecuaciones proporcionan información sobre el comportamiento transitorio

NIVEL	DESCRIPCIÓN
	del sistema. <ul style="list-style-type: none"> • Se llega a comprender el comportamiento físico del sistema y la interrelación de sus subcomponentes.
Nivel de dispositivo	<ul style="list-style-type: none"> • Conocido como nivel de geometría. • Nivel más cercano a la realidad y los fenómenos físicos se describen a través de ecuaciones en derivadas parciales. • La solución numérica de estas ecuaciones se obtiene a través de técnicas como el método de elementos finitos (FEM) o el método de los elementos de contorno (BEM)

Tabla 6.1 Niveles de modelamiento de un MEMS

6.2.2. Establecimiento de parámetros y variables

Los diferentes parámetros se pueden deducir a partir de ajuste de curvas u observaciones numéricas y experimentales. Cuando el número de parámetros aumenta, se hace más difícil el modelado, con cada parámetro el número de variaciones posibles crece de manera exponencial. Existen dos tipos de parámetros, estos se muestran en la tabla 6.2:

PARÁMETROS	DESCRIPCIÓN
Continuos	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensiones geométricas • Propiedades del material
Discretos	<ul style="list-style-type: none"> • Condiciones de contorno • Cargas.

Tabla 6.2 Tipos de parámetros

Existen 5 variables de diseño, su clasificación y descripción se detalla en la tabla 6.3:

VARIABLES DE DISEÑO		DESCRIPCIÓN
Geométrico	Tamaño del diseño	Describen las propiedades de la sección transversal de los componentes estructurales. Por ejemplo: las dimensiones, áreas transversales, momentos de inercia de las vigas, espesores de las membranas o placas.
	Configuración	Describen las coordenadas de las articulaciones de las estructuras discretas como armaduras y marcos. También definen la forma de la línea central o media de la superficie de las estructuras como vigas continuas o curvas.
	Forma	Determinan los límites exteriores de las superficies o los límites internos de una estructura. Por ejemplo: la forma de la superficie de una placa, la forma de la superficie de un componente en 3D, o la interfaz dentro de un componente estructural de diferentes materiales.
	Topológicas	Describen el tipo de estructura cuando se trata de una estructura continua. Para una estructura discreta, estas variables describen la secuencia espacial, la conectividad mutua de los miembros y articulaciones.
De material		Representan los parámetros constitutivos de los materiales. Por ejemplo: coeficientes de elasticidad o densidad.

VARIABLES DE DISEÑO	DESCRIPCIÓN
De apoyo	Describen el tipo, el número, las posiciones y las condiciones de soporte de la estructura.
De carga	Describen el posicionamiento y distribución de carga externa. Dichas variables dependen del diseñador.
De fabricación	Parámetros relacionados con el proceso de fabricación. Estas variables influyen en las propiedades de los materiales y el costo de la estructura.

Tabla 6.3 Variables de diseño

En los dispositivos MEMS se utilizan transductores para obtener señales eléctricas de los procesos físicos para el caso de los sensores. Mientras que para los actuadores permite convertir señales eléctricas en parámetros físicos. Por ejemplo, un sensor de presión puede convertir el cambio de la presión en una tensión de salida y en las micro-bombas convertir un voltaje en un determinado valor de presión. El modelado de estos dispositivos, puede implicar fenómenos electrostáticos, electromagnéticos o piezoeléctricos. Estas características van relacionadas con la respuesta estática o dinámica de la micro-estructura.

En el modelado de dispositivos como vigas, diafragmas, actuadores capacitivos (“comb-drives”) y las nano-pinzas, se debe tener cuidado con la calibración del dispositivo de acuerdo con el voltaje de cierre (“pull-in voltage”). Otro factor es la máxima deflexión alcanzada antes del inicio de la inestabilidad conocida como “pull-in distance”. Como la distancia es tan pequeña, este valor es un factor limitante en el diseño de todos los sistemas de este tipo.

En tanto que los micro-dispositivos hidráulicos como bombas o válvulas, se debe tener en cuenta la dinámica de fluidos. Por lo tanto, los algoritmos de simulación de flujo viscoso y/o bajo presión de amortiguación son necesarios para ayudar al diseño de estos dispositivos.

6.2.3. Selección de métodos para el modelamiento de dispositivos MEMS

Los métodos para el modelado de componentes MEMS por lo general se pueden clasificar en dos categorías, como se muestra en la tabla 6.4. Los métodos analíticos son los de Euler-Bernoulli, Cosserat y de Timoshenko, se resuelven mediante una expansión en serie de potencias. Es importante aclarar que estos métodos analizan estructuras con vigas, debido a que este estudio servirá para el diseño del dispositivo MEMS que se plantea en el capítulo XI. Los métodos FEM y BEM son clasificados en los métodos numéricos. Se utiliza la palabra “aproximados” ya que asume que los desplazamientos pueden ser representados por simples expresiones polinómicas.

MÉTODOS PARA MODELAR LOS COMPONENTES MEMS	
Métodos analíticos	
a.	Bernoulli-Euler
b.	Timoshenko
c.	Teoría de Cosserat
Métodos numéricos	
a.	Método de elementos de contorno (BEM)
b.	Método del elemento finito (FEM)

Tabla 6.4 Métodos para modelar los componentes MEMS

6.2.3.1. Métodos analíticos

a. Bernoulli Euler

El método de Euler-Bernoulli o teoría de la viga es una simplificación de la teoría lineal de la elasticidad, proporciona un método de cálculo de los portadores de carga y deformación características de las vigas. Cubre el caso de desviaciones pequeñas de una viga sometidas solo a cargas laterales.

La ecuación de la viga de Euler surge de una combinación de 4 diferentes subconjuntos, los cuales se nombran a continuación:

- i. Cinemática
- ii. Fuerza constitutiva
- iii. Fuerza resultante
- iv. Ecuaciones de equilibrio

i. Cinemática

La cinemática describe las desviaciones de la viga cuando se realiza un desplazamiento fuera del plano W . El desplazamiento fuera del plano está por lo general acompañado de una rotación del plano neutro de la viga, definido como θ , y por una rotación de la sección transversal χ . Esto se puede observar en la figura 6.2:

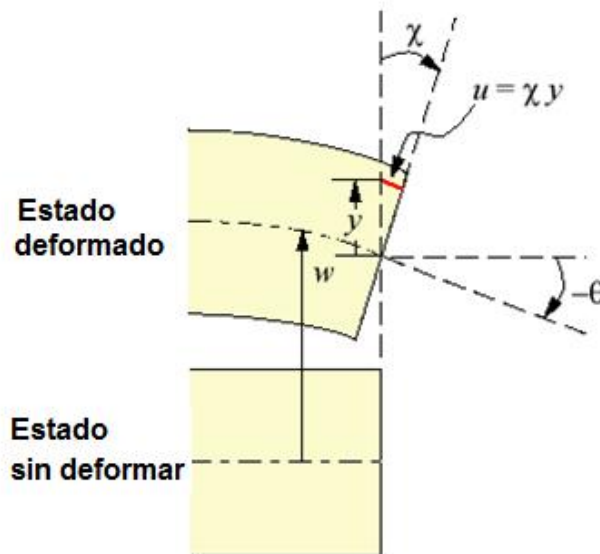


Figura 6.2 Deformación de una viga⁴⁰

Ahora se encontrará el desplazamiento en la dirección x , a través de un haz de sección transversal u , así se encuentra la tensión directa $\epsilon(x, y)$ dada por la ecuación 6.1:

⁴⁰ Tomado de: Varios autores, "Theory: Beam Equation", efunda. [Online]. Disponible: http://www.efunda.com/formulae/solid_mechanics/beams/theory.cfm. [Accesado: Diciembre 3, 2010]

$$\varepsilon = \frac{du}{dx}$$

Ecuación 6.1 Tensión directa

Las hipótesis fueron dadas por Kirchoff haciendo referencia al comportamiento de las normales siendo estas líneas perpendiculares al plano neutro de la viga e incorporado en las secciones transversales de la viga. Se hacen algunas suposiciones sobre cómo gira la sección transversal de la viga y se asume que:

- La normal sigue siendo recta.
- La normal no se estira, es decir se mantiene la misma longitud.
- La normal hacen un ángulo recto con el plano neutro.

Con las normales rectas y sin estirar, se puede asumir con seguridad que no es despreciable la tensión en la dirección y . Junto con el resto de las normales al plano neutro, se puede hacer dependientes a x e y a través de la ecuación 6.2:

$$u(x, y) = \chi(x) \cdot y$$

Ecuación 6.2 Relación entre x , y , $u(x,y)$

Como x depende de u , se puede encontrar la tensión directa a través de la viga, sustituyendo la ecuación 6.2 en 6.1:

$$\varepsilon(x, y) = y \frac{d\chi}{dx}$$

Ecuación 6.3 Tensión directa

Por último, se puede igualar la sección transversal de la viga χ , al plano de rotación neutro θ y al desplazamiento de la viga w , obteniendo la ecuación 6.4 de su sección transversal:

$$\chi = -\theta = -\frac{dw}{dx}$$

Ecuación 6.4 Sección transversal de la viga

ii. Fuerza constitutiva

Las ecuaciones constitutivas vinculan el campo de tensiones con las deformaciones, velocidades de deformación y otras variables internas relacionadas con la carga.

La ecuación constitutiva se describe mediante el tensor de tensiones σ y el tensor de deformaciones ϵ , cuyos parámetros dentro de la viga están relacionados. Al cortar la viga en un lugar determinado, se encontraría con una distribución de tensión en la cara de la misma, como se observa en la figura 6.3:



Figura 6.3 Tensión de acción directa en la cara de la viga

En la teoría de la viga, la ecuación constitutiva se llama Ley de Hooke generalizada, expresada en la ecuación 6.5:

$$\sigma(x, y) = E \cdot \epsilon(x, y)$$

Ecuación 6.5 Ecuación simple de Hooke

iii. Fuerzas resultantes

Las fuerzas resultantes sólo están en función de x , mientras que las tensiones en la viga están en función de x , y . Si se cortara una viga en un punto x , se encontraría con una distribución de tensiones $\sigma(y)$, como se muestra en la figura 6.4. Además sus tensiones tangenciales correspondientes $\sigma_{xy}(y)$, se observan en la figura 6.5.



Figura 6.4 Tensiones directas



Figura 6.5 Tensiones tangenciales

Cada pequeña porción de la tensión actúa en la sección transversal y crea un momento en el plano neutro. Sumando estos momentos individuales sobre el área de la sección transversal se define el momento resultante M (ecuación 6.6):

$$M(x) = \int \int y \cdot \sigma(x, y) dy dz$$

Ecuación 6.6 Momento resultante

Donde:

z = coordenada en la dirección del ancho de la viga.

Sumando las tensiones tangenciales en la sección transversal se encuentra la resultante de corte V , esto se observa en la ecuación 6.7:

$$V(x) = \int \int \sigma_{xy}(x, y) dy dz$$

Ecuación 6.7 Resultante de corte

Existe más de una fuerza resultante por definir como la suma de todas las tensiones denotada con la letra N , las cuales actúan directamente en la sección transversal, se la describe en la ecuación 6.8:

$$N(x) = \iint \sigma(x, y) dy dz$$

Ecuación 6.8 Suma de las tensiones

$N(x)$ es la fuerza directa total dentro de la viga en algún punto x . Sin embargo, no juega un papel en la teoría de la viga, porque no causa un desplazamiento w . En cambio es importante en el desplazamiento axial de las barras.

iv. Ecuaciones de equilibrio

Las ecuaciones de equilibrio describen como se relacionan las fuerzas externas con las tensiones internas. Por lo tanto, se considera el balance de las fuerzas y momentos actuando en un elemento de longitud diferencial dx . En la figura 6.6 se puede apreciar este efecto.

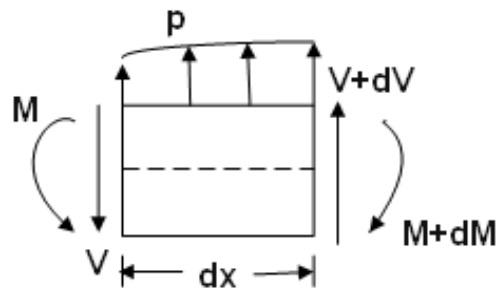


Figura 6.6 Fuerzas y momentos que actúan sobre una pequeña sección de la viga

Donde:

V = corte en la sección

M = momento flexional

p = fuerza externa.

Entonces, la ecuación de equilibrio en la dirección y , permite calcular la fuerza resultante de corte V , esto se representa en la ecuación 6.9:

$$\frac{dV}{dx} = -p$$

Ecuación 6.9 Fuerza resultante de corte V

El momento resultante M sobre un punto en el lado de la viga permite obtener la ecuación 6.10.

$$\frac{dM}{dx} = V$$

Ecuación 6.10 Momento resultante M

Después de analizar estos 4 subconjuntos de la teoría de la viga se obtiene la ecuación Euler-Bernoulli. Para relacionar el desplazamiento fuera del plano w de la viga se combina las ecuaciones estudiadas en el orden que se indica a continuación:

Cinemática-> *Constitutiva*-> *Fuerzas Resultantes*-> *Equilibrio*=**Ecuación de viga**

Para iniciar el modelamiento se igualan las 2 ecuaciones de equilibrio para despejar la fuerza externa p (ecuación 6.11):

$$\frac{d^2M}{dx^2} = -p$$

Ecuación 6.11 Combinación de las 2 ecuaciones de equilibrio

Después se reemplaza el momento resultante M en términos de la tensión σ (ecuación 6.12)

$$\frac{d^2}{dx^2} \left(\iint (y \cdot \sigma) dy dz \right) = -p$$

Ecuación 6.12 Reemplazo del momento resultante en función de la tensión

Luego se utiliza la relación constitutiva para eliminar σ y obtener una ecuación en términos de la tensión ϵ (ecuación 6.13). Se debe usar la ecuación de la cinemática para encontrar el desplazamiento w (ecuación 6.14)

$$\frac{d^2}{dx^2} \left(E \iint (y \cdot \epsilon) dy dz \right) = -p$$

Ecuación 6.13 Uso de la relación constitutiva para reemplazar σ en términos de ϵ

$$\frac{d^2}{dx^2} \left(E \frac{d\chi}{dx} \iint y^2 dydz \right) = -p$$

$$\frac{d^2}{dx^2} \left(E \frac{d^2 w}{dx^2} \iint y^2 dydz \right) = p$$

Ecuación 6.14 Ecuación en términos de w (desplazamiento normal)

Como paso final, siendo la integral y^2 , el área del momento de inercia de la viga se obtiene la ecuación 6.15

$$I = \iint y^2 dydz$$

Ecuación 6.15 Área del momento de inercia de la viga

De esta manera se reemplaza la ecuación 6.15 en 6.14 y se obtiene la ecuación de la viga de Euler-Bernoulli [46]:

$$E \cdot I \frac{d^4 w}{dx^4} = p$$

Ecuación 6.16 Ecuación de Euler-Bernoulli

Donde:

p= Carga distribuida (fuerza por unidad de longitud)

E= Módulo de Young de la viga

I= Momento de inercia del área de sección transversal de la viga.

b. Timoshenko

El modelamiento de Timoshenko formula ecuaciones diferenciales contemplando los efectos de los esfuerzos de corte y de inercia rotacional. De esta manera se puede evitar errores importantes en la obtención de las frecuencias de vibración.

En este modelo, el cálculo de variaciones permite obtener de una manera sistemática, rigurosa y eficaz las ecuaciones diferenciales y las condiciones de contorno. Las ecuaciones describen el comportamiento estático y/o dinámico de elementos estructurales como cuerdas, membranas, vigas y placas específicamente con bajo módulo de corte.

Al utilizar un método analítico como el de Timoshenko, la correcta formulación del problema, el apropiado establecimiento de las condiciones de contorno y sus valores iniciales, constituye un paso esencial para la descripción del comportamiento del sistema.

Entre las condiciones de contorno se puede contemplar los distintos tipos de apoyos clásicos. Por ejemplo: Si el elemento está rígidamente empotrado, simplemente apoyado, deslizante o libre. Además, se debe considerar los efectos de flexibilidad en los extremos porque las características teóricas de los distintos apoyos en realidad no se manifiestan con toda precisión [47].

La teoría de la flexión de vigas de Timoshenko se basa en las 3 hipótesis siguientes [48]:

1. Los desplazamientos verticales de todos los puntos de una sección transversal son pequeños e iguales.
2. El desplazamiento lateral es nulo.
3. Las secciones planas normales al eje del elemento antes de la deformación permanecen planas, pero no necesariamente normales al eje después de la deformación.

Esta tercera hipótesis incorpora una variación considerable respecto a la teoría de Euler-Bernoulli. Las secciones permanecen planas y normales al eje después de la deformación.

En la figura 6.7 se definen el desplazamiento fuera del plano u , el ángulo de rotación por flexión f , la deformación angular de corte g y el desplazamiento en la dirección x , d

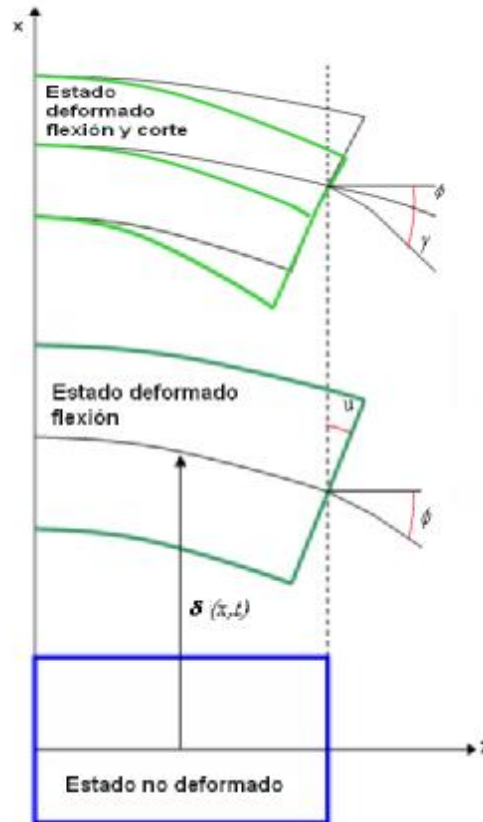


Figura 6.7 Deformación en vigas de Timoshenko

Si bien el fenómeno ocurre en forma simultánea, en la figura 6.7 se ha descompuesto el desplazamiento d en un desplazamiento d_f producido por la flexión y un desplazamiento d_c producido por la deformación por corte.

De acuerdo a la definición de Timoshenko, el coeficiente de corte es la relación entre la deformación por corte promedio en la sección y la deformación por corte en el centroide. Este coeficiente depende sólo de la forma de la sección transversal de la viga [47].

Las fuerzas resultantes actuando en un elemento de longitud diferencial dz pueden apreciarse en figura 6.8.

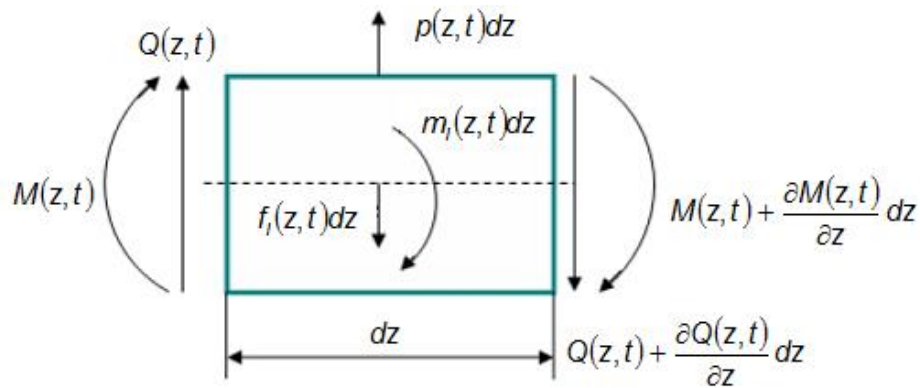


Figura 6.8 Fuerzas actuando en una viga de Timoshenko

Donde:

$Q(z, t)$ = Corte en la sección

$M(z, t)$ = Momento flexional,

$f_i(z, t)dz$ = Resultante transversal de la fuerza inercial

$m_i(z, t)$ = Fuerza de inercia rotacional, la cual es igual al momento de inercia de masa por la aceleración angular

$p(z; t)dz$ = Fuerza externa.

En la tabla 6.5 quedan resumidas las características de la teoría de Timoshenko:

VIGAS DE TIMOSHENKO	
Cinética	$e = \frac{du}{dz} = \frac{d^2d}{dz^2} = \frac{dg}{dz}$
Ecuación constitutiva	$s = E \cdot e$
Ecuación de movimiento	$EJ(z) \left(\frac{\partial^4 d(z,t)}{\partial z^4} - \frac{\partial^3 g(z,t)}{\partial z^3} \right) + m(z) \frac{\partial^4 d(z,t)}{\partial t^2} -$ $pI(z) \left(\frac{\partial^4 d(z,t)}{\partial z^2 \partial t^2} - \frac{\partial^3 g(z,t)}{\partial z \partial t^2} \right) = p(z,t)$

Tabla 6.5 Viga de timoshenko

c. Método de Cosserat

La teoría de Cosserat permite dar una descripción dinámica mediante ecuaciones diferenciales ordinarias (EDO) en lugar de las ecuaciones en derivadas parciales (EDP) [49].

El enfoque de este modelo está en la aplicación de las leyes básicas de la mecánica newtoniana a un continuo material fino y al análisis de las propiedades de dicho material dentro de la estructura. Además, define la dinámica del elemento pudiendo obtener su energía cinética y la tensión al realizar movimientos. Este tipo de modelamiento es utilizado en dispositivos MEMS con vigas, membranas y placas.

Las herramientas del modelado Cosserat proporcionan una descripción adecuada del comportamiento elasto-dinámico. Presenta mejores ventajas de rendimiento en velocidad computacional en comparación con los modelos tradicionales porque a menudo gastan demasiado tiempo descartando detalles redundantes. El modelo es no lineal, pues considera la variación geométrica de la viga. En este modelo son permitidas las grandes deformaciones y son considerados los efectos por corte. Por lo tanto, las secciones transversales no se mantienen perpendiculares a la línea de centroides [50].

El comportamiento no-lineal se puede deber al comportamiento del material o geometría de la estructura. Si dependen del tipo de material se deben a no-linealidades elásticas, plásticas, visco-elásticas, daño o fragilidad del comportamiento de la estructura. Las no-linealidades geométricas ocurren cuando las deflexiones son grandes y producen cambios significativos en la geometría de la estructura. De esta manera, las ecuaciones de equilibrio se deben formular para la configuración deformada.

La configuración de una viga es descrita por una curva denominada curva de centroides y por una familia de secciones planas descrita por una tríada de vectores ortonormales. La deformación de la viga es medida al comparar una configuración deformada con otra tomada como referencia.

A continuación se resume brevemente los aspectos del modelado de un elemento de la viga Cosserat, el mismo se muestra en la figura 6.9 [49]:

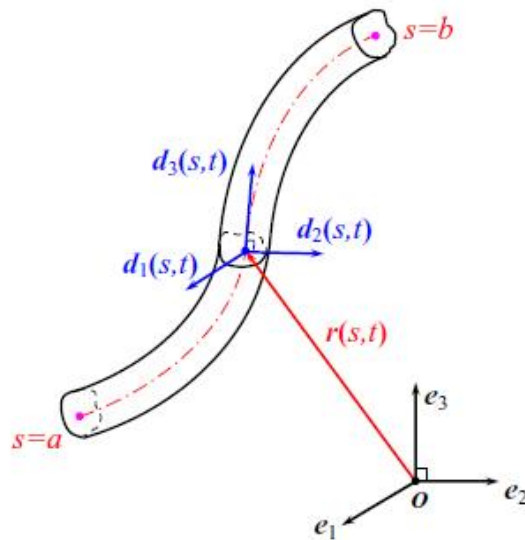


Figura 6.9 Barra de Cosserat⁴¹

- Es necesario adoptar las coordenadas cartesianas (x, y, z) en forma inercial (e_1, e_2, e_3) con el tiempo newtoniano t .
- La configuración de un segmento de la viga puede ser descrito por el eje neutro $r(s, t)$ en la curva Cosserat. Además tiene 3 vectores unitarios ortonormales $\{d_1(s, t), d_2(s, t), d_3(s, t)\}$ llamados vectores directores, s y t denotan un parámetro de longitud y tiempo, respectivamente.
- La curva de Cosserat se puede describir mediante:

$$r(s, t) = r_i(s, t)e_i = x(s, t)e_1 + y(s, t)e_2 + z(s, t)e_3$$
- Los vectores d_1 y d_2 están en el área de la sección transversal y el vector d_3 es normal a la sección transversal.
- Como se observa en la figura 6.9, $a \leq s \leq b$ y la longitud de la barra es $L=b-a$.

⁴¹ S. Gutierrez, G. Etse, "Elemento finito isoparametrico de placa para Continuos micropolares cosserat", 2004, Argentina. [Online]. Disponible: <http://www.amcaonline.org.ar/ojs/index.php/mc/article/viewFile/283/271>. [Accesado: Noviembre 29, 2010]

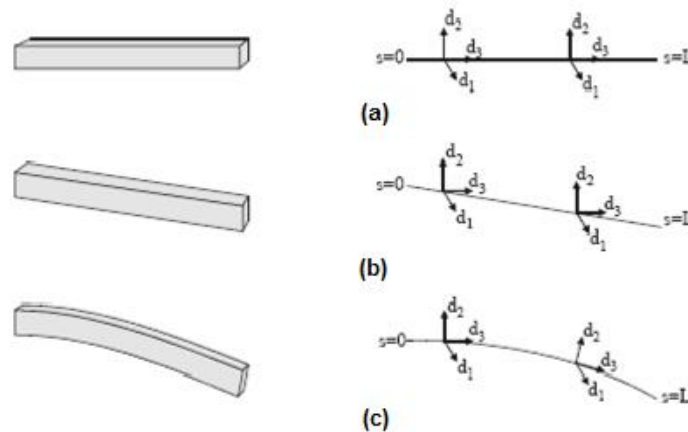


Figura 6.10 Configuración de la viga

En la figura 6.10 (a) se puede observar la configuración inicial de la viga. En la figura 6.10 (b) muestra una viga desviada con cambio en la posición y dirección de la estructura. Además el vector d_3 no coincide con la tangente de la curva. Y en la figura 6.10 (c) muestra una viga flexionada debido a fuerzas exteriores aplicadas, algunas partes de la viga se acortan y otras zonas se pueden alargar. Este fenómeno produce una curvatura transitoria experimentada en la estructura por la acción de una fuerza deformándola elásticamente [51].

Los Vectores d_1 y d_2 permiten modelar la torsión de una viga. Utilizando la figura anterior se puede observar a estos vectores directores d_1 y d_2 rotando sobre d_3 . La forma de cada sección se describe con los momentos del área por unidad de longitud. Este parámetro coincide con el producto del área total multiplicado por la distancia entre el punto considerado al centroide del área. Siendo los momentos M_1 , M_2 y M_3 , descritos por la ecuación 6.17:

$$\begin{aligned}
 M_1 &= \int_A x_2^2 dA & M_2 &= \int_A x_1^2 dA & M_3 &= M_1 + M_2 \\
 M_1 &= \int_A x_2^2 (dx_1 dx_2) & M_2 &= \int_A x_1^2 (dx_1 dx_2)
 \end{aligned}$$

Ecuación 6.17 Momentos de área

Donde:

ξ_1, ξ_2 = Coordenadas de la sección transversal a lo largo de d_1 y d_2 respectivamente.

Las referencias geométricas para definir un punto dentro de una sección las podemos ver en la siguiente figura 6.11

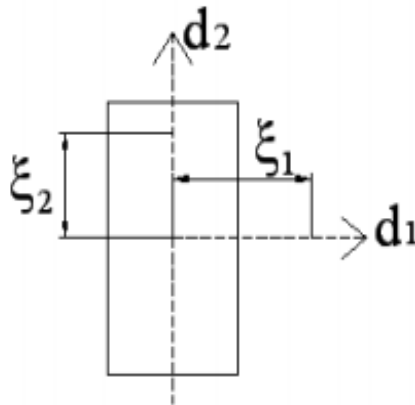


Figura 6.11 Referencias geométricas de una sección

Cuando ρ (densidad de masa del elemento) es constante, los momentos de inercia por unidad de longitud reflejan la distribución de masa de la estructura en rotación respecto a un eje de giro. El momento de inercia sólo depende de la geometría y de la posición del eje de giro. El momento de inercia no depende de las fuerzas relacionadas al movimiento, como se muestra en la ecuación 6.18 [49]:

$$I_{11} = \rho M_1 \quad I_{22} = r M_2 \quad I_{33} = r M_3$$

Ecuación 6.18 Momentos de inercia

El modelado Cosserat permite la inclusión de las fuerzas y momentos externos de la viga. Al hablar de las fuerzas propias de la estructura se refiere a las fuerzas de contacto junto con sus momentos al operar en los puntos donde la viga se conecta a otros elementos. Los parámetros de este modelo se describen en la tabla 6.6:

PARÁMETROS	ECUACIÓN
Velocidad de la curva	$\partial_t r$
Velocidad angular de la Sección	$\omega = \omega_i \cdot d_i$
Transversal	$\partial_t d_i = \omega \cdot d_i$
Tensión lineal	$v = \partial_s r = v_i \cdot d_i$

PARÁMETROS	ECUACIÓN
Tensión angular	$u = u_i \cdot d_i$ $\partial_s d_i = u \cdot d_i$

Tabla 6.6 Parámetros del Modelo de Cosserat

La energía cinética por unidad de longitud se define en la ecuación 6.19:

$$U = \frac{1}{2} \{ \mu \partial_{t,r} \cdot \partial_{t,r} + I(\omega, \omega) \}$$

Ecuación 6.19 Energía cinética de la viga Cosserat

Donde

$$\mu = \rho A ,$$

ρ = densidad de la estructura,

A= área de la sección transversal

I = momento de inercia del tensor

Para la teoría de Cosserat se toma en cuenta los desplazamientos finitos, rotaciones, torsión y flexión. Las relaciones constitutivas de Kirchoff proporcionan una descripción adecuada de las propiedades elásticas de los materiales. Para un material elástico e isotrópico con módulo de Young (E) y módulo de corte (G) sus tensores tiene los siguientes componentes definidos en las ecuaciones 6.20 [49]:

$$m_1 = EM_1 u_1 \quad m_2 = EM_2 u_2$$

$$n_1 = GA v_1 \quad n_2 = GA v_2 \quad n_3 = EA(v_3 - 1)v_1$$

Ecuación 6.20 Componentes de los tensores

La tensión, la fuerza y el torque se definen como:

$$m_i = m \cdot d_i \quad n_i = n \cdot d_i \quad u_i = u \cdot d_i \quad v_i = v \cdot d_i$$

Ecuación 6.21 Tensión, fuerza y torque

Donde:

$m = m(s, t)$ Vector de torque de contacto

$n = n(s, t)$ Vector de fuerza de contacto

$u = u(s, t)$ Vector angular de tensión

$v = v(s, t)$ Vector translacional o lineal de tensión

El análisis de una estructura mediante el modelo de Cosserat permite determinar 3 cuantificadores:

i. Cinética.- Cálculo de fuerzas, tensiones y energía cinética.

ii. Variaciones angulares.- Cálculo de torques y momentos.

iii. Análisis de la configuraciones de desviación y flexión de estructuras simples.- Estudio sobre las estructuras deformadas.

6.2.3.2. Métodos numéricos

a. Método de elementos de contorno (BEM)

El método de elementos de contorno, es también conocido como método de elementos de frontera o método de elementos de borde. Este método numérico resuelve ecuaciones en derivadas parciales lineales. Además, conceptualmente, trabaja construyendo una "malla" sobre la superficie modelada. Sin embargo, para muchos problemas el método de elementos de frontera es significativamente menos eficiente que los métodos de discretización de volumen.

El método de los elementos de contorno permite modelar las estructuras con una gran aproximación a su geometría. Además de adaptar el modelo a las distintas dimensiones implicadas en el problema. Este método permite calcular la densidad de carga y la capacidad de la estructura. Estos parámetros son importantes para el diseño eficiente de MEMS. Puede ser utilizado en muchas aplicaciones electrostáticas, de fluidos, acústicas y electromagnéticas [52].

Para el BEM se debe situarse sobre la frontera o establecer relaciones entre magnitudes asociadas, y determinar cuáles elementos de la estructura

cumple las condiciones de contorno. De esta manera resuelve una ecuación integral, en lugar de tomarse valores en todo el espacio definido por una ecuación diferencial parcial. Luego en la etapa de post-procesamiento, la ecuación integral se puede utilizar de nuevo para calcular numéricamente la solución en cualquier punto deseado en el interior del dominio [52].

El BEM es aplicable a problemas para los cuales se conoce una función de Green. Este es un tipo de función utilizada como núcleo de un operador lineal integral y empleada en la resolución de ecuaciones diferenciales homogéneas con condiciones de contorno especificadas. Usualmente implica campos lineales en medios homogéneos. De esta manera, restringe la generalidad de los problemas para los cuales el método se puede aplicar [53].

La forma de resolver el problema es discretizando la frontera en trozos denominados "elementos" y luego se forma un sistema de ecuaciones para organizar en forma matricial y solucionar numéricamente. Los coeficientes de la matriz resultan de la "influencia" de la función Green en cierto elemento. Dicha función suelen presentar problemas a la hora de integrar por estar basada en una solución del sistema sujeta a una carga puntual. Así por ejemplo: el campo eléctrico debido a una carga puntual. En el caso de elementos con geometrías simples se puede usar integración analítica. Para elementos más generales, es posible diseñar esquemas puramente numéricos, lo que incrementa el costo computacional [54].

b. Método de elementos finitos (FEM)

El análisis de elementos finitos es una herramienta esencial para el diseño de MEMS. Proporciona simulaciones del comportamiento estático y dinámico de estructuras complejas en la escala micrométrica. El método es muy poderoso debido a su generalidad y a la facilidad de introducir dominios de cálculo en dos o tres dimensiones. Cuando los problemas no tienen solución analítica o es muy difícil obtenerla, FEM se ha convertido en la única alternativa de solución [55].

Actualmente, el método se encuentra en una fase de gran expansión, es ampliamente utilizado en la industria y continúan apareciendo cientos de trabajos de investigación en este campo. Los ordenadores han aportado como el medio eficaz para resolver la multitud de ecuaciones planteadas en el FEM. Hoy en día ya se concibe la conexión entre las técnicas de análisis estructural, las técnicas de diseño (CAD) y, las técnicas de fabricación.

En la obtención de este modelo hay 2 puntos claves:

1. Se debe considerar una estructura para el modelo a construir. La estructura y su complejidad, dependerán de la precisión en el modelamiento de los diferentes aspectos. Por ejemplo: consideraciones de la distribución de los elementos, consideraciones de las propiedades físicas y, modelamiento de las condiciones de contorno.
2. Una vez establecida la estructura, se debe determinar sus parámetros. Para los cuales también existen varias posibilidades dependiendo de: el tipo de distribución para el análisis, el tipo de condiciones de contorno empleadas, el tipo de régimen, entre otros. Dependiendo del tipo de estructura elegida para el modelo, la complejidad en el proceso de obtención de parámetros cambiará.

Por tanto ambos aspectos están relacionados. Cuanto más complejo y más preciso sea el modelo generado, más difícil será la obtención de sus parámetros [56].

La idea general del método de los elementos finitos es la división de una estructura continua en un conjunto de pequeños elementos interconectados por una serie de puntos llamados nodos. Las ecuaciones rigen el comportamiento de todo el sistema y regirán también a todo elemento. El sistema continuo tiene infinitos grados de libertad y esta determinado por una ecuación diferencial o por un sistema de ecuaciones diferenciales. Al aplicar el método se obtiene un sistema con un número de grados de libertad finito cuyo comportamiento se modela por un sistema de ecuaciones lineales o no-lineales.

En cualquier sistema a analizar podemos distinguir 3 elementos visualizados en la figura 6.12. A continuación en la tabla 6.7 se explica cada uno de ellos:

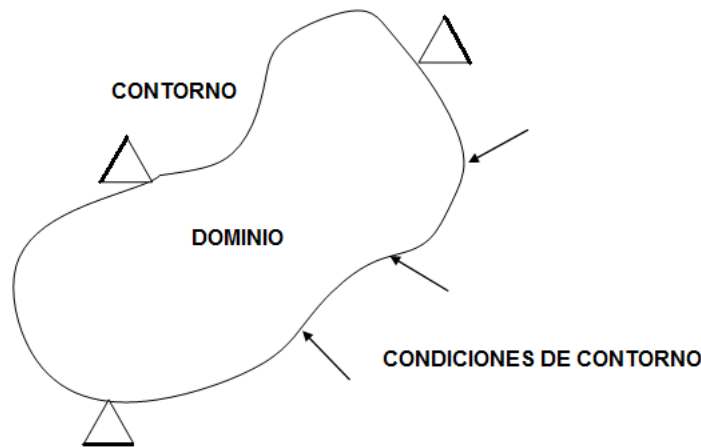


Figura 6.12 Elementos de un sistema en el método FEM

ELEMENTO	DESCRIPCIÓN
Dominio	<p>Espacio geométrico donde se va a analizar el sistema.</p> <p>El dominio se divide mediante puntos (en el caso lineal), líneas (en el caso bidimensional) o superficies (en el tridimensional) imaginarias, de forma el dominio total en estudio se aproxima mediante el conjunto de porciones (elementos) en el cual esta subdividido. Los elementos se definen por un número discreto de puntos llamados nodos, los cuales conectan entre si los elementos.</p>
Condiciones de contorno	<p>Estas variables condicionan el cambio del sistema: cargas, desplazamientos, temperaturas, voltaje, focos de calor, etc.</p>
Incógnitas	<p>VARIABLES a conocer después de aplicar las condiciones de contorno sobre el sistema. Por ejemplo: desplazamientos, tensiones, temperaturas. A estas incógnitas se les denomina grados de libertad de cada nodo. Los grados de libertad de un nodo determinan el estado y/o posición del nodo.</p>

Tabla 6.7 Elementos del método FEM

El proceso de generación de la solución mediante FEM se da en 5 pasos estos se observan en la figura 6.13 y se explican a continuación en la tabla 6.8:

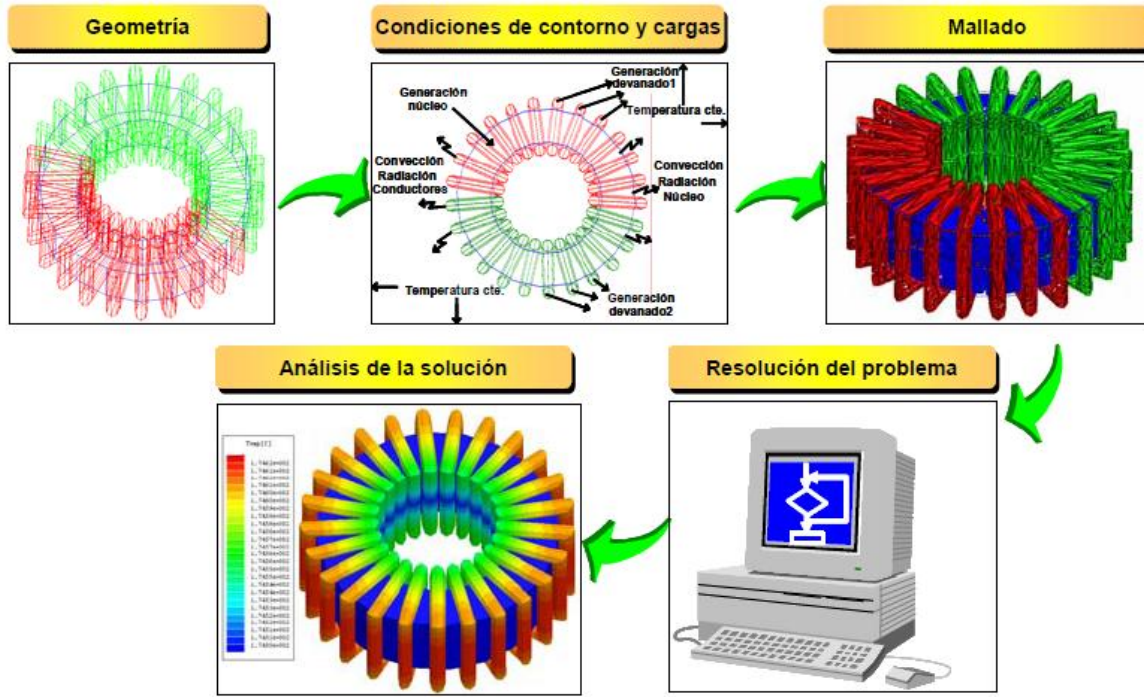


Figura 6.13 Proceso de obtención de la solución mediante análisis por elementos finitos⁴²

PASOS	DESCRIPCION
Definición de la Estructura	Consiste en la obtención de un dibujo en 2D o 3D. Esta estructura permite establecer el planteamiento y la resolución de las ecuaciones. Este método generalmente tiene una herramienta CAD.
Definir el modelo matemático a resolver.	1. Especificación del régimen a estudiar
	Permiten realizar un análisis estacionario, en el tiempo o en la frecuencia.

⁴² M. Escribano, "El análisis por elementos finitos", Universidad Complutense de Madrid, España. [Online]. Disponible: <http://www.uv.es/asepuma/XIV/comunica/117.pdf>. [Accesado: Diciembre 9, 2010]

PASOS	DESCRIPCION
2. Asignación de las propiedades físicas de los materiales	Las propiedades tales como la conductividad térmica, la densidad, coeficiente de elasticidad, etc se asignan a cada uno de los objetos generados en la fase de definición de la geometría.
3. Asignación de condiciones contorno	Determinar parámetros constantes de funcionamiento de la estructura.
4. Aplicación de las cargas	Expresar las cargas en función de las variables de la estructura definida.
Mallado de la geometría	<p>La geometría del objeto se divide en diferentes elementos. Existen varias herramientas para realizar el mallado de forma automática. Además permite al usuario realizar este proceso de forma más fina en las zonas de estudio.</p> <p>El mallado es una tarea clave en el proceso.</p>
Resolución del problema	<p>Una vez efectuada dicha definición el programa resuelve automáticamente las ecuaciones y provee los resultados en una forma apropiada.</p> <p>En esta fase del proceso se aplica el método de análisis por elementos finitos para obtener la solución del problema.</p>
Análisis de la solución	Una vez obtenida la solución del problema es posible representar gráficamente la distribución. Además determinar los parámetros en estudio.

Tabla 6.8 Pasos del modelamiento FEM

Con la finalidad de entender mejor este método, se ejemplifica una viga en voladizo con una carga puntual en el extremo y una distribución de temperaturas tal y como muestra la figura 6.14:

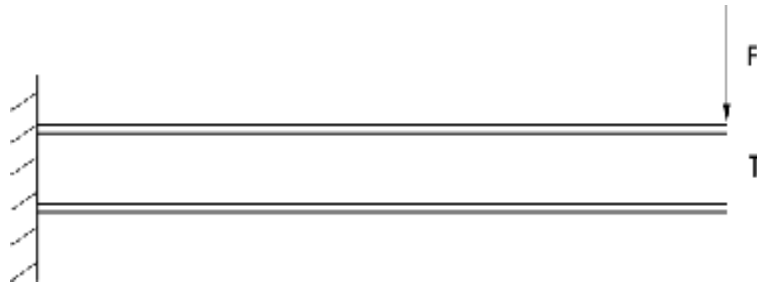


Figura 6.14 Viga en voladizo con una carga puntual en el extremo

El discretizado de dominio puede ser como se ilustra en la figura 6.15:

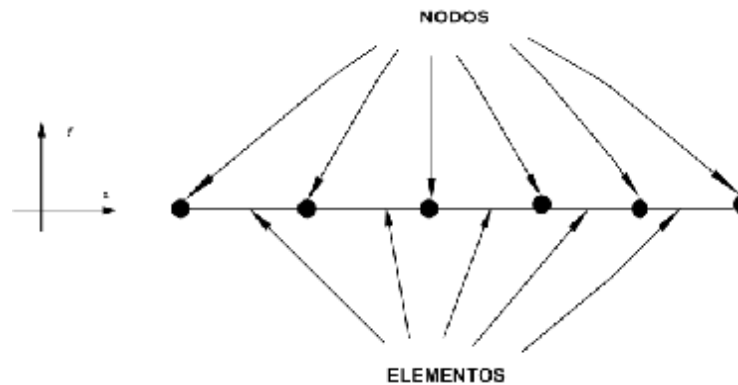


Figura 6.15 Discretizado del dominio de una viga en voladizo

Los grados de libertad de cada nodo serán:

- Desplazamiento en la dirección x
- Desplazamiento en la dirección y
- Giro según z
- Temperatura

El sistema debido a las condiciones de contorno: empotramiento, fuerza puntual y temperatura, evoluciona hasta un estado final. En este estado final, conocidos los valores de los grados de libertad de los nodos del sistema podemos determinar cualquier otra incógnita deseada como: tensiones, deformaciones.

Para plantear la ecuación diferencial del comportamiento de un elemento, se lo realiza por medio de unas funciones llamadas de interpolación. Estas funciones interpolan el valor de la variable dentro del elemento.

El problema se formula en forma matricial debido a la facilidad de manipulación mediante un ordenador. Conocidas las matrices definidas para establecer el comportamiento del elemento (en el caso estructural serán las llamadas matrices de rigidez, amortiguamiento y masa). Luego se ensamblan y se forma un conjunto de ecuaciones algebraicas lineales o no-lineales. Al resolverlas proporcionan los valores de los grados de libertad en los nodos del sistema. [58]

6.2.4. Comparación entre los métodos de modelamiento

A continuación en la tabla 6.9 se realiza una comparación entre los métodos de modelamiento analíticos.

MÉTODOS ANALÍTICOS			
CARACTERÍSTICAS	Bernoulli-Euler	Timoshenko	Cosserat
Principio	Teoría de la elasticidad.	Teoría de flexión de vigas	Aplicación de las leyes básicas de la mecánica newtoniana.
Características	<ul style="list-style-type: none"> • Calcula los portadores de carga y deformación de las vigas. • Calculo de desviaciones pequeñas de una viga sometida solo 	<ul style="list-style-type: none"> • Utiliza ecuaciones inerciales para contemplar los efectos de los esfuerzos de corte y de inercia rotatoria • Las ecuaciones diferenciales y las condiciones de contorno describen 	<ul style="list-style-type: none"> • Proporciona una descripción dinámica del elemento mediante ecuaciones diferenciales ordinarias. • Proporciona una descripción del

MÉTODOS ANALÍTICOS			
	a cargas laterales	el comportamiento estático y/o dinámico de los elementos.	comportamiento elasto-dinámico
Aplicación	<ul style="list-style-type: none"> • Vigas 	<ul style="list-style-type: none"> • Cuerdas • Membranas • Vigas • Placas 	<ul style="list-style-type: none"> • Vigas • Membranas • Placas

Tabla 6.9 Comparación entre métodos de modelamiento analíticos

Además en la tabla 6.10 se realiza una comparación de los métodos numéricos:

MÉTODOS NUMÉRICOS		
CARACTERÍSTICAS	FEM	BEM
Geometría	3D, 2D	2D
Discretización	Volumen	Superficie
Número de Ecuaciones	N^3 N=Número de grados de libertad	N^2 N=Número de grados de libertad
Resolución	Usa algoritmos desarrollados para la resolución de las ecuaciones.	Los algoritmos para resolver sus ecuaciones no están desarrollados.
Análisis	Calculo del campo de desplazamientos, deformaciones y tensiones.	Calculo de la densidad de carga y la capacidad de la estructura.
Aplicaciones	MEMS relacionados con transmisión de calor, fluidos, mecánica y de campo electrostático y electromagnético	MEMS electrostáticos, de fluidos, acústicos y electromagnéticos

Tabla 6.10 Comparación entre métodos de modelamiento numéricos

6.3. Desafíos para el modelamiento de un dispositivo MEMS

Los fenómenos no lineales son frecuentes en los dispositivos MEMS. Por tanto, es necesario identificar y comprender estas no linealidades para garantizar un mejor rendimiento del sistema.

En general, aparece en funciones no lineales o discontinuas, en las variables del sistema y sus derivadas. Estos fenómenos presentan un problema de modelado difícil y es necesario estudiarlas para entender de mejor manera su comportamiento. A continuación, se identificarán 4 no linealidades asociadas a dispositivos MEMS.

1. Accionamiento eléctrico e inestabilidad “pull in”
2. Micro-placas accionadas eléctricamente
3. Impactos y fricción
4. Interacción fluido-estructura (FSI “Fluid-Structure Interaction”)

6.3.1. Accionamiento eléctrico e inestabilidad “pull in”

Los dispositivos MEMS requieren bajas entradas de energía. Pueden ser proporcionadas por actuaciones térmicas, magnéticas, piezo-eléctricas, hidráulicas y eléctricas. Sin embargo, la gran mayoría de los dispositivos se han basado en la impulsión eléctrica. Debido a su alta densidad de energía, alta flexibilidad mecánica, y poca corriente.

Para predecir el rendimiento y permitir la optimización del diseño de estos dispositivos, una simulación electro-mecánica es necesaria. En general, esto requiere la solución de la ecuación de Laplace para el campo electrostático con condiciones de contorno determinadas.

En los software comerciales, tales como Coventor Ware, Comsol e Intellsuite, la estructura mecánica se discretiza utilizando el método de elementos finitos (FEM) y el campo eléctrico se discretiza utilizando el método de los elementos de contorno (BEM). El estudio empieza basándose en la configuración y estructura original donde se calcula la carga eléctrica inicial. Esta carga

entonces actúa en la estructura desviándola a una nueva posición. A su vez induce un cambio en la capacidad y por lo tanto una carga eléctrica nueva. Este modelamiento debe iterarse varias veces para garantizar la convergencia.

Por otra parte, muchos dispositivos MEMS poseen una relación de aspecto pequeño. Por lo tanto, el campo potencial puede ser simplificado. Por ejemplo en vigas de polisilicio o componentes de actuación basados en placas, se deforman con una diferencia de potencial entre la estructura y un electrodo rígido. La distribución eléctrica puede ser aproximada por la ecuación 6.21:

$$F(x, y, V) = \frac{\epsilon V^2}{2(d - w(x, y))^2}$$

Ecuación 6.22 Distribución eléctrica

Donde:

w (x, y)= Desviación fuera de plano

ε= Permitividad del material dieléctrico

V= Voltaje

d=Diferencia de voltaje (“zero-voltage gap”).

La carga eléctrica puede ser simplificada aún más en los interruptores ópticos. Las fuerzas de impulsión se pueden describir mediante un modelo no lineal de placas paralelas de capacitancia [45], como se muestra en la figura 6.16 y la ecuación 6.22 define esta fuerza:

$$F = \frac{\epsilon \cdot A \cdot V^2}{2 \cdot (d - \delta)^2}$$

Ecuación 6.23 Fuerza de atracción entre dos conductores de placas paralelas

Donde:

A= Área de la placa.

d= Distancia entre las placas.

δ= Desplazamiento de la placa móvil

V = Voltaje

ϵ = Permitividad del material dieléctrico

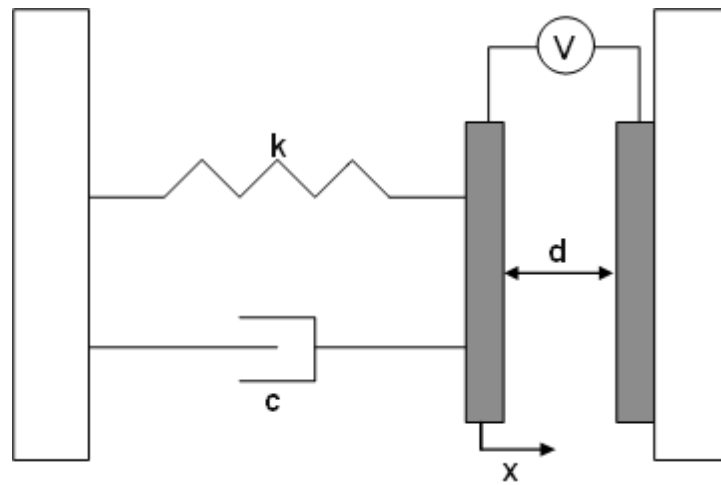


Figura 6.16 Diagrama esquemático de un condensador de placas paralelas

La interacción entre el campo eléctrico y las deformaciones estructurales trae una nueva inestabilidad llamado "pull-in". Harvey Nathanson (Científico del Laboratorio de Ciencia y Tecnología del Grupo "Northrop Grumman Electronic Systems" en Baltimore) fue el primero en observar el fenómeno "pull in" al estudiar un transistor de compuerta resonante accionado eléctricamente.

6.3.2. Micro-placas accionadas eléctricamente

El accionamiento eléctrico de una micro-placa de capacitancia variable se muestra en la figura 6.17. Como la fuerza capacitiva deforma la micro-placa, esta cambia con la placa de desviación, permitiendo un acoplamiento de las fuerzas eléctricas y mecánicas. Este fenómeno se observa en micro-bombas, micro-espejos y micrófonos. Las aplicaciones de estos dispositivos MEMS se encuentran en: Biotecnología, procesamiento de imágenes, minería, industria automotriz, química y alimentaria

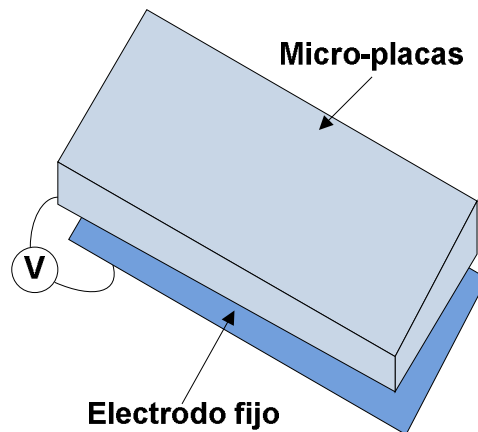


Figura 6.17 Estructura esquemática de un capacitor "air gap"

Para este análisis se debe asumir una relación lineal entre la fuerza de excitación y la deformación de la placa. La ecuación lineal de las placas se puede resolver por métodos numéricos. Tales como el método de Galerkin, el método de Rayleigh-Ritz, y el método de elementos finitos (FEM). Sin embargo, la teoría de placas lineales sólo es adecuada para pequeñas deflexiones. Cuando la desviación es comparable con el espesor de la placa, produce resultados erróneos y se debe recurrir a una teoría de placas no lineales. [45]

6.3.3. Impactos y fricción

La micro-manipulación a distancia es importante en la industria de MEMS, son ideales para los sistemas de micro-posicionamiento debido a su pequeño tamaño. Los micro-actuadores para producir pequeños desplazamientos necesitan grandes fuerzas de accionamiento. El correcto funcionamiento de estos actuadores depende de los impactos entre sus componentes y el fenómeno de "stick-slip" debido a la fricción entre el dispositivo y el soporte del mismo.

Probablemente la forma más sencilla de modelar los sistemas de impacto y fricción es utilizar la aproximación de los multi-cuerpos rígidos. De esta manera dejan de lado los efectos de onda durante los impactos entre los cuerpos y las transiciones "stick-slip" de los cuerpos en contacto. La ventaja de esta aproximación está en evitar los problemas de rigidez diferencial. Sin embargo, el enfoque conlleva a obtener formulaciones matemáticas con discontinuidades en

las velocidades debido a los impactos y en el campo de vectores debido a la fricción.

6.3.4. Interacción fluido-estructura (FSI “Fluid-Structure Interaction”)

Los micro-fluidos se han convertido en un campo de investigación importante. Estas micro-estructuras se utilizan en dispositivos de ADN, análisis de proteínas y en descubrimiento de fármacos. En la figura 6.18 se puede observar un ejemplo de este fenómeno.

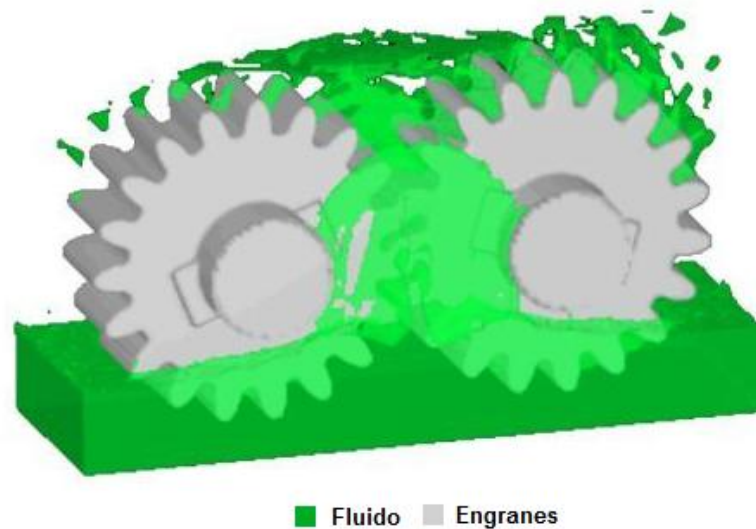


Figura 6.18 Interacción fluido-estructura de un movimiento determinado en una simulación de engranajes⁴³

Uno de los componentes más importantes en la micro-hidráulica son las micro-bombas se utilizan para manipular volúmenes muy pequeños y precisos de fluidos. El flujo es impulsado por la vibración de la placa delgada y el este pone resistencia a dicha vibración. Las características de vibración de una micro-bomba dependen del acoplamiento fluido-estructura. Por lo tanto, es una de las principales preocupaciones en el estudio de estructuras micro-fluidricas [45].

⁴³ Tomado de: Varios Autores, "Modeling Fluid-Structure Interaction with FLOW-3D". [Online] Disponible: <http://www.flow3d.com/flow3d/flow3d-fluid-structure-interaction.html>

CAPÍTULO VII

SIMULACIÓN

Introducción: La simulación es un complemento de diseño de microsistemas. La gran disponibilidad de software existentes en la actualidad, han hecho de la técnica de simulación una de las herramientas utilizadas en el análisis de dispositivos. Este procedimiento permite obtener un mayor conocimiento sobre un proceso o sistema, empleando un modelo matemático donde se reúna las principales variables. Entre los software de simulación de MEMS se puede nombrar: COMSOL MULTIPHYSICS, CONVENTOR, ANSYS Y SOFTMEMS, los que analizarán

7.1. Introducción a la simulación de dispositivos MEMS

En forma general, la simulación puede entenderse como la utilización del computador para la reproducción aproximada y el estudio de un fenómeno: físico, químico, biológico, mecánico, electrónico, etc.

Su principal objetivo es obtener mayor información sobre la respuesta y evolución de un micro-sistema bajo ciertas condiciones impuestas: cargas, condiciones de contorno y condiciones iniciales. Esta información será útil en el proceso de toma de decisiones para optimizar prototipos. Además permite conocer y estudiar las variables relacionadas con el fenómeno sin necesidad de construir el objeto bajo estudio [59].

Aunque las herramientas de simulación por computador son recientes, se basan en técnicas matemáticas desarrolladas tiempo atrás. Estos métodos sólo pudieron ser puestos en práctica gracias a la aparición de máquinas con gran capacidad de memoria y elevada velocidad de procesamiento. De esta manera, el computador resuelve una serie de ecuaciones conocidas y utilizadas para calcular las variables involucradas en los fenómenos físicos.

La creciente capacidad de las computadoras otorga nuevas herramientas para apoyar el proceso de la toma de decisiones en diversas disciplinas y áreas de diseño de la industria. El usuario define la estructura del sistema a simular para analizar cuando un mecanismo pueda fallar en las condiciones adversas del ambiente.

7.2. Utilidad de la simulación

La simulación se realiza cuando existe alguna de estas 5 condiciones:

1. No existe una completa formulación matemática del problema o los métodos analíticos para resolver el modelo matemático no se han desarrollado aún.
2. Los métodos analíticos están disponibles, pero los procedimientos matemáticos son tan complejos y difíciles. Entonces la simulación proporciona un método más simple de solución.
3. Las soluciones analíticas existen y son posibles, pero están más allá de la habilidad matemática del personal disponible. El costo del diseño, la prueba y la simulación debe evaluarse contra el costo de obtener ayuda externa.
4. Se desea observar el trayecto histórico simulado del proceso sobre un periodo. Además de estimar ciertos parámetros.
5. La simulación puede ser la única posibilidad, debido a la dificultad para realizar experimentos y observar fenómenos en su entorno real.

7.3. Importancia de la simulación en la ingeniería.

Recientes avances en las metodologías de simulación y la gran disponibilidad de software existentes en el mercado, han convertido a la técnica de simulación en una herramienta útil en el análisis. Un estudio de simulación es muy importante por las siguientes razones [60]:

- Se puede estudiar el efecto de cambios internos y externos del sistema, al hacer alteraciones en el modelo del sistema y observar sus efectos en el comportamiento del sistema.
- Una observación detallada del sistema a simularse puede conducir a un mejor entendimiento del sistema. En consecuencia se sugiere estrategias para mejorar la operatividad y eficiencia del sistema.
- En sistemas complejos, la simulación puede ayudar a comprender su funcionamiento, a detectar las variables y a entender mejor las interrelaciones entre las mismas.
- La técnica de simulación puede ser utilizada para experimentar con nuevas situaciones sobre las cuales tiene poca o ninguna información. A través de esta experimentación se puede anticipar ante posibles resultados no previstos.
- Cuando nuevos elementos son introducidos en un sistema. La simulación es utilizada para prevenir cuellos de botella o algún otro problema en relación al comportamiento del sistema.

7.4. Elementos para realizar una simulación

Existen 3 elementos importantes en la obtención de resultados útiles a partir de una simulación [61]:

1. Modelo Matemático
2. Hardware
3. Software

7.4.1. Modelo matemático

Consiste en una representación idealizada de la realidad. Para su elaboración se tienen en cuenta el propósito final del modelamiento del proceso o sistema físico. Además de conocer las variables relacionadas tales como:

- Las propiedades de los materiales.
- Las propiedades geométricas (configuración física).
- Las condiciones de operación (iniciales y de contorno).

Dada la complejidad de las aplicaciones reales, en diversas ocasiones es necesario recurrir a la experiencia y a la intuición para plantear un modelo. Además es necesario reducir el número de variables y parámetros considerados de esta manera la solución pueda ser obtenida en un tiempo razonable.

7.4.2. Hardware

En el pasado existían grandes limitaciones en cuanto a capacidad de memoria, velocidad de procesamiento y flexibilidad en la programación de computadores. Además, el costo excesivo de los equipos requeridos y la poca disponibilidad de personal calificado limita el desarrollo. Actualmente, en la microelectrónica, se dispone de equipos con excelentes prestaciones que facilitan el procesamiento digital.

En general, hoy en día el hardware impone muy pocas restricciones a los modelos a simularse. En el futuro, la próxima generación de computadores hará desaparecer estas limitaciones por completo.

7.4.3. Software

La programación de los modelos Inicialmente se llevaba a cabo en forma manual por especialistas en el área. Además existían grandes dificultades para resolver las partes críticas del diseño. El término "manual" indica que cada

problema se desarrollaba en un algoritmo específico. Y no existía una metodología general para permitir la reutilización del código generado.

Como se observa en la tabla 7.1, hoy día la generación del modelo es una operación muy simple y es realizada de manera personal. Ya no es necesario un experto en modelado matemático ni en el área de aplicación [61]

AÑO	TIEMPO DE DESARROLLO
1980	Meses
1994	Días
1998	Horas
2004	Minutos

Tabla 7.1 Evolución del tiempo de desarrollo de un modelo de simulación

A corto plazo, será posible diseñar aplicaciones basadas en módulos de propósito general. Además los paquetes de software serán más 'inteligentes', y ejecutarían muchas de las operaciones realizadas en la actualidad por el usuario. Se están desarrollando interfaces en base a la interoperabilidad, donde los programas de tipo CAD (Diseño Asistido por Computador), CAM (Manufactura Asistida por Computador) y, CAE (Ingeniería Asistida por Computador) podrán compartir información sin problema alguno.

7.5. Modos de simulación

Un micro-sistema es el elemento primario. Sus componentes interactúan con otros de acuerdo a ciertas reglas dentro de una frontera identificada para el propósito del estudio. Dentro de los parámetros se enumeran a las variables utilizadas durante el diseño del sistema.

Las variables se clasifican a su vez en 4 y se explican en la tabla 7.2 [61]:

VARIABLES	DESCRIPCION
VARIABLES DE ENTRADA (U o D)	<ul style="list-style-type: none"> Son fijadas por el medio ambiente, las cuales rodean el sistema. Pueden ser manipulables, las cuales se fijan a voluntad del diseñador.
VARIABLES DE SALIDA (Y)	<ul style="list-style-type: none"> Son las variables de estado, o combinación de ellas.
VARIABLES INTERNAS	<ul style="list-style-type: none"> Son variables del sistema no son ni de entrada ni de salida. Estas variables pueden ser características propias del micro-sistema.
VARIABLES DE ESTADO (X)	<ul style="list-style-type: none"> Conforman el conjunto mínimo de variables internas del sistema necesarias para describir completamente su estado interno.

Tabla 7.2 Variables de diseño de un sistema

De acuerdo a lo descrito anteriormente, cuando se simula se experimenta con un modelo para obtener ciertos resultados. Existen 3 modos de simulación descritos en la tabla 7.3 [61]:

MODO DE SIMULACIÓN	DESCRIPCIÓN	REPRESENTACIÓN
Análisis	<p>Es el modo más empleado. Las variables de salida del modelo representan a las variables de salida del sistema real.</p> <p>Este modo se utiliza para estimar la respuesta del sistema real ante entradas especificadas. Además este modelo es matemáticamente más estable y se asegura la existencia de una solución.</p>	<pre> graph LR U --> X D --> X P --> X X --> Y </pre>

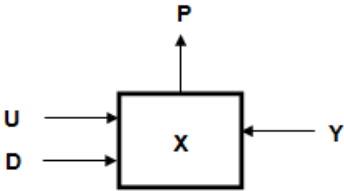
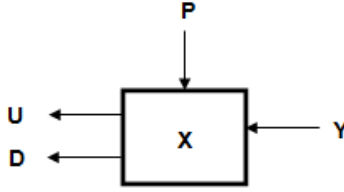
MODO DE SIMULACIÓN	DESCRIPCIÓN	REPRESENTACIÓN
Diseño	<p>En este modo las salidas del modelo representan a los parámetros del sistema real. Se utiliza para determinar los parámetros para los cuales se produce las salidas deseadas para las entradas especificadas.</p>	
Control	<p>Las variables de salida del modelo representan a las variables de entrada del sistema real. Este modo sirve para determinar los valores a adoptar por las entradas del sistema para producir los resultados deseados. Se utiliza para determinar las condiciones de operación de un sistema</p>	

Tabla 7.3 Modos de simulación

Por lo general, los simuladores operan en modo diseño dejando al usuario la tarea de iterar para obtener los resultados provistos por los otros modos. Por ejemplo, para estimar el voltaje requerido para un acelerómetro piezoeléctrico, se pueden realizar varias simulaciones en modo análisis para un conjunto de valores de voltaje.

7.6. Etapas para realizar un estudio de simulación

En el desarrollo de una simulación se pueden distinguir 7 etapas y se muestran en la figura 7.1 [62]:

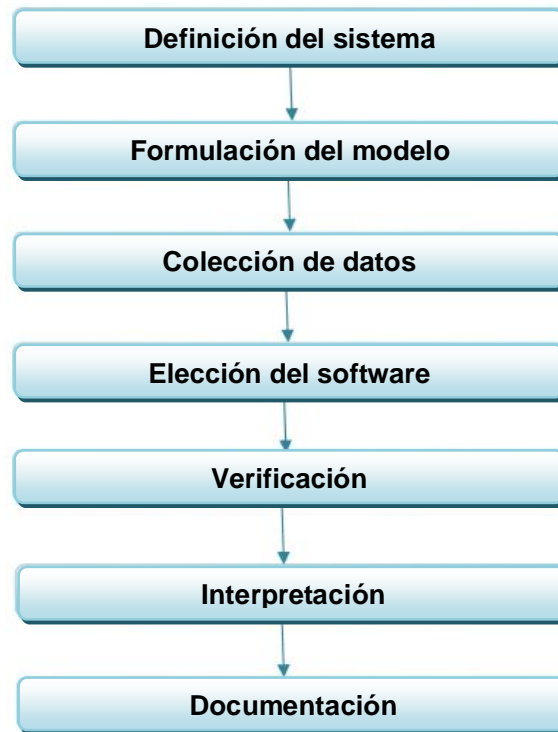


Figura 7.1 Etapas de la simulación

A continuación se describe cada una de las etapas:

7.6.1 Definición del sistema

Consiste en estudiar el contexto del problema e identificar los objetivos del proyecto. Además especificar los índices de medición de la efectividad del sistema y los objetivos del modelamiento.

7.6.2. Formulación del modelo

En este paso se define y construye el modelo con el cual se obtendrán los resultados deseados. En la etapa de formulación es necesario definir todas las variables involucradas y sus relaciones lógicas.

7.6.3. Colección de datos

Es importante definir con claridad y exactitud los datos necesarios para realizar el modelamiento con el fin de producir los resultados deseados.

7.6.4. Elección del software

El siguiente paso es decidir el tipo de software se va a utilizar. Por ejemplo Conventor, Comsol, Ansys, FemLab, entre otros. De esta manera se analizará el comportamiento del micro-sistema.

7.6.5. Verificación

El proceso de verificación consiste en comprobar si el modelo simulado cumple con los requisitos de diseño. Además se trata de evaluar su comportamiento y optimizar el diseño.

7.6.6. Interpretación

En esta etapa del estudio, se interpretan los resultados arrojados por la simulación. En base a los resultados se toma una decisión para optimizar el diseño y eficiencia del prototipo.

7.6.7. Documentación

Existen 2 tipos de documentación requeridos para hacer un mejor uso del modelo de simulación:

1. **Documentación del tipo técnico.**- Contiene parámetros de diseño, metodología, graficas, análisis y conclusiones.
2. **Manual del usuario.**- Con el cual se facilita la interacción y el uso del modelo desarrollado

7.7. Ventajas y desventajas de la simulación

Pese a las grandes bondades de la simulación debe emplearse con precaución porque puede presentar limitaciones propias de la metodología. Como principales ventajas y desventajas se citan las siguientes en la tabla 7.4:

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • Permite el estudio del sistema completo, independientemente de su complejidad. Además pueden estudiarse fenómenos térmicos, mecánicos, electromagnéticos, fluidos, ópticos, etc. • Permite realizar el análisis de sensibilidad. Es decir, estudiar el efecto de pequeñas variaciones de los parámetros y propiedades de los materiales. • La presentación gráfica de los resultados facilita la comprensión del problema y la optimización del objeto de estudio. • Bajo costo de los programas y equipos de cómputo. De esta manera, convierte a las herramientas de simulación en elementos indispensables para la investigación y desarrollo de soluciones. 	<ul style="list-style-type: none"> • El resultado de una simulación es una aproximación a la realidad. Sin embargo, la verificación del modelo se obtendrá al comparar sus resultados con los del sistema o proceso real. • El éxito del modelo será directamente proporcional al grado de conocimiento del sistema. • Cuando la simulación no ha sido bien estructurada, puede convertirse en un proceso lento y costoso. • La simulación es utilizada para contestar preguntas del tipo “¿Qué pasa si?”, pero no de, “¿Qué es lo mejor?”. En este sentido, la simulación no es una técnica de optimización.

Tabla 7.4 Ventajas y desventajas de la simulación

7.8. Software de simulación de dispositivos MEMS

El reto en la simulación de MEMS es entender el conjunto completo de herramientas de software en cada etapa del proceso de diseño de MEMS. Cada paquete de simulación proporciona bloques de construcción ya programados. El usuario puede seleccionar el bloque en el orden necesario para construir la geometría. Cada proveedor de software tiene un interfaz de usuario que interactúa con dicho programa y realiza los procesos de simulación.

Las múltiples facetas de CAD, modelado y simulación ofrece nuevas capacidades acelerando aún más el desarrollo y reduciendo el costo del diseño de los MEMS. A continuación en la tabla 7.5 se enumeran los programas de simulación a analizarse más adelante:

SOFTWARE PARA LA SIMULACIÓN DE MEMS
1. COMSOL MULTIPHYSICS
2. CONVENTOR
3. ANSYS
4. MEMSPro

Tabla 7.5 Software de simulación

7.8.1. Comsol Multiphysics

COMSOL Multiphysics™ es un paquete de software diseñado para el análisis de elementos finitos en diversos campos de la física y la ingeniería. Las características principales de este software se nombran a continuación:

- Interfaz gráfico interactivo para todas las etapas del proceso de modelado.

- Modelado simultáneo de sistemas en 1D, 2D y 3D.
- Incorpora herramientas CAD.
- Extensa biblioteca de modelos y más de 80 ejemplos resueltos.
- Post-procesado interactivo permite visualizar cualquier función de la solución.
- Una característica única de COMSOL Multiphysics es la capacidad para interactuar con MATLAB.

COMSOL Multiphysics proporciona un intercambio eficiente de datos con productos populares de modelado geométrico. Por ejemplo: Autodesk, Inventor, SolidWorks, CATIA, Pro / E, NX, SolidEdge, entre otros.

COMSOL utiliza un sistema de ecuaciones diferenciales parciales (PDEs). Una descripción matemática de varios fenómenos físicos basados en las leyes de la ciencia. Simplifica el desarrollo de aplicaciones a través del uso de la biblioteca de modelos, incorporando ejemplos de diversas áreas de aplicación. De esta manera, los usuarios sin necesidad de poseer profundos conocimientos en análisis numérico podrán construir un sin número de aplicaciones.

Las prestaciones de modelización y simulación de COMSOL lo convierten en una herramienta aplicable en amplio abanico de áreas. Por ejemplo: estructuras mecánicas, transferencia de calor, movimiento de fluidos, electromagnetismo, eléctrica, acústica y fenómenos relacionados con los efectos en la micro-óptica y alta frecuencia.

COMSOL Multiphysics posee un conjunto de librerías para proporcionar un entorno de trabajo cómodo para campos específicos de la física. En la figura 7.2 se muestran la distribución del software. En este estudio se explicará el módulo MEMS, ya que se requiere a fin de diseñar el dispositivo. [63]

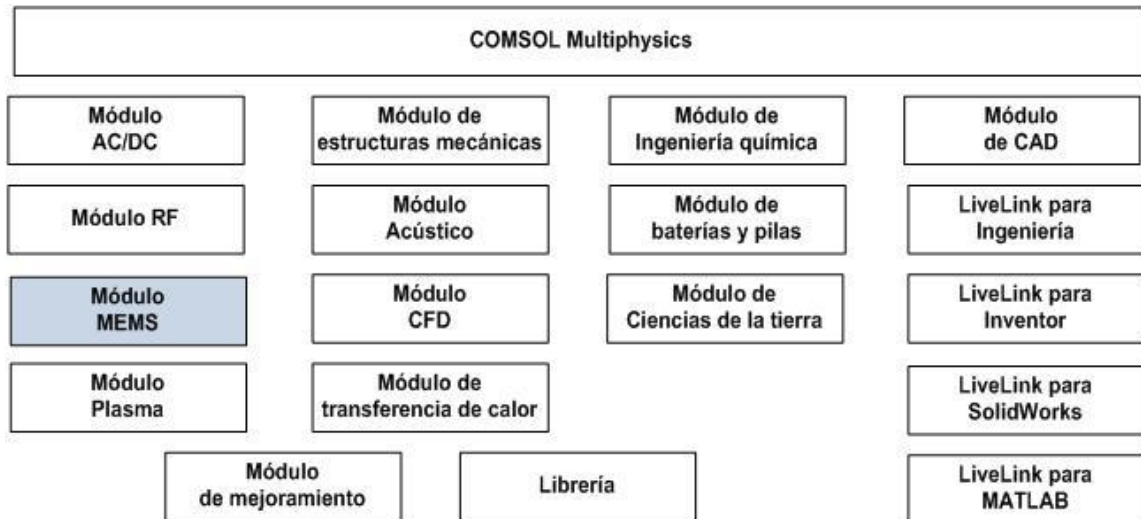


Figura 7.2 Modelos de COMSOL Multiphysics

El Módulo de MEMS se ocupa de cuestiones de diseño planteados en el micro-mundo. Representa, procesos acoplados en dispositivos micro-electromecánicos y micro-fluídicos. Además, incorpora acoplamientos multi-físicos específicos para aplicaciones tales como flujo electro-osmótico, amortiguamiento pelicular, piezoelectricidad e interacción fluido-estructura. De manera general se puede registrar que este módulo brinda:

- Soporte general para amortiguamiento y pérdidas (amortiguamiento estructural más pérdidas de dieléctrico y acoplamiento).
- Soporte para circuitos SPICE.
- Estabilización de la ecuación de superficies de nivel para mejoras en el modelado de flujo multifase.
- Todas las nuevas características introducidas también en el módulo de estructuras mecánicas [63].

7.8.2. Conventor

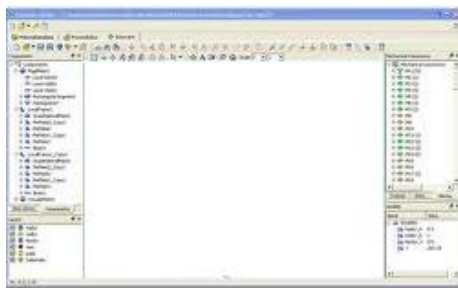
El software COVENTORWARE está lleno de características específicas como:

- El desarrollo de dispositivos MEMS a un menor costo.
- Eficiente diseño de nuevos productos de forma rápida, desde el desarrollo hasta la producción.
- Explorar rápidamente y optimizar el diseño y las opciones de proceso.
- Adaptar los diseños y procesos para nuevos mercados.

Esta plataforma se ha establecido como líder en el diseño de simulación para todas las fases de diseño de MEMS. Desde el nivel del sistema de modelización, la simulación 3D hasta el rendimiento y optimización de la fabricación del dispositivo. El método de modelamiento matemático utilizado por este software es el FEM (Método de elementos finitos) y el BEM (Método de los elementos de contorno).

COVENTORWARE se compone de cuatro módulos principales. Estos módulos son utilizados individualmente para complementar un diseño existente o en conjunto proporcionar un completo flujo de diseño de un MEMS. A continuación en la tabla 7.6 se resume la utilidad de las 4 herramientas:

ORGANIZACIÓN DEL PROGRAMA DE SIMULACIÓN “CONVENTOR”



ARQUITECTURA: Modelado rápido del comportamiento de un dispositivo MEMS. Tiene una librería completa y bloques de construcción de MEMS. Permite simular su comportamiento a nivel de sistema.

ORGANIZACIÓN DEL PROGRAMA DE SIMULACIÓN “CONVENTOR”	
	<p>DISEÑADOR: Define el proceso de fabricación. Dibuja el diseño de máscaras en el editor de diseño de MEMS. Además automáticamente genera y visualiza el sólido en 3D.</p>
	<p>ANALIZADOR: Analizar, entender y verificar el comportamiento físico de cualquier MEMS.</p>
	<p>INTEGRADOR: Extractos lineales y no lineales de orden reducido para modelos MEMS compatibles con la arquitectura.</p>

Tabla 7.6 Organización del programa de simulación CONVENTOR

COVENTOR ha creado la primera plataforma común para los MEMS y los circuitos integrados. Una plataforma integrada para la realización del diseño de MEMS+CI, la simulación de MEMS+IC y el desarrollo de productos MEMS+IC. Los diseñadores de CI ahora pueden incluir bloques de MEMS en sus diseños en comparación con la otra lógica o bloques analógicos. Esto permitirá la aceleración del desarrollo de productos de MEMS, un uso más eficiente de los recursos y la capacidad para cumplir los objetivos de costes y tiempos de ciclo de producto.

Los dispositivos MEMS son tridimensionales, siendo esencial disponer de una interfaz de usuario en 3D. Cada diseño 3D se conecta automáticamente a modelos 3D de comportamiento electro-mecánicos para las simulaciones. Los usuarios pueden definir y controlar las variables o parámetros para cada aspecto del diseño. A continuación en la figura 7.3 se presenta un diagrama del proceso de simulación, y los pasos correspondientes para poder simular un dispositivo MEMS: [64]

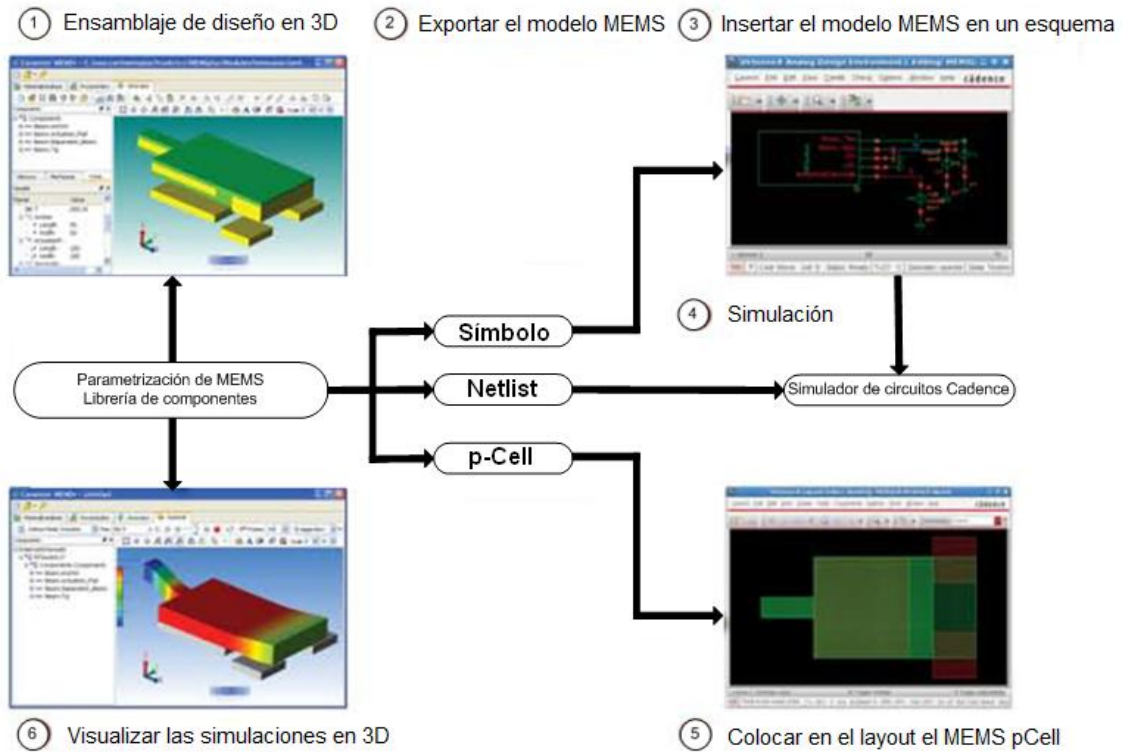


Figura 7.3 Pasos para simular un dispositivo MEMS

7.8.3. ANSYS

ANSYS es un software de simulación ingenieril utilizado en el análisis de elementos finitos (FEM). Usa un preprocesador para crear la geometría. A continuación, utiliza una solución de rutina para aplicar cargas a la geometría de malla. Por último, los resultados deseados se presentan en el post-proceso. Este programa tiene 3 características importantes descritas en la tabla 7.7:

CARACTERÍSTICAS	DESCRIPCIÓN
Integrado	Permite la asociación de distintas tecnologías para el desarrollo de un producto sin abandonar una única plataforma. Además, su integración permite la asociación con los software más avanzados de CAD. Por último, su sistema de integración permite incluirse sin dificultad en sistemas de documentación propios de cada empresa.

CARACTERÍSTICAS	DESCRIPCIÓN
Modular	Permite instalar una única aplicación para la solución de un problema específico. Los distintos módulos de ANSYS permiten solucionar los problemas por partes.
Extensible	Propone "aplicaciones verticales" o adaptaciones más específicas según las requiera el usuario. Estas adaptaciones pueden automatizar procesos útiles en sectores industriales.

Tabla 7.7 Características del software ANSYS

La mayoría de los errores y desventajas de ANSYS, se basan en el elemento finito utilizado por el programa para realizar los análisis. La solución otorgada por el programa es una compleja mezcla de cálculos discretos. En tanto que los esfuerzos, temperaturas y otras propiedades representan parámetros continuos. Los resultados arrojados por ANSYS son aproximaciones y dependerán del número de elementos utilizados.

El tipo de elemento así como algunas propiedades son ingresados de forma manual por el usuario. Lo cual genera errores de tipo humano en la utilización de ANSYS. En ocasiones el programa no muestra una alerta sobre los rangos normalmente utilizados.

ANSYS está dividido en tres herramientas principales llamados módulos, estos se resumen en la tabla 7.8:

MÓDULOS DE EL PROGRAMA DE SIMULACIÓN ANSYS	
Pre-procesador	<ul style="list-style-type: none"> • Creación de geometría y mallado. • Previsto de una interfaz gráfica
Procesador	Este procesador usa el método del elemento finito (FEM) para la solución de problemas mecánicos incluye:

MÓDULOS DE EL PROGRAMA DE SIMULACIÓN ANSYS	
	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis de estructuras dinámicas y estáticas (ambas para problemas lineales y no-lineales) • Análisis de transferencia de calor y fluido-dinámica • Problemas de acústicas y de electromagnetismo.
Post-procesador.	<ul style="list-style-type: none"> • Previsto de una interfaz gráfica • Se observan los resultados

Tabla 7.8 Módulos del programa de simulación ANSYS

ANSYS tiene una capacidad física muy amplia directamente aplicable a muchas áreas de diseño de microsistemas. El siguiente diagrama de la figura 7.4 explica cómo las capacidades físicas de ANSYS se ajustan al micro-sistema:

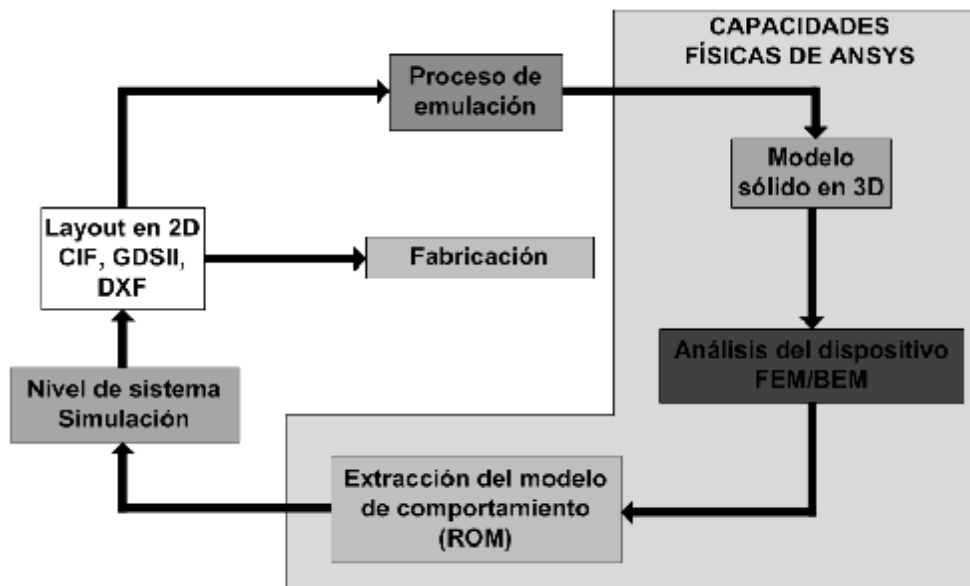


Figura 7.4 Proceso de diseño de MEMS en el software ANSYS

Este software puede aplicarse en el análisis de una amplia gama de microsistemas. Por ejemplo: [65]

- Dispositivos de onda acústica superficial
- Micro espectrómetros de masas

- “Comb drives” electrostáticos
- Canales para micro-fluidos
- Actuadores piezoeléctricos
- Transductores de presión
- Micro-espejos
- Micro-pinzas
- Actuadores termo-eléctricos

7.8.4. MEMSPro

MEMS Pro es una solución flexible, potente, fácil de usar. Además es una herramienta CAD para el diseño y análisis de sistemas micro-electromecánicos (MEMS). Ofrece una solución integrada para el proceso de diseño que acorta el tiempo de desarrollo. A continuación se listan las características más importantes de este programa de simulación:

- MEMS Pro proporciona la capacidad del sistema a nivel de diseño a través de la captura jerárquica de elementos y la simulación a nivel de comportamiento de los dispositivos MEMS. Los modelos de MEMS están representados en lenguajes de alto nivel o en tablas de datos.
- MEMS Pro permite la fácil creación y modificación de esquemas. Además genera listas de red para la simulación, optimización, análisis estadístico, y la verificación del esquema. La simulación incluye la colección de símbolos y modelos con parámetros de comportamiento para una variedad de componentes MEMS.
- El diseño de montaje de este software es un editor personalizado completo para el diseño MEMS y de circuitos integrados. Además, el programa utiliza una interfaz intuitiva y proporciona capacidades específicas relacionadas con el MEMS. La herramienta EasyMEMS ayuda a automatizar tareas que consumen mucho tiempo en la creación de diseño de layouts de MEMS.

- Una librería de layouts para dispositivos MEMS se proporciona a través de un navegador. Los dispositivos existentes en el software relacionan las normas de diseño y fabricación. La colección incluye dispositivos térmicos, mecánicos, ópticos, fluidos, electrostáticos.
 - El “Design Rule Checker” sirve para la verificación del dispositivo. Esta herramienta comprueba los requisitos del diseño MEMS para en la fabricación. Además genera un “netlist” del layout de MEMS incluyendo sus parámetros y la conectividad. El LVS (Layout vs Esquema) toma los datos extraídos y los compara con el netlist del editor de esquemas para asegurar un mejor diseño de la máscara.
 - El Modelador de sólidos 3D crea una vista en 3D del diseño del dispositivo MEMS y una descripción del proceso de fabricación. Los modelos pueden ser vistos con rotación, zoom, y puntos de vista preestablecidos. La sección transversal del visor muestra una vista un corte en la dimensión z basada en una línea de corte especificada por el usuario. Este módulo muestra el modelo animado para mostrar secuencias de proceso. Las propiedades de los materiales y las condiciones de frontera pueden ser definidos y se pueden transferir junto con el modelo 3D para ser utilizadas en programas de análisis.
 - Un mallador de MEMS crea mallas eficientes para el análisis. “3D-To-Layout” convierte los sólidos 3D en diseños 2D usando la máscara de usuario con especificaciones de procesos de fabricación.
 - “Foundry Modules” es una variedad de módulos específicos para asegurar la compatibilidad en los procesos de fabricación. Los módulos incluyen normas de diseño, descripciones de la máscara, parámetros del proceso, propiedades de los materiales, y descripciones de procesos de fabricación.
- [66]

En la figura 7.5 se observa la organización de los módulos de este software de simulación:

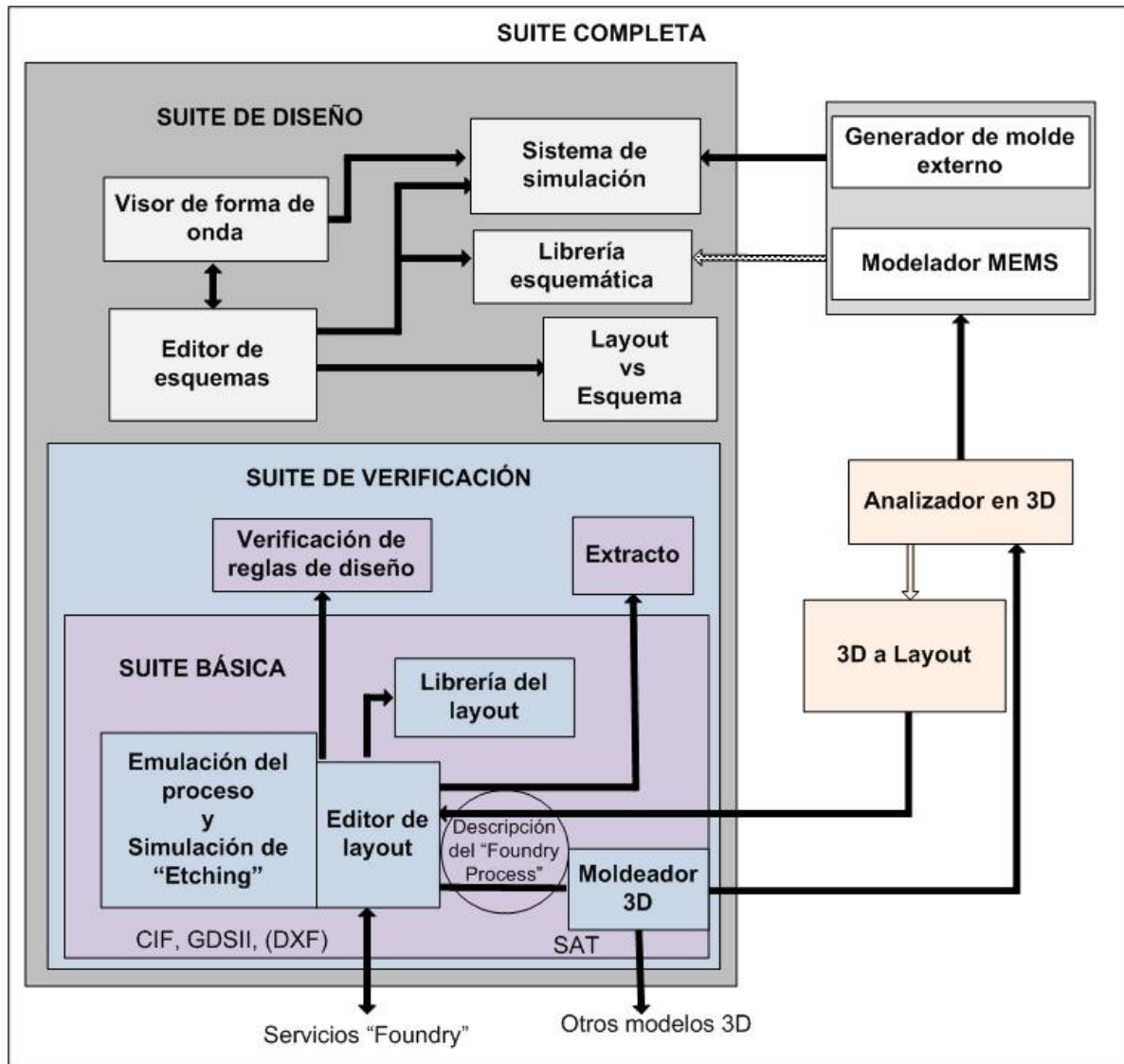


Figura 7.5 Módulos utilizados en el software de simulación SoftMEMS

A continuación se tiene una tabla 7.9 comparativa de los 4 programas de simulación que se estudiaron:

SOFTWARE	DESCRIPCIÓN	MÓDULOS	MÉTODO MATEMÁTICO	UTILIDAD
COMSOL	COMSOL Multiphysics es un paquete de modelización para la simulación de cualquier proceso físico. Cada fenómeno se describe mediante ecuaciones en derivadas parciales.	<ul style="list-style-type: none"> • Módulo AC/DC • Módulo acústico • Módulo CAD • Módulo de transferencia de calor • Librería de materiales • Módulo MEMS • Módulo de estructura mecánica 	FEM	Estructuras mecánicas. Aplicaciones químicas. MEMS. Acústica.
COVENTOR	Herramientas de software para el desarrollo eficiente de dispositivos.	<ul style="list-style-type: none"> • Arquitectura • Diseñador • Analizador • Integrador 	FEM BEM	Diseño y simulación de MEMS
MEMS-PRO	Conjunto de herramientas CAD para el diseño y análisis de sistemas micro-electro-mecánicos (MEMS)	<ul style="list-style-type: none"> • Suite básica • Suite de verificación • Suite de diseño • Moldeador de MEMS • Analizador en 3D 	FEM	MEMS

SOFTWARE	DESCRIPCIÓN	MÓDULOS	MÉTODO MATEMÁTICO	UTILIDAD
ANSYS	Está desarrollado para funcionar bajo la teoría de elemento finito, usado en estructuras y volúmenes finitos de fluidos.	<ul style="list-style-type: none"> • Pre-procesador • Procesador • Post-procesador 	FEM	Diseño y manufactura de semiconductores Microsistemas

Tabla 7.9 Comparación entre los software de simulación

CAPÍTULO VIII

SENSORES

Introducción: El estudio de este capítulo se centrará en los sensores MEMS. Estos dispositivos están adquiriendo gran relevancia por su rendimiento y viabilidad para detectar y/o medir parámetros físicos y químicos. Por ejemplo en el control de condiciones ambientales, automatización industrial, domótica, biomédica y telecomunicaciones. También se analizará la estructura, clasificación y sus respectivas aplicaciones.

8.1. Sensores de presión

La presión se define como una fuerza por unidad de superficie. La unidad en el sistema internacional es el N/m^2 o Pascal (Pa). Otras de las unidades familiares de la presión se muestran en la Tabla 8.1, junto con el factor de conversión a Pascal.

Unidad	Símbolo	No. de Pascales
Bar	bar	100 000
Atmósfera	atm	101 325
Milímetro de mercurio	mmHg/torr	133.32
Pulgadas de mercurio	inHg	3,386.39
Libra-fuerza por pulgada cuadrada	lbf/in ² (psi)	6,894.76
Pulgadas de agua	inH ₂ O	284.8

Tabla 8.1 Unidades de presión⁴⁴

⁴⁴ Tomado de: S. Beeby, G. Ensell, M. Kraft, N. White, "MEMS Mechanical Sensors", Artech house, 2004

Los transductores de presión se han utilizado durante décadas para medir la presión y dar el resultado como una señal eléctrica. Los MEMS están sustituyendo muchos de estos diseños ensamblados a partir de muchas partes. Es sin duda una de las áreas de aplicación más exitosa, representando una porción importante del mercado de MEMS [19].

La medición de presión compara la presión actual con una presión de referencia. La presión de referencia puede estar dada por una columna líquida, por un resorte, por un émbolo cargado con un peso o por cualquier otro elemento capaz de sufrir una deformación cuando se le aplica una presión. A continuación se ilustran los tipos de presión en la figura 8.1 y se describen sus características en la tabla 8.2:

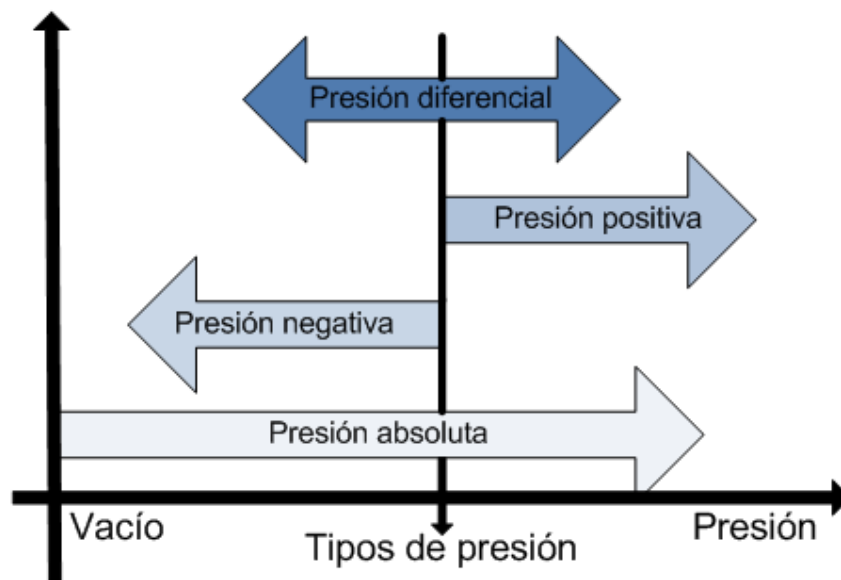


Figura 8.1 Tipos de presión

TIPOS DE PRESIÓN	CARACTERÍSTICAS
Presión absoluta	<ul style="list-style-type: none"> • Presión medida por encima del cero absoluto. • Referencia, vacío ideal. • La presión de medición siempre es mayor a la presión de referencia.

TIPOS DE PRESIÓN	CARACTERÍSTICAS
Presión positiva	<ul style="list-style-type: none"> • Presión medida por encima de la presión barométrica. • Presión de referencia: presión ambiental. • La presión de medición siempre es mayor a la presión de referencia
Presión negativa	<ul style="list-style-type: none"> • Presión medida por debajo de la presión barométrica • Presión de referencia: presión ambiental. • La presión de medición siempre es menor a la presión de referencia
Presión diferencial	<ul style="list-style-type: none"> • Presión medida superior o inferior a cualquier presión de referencia deseada. • La presión de medición siempre es mayor a la presión de referencia [67].

Tabla 8.2 Tipos de presión

Los sensores de presión se han desarrollado utilizando una amplia gama de técnicas de detección. La técnica más utilizada es la piezo-resistiva en los sensores de alto rendimiento. También se aplica el efecto piezoeléctrico donde estos materiales pueden ser sometidos a cambios de la conductividad eléctrica, al verse oprimidos por la presión. La capacitancia puede ser utilizada para la detección de la presión si un condensador de placas delgadas debe deformarse. Así mismo, un resonador puede ser configurado para detectar la fuerza resultante de presión. La figura 8.2 muestra la estructura de un sensor de presión. [68]

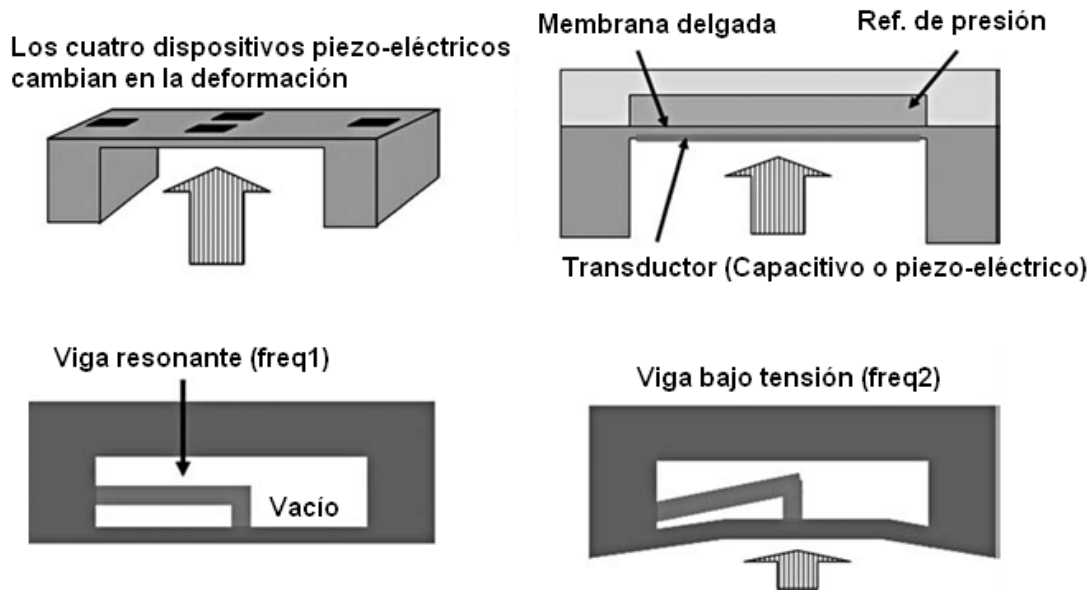


Figura 8.2 Sensor de presión⁴⁵

El mecanismo elegido para medir la presión depende de la aplicación. Normalmente la presión se mide mediante el control de su efecto sobre una estructura mecánica conocido como el elemento de detección. La aplicación de presión en el elemento sensor provoca un cambio en la forma. La deflexión resultante o tensión en el material puede ser utilizada para determinar la magnitud de la presión. Un diagrama de bloque de este proceso se muestra en la figura 8.3.

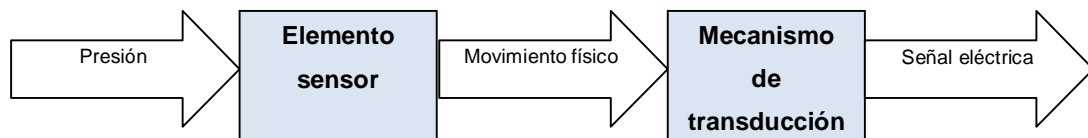


Figura 8.3 Esquema de los principales componentes de sensor de presión

8.1.1. Sensores de presión de tecnología MEMS

La investigación en sensores de presión de estado sólido se inició ya en la década de 1960. El componente esencial del sensor de presión micro-mecánico es el elemento denominado "célula del sensor". Ella consta de un chip de silicio micro-mecánico, la cual lleva grabada una membrana delgada. Sobre la

⁴⁵ Tomado de: K.Gilleo, "MEMS/ MOEMS packaging: Concepts, Design, Materials and Processes", McGraw Hill Nanoscience and Technology Series.

membrana están dispuestas cuatro resistencias de medición dispuestas en un puente. Conforme a la magnitud de la presión, la membrana de la célula del sensor se curva de manera distinta en pocos micrómetros. El lado de la membrana no sometida a la presión de medición se encuentra expuesto a un vacío de referencia, así el sensor mide el valor absoluto de la presión.

El sistema electrónico está integrado en el chip y tiene la misión de amplificar la tensión del puente, de compensar influencias de temperatura y de linealizar la curva característica de presión. La tensión de salida es del orden de 0 a 5 V y se suministra a la unidad de control. Y mediante una curva característica programada se calcule la presión. En la figura 8.4 se observa el esquema de un sensor de presión micro-mecanizado. [69]

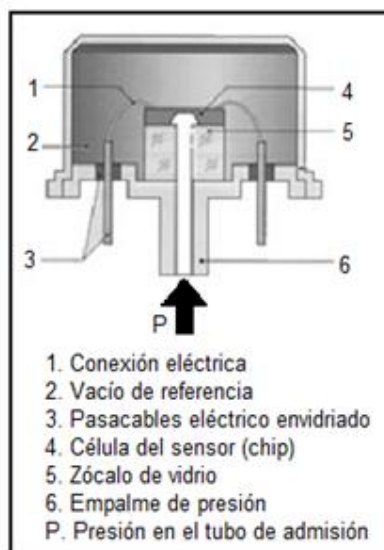


Figura 8.4 Esquema de un sensor de presión MEMS⁴⁶

A continuación se describan las características de 5 tipos de sensores de presión existentes en el mercado:

1. Sensores de presión de diafragmas
2. Sensor de presión piezo-resistivo
3. Sensor de presión capacitivo

⁴⁶ Tomado de: C. Cipolletti, "Sensores de presión", E.E.T., Tecnología de Control. [Online]. Disponible: <http://www.scribd.com/doc/4560444/TC-UNIDAD-4-Sensores-de-Presion>. Accesado: 6 Noviembre, 2010.

4. Sensor de presión resonante
5. Micrófonos

8.1.1.1. Sensores de diafragmas

Los micro-sensores de presión MEMS normalmente tienen un diafragma flexible el cual se deforma en presencia de una diferencia de presión. La deformación se convierte en una señal eléctrica a la salida del sensor.

Este sensor puede ser utilizado para detectar la presión atmosférica absoluta en el motor de un automóvil. De esta manera se calcula la cantidad de combustible necesario para cada cilindro del motor. En este ejemplo, los piezo-resistores se modelan a través de los bordes de una región en un diafragma de silicio micro-mecanizados. El sustrato es grabado para crear el diafragma. El sensor luego se une a un sustrato de vidrio, creando una cavidad de sellado al vacío bajo el diafragma. Mientras la parte superior del diafragma está expuesta al medio ambiente, el cambio en la presión ambiental origina fuerzas de deformación hacia abajo del diafragma, resultando un cambio de resistencia.

La técnica de micro-mecanizado de superficie es la más aplicada. Esta ofrece la oportunidad de reducir el tamaño del dispositivo y lo hace compatible con los CI. En esta técnica se utiliza el grabado húmedo anisotrópico de silicio, porque permite un buen control sobre las dimensiones del diafragma. El espesor del diafragma se puede controlar con la duración del tiempo de grabado. Una sección de un diafragma típica se muestra en la figura 8.5.

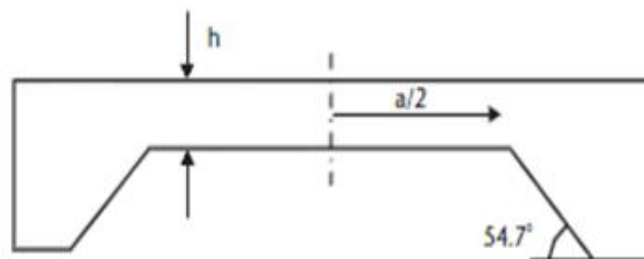


Figura 8.5 Diafragma de silicio

Los diafragmas son una de las pocas estructuras MEMS los cuales pueden ser modelados analíticamente. Como el diafragma es rectangular, se utiliza la ecuación 8.1, la cual describe a una membrana rectangular, donde a es la longitud del lado más corto

$$y_0 = \alpha \left(\frac{Pa^4}{Eh^3} \right) (1 - \nu^2), \quad \sigma = \beta \left(\frac{Pa^2}{h^2} \right) (1 - \nu^2)$$

Ecuación 8.1 Ecuación característica de un diafragma rectangular

Donde:

α y β = coeficientes dependientes de la relación de las longitudes de los lados del diafragma y la posición de interés.

y_0 = máxima deflexión del diafragma

σ = tensión radial producida en el borde del diafragma.

La dinámica de un diafragma micro-maquinado puede ser adecuadamente caracterizada por la teoría lineal de la placa. La frecuencia de resonancia no amortiguada f_n de un diafragma de espesor uniforme y material homogéneo está dada por la ecuación 8.2 [19]

$$f_n = 1.654 \left[\frac{E}{\rho} (1 - \nu^2) \right]^{1/2} \frac{h}{a^2}$$

Ecuación 8.2 Frecuencia de resonancia no amortiguada

Las frecuencias de resonancia de los diafragmas típicas deberán fluctuar entre 80 KHz para un dispositivo de 1 bar, a 575 KHz para un dispositivo de 40 bar. Sin embargo, se han desarrollado dispositivos de alta frecuencia, por ejemplo, el "Entran EPIH Micro Miniature" el cual ofrece una máxima frecuencia de resonancia de 1,7 MHz para el dispositivo de 20 bar.

8.1.1.2. Sensor de presión piezo-resistivo

En el principio piezo-resistivo, el elemento de medición consta de un chip de silicio con varios resistores entre 4 y 6. Si existe presión, se deforma sólo unos pocos milímetros. Esta conduce a cambios en los valores de resistencia

permitiendo calcular la presión. Entre las ventajas de estos sensores se pueden nombrar:

- Excelente comportamiento de histéresis y una
- Elevada exactitud.
- Su tamaño lo hace susceptible a las fluctuaciones de temperatura.

A continuación en la figura 8.6 se observa el esquema de un sensor de presión piezo-resistivo. El dispositivo consiste en un diafragma de silicio suspendido sobre una cavidad de vacío de referencia para formar un sensor de presión absoluta. Una presión externa aplicada en las resistencias de detección produce un cambio de valor de la resistencia correspondiente a la presión, esto hace que se forme un potencial eléctrico en ellas. [70]

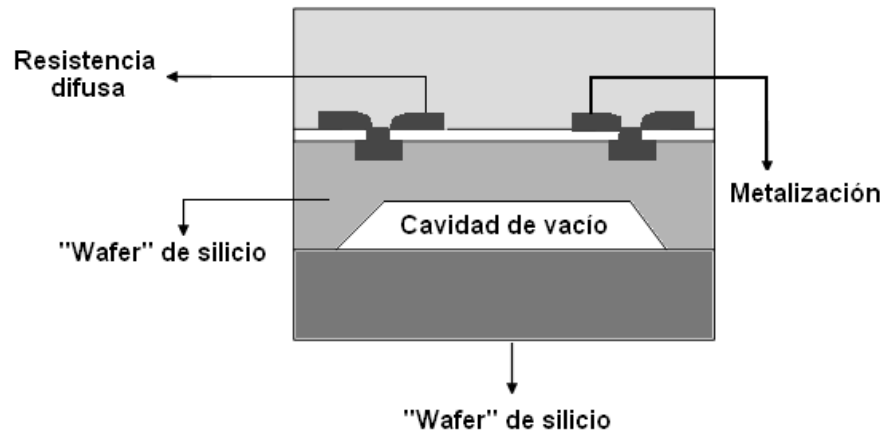


Figura 8.6 Esquema de la sección transversal de un sensor de presión

8.1.1.3. Sensor de presión capacitivo

Los sensores de presión capacitivos se basan normalmente en una placa paralela donde un electrodo es fijo y el otro flexible. Mientras el electrodo flexible se dobla bajo la presión aplicada, la separación entre los electrodos disminuye y la capacitancia aumenta.

La estructura de este sensor se muestra en la figura 8.7. Consta de un diafragma de silicio grabado anisotrópicamente con un electrodo fijo proporcionado por un cristal metalizado. Las características de este dispositivo son:

- Alta sensibilidad a la presión
- Bajo consumo de energía
- Baja temperatura.

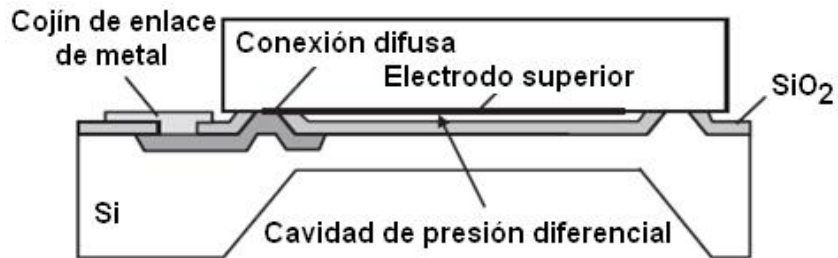


Figura 8.7 Sensor de presión capacitivo⁴⁷

Los principales inconvenientes asociados con estos sensores son la salida no lineal y la complejidad de la electrónica (en comparación con el puente de resistencia). Suponiendo la existencia de una desviación paralela en el diafragma flexible, el cambio de la capacitancia es inversamente proporcional a la altura del hueco. Además, un diafragma como el de la figura 8.7 se doblará. Por lo tanto, el diafragma ya no es paralelo al electrodo fijo y esto introduce una salida no lineal [19]

8.1.1.4. Sensor de presión resonante

Los sensores de presión resonantes suelen utilizar una estructura de resonancia mecánica como una galga de tensión para detectar la desviación de la membrana sensible a la presión. Los retos técnicos asociados con estos dispositivos son los siguientes:

- Fabricación de la estructura del resonador mecánico en la parte superior de la presión de detección de la estructura.
- En el caso de los resonadores de silicio, la incorporación de los mecanismo de excitación y detección de vibraciones.
- La encapsulación al vacío del resonador para evitar los efectos de amortiguación de gas.

⁴⁷ Tomado de: S. Beeby, G. Ensell, M. Kraft, N. White, "MEMS Mechanical Sensors", Artech house, 2004

El primer sensor de MEMS de presión resonante fue desarrollado por Greenwood y más tarde comercializado por Druck. Una sección del sensor se muestra en la figura 8.8 junto con una vista plana del resonador y su modo de vibración. El resonador en forma de mariposa se une a través de cuatro brazos los cuales forman parte del diafragma. Mientras el diafragma se desvía, el ángulo de los brazos hace al resonador colocarse en la frecuencia de resonancia. El resonador es impulsado electrostáticamente y sus vibraciones son detectadas a través de electrodos de metal. [19]

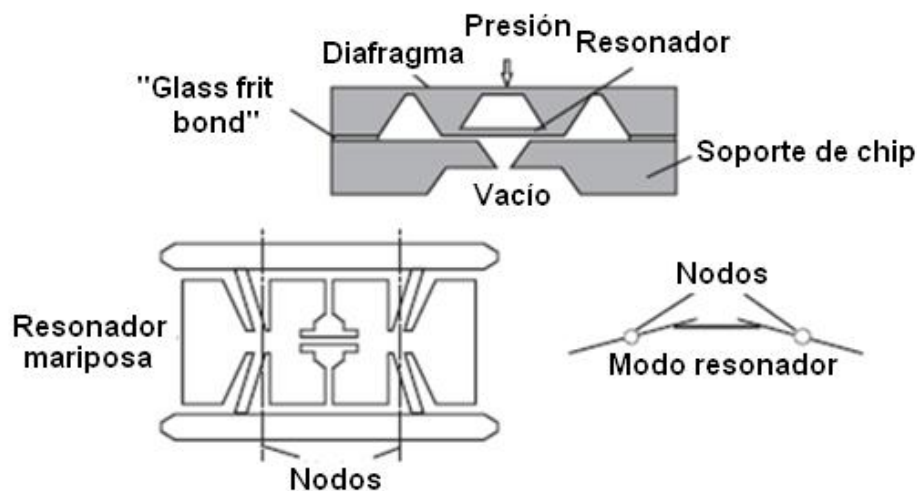


Figura 8.8 Sensor de presión resonante de Druck⁴⁸

8.1.1.5. Micrófonos

Los micrófonos son un tipo particular de sensores MEMS de presión diseñados para transductores de señales acústicas. Los diafragmas de micrófono deben ser altamente sensibles. Estos muestran un comportamiento dinámico e insensible a las presiones estáticas. Para lograr inmunidad a las presiones estáticas, ambos lados del diafragma deben estar abiertos a la atmósfera. Pero sólo una parte estará sujeta a las ondas de presión acústica entrante.

El micrófono suele ser empacado dentro de una cámara diseñada para ajustar la respuesta del diafragma. Un esquema del dicho dispositivo se muestra en la figura 8.9.

⁴⁸ Tomado de: S. Beeby, G. Ensell, M. Kraft, N. White, "MEMS Mechanical Sensors", Artech house, 2004

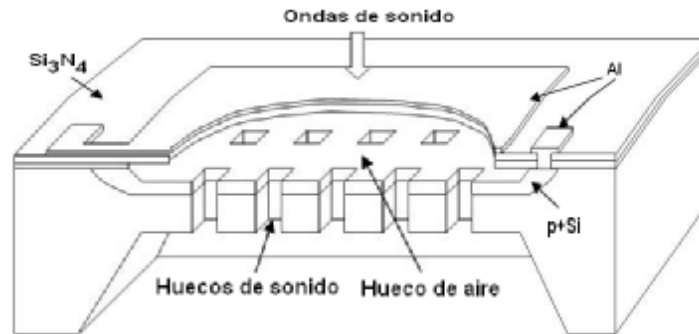


Figura 8.9 Esquema de un micrófono⁴⁹

La diferencia entre los tipos de micrófono depende de la tecnología de detección utilizada para sensar los desplazamientos de la membrana. Estos se pueden resumir de la siguiente manera:

- Micrófonos capacitivos
- Micrófonos electret
- Micrófonos piezo-resistivos
- Micrófonos piezoeléctricos [19]

8.1.1.6. Otras técnicas de detección de presión

Existen otros métodos menos conocidos para sensar presión. A continuación en la tabla 8.2 se describen brevemente:

MÉTODOS	DESCRIPCIÓN
Técnica óptica	Típicamente emplean un micro-sensor cuya deformación se produce bajo presión. Esto produce un cambio en una señal óptica.
Resonadores SAW (Surface Acoustic Wave)	Usan ondas acústicas de superficie producidas con el sustrato piezoeléctrico (normalmente de cuarzo) utilizando electrodos para detectar la presión. Una onda de superficie está muy excitada en un extremo del sustrato y se detecta en el otro [19].

Tabla 8.3 Técnicas de detección de presión

⁴⁹ Tomado de: S. Beeby, G. Ensell, M. Kraft, N. White, "MEMS Mechanical Sensors", Artech house, 2004

En la tabla 8.4 se presenta un resumen de las características principales de los sensores de presión.

TIPOS DE SENSORES DE PRESIÓN	CARACTERÍSTICAS
De diafragmas	<ul style="list-style-type: none"> • Alta sensibilidad • Tipo de sensor más empleado en el mercado.
Piezo-resistivo	<ul style="list-style-type: none"> • Elevada exactitud. • Susceptible a las fluctuaciones de temperatura.
Capacitivo	<ul style="list-style-type: none"> • Alta sensibilidad a la presión • Bajo consumo de energía • Baja temperatura • Presentan una salida no lineal
Resonantes	<ul style="list-style-type: none"> • Ofrecen un mejor rendimiento en comparación con las técnicas piezo-resistivas y capacitivas
Micrófonos	<ul style="list-style-type: none"> • Insensibilidad a las presiones estáticas.

Tabla 8.4 Características de los sensores de presión

8.2. Sensores de torque o fuerza

Este sensor es un dispositivo para medir y registrar el torque de un sistema de rotación. La torsión estática es relativamente fácil de medir, en tanto que el par dinámico no es fácil de medir, pues generalmente requiere la transferencia de algún efecto (eléctrico o magnético) del eje del sistema estático. Comúnmente, los transductores de torque utilizan medidores de deformación aplicados a un eje de giro. La fuerza medida se convierte en un cambio en la longitud de un elemento la cual es medida con un sensor [71].

El sensor de par se representa esquemáticamente en la figura 8.10. Consta de dos sensores de fuerza piezo-resistivos. Además de un resorte hecho de berilio, cobre y montada perpendicular al eje de torsión, la cual actúa sobre los dos sensores. Una barra perpendicular montada en el eje del esfuerzo de torsión

actúa sobre el resorte a través de dos tornillos ajustables. Así un torque aplicado sobre el eje aumentará la presión sobre un sensor de fuerza y disminuye la presión sobre el otro.

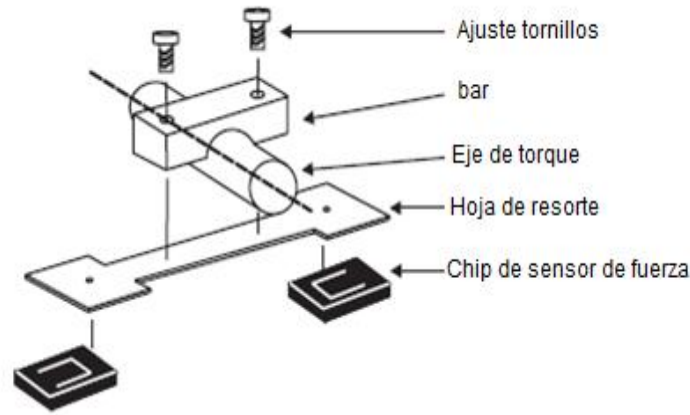


Figura 8.10 Representación esquemática de un micro-sensor de torque⁵⁰

Las células de carga son sensores de fuerza utilizados en equipos de pesaje. En la mayoría de las células de carga convencional, el elemento elástico es de acero o aluminio, y los medidores de resistencia a la deformación del metal se utilizan como elementos sensores.

El doblado de estructuras de vigas puede ser utilizado para cargas de hasta 150 kg. Pero para altas cargas por encima de 1000 kg, una célula de carga está basada en la compresión de silicio, como se muestra en la figura 8.11. Este sensor consta de dos láminas de silicio, el borde del chip del sensor se comprime bajo la carga, y la cantidad de compresión se puede medir por la variación de capacitancia entre dos placas del condensador situado en el centro. [19]

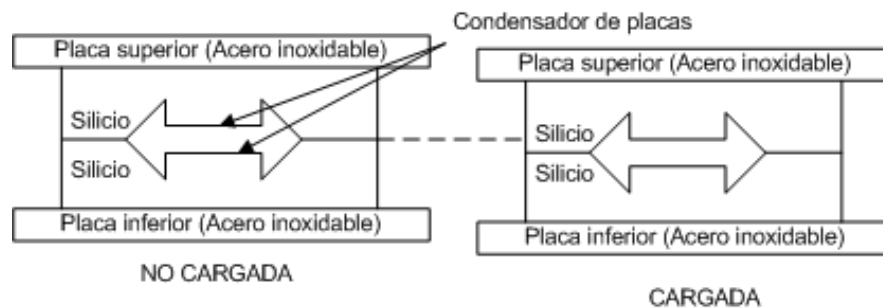


Figura 8.11 Principio de una célula de carga basado en la compresión de silicio

⁵⁰ Tomado de: S. Beeby, G. Ensell, M. Kraft, N. White, "MEMS Mechanical Sensors", Artech house, 2004

La tecnología MEMS está desempeñando un papel significativo en las mediciones de fuerza y torque. Estos sensores se utilizan en una serie de aplicaciones avanzadas. Los actuadores MEMS se combinarán con los sensores para desarrollar sistemas de control en miniatura para controlar las fuerzas y torques. Por ejemplo en la manipulación dinámica de los objetos frágiles o irregulares con micro-pinzas y manos robóticas.

A continuación se va a estudiar algunos dispositivos utilizados para sensores de fuerza o torque, estos son:

1. Dispositivos resonantes y saw
2. Dispositivos capacitivos
3. Dispositivos magnéticos
4. Sensores táctiles

8.2.1. Dispositivos resonantes y SAW (“Surface Acoustic Wave”)

Estos sensores son aquellos cuya salida se produce por un cambio de la frecuencia son muy atractivos. Pueden ser extremadamente sensibles y poseen un amplio rango dinámico. La naturaleza de la señal de salida hace a estos dispositivos fáciles de integrar en los sistemas digitales y proporcionar inmunidad al ruido.

En la figura 8.12 se muestra el resonador metálico con elementos piezoeléctricos de película gruesa para conducir y detectar las vibraciones. El resonador tiene 15,5 mm de largo y 7 mm de ancho y, la sensibilidad de carga esta alrededor de 13 Hz/N.

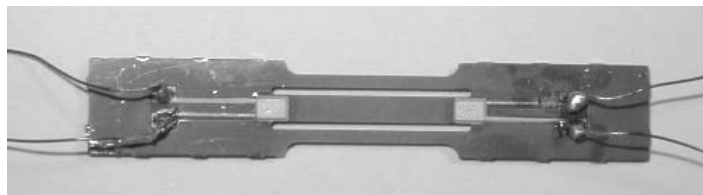


Figura 8.12 Resonador metálico⁵¹

⁵¹ Tomado de: S. Beeby, G. Ensell, M. Kraft, N. White, “MEMS Mechanical Sensors”, Artech house, 2004

Los resonadores SAW se pueden utilizar a fin de medir el torque sin contacto. La sensibilidad de los dispositivos SAW a la tensión es suficiente para realizar las mediciones en un eje. Por lo general, dos dispositivos SAW se utilizan en un sensor, como se muestra en la figura 8.13. La medición de la diferencia de cualquier retardo de fase o frecuencia de resonancia se realiza con el fin de lograr la compensación de temperatura y eliminar la sensibilidad a la flexión del eje. Ambos tipos de sensores SAW al aplicar un torque “M” en el eje, crean dos componentes principales, $s_{xx} = -s_{yy} = s$. Como resultado, uno de los dispositivos SAW se encuentra bajo tensión y el otro está bajo compresión [19].

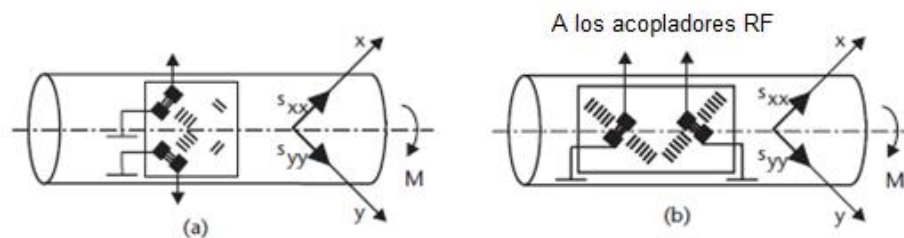


Figura 8.13 Elemento de detección de torque sobre la base a) líneas de retardo reflexivo de SAW b) resonadores SAW.⁵²

8.2.2. Dispositivos capacitivos

La medición sin contacto del torque en un eje de rotación se puede lograr mediante el uso de un sensor capacitivo. Aunque la susceptibilidad de los circuitos de la telemetría y la interferencia electromagnética puede ser un problema. El esfuerzo de torsión se puede medir por el uso de un conjunto de electrodos en un extremo de una barra de torsión conectada a un eje y un segundo conjunto de electrodos en el exterior de un tubo delgado de material dieléctrico. Este tubo se fija al eje en el otro extremo de la barra de torsión. Un conjunto de electrodos se mueve en relación con el segundo conjunto cuando se aplica un momento o torque para permitir una variación de la capacitancia. La capacitancia es parte de un circuito de resonancia inductiva vinculada a una bobina en la parte fija. Cada extremo de una barra de torsión puede tener un sensor capacitivo sin contacto de desplazamiento angular y el giro del torque es monitoreado por el cambio de fase.

⁵² Tomado de: S. Beeby, G. Ensell, M. Kraft, N. White, “MEMS Mechanical Sensors”, Artech house, 2004

El principio del sensor de fuerza de un condensador de distancia variable se muestra en la figura 8.14. Los condensadores están hechos de dos placas finas aisladas eléctricamente con una distancia muy pequeña entre ellas. Si se aumenta la capacitancia, la otra disminuye. Una lectura diferencial de la capacitancia asegura una mejor linealidad y una mayor sensibilidad. [19]

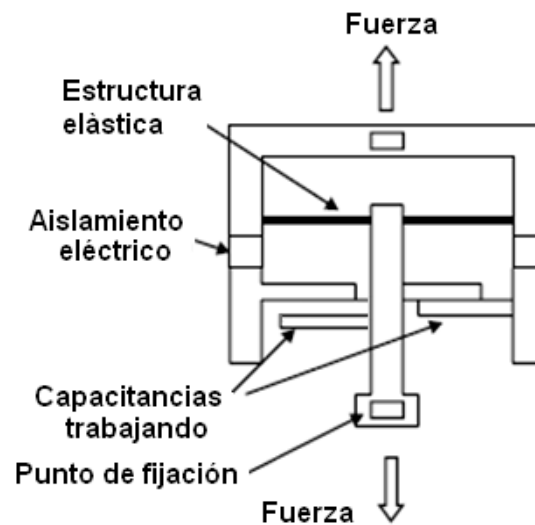


Figura 8.14 Principio del sensor de fuerza de un condensador de distancia variable

8.2.3. Dispositivos magnéticos

El sensor de torque de cabeza magnética permite al eje permanecer como una parte del sensor para recibir la señal. Este principio se basa en las propiedades magneto-restrictivas de algunos materiales ferro-magnéticos, como cintas CoSiB de aleación amorfa. La cinta tiene fuertes propiedades magneto-elásticas y se transforma en un par de cambios de permeabilidad. Un diagrama esquemático de este dispositivo se ilustra en la figura 8.15.

En este sensor la cabeza está hecha de un rollo ferro-magnético con bobinas de excitación y la inducción permite la detección del cambio en la permeabilidad causada por el estrés mecánico [19].

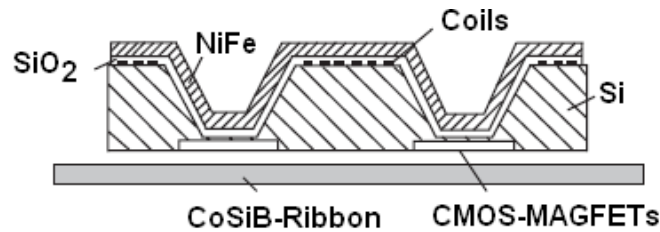


Figura 8.15 Cabeza de un sensor micro-maquinado⁵³

Un sensor muy pequeño ha sido diseñado para eliminar la modulación de la señal por la variación del entrehierro por medio de un método de medición diferencial. Este dispositivo consiste en CMOS-MAGFETs (Transistor de efecto de campo magnético) en la parte delantera de una oblea de silicio, y bobinas de excitación, combinado con un rollo ferro-magnético en la parte trasera de la oblea. Para medir el par, dos cabezales se colocan con un ángulo $\pm 45^\circ$ con respecto al eje. Estas direcciones muestran los máximos de tensión de tracción y compresión en el eje. El torque es proporcional a la tensión de tracción.

En la tabla 8.5 se presenta un resumen de las características principales de los sensores de torque o fuerza.

TIPOS DE SENSOR DE TORQUE O FUERZA	CARACTERISTICAS
Resonantes	<ul style="list-style-type: none"> • La salida se produce por un cambio de frecuencia • Extremadamente sensibles • Dispositivos fáciles de integrar en los sistemas digitales
SAW	<ul style="list-style-type: none"> • La sensibilidad de los dispositivos a la tensión es suficiente para realizar las mediciones en un eje. • Se utilizan dos dispositivos SAW en un sensor.
Capacitivos	<ul style="list-style-type: none"> • La interferencia electromagnética es un problema.

⁵³ Tomado de: S. Beeby, G. Ensell, M. Kraft, N. White, "MEMS Mechanical Sensors", Artech house, 2004

TIPOS DE SENSOR DE TORQUE O FUERZA	CARACTERÍSTICAS
Magnéticos	<ul style="list-style-type: none"> Este principio se basa en las propiedades magneto-restrictivas de algunos materiales ferro-magnéticos.

Tabla 8.5 Características de sensores de torque o fuerza

8.2.4. Sensores táctiles

Mediante un ejemplo se va a explicar el funcionamiento de un sensor táctil. Un sensor piezoeléctrico táctil de silicio micro-mecanizado se ha integrado en la punta de una pinza endoscópica utilizados por un cirujano para manipular los tejidos. El sujetador tiene la costumbre superficie rígida de dientes similares como se observa en la figura 8.16. Se compone de silicio en la parte superior, un sustrato de metacrilato, y un patrón de fluoruro de polivinilo (PVDF), siendo este la película intercalada entre las dos capas. El rango dinámico de la fuerza es de 0,1 [N] a 2[N] con una resolución de 0,1 y ancho de banda cerca de varios megahercios.

El sustrato de silicio usado para sensores táctiles micro-maquinados es rígido y quebradizo mecánicamente. Por lo tanto, no es capaz de sostener grandes deformaciones. Recientemente, un conjunto de sensores táctiles de dos dimensiones basada únicamente en polímero (poliamida) micro-mecanizado y resistencias de película delgada de metal están en el mercado. [19]

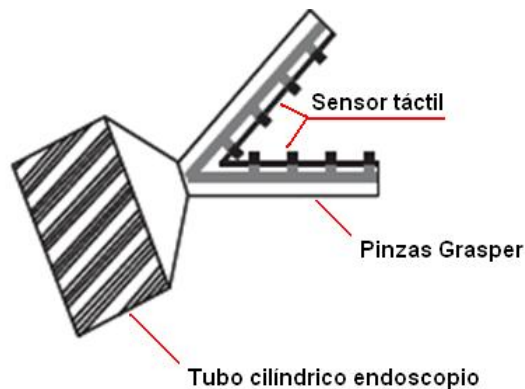


Figura 8.16 Pinza Endoscópica con sensor táctil integrado ⁵⁴

⁵⁴ Tomado de: S. Beeby, G. Ensell, M. Kraft, N. White, "MEMS Mechanical Sensors", Artech house, 2004

8.3. Sensores inerciales

Los sensores inerciales MEMS consisten en dispositivos en miniatura combinados con componentes de detección inerciales eléctricos y mecánicos. Están diseñados para convertir una fuerza de inercia en una salida de tensión lineal con una sensibilidad determinada. Los sensores inerciales lineales típicamente tienen tres componentes:

1. Masa sísmica o masa de prueba para generar una fuerza de inercia debido a un evento de aceleración o desaceleración.
2. Suspensión en forma de uno o varios muelles elásticos
3. Amortiguador para proporcionar la estabilización del movimiento

Entre los sensores inerciales más conocidos se nombran 2:

1. Acelerómetros
2. Giroscopios

Son ampliamente utilizados en muchas aplicaciones en las industrias aeroespacial, militar, automotriz y las industrias marinas. En la industria aeroespacial, estos dispositivos se utilizan en la estabilización de vuelo básico de los aviones y cohetes, así como en la navegación. Las aplicaciones automotrices incluyen la estabilidad de los sistemas de vehículos y sistemas de prevención de volcaduras. En las aplicaciones marinas se tienen la estabilización de los buques y la navegación.

8.3.1. Acelerómetros

La medición de aceleración puede realizarse midiendo la fuerza necesaria para acelerar un objeto de masa conocida. Para lo cual a su vez bastará medir la deflexión de un resorte el cual sostiene a dicha masa. El modelo mecánico correspondiente a esta idea se muestra en la figura 8.17.

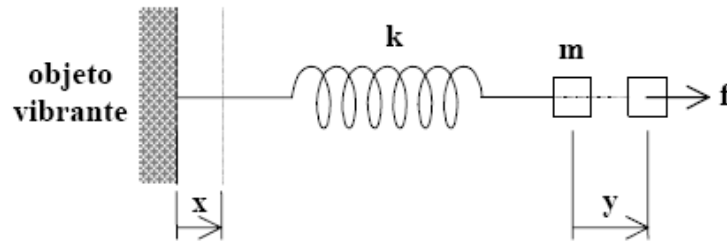


Figura 8.17 Modelo físico sobre el cual se basa el funcionamiento de los acelerómetros integrados

La disposición muestra un objeto vibrante cuya aceleración se desea medir. Sobre este mismo está montado el dispositivo de medición formado por una masa (m) y un resorte con constante elástica (k). Se medirá la segunda derivada del desplazamiento del objeto vibrante, esto se observa en la ecuación 8.3:

$$a(t) = x''(t)$$

Ecuación 8.3 Aceleración de un objeto vibrante

Para ello se medirá, en realidad, la deformación $x(t)-y(t)$ del resorte, pues no es sencillo medir directamente la aceleración respecto a un sistema inercial. Se buscará, por lo tanto, una relación entre esta deformación y la aceleración $a(t)$.

En la ecuación 8.4 se tiene la fuerza aplicada por el resorte a la masa m :

$$f = k(x-y) = m \cdot y''(t)$$

Ecuación 8.4 Fuerza aplicada por el resorte

Donde:

f= Fuerza

m=masa

Se obtiene una ecuación diferencial de la relación entre x e y , la cual se muestra en la ecuación 8.5:

$$m \cdot y''(t) + k \cdot y(t) = k \cdot x(t)$$

Ecuación 8.5 Ecuación diferencial donde se relaciona x,y

Aplicando la transformación de Laplace (suponiendo condiciones iniciales nulas), se obtiene la ecuación 8.6:

$$Y(s) = \frac{X(s)}{1 + \frac{m}{k} s^2} = \frac{X(s)}{1 + \left(\frac{s}{w_0}\right)^2}$$

Ecuación 8.6 Deformación Y

Se calcula la frecuencia natural o frecuencia de resonancia del sistema con la ecuación 8.7.

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{m}}$$

Ecuación 8.7 Frecuencia natural

Donde:

K= Constante de rigidez o constante elástica

De la ecuación 8.7 se obtiene la ecuación 8.8, y se encuentra la variación de deformación del resorte en función del desplazamiento de la masa:

$$X(s) - Y(s) = \frac{X\left(\frac{s}{w_0}\right)^2}{1 + \left(\frac{s}{w_0}\right)^2} = \frac{1}{w_0^2} \frac{A(s)}{1 + \left(\frac{s}{w_0}\right)^2}$$

Ecuación 8.8 Diferencia entre deformaciones

Donde A(s) es la transformada de la aceleración buscada. Esta ecuación muestra que muy por debajo de la resonancia, es decir para $\omega \ll \omega_0$, la deformación del resorte es aproximadamente proporcional a la aceleración (ecuación 8.9):

$$x(t) - y(t) = \frac{1}{w_0^2} a(t)$$

Ecuación 8.9 Deformación del resorte

Una vez reducido el problema de medir la aceleración en base a una deformación geométrica, existen varios principios para resolverlo. Por ejemplo utilizar una celda de carga, aplicar el efecto piezoeléctrico de algunos cristales o transformar la deformación en una variación de capacitancia. De acuerdo al principio de funcionamiento del acelerómetro se clasifica en 4 diferentes estructuras:

1. Mecánicos
2. Capacitivos
3. Piezoeléctricos
4. Piezo-resistivos

8.3.1.1. Acelerómetros mecánicos

Emplean una masa inerte y resortes elásticos. Los cambios se miden con galgas extensiométricas, incluyendo sistemas de amortiguación para evitar la propia oscilación. [72] En la figura 8.18 se observa los elementos (masa, mecanismo de suspensión y el elemento sensor) de este dispositivo:

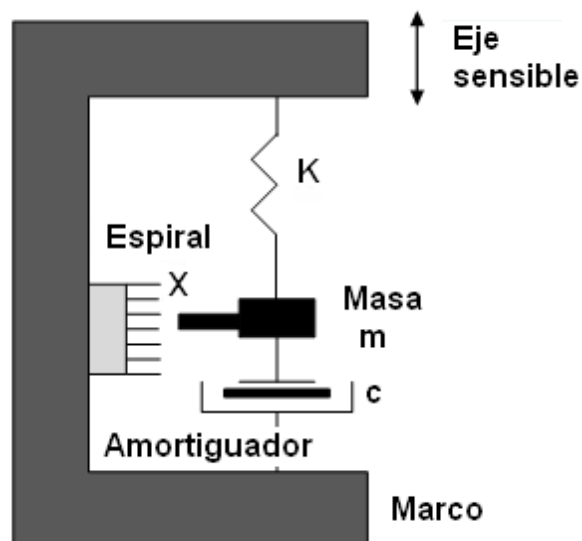


Figura 8.18 Elementos de un acelerómetro mecánico

8.3.1.2. Acelerómetros capacitivos

Modifican la posición relativa de las placas de un micro-condensador cuando está sometido a aceleración [72]. En la figura 8.19 se presenta el funcionamiento de un acelerómetro capacitivo.

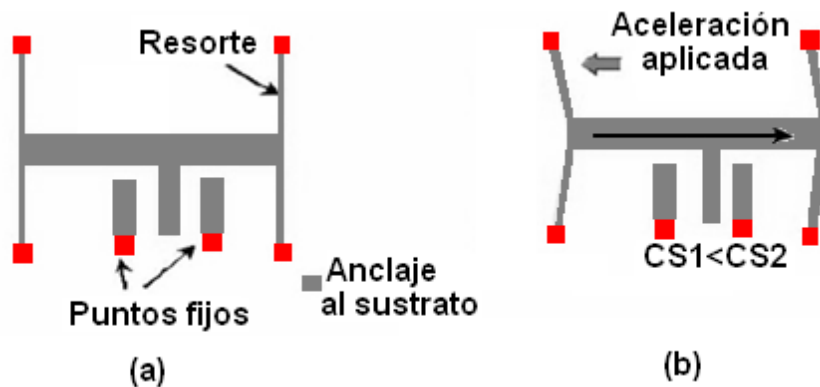


Figura 8.19 Funcionamiento de un acelerómetro capacitivo. a) sensor en reposo y b) respuesta a una aceleración aplicada

8.3.1.3. Acelerómetros piezoeléctricos

Su funcionamiento se basa en el efecto piezoeléctrico. Una deformación física del material causa un cambio en la estructura cristalina y así cambian las características eléctricas. [72] Se ilustra en la figura 8.20 un acelerómetro piezoeléctrico.

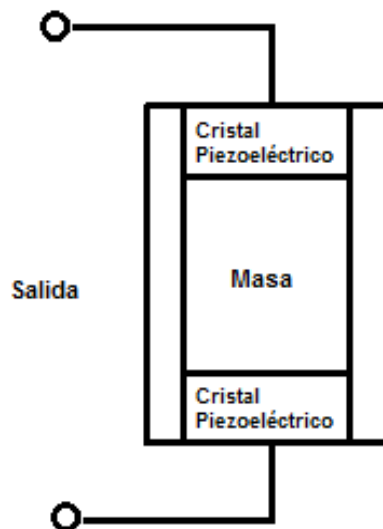


Figura 8.20 Acelerómetro piezo-eléctrico

8.3.1.4. Acelerómetros piezo-resistivos

El funcionamiento se basa en el efecto piezo-resistivo es decir, una deformación física del material cambia el valor de las resistencias del puente [72]. A continuación en el gráfico 8.21 se observa la estructura de este dispositivo:

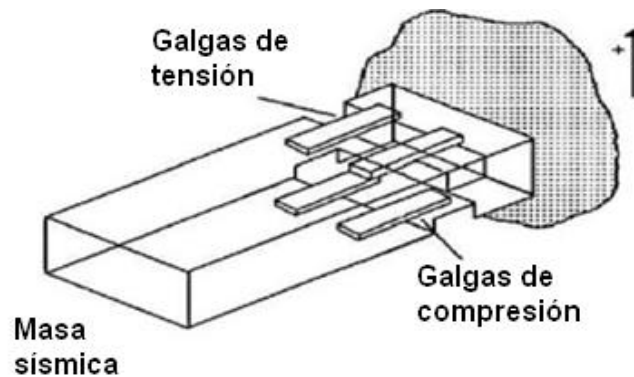


Figura 8.21 Acelerómetro piezo resistivo⁵⁵

En la tabla 8.6 se resume las características principales de los diferentes tipos de acelerómetros:

ACELERÓMETRO	CARACTERÍSTICAS
Piezo-eléctrico	<ul style="list-style-type: none"> • Sensibilidad media • Uso complejo • Bajas temperaturas
Piezo-resistivo	<ul style="list-style-type: none"> • Prestaciones medias • Bajo costo • Tamaño y peso mínimo • Alta sensibilidad
Capacitivos	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo ruido • Baja potencia • Bajo costo

⁵⁵ Tomado de: J. A. Pérez Magni, "MEMS, Acelerómetros", Universidad de Cantabria. [Online]. Disponible en: http://www.scribd.com/doc/13713749/MEMS#open_download. [Accesado: 7 Noviembre, 2010]

ACELERÓMETRO	CARACTERÍSTICAS
Mecánicos	<ul style="list-style-type: none"> • Alta precisión • Lentos • Alto costo

Tabla 8.6 Tipos de acelerómetros

8.3.2. Giroscopios

El giróscopo es un dispositivo cuya función es conocer como varía un ángulo en el tiempo, mientras se encuentra rotando (velocidad angular). Estos dispositivos antiguamente por su tamaño, peso y carácter mecánico tenían limitadas aplicaciones. Actualmente el uso de la tecnología MEMS le da gran versatilidad en sus aplicaciones. Por ejemplo: para desplegar un air-bag. Este tipo de sensores van en los iPhone, Android y similares.

En la figura 8.22 se observa un giroscopio utilizado en un teléfono inteligente.

Figura 8.22 Uso del giroscopio en un iPhone⁵⁶

⁵⁶ Tomado de: Varios autores, "MEMS, giroscopios que convierten un teléfono en un wii-mando", Tecnologías.com. [Online]. Disponible: <http://tec.nologia.com/2008/12/12/mems-giroscopios-que-convierten-un-telefono-en-un-wii-mando/>

Existen tres principios básicos de funcionamiento para estos dispositivos, estos se describen en la tabla 8.7:

PRINCIPIO	PRINCIPIO
Rotatorios	Utiliza una masa rotando sobre un eje sostenido por uno o varios “gimbals” (cardanes) dependiendo de los grados de libertad deseados. De esta manera, se mantiene el eje estable y por tanto el giroscopio apuntará siempre en la misma dirección. Cuando se produce un movimiento en el sistema externo es posible observar el cambio en el ángulo.
Vibratorios	Se caracterizan por disponer de un elemento vibrante el cual al ser forzado a rotar, es afectado por una fuerza de Coriolis. Este induce vibraciones secundarias ortogonales a la vibración original. La velocidad angular se obtiene en base a dicha vibraciones [73].
Ópticos	Usan el efecto Sagnac, cuando dos rayos de luz circulan en direcciones opuestas dentro de un camino cerrado. El haz de luz al circular en la misma dirección de la rotación tarda más tiempo en viajar a comparación del haz de luz en sentido contrario. El ángulo se puede obtener en base a la diferencia de camino de los dos rayos, estos viajan en direcciones opuestas a lo largo del perímetro. [74]

Tabla 8.7 Principios básicos de funcionamiento de los giroscopios

8.4. Sensores de flujo

Los sensores de flujo monitorean la velocidad de fluidos, tanto líquidos como gaseosos. Se destacan 4 opciones para monitorear el flujo de líquidos y gases utilizando MEMS:

1. Sensores de flujo térmico
2. Sensores de flujo por diferencia de presión
3. Sensores de flujo por transferencia de fuerza
4. Sensores de flujo basados en el principio de Faraday

8.4.1. Sensores de flujo térmico

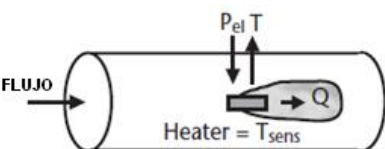
Se puede medir la temperatura de un fluido conforme pase por el sensor. Generalmente cumplen el siguiente principio de funcionamiento: el fluido pasa sobre un resistor "caliente" donde la diferencia en temperatura será proporcional a la razón másica del flujo. Otra posibilidad es mantener el sensor a una temperatura constante y medir la cantidad de potencia requerida para mantener esa temperatura. Los elementos integrantes de estos micro-sensores se nombran en la tabla 8.8:

ELEMENTOS	DESCRIPCIÓN	MATERIAL DE FABRICACIÓN
Termistores	Miden el cambio de resistencia con la temperatura	<ul style="list-style-type: none"> • Germanio
Termopares	Mide el voltaje proporcional a la diferencia entre los contactos de los 2 materiales	<ul style="list-style-type: none"> • Aluminio/polisilicio • Platino/silicio dopado de boro • Oro/polisilicio • Aluminio/silicio

Tabla 8.8 Elementos de los sensores térmicos de flujo

Se han clasificado en dos categorías, las cuales se describen a continuación en la tabla 8.9:

1. Anemómetros
2. Calorimétricos

TIPO	DESCRIPCIÓN
<p>Anemómetros</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Formada por un solo elemento. • Cuando el líquido pasa sobre un resistor "caliente" la diferencia en temperatura será proporcional a la razón másica. • Tiempos de respuesta rápido debido a su masa térmica pequeña.

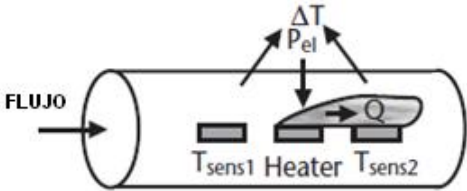
TIPO	DESCRIPCIÓN
<p style="text-align: center;">Calorimétricos</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Requieren dos elementos, un de calefacción con elementos de detección de temperatura en la parte superior e inferior del fluido. • El sensor superior detecta el flujo frío y el sensor de abajo el flujo caliente debido al transporte de calor de la calefacción en la dirección del flujo. • La cantidad de calor medido es proporcional al caudal, la señal de salida es la diferencia de temperatura entre los dos sensores.

Tabla 8.9 Tipos de sensores de flujo térmicos ⁵⁷

8.4.2. Sensores de flujo por diferencia de presión

Se basan en la diferencia de presión medida antes y después del sensor, dicha diferencia es proporcional al caudal medido. Estos micro-sensores se pueden utilizar para medir el flujo a través de la caída de presión a lo largo de un canal el cual puede presentar una resistencia conocida como R_f . Se aplica una ley equivalente a la Ley de Ohm y se plantea en la ecuación 8.10:

$$Q = \frac{\Delta p}{R_f}$$

Ecuación 8.10 Ley de Ohm equivalente para Fluidos

Donde:

Q= Flujo, comparable con la medición de corriente en un circuito eléctrico al detectar la caída de presión Δp .

⁵⁷ Tomado de: S. Beeby, G. Ensell, M. Kraft, N. White, "MEMS Mechanical Sensors", Artech house, 2004

Existen 3 tipos de estructuras utilizadas en este tipo de micro-sensores, en la tabla 8.10 se describe su funcionamiento.

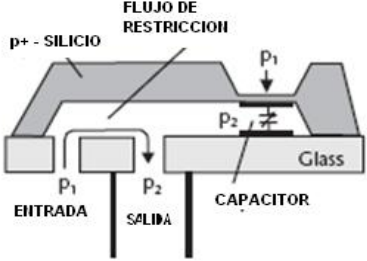
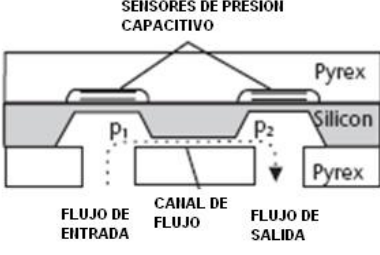
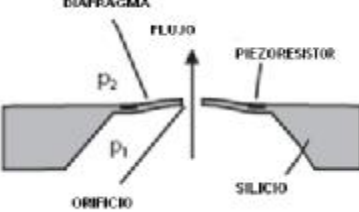
ESTRUCTURA	DESCRIPCIÓN	MATERIAL DE FABRICACION
<p>Sensor de flujo con detector capacitivo</p> 	<ul style="list-style-type: none"> El fluido en la entrada tiene una presión p_1, este fluye a través de un canal y sale del sensor con una la presión p_2. Si el canal de flujo es lo suficientemente pequeño como para crear una resistencia al flujo la caída de presión aparece. 	<p>Vidrio y silicio</p>
<p>Sensor de flujo con 2 detectores capacitivo</p> 	<ul style="list-style-type: none"> Se colocan dos sensores capacitivos separados de tal manera para medir la presión y volumen del caudal. Los electrodos del condensador no están en contacto con el líquido evitando así un cortocircuito. 	<p>Vidrio-silicio-vidrio</p>
<p>Sensor de flujo con diafragma</p> 	<ul style="list-style-type: none"> Tiene una placa con un orificio en el medio de la estructura. El sensor lo usa como un medidor de flujo de presión diferencial. 	<p>Silicio</p>

Tabla 8.10 Estructuras de micro-sensores de flujo⁵⁸

⁵⁸ Tomado de: S. Beeby, G. Ensell, M. Kraft, N. White, "MEMS Mechanical Sensors", Artech house, 2004

La ventaja de estos sensores es que el calentamiento del fluido es despreciable. Este es un parámetro importante cuando se trata de líquidos sensibles a la temperatura o durante las reacciones químicas. La desventaja de los sensores de flujo por presión diferencial ocasiona una pérdida permanente de presión. En caso de ser necesario, debe ser compensada para retornar a las condiciones originales del sistema. Los cambios de temperatura pueden tener una fuerte influencia en la detección de la señal debido al cambio en la densidad y la viscosidad. Por lo tanto, la temperatura también debe ser monitoreada [19].

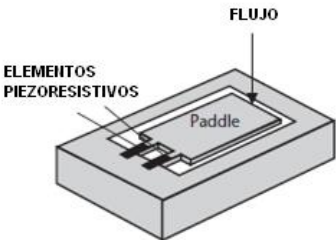
8.4.3. Sensores de flujo por transferencia de fuerza

Entre estos sensores tenemos:

1. "Drag force" (Fuerza de arrastre)
2. "Lift forcé"
3. Fuerza de Coriolis

8.4.3.1 Drag force (Fuerza de arrastre)

Este tipo de sensor de flujo consta de una viga en voladizo con una galga. Cuando el voladizo se sumerge en un líquido el cual fluye, una fuerza produce una desviación del voladizo. Esta fuerza es paralela a la dirección del fluido, y puede ser detectado por un elemento piezo-resistivo. Se tienen 2 clases de micro-sensores, los cuales se describen en la tabla 8.11:

TIPO	DESCRIPCION	MATERIAL DE FABRICACIÓN
<p>Sensor de flujo "in-plane drag"</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Pequeños caudales. • Trabaja con altas velocidades de flujo. • Utilizado debido a la caída de presión a través del espacio existente entre las paletas en altas velocidades de flujo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Silicio

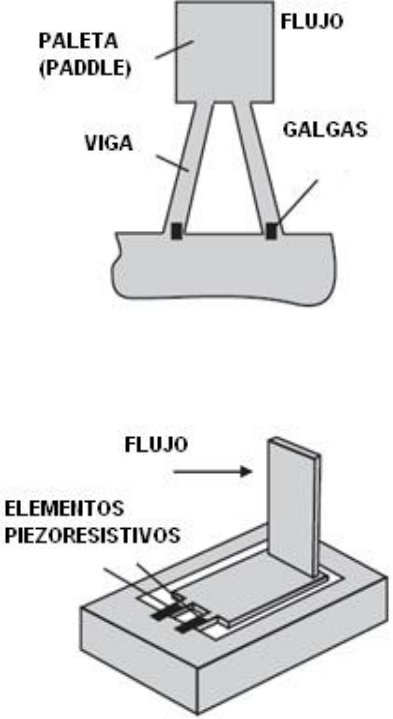
TIPO	DESCRIPCION	MATERIAL DE FABRICACIÓN
<p>Sensor de flujo “out-plane drag”</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Tiene una paleta suspendida evitando así la caída de presión. La viga se ha galvanizado con un material magnético y puede ser atraído por un imán externo. • Un inconveniente en la fabricación está en la reproducibilidad y la robustez de la estructura. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aleación de hierro y níquel • Cobre • Oro • Parileno

Tabla 8.11 Tipos de micro-sensores “drag force” ⁵⁹

8.4.3.2. “Lift forcé”

El principio se basa en la fuerza perpendicular a la dirección del flujo. Se compone de dos placas finas unidas a una viga rígida central como se muestra en la figura 8.23. Las vigas contienen polisilicio piezo-resistor a cada lado para detectar la desviación de las placas. Las galgas están conectadas al puente de Wheatstone, el cual mide la desviación proporcional al cuadrado de la velocidad del flujo [6].

⁵⁹ Tomado de: S. Beeby, G. Ensell, M. Kraft, N. White, “MEMS Mechanical Sensors”, Artech house, 2004

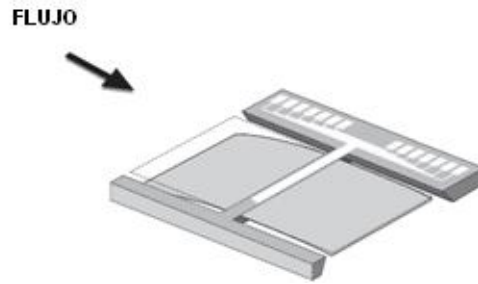


Figura 8.23 Estructura del Sensor "lift force"⁶⁰

Debido a la distribución no uniforme de la fuerza, las placas son desviadas en la misma dirección pero con magnitudes diferentes, como se observa en la figura 8.24. Las mediciones han demostrado lo siguiente: la placa superior se desvía cerca de cinco veces más en comparación con la placa inferior. Esta diferencia implica una mayor presión en la parte inferior de la viga y una disminución de la presión en la parte superior, como se ve reflejado en la figura 8.25. La desviación es detectada por un cambio de la resistencia en las galgas ubicadas sobre la estructura [19].

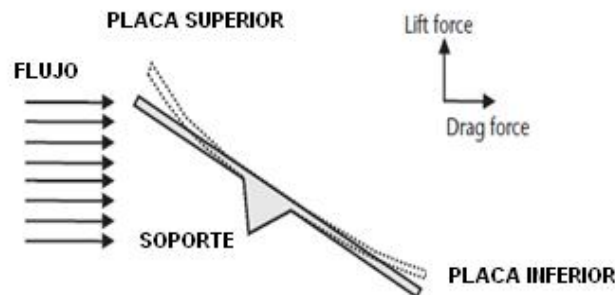


Figura 8.24 Vista lateral del sensor de flujo

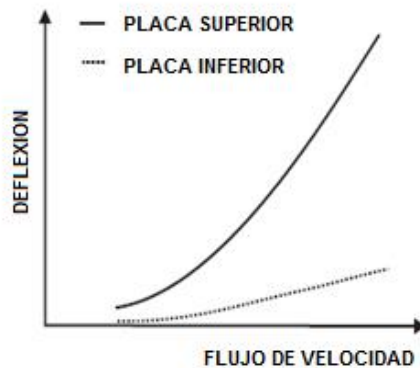


Figura 8.25 Curvas de desviación de las placas superior e inferior con respecto a la velocidad del flujo

⁶⁰ Tomado de: S. Beeby, G. Ensell, M. Kraft, N. White, "MEMS Mechanical Sensors", Artech house, 2004

8.4.3.3. Fuerza de coriolis

La fuerza de coriolis aparece como respuesta a fuerzas inerciales cuando en un sistema se superponen movimientos rotacionales y traslacionales. La estructura de este micro-sensor se muestra en la figura 8.26. Un sensor de flujo másico de efecto coriolis está formado por los elementos descritos en la tabla 8.12.:

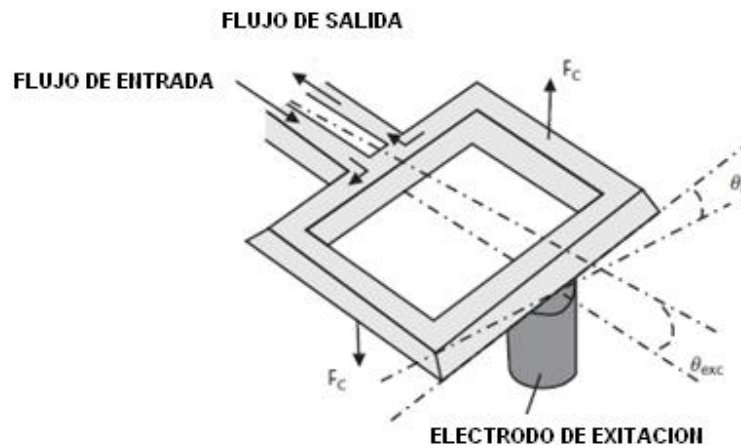


Figura 8.26 Sensor de flujo másico de efecto coriolis⁶¹

ELEMENTOS	DESCRIPCIÓN
Tubo de doble circuito	Estos se hacen vibrar de forma controlada a su frecuencia de resonancia.
Sensores ópticos	Detectan la fase de la vibración

Tabla 8.12 Elementos del sensor de flujo por fuerza de coriolis

En la tabla 8.13 se resume las características principales de los diferentes tipos de sensores de flujo:

⁶¹ Tomado de: S. Beeby, G. Ensell, M. Kraft, N. White, "MEMS Mechanical Sensors", Artech house, 2004

TIPOS DE SENSOR DE FLUJO	CARACTERÍSTICAS
Térmico	<ul style="list-style-type: none"> • Mientras el peso del elemento sensor (resistencia, termistor, termopar) sea menor, la velocidad de respuesta ante los cambios de flujo será más rápida. • Alta sensibilidad.
Por diferencia de presión	<ul style="list-style-type: none"> • Se utilizan con líquidos sensibles a la temperatura debido al cambio en la densidad y la viscosidad.
Por transferencia de fuerza	<ul style="list-style-type: none"> • Las partículas fluyen a velocidades altas, y pueden destruir el voladizo suspendido. • Si la velocidad de las partículas es lenta puede obstruir la vía del fluido.
Fuerza de Coriolis	<ul style="list-style-type: none"> • Este tipo de sensores son inmunes a: presión, temperatura, densidad, viscosidad y perfil del flujo. • Las vibraciones deben ser monitoreadas porque puede deteriorar la estructura.

Tabla 8.13 Características de los sensores de flujo

8.5. Sensores inteligentes

Según IEEE 1451.2 un transductor inteligente proporciona más funciones de las necesarias para generar una correcta representación de la variable monitorizada. Dichas funcionalidades están orientadas a facilitar la integración del transductor con las aplicaciones del entorno de red.

Un sensor inteligente combina la función de detección, procesamiento de señal y comunicación, las mismas son realizadas por un μ P. Este tipo de sensor es un dispositivo capaz de proporcionar una señal digital, comunicar a través de un bus digital y ejecutar funciones u órdenes lógicas. Además, posee una amplia gama de funciones, a continuación se nombran algunas de ellas [75]:

- Acondicionamiento de señal
- Correcciones de cero, ganancia y linealidad
- Compensación ambiental (temperatura humedad)
- Escalamiento
- Conversión de unidades
- Autodiagnóstico y autocalibración
- Detección y acción sobre el sistema.
- La prevención y detección de fallos.

8.5.1. Arquitectura general de un sensor inteligente

La implementación de sensores inteligentes requiere una estructura como la de la figura 8.27, sus 3 elementos principales son [56]:

1. Procesamiento de la señal
2. Control y manipulación de las señales digitales
3. Comunicación con el exterior mediante un bus



Figura 8.27 Arquitectura de un sensor inteligente

A continuación en la tabla 8.14, se describen las características de las 3 funciones principales:

ELEMENTOS	DESCRIPCION
Procesamiento de señal	<ul style="list-style-type: none"> • La amplificación de la señal del sensor es importante cuando la señal es baja. De esta manera se reduce el efecto del ruido exterior y permite aprovechar el máximo rango del

ELEMENTOS	DESCRIPCION
	<p>convertidor analógico-digital.</p> <ul style="list-style-type: none"> • A veces es necesario transformar el valor de impedancia en un valor de tensión. Así se asegura la transferencia máxima de la señal a la siguiente etapa. • Se requiere un filtrado de la señal para prevenir el problema de la aliasing.
Control digital	<ul style="list-style-type: none"> • Los sensores deben proporcionar una señal digital para poder acceder a un bus digital. De esta manera permite la corrección de la desviación, auto calibración, detección y corrección de faltas y de linealidad [76]. • Se utiliza un procesador externo con acceso al PROM (Memoria programable de lectura) para poder calibrarlo en campo.
Comunicación	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de interactuar con un controlador para manejar el sistema general mediante varios buses y protocolos. • Se está desarrollando un estándar de comunicación para optimizar la funcionalidad, la velocidad y el costo [76]. • La información a intercambiar será: datos de calibración, compensación, información propia del sensor, los datos medidos y también la posibilidad de poder programarlo.

Tabla 8.14 Características de los elementos de un sensor inteligente

8.6. Laboratorios on-chip

Los Lab-on-a-chip son un subconjunto de los dispositivos MEMS. Un laboratorio en un chip (LOC) integra una o varias funciones de un laboratorio en un solo chip como se observa en la figura 8.28. Los elementos están descritos en la tabla 8.15:

ELEMENTOS	DESCRIPCION
Micro-red de tubos	Por estos circulan volúmenes pequeñísimos de líquidos (del orden de picolitros).
Dispositivos mecánicos	Como las bombas y las válvulas, o sensores, por ejemplo: medidores de flujo, viscosímetros, entre otros.

Tabla 8.15 Descripción de los elementos del lab-on-chip

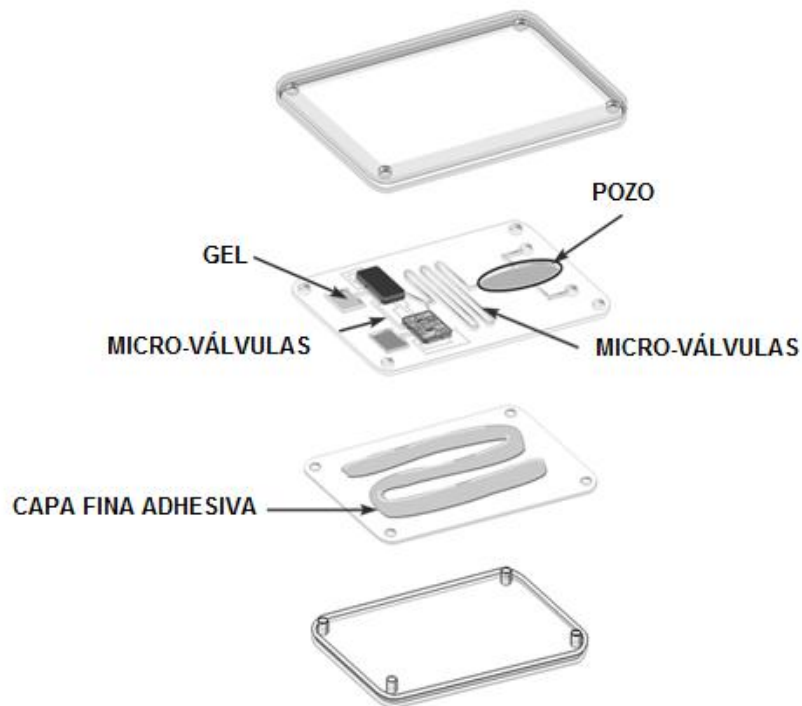


Figura 8.28 Componentes de un LOC⁶²

Los lab-on-chip proporcionan ciertas ventajas las cuales se nombran a continuación:

- Bajo consumo de reactivos.
- Menos volumen de muestra es necesario para el diagnóstico.
- Tiempo de respuesta rápido y análisis inmediato.

⁶² J. Kong, "Lab on a chip" Disponible: <http://www-car.asymtek.com/kr/applications/lab-on-chip/default.htm>. [Online]. [Accesado: Noviembre, 2010]

- Menores costos de fabricación, fabricados en masa, permitiendo tener chips desechables y rentables.
- Plataforma segura para estudios químicos, radioactivos o biológicos.

Entre los materiales utilizados en la fabricación de LOC se pueden nombrar: silicio, plástico, vidrio, cerámica y, cíclica copolímero de olefina (COC); Estos materiales se usan por sus características ópticas, por su bio-compatibilidad química, por los menores costos de producción y por la creación de prototipos rápidos.

Los procesos de fabricación de los lab-on-a-chip son fotolitografía, PDMS (Litografía blanda), estereolitografía. [77]

8.7. Aplicaciones de los micro-sensores

Se mencionan en la tabla 8.16 algunas aplicaciones de los diferentes tipos de sensores MEMS estudiados en este capítulo:

TIPO DE SENSORES	APLICACIONES
Presión	<ul style="list-style-type: none"> • Instrumentos para aviación • Laboratorios • Controles de quemadores y calderas • Sistemas de frenado
Torque o fuerza	<ul style="list-style-type: none"> • Equipos de diálisis • Pielas Artificiales • Brazos manipuladores • Articulaciones • Rehabilitación Física • Investigación de prótesis • Volantes de torsión • Asientos automatizados

TIPO DE SENSORES	APLICACIONES
Inerciales	<ul style="list-style-type: none"> • Giroscopios • Acelerómetros • Sensores sismológicos
Flujo	<ul style="list-style-type: none"> • Microarray de ADN • Micropumps • Caudalímetro • Sensor de gas
Inteligentes	<ul style="list-style-type: none"> • Ventilación y aire acondicionado • Sensores de fibra óptica para monitoreo de la salud humana. • Control de vibración de helicópteros. • Giroscopios ópticos para cámaras.
Lab-on-a-chip	<ul style="list-style-type: none"> • PCR en tiempo real: detección de bacterias, virus y cáncer. • Inmuno-ensayo: Detección de bacterias, los virus y el cáncer basada en las reacciones antígeno-anticuerpo. • Di-electroforesis: Detección de células cancerosas y las bacterias • Prueba de eficacia de nuevos fármacos.

Tabla 8.16 Aplicaciones de los micro-sensores

CAPÍTULO IX

MICRO-ACTUADORES Y MICRO-ROBOTS

Introducción: Un actuador MEMS es un dispositivo mecánico cuya función es proporcionar fuerza para mover o actuar sobre otro dispositivo. Su tamaño, consumo y características los hacen ideales para modernizar sistemas de aviación, espaciales, automotrices y electrónica de consumo. En este capítulo se abordará brevemente su estructura, clasificación y aplicaciones. Con el motivo de ampliar nuestro estudio, también se hablará sobre Micro-robots. Esta nueva tecnología requiere la integración de micro-sensores y micro-actuadores para ser programados en una variedad de tareas.

9.1. Micro-actuadores

Un micro-actuador puede tener dimensiones macro para generar una perturbación. Sin embargo, para nuestros propósitos, vamos a considerar los actuadores en el orden de las micras (menos de 1 mm). Este dispositivo transforma la energía en un movimiento controlable, como se observa en la figura 9.1



Figura 9.1 Funcionamiento de un micro-actuador

Las primeras aplicaciones relacionadas con la micro-ingeniería fueron los sensores. La idea de usar estas técnicas en actuadores fue desarrollada a partir de los micro-sensores, dada la gran cantidad posible de aplicaciones en esta área. Unos ejemplos de actuadores existentes en el mercado son los siguientes [24]:

- Micro bombas.
- Actuadores de presión para chorro de tinta mediante pulsos.
- Actuadores térmicos para chorro de tinta.
- Cabezas impresoras térmicas.
- Elementos de comunicación ópticos.
- Espejos exploradores.
- Micro- bombas y válvulas implantables, para dosificar medicamentos.

9.1.1. Características funcionales y criterios de selección

La característica funcional de un actuador es su salida mecánica. Puede ser descrito por la relación entre el par generado y la velocidad angular (si el actuador produce un movimiento rotacional). También se describe por la relación entre la fuerza generada y la velocidad lineal (si el actuador produce un movimiento lineal) [6].

Un micro-actuador se selecciona en forma conjunta con la transmisión. Se toma en cuenta varios parámetros tales como:

- Características mecánicas
- Condiciones ambientales
- Frecuencia de trabajo

Una de las características más interesantes es la linealidad. La lineabilidad se refiere a la función de entrada-salida del actuador. Donde la entrada es una propiedad física de la energía (corriente, tensión, temperatura, etc) y la salida es una propiedad física de la energía mecánica (posición, velocidad, aceleración,

alimentación, etc). La diferencia máxima entre la línea de referencia y la salida del actuador es una medida de la linealidad como se observa en a figura 9.2.

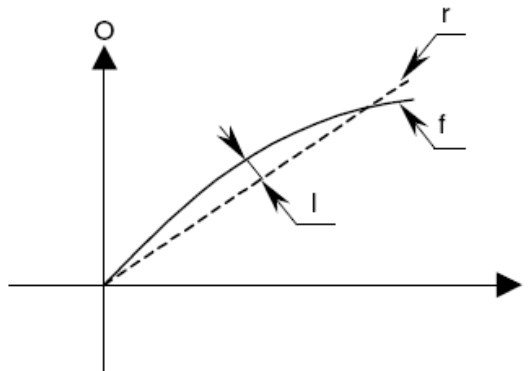


Figura 9.2 Definición de linealidad.

Donde:

- O** = la salida del actuador
- I** = la entrada del actuador
- r** = la línea de referencia
- f** = la función entrada-salida
- l** = la medida de linealidad

Un actuador se utiliza para generar un movimiento. Por lo tanto, es necesario estudiar el concepto de "precisión de posicionamiento", definiendo tres subconceptos descritos en la tabla 9.1 [6]:

TÉRMINOS	DEFINICIÓN
Precisión	Distancia entre la posición media y la posición de destino
Repetición	Distancia media entre las diferentes posiciones alcanzadas con respecto a la posición de destino.
Resolución	Mínimo movimiento incremental del actuador

Tabla 9.1 Precisión de posicionamiento

Hay dos problemas adicionales los cuales dificultan la correcta selección de un actuador. En primer lugar, los micro-actuadores no siempre están bien caracterizados desde el punto de vista mecánico. Por lo tanto una selección precisa a veces es imposible. El segundo problema es el factor de la micro-transmisión. Un factor de escala puede introducir fenómenos dinámicos indeseados. Así por ejemplo la fricción, la histéresis, las fluctuaciones del umbral, el ruido. Dichos factores disminuyen el rendimiento y se definen a continuación en la tabla 9.2 [6]:

FENÓMENOS	DEFINICIÓN
Histéresis	Diferencia en la salida del actuador cuando se llega desde dos direcciones opuestas.
Fluctuaciones del umbral	El incremento más pequeño en la entrada capaz de generar una salida del actuador.
Ruido	Medida de las fluctuaciones en la salida con entrada cero. También es la perturbación o señal accidental no deseada la cual modifica la indicación, medición o transmisión.
“Backlash”	Movimiento perdido después de invertir la dirección

Tabla 9.2 Descripción de los fenómenos dinámicos indeseados

Por estas razones, se utilizan algunos programas de software con algoritmos de optimización especializados para lograr una selección óptima de micro-actuadores. Estas técnicas de selección deben tener en cuenta muchas otras características de los actuadores.

9.1.2. Clasificación de los micro-actuadores

Algunas tecnologías de actuación permitirán la integración de muchos micro-actuadores idénticos los cuales se combinan para formar un único actuador.

Cuando se integran en una configuración paralela, la fuerza total es la suma de las fuerzas ejercidas por cada micro-actuador individual. En cambio si se integran en una configuración en serie, la fuerza total es la misma fuerza ejercida por cada micro-actuador individual. Un tipo de clasificación de los micro-actuadores se realiza de acuerdo al tipo de energía de entrada tal como se muestra en la tabla 9.3.

ENERGÍA DE ENTRADA	CLASE	ACTUADOR
Eléctrica	Campo eléctrico y magnético	Electrostático
		Electromagnético
		Piezo-eléctrico
		Piezo-cerámico
		Piezo-polímero
		Magnetostrictivo
		Aleaciones con memoria de forma
Neumática	Neumático	Alta presión Baja presión
	Hidráulica	Hidráulico
Térmica	Expansión térmica	Bimetálico
		Térmico
		Gel de polímero
Química	Electrolítico	Electromecánico
	Explosivo	Pirotécnicos
Óptica	Fotomecánica	Fotomecánica
		Gel de polímero
Acústica	Vibración inducida	Vibrante

Tabla 9.3 Clasificación de los Micro-actuadores

A continuación se analizarán los siguientes micro-actuadores:

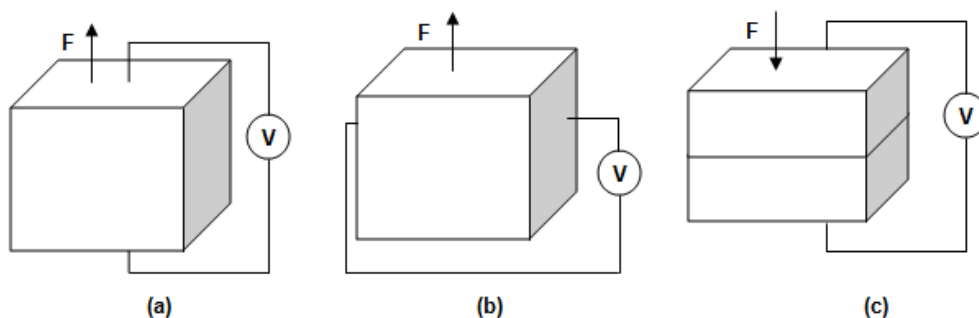
1. Piezoeléctricos
2. Electromagnéticos
3. Aleaciones con memoria de forma
4. Electrostáticos

9.1.2.1. Micro-actuadores piezo-eléctricos

Un actuador piezo-eléctrico es un dispositivo productor de movimiento o desplazamiento aprovechando el fenómeno físico de la piezoelectricidad. El efecto piezoeléctrico exhibido por los materiales naturales como el cuarzo, la turmalina, la Sal de Rochelle, etc, es muy pequeño. Por lo tanto, se han desarrollado materiales con propiedades mejoradas para ser utilizadas en estas aplicaciones. Por ejemplo: los materiales cerámicos ferro-eléctricos policristalinos como el BaTiO_3 y el Zirconato Titanato de Plomo (PZT) [41].

Los actuadores piezoeléctricos no son sólo "actuadores simples". sino máquinas completas con un sistema de actuación formado de piezas de PZT (Zirconato Titanato de Plomo) y una transmisión la cual permite la transformación de la energía mecánica generada en una forma deseada [24].

Se pueden dividir en tres categorías observadas en la figura 9.3 de acuerdo a su relación piezoeléctrica. Además se describen sus características en la tabla 9.4:



Leyenda: F es la fuerza ejercida y V es la diferencia de potencial entre las caras

Figura 9.3 Micro-actuadores: (a) axial, (b) transversal y (c) flexión

TIPOS	CARACTERÍSTICAS
Actuadores Axiales y Transversales	Alcanzan grandes trazos “stroks”, sin embargo presenta una menor rigidez.
Actuador de Flexión	Se caracterizan por una mayor rigidez, reducción de tiempos de respuesta, y fuerzas ejercidas superiores.

Tabla 9.4 Tipos de micro-actuadores piezoeléctricos

Los micro-actuadores piezoeléctricos presentan ventajas importantes listadas en la tabla 9.5.

PARAMETROS	VENTAJAS
a) Resolución	Puede producir cambios de posición extremadamente finos por abajo del rango sub-nanómetro. Los pequeños cambios de voltaje de operación son convertidos en suaves movimientos.
b) Generación de grandes fuerzas	Pueden generar una fuerza de varios miles de Newton.
c) Expansión rápida	Ofrecen el tiempo más rápido de respuesta disponible (microsegundos).
d) Ningún efecto magnético	El efecto piezoeléctrico está relacionado a los campos eléctricos. Sin embargo no produce campos magnéticos ni son afectados por estos. Son especialmente apropiados para aplicaciones donde los campos magnéticos no pueden tolerarse.
e) Libre de desgaste y roturas	No tiene engranes ni ejes rotativos. Su desplazamiento se basa en la dinámica de estado sólido y no muestra desgaste ni rotura.
f) Baja potencia de consumo	Convierten directamente energía eléctrica en movimiento absorbiendo energía solo

PARAMETROS	VENTAJAS
	durante este proceso. La operación estática aun sosteniendo cargas pesadas no consumen potencia.
g) Operación a Temperatura Criogénicas(temperaturas bajas)	El efecto piezoeléctrico se basa en campo eléctricos y funciona hasta casi cero grados Kelvin.

Tabla 9.5 Ventajas de los Actuadores Piezoeléctricos

Para el diseño de un actuador piezoeléctrico se debe tomar en cuenta lo mencionado en la tabla 9.6:

PARÁMETROS FUNCIONALES	PARÁMETROS DE DISEÑO
<ul style="list-style-type: none"> • El Desplazamiento • La Fuerza • La Frecuencia 	<ul style="list-style-type: none"> • El tamaño • Peso • Potencia de Entrada

Tabla 9.6 Parámetros de diseño

9.1.2.2. Micro-actuadores electromagnéticos

El fenómeno del electromagnetismo surge de una corriente eléctrica moviéndose a través de un material conductor o viceversa. Fuerzas atractivas o repulsivas son generadas en la región adyacente al conductor y resultan proporcionales al flujo de corriente. Este fenómeno se puede observar en la figura 9.4.

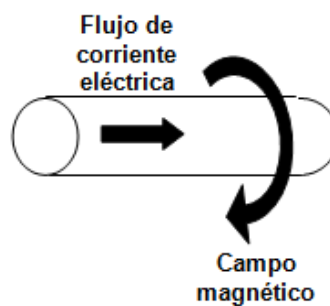


Figura 9.4 Fenómeno del electromagnetismo

Un micro-actuador electromagnético incluye un soporte, dos partes móviles, por lo menos un par de imanes permanentes, un bobina, y una porción de la deformación de supresión. La primera parte móvil está conectada alrededor de la estructura base. La segunda parte móvil está conectada alrededor de la primera parte móvil e incluye un espejo el cual cambia una trayectoria óptica. La parte de la bobina sobresale en la superficie superior de la parte móvil. La porción de la supresión de la deformación incluye una pluralidad de depresiones formados en las partes móviles primera y la segunda entre las secciones de la bobina. La porción de la supresión de la deformación suprime una deformación térmica. Esto ocurre cuando se aplica una corriente a la parte de la bobina, a fin de reducir las deformaciones de las partes móviles primera y segunda. En figura 9.5 se observa un micro-actuador con sus respectivas partes.

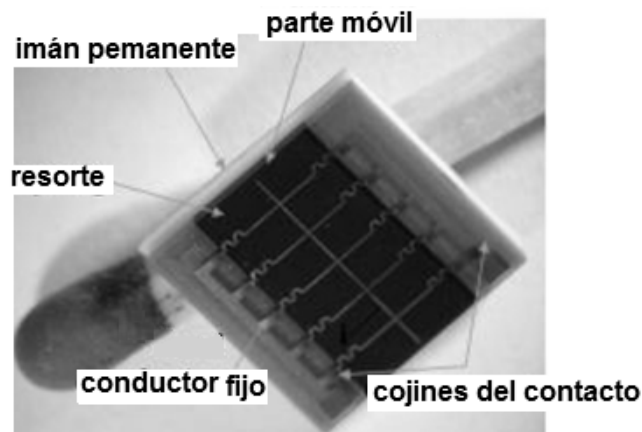


Figura 9.5 Partes de un micro-actuador⁶³

9.1.2.3. Micro-actuadores con memoria de forma SMA (“Shape Memory Alloy”)

El efecto de memoria de forma o “shape memory” consiste en una relación causa-efecto entre la deformación y un estímulo externo. Por ejemplo: cambio de temperatura o de campo magnético.

⁶³ Tomado de: M. Feldmann, “Electro Magnetic Micro Actuators and Generators”, imt. [Online] Disponible: <http://www.imt.tubs.de/imt/en/projekte/abgeschlossen/Polymermagnetaktoren>

Los materiales con memoria de forma pueden ser: aleaciones, polímeros, cerámicas y aleaciones ferro-magnéticas. De estos materiales, los más comunes son las aleaciones con la propiedad de pseudoelasticidad. Esta propiedad es la capacidad del material, el cual en un régimen de altas temperaturas, sufre deformaciones relativamente altas. Después de ser deformadas mediante carga, las SMA pueden recuperar su configuración original cuando se someten a un pequeño cambio de temperatura. Este efecto produce un cambio de estructura cristalina del material que se puede observar en la figura 9.6.

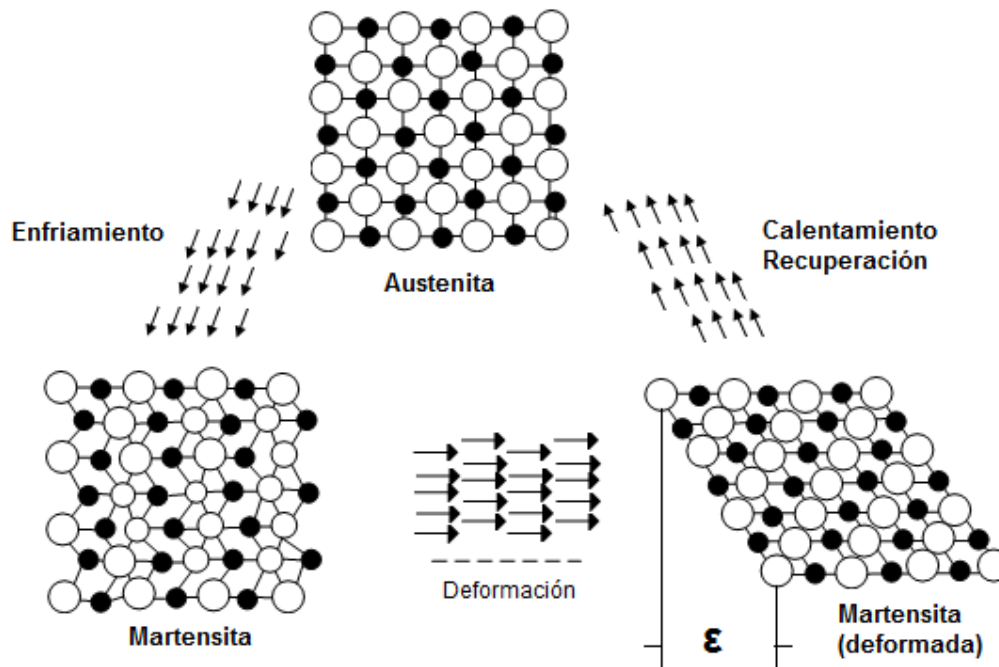


Figura 9.6 Cambio en la estructura cristalina de las SMA producido por el cambio de fase

Aparecen dos fases, la martensita y la austenita. La martensita es relativamente suave y existe a bajas temperaturas. La austenita es más dura y aparece a una temperatura más alta. La martensita puede deformarse fácilmente, con lo cual una carga en la pieza puede producir un cambio significativo en su forma. Pero si la pieza se calienta por encima de la temperatura a la cual el material es completamente austenítico, ésta recupera su forma inicial, aún soportando la misma carga. [79]

Las aleaciones metálicas más conocidas son las aleaciones de níquel-titanio, cuyo nombre comercial es NITINOL y responden ante campos térmicos.

Pueden ser utilizadas para una amplia gama de aplicaciones. Son de gran importancia tecnológica pues combina buenos resultados funcionales y propiedades estructurales. Las aleaciones Ni-Ti han sido esenciales para el diseño de micro actuadores con membranas de silicio cubiertas de SMA (Ni-Ti).

Las aleaciones de Ni son de gran interés pues las temperaturas de transformación pueden ser controladas a través de tratamientos térmicos. Las características de transformación dependen de la temperatura de tratamiento térmico aplicado. La temperatura de transformación en las aleaciones con alto contenido en Ni también puede ser controlada modificando la temperatura del recocido [55]. Esta aleación se suele utilizar para robótica y tiene una temperatura de transición de 70° C.

Otra característica interesante de las SMA es el efecto de memoria de la forma (SME, del inglés "Shape Memory Effect"). Es posible hacer a la aleación recordar una forma en particular. Una vez recordada esa forma, la aleación se puede deformar. Y se la puede hacer volver a la forma original calentando la aleación por encima de una temperatura llamada "de transición". Por ejemplo si a un alambre de SMA, se hace pasar una corriente eléctrica hasta calentarlo a una temperatura determinada, este se encogerá hasta un 6% de su longitud, si se enfría por debajo de la temperatura de transición recupera su longitud inicial. La fuerza generada cuando el alambre está volviendo a su forma es asombrosamente potente.

Los actuadores convencionales, como los eléctricos, hidráulicos y neumáticos, provocan grandes limitaciones a los diseñadores robóticos, empezando por su peso y complejidad para ser manipulados. Por otro lado, los actuadores SMA son muy fuertes (equivalentes a los actuadores hidráulicos) y son increíblemente pequeños.

9.2. Micro-robots

9.2.1. Definición de micro-robots

Un micro-robot debe ser capaz de moverse, aplicar fuerza, manipular objetos de la misma manera como un "macro-robot". Las dimensiones de este robots están el rango micrométrico. Estos dispositivos incluyen micro-actuadores, micro-sensores, fuentes de energía, electrónica para control y/o procesamiento de la señal. Los micro-robots basado en MEMS constan de miles de millones de átomos y se fabrican usando técnicas de fotolitografía y diversos métodos de grabado.

Los micro-robots fueron separados en tres categorías diferentes, cada uno caracterizado por la fabricación, tecnología utilizada para obtener el robot y el tamaño del dispositivo, como se ilustra en la tabla 9.7.

CLASE DE ROBOT	TAMAÑO Y TECNOLOGÍA DE FABRICACIÓN
Robots Miniatura o Mini-Robots	Tiene un tamaño del orden de unos pocos centímetros cúbicos y fabricados por unión de componentes convencionales en miniatura.
Robots basados en MEMS o Micro-Robots	Una especie de "chip" fabricados con tecnologías de silicio basado en MEMS con características en el rango micrométrico.
Nano-robots	Funcionan a una escala similar a la de biología celular (en el orden de los nanómetros). Fabricados por métodos mecánicos no estándares.




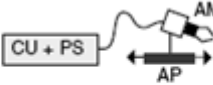




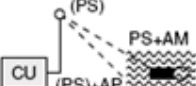
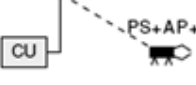
Tabla 9.7 Clasificación de Robots por el tipo de Tecnología de Fabricación

También los micro-robots se pueden clasificar por su movilidad y funcionalidad de acuerdo con los siguientes criterios:

- Locomoción y Posicionamiento
- Posibilidad de manipulación
- Tipo de control
- Autonomía

La tabla 9.8 ilustra 15 configuraciones diferentes que combinan los criterios antes mencionados. Cabe mencionar que la clasificación depende de los siguientes componentes:

- El unidad de control (CU)
- La fuente de alimentación (PS)
- Los actuadores para el posicionamiento (AP).
- Los actuadores para la manipulación (AM).
- Los sensores cuyas funciones son necesarias. Por ejemplo: sensores táctiles para micro-pinzas o dispositivo de carga (CCD), cámaras para aplicaciones de endoscopia, entre otras [6].

CLASIFICACION	EJEMPLOS	
Plataformas de silicio alimentado y dirigidos a través de cables	  	  
Micro-robots móviles equipados con micro-herramientas inalámbricas	 	 

CLASIFICACION	EJEMPLOS
Micro-robots con fuentes externas de locomoción	
Micro-robots autónomos para manipulación.	
Sistemas parcialmente autónomos llamados "píldoras inteligentes" utilizados para la detección de la temperatura o el pH en el interior del cuerpo. Así como pastillas equipadas con cámaras de video.	

Tabla 9.8 Clasificación de los robots por su funcionalidad y movilidad⁶⁴

9.2.2. Utilidad de los micro-robots

Los micro-robots basado en MEMS, surgieron en la década de 1950 donde preveían la utilidad y posibilidad de maquinas miniaturizadas. Los conceptos de micro-factoría y micro-cirugía (basado en pequeños dispositivos insertadas en los vasos sanguíneos de un paciente) han pasado de ser solo ideas teóricas para convertirse en una área potencial de aplicaciones [19].

En la cirugía, el uso de catéteres dirigibles y endoscopios, es un campo muy atractivo y puede serlo aún más con el uso de micro-robots basados en MEMS. De esta manera, su uso permite avances en la cirugía asistida por ordenador (CAS) e incluso la cirugía a través de Internet (telemedicina). Para tales aplicaciones, los endoscopios más pequeños y flexibles pueden reaccionar a

⁶⁴ Tomado de: M. Gad-el-Hak, "MEMS: Applications", Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2005.

las instrucciones en tiempo real con la finalidad de ayudar al cirujano. Estos pueden entrar en los vasos sanguíneos y entrar en las cavidades (angioplastia) por control remoto, allí llevan a cabo mediciones complejas y se utilizan manipuladores para agarre, corte, aplicación de torniquetes, incisiones, succión, y operaciones de lavado, entre otros. Estos dispositivos están revolucionando la cirugía clásica, pero su realización sigue teniendo inconvenientes debido a la fricción, la navegabilidad y los problemas de bio-compatibilidad [6].

Otras áreas de interés para los dispositivos micro-robóticos son:

- Micro-montaje y micro-factoría
- Metrología (prueba automatizadas de chips micro-electrónicos, entre otros)
- Inspección y mantenimiento
- Biología (captación, selección y combinación de las células)
- Micro-óptica (colocación de chips micro-ópticos, micro-lentes, y prismas)

Muchas de estas aplicaciones requieren el manejo automatizado y montaje de piezas pequeñas con una precisión en el rango sub-micrométrico.

9.2.3. Fabricación de los micro-robots

Durante el diseño de un dispositivo micro-robóticos basado en MEMS, las compensaciones entre los diversos parámetros deben ser tomados en cuenta. Tales como: rango de movimiento, fuerza, velocidad (frecuencia de actuación), consumo de energía, precisión del control, fiabilidad, robustez, generación de la fuerza y capacidad de carga. Estos parámetros dependen en gran medida del principio de actuación. A continuación se describen 2 consideraciones importantes:

1. Principios de los actuador para aplicaciones Micro-robóticas
2. Diseño de dispositivos micro-roboticos de locomoción basado en actuadores.

9.2.3.1. Principios de los actuadores para aplicaciones Micro-robóticas

Para la mayoría de micro-actuadores, la fuerza generada y la carga de soporte son limitadas. Esto constituye un inconveniente fundamental en el proceso de micro-fabricación de MEMS.

El concepto de configuración de una matriz de micro-actuadores, donde el trabajo cooperativo y coordinado de varios actuadores simple genera interacción con el mundo macro, se conoce como Sistemas Distribuidos de Micro-movimiento (DMM). Pueden trabajar en modo síncrono es decir todos los actuadores se encienden y se apagan al mismo tiempo. También trabajan en modo asíncrono es decir los actuadores se encienden y se apagan en diferentes momentos. Siendo el segundo modo de trabajo el más eficaz porque se realiza movimientos suaves.

Se han estudiado varios informes teóricos sobre los efectos de escala y la aplicabilidad de los principios de actuación para micro-robots. Por ejemplo, algunos actuadores piezoeléctricos y electrostáticos tienen la ventaja de bajo consumo de energía y se puede conducir a altas velocidades (régimen kHz y más). Los principios de actuación magnética y térmica tienen el potencial para ejercer grandes fuerzas mientras en los desplazamientos la velocidad de conducción es el factor limitante. Dichos actuadores trabajan con corrientes y niveles de potencia alta y puede requerir refrigeración.

9.2.3.2. Diseño de dispositivos micro-robóticos de locomoción basado en actuadores.

El principio de la CMS se basa en una técnica de conducción asincrónica la cual requiere por lo menos dos grupos separados de actuadores los cuales se encienden y apagan en diferentes momentos. El principio de un sistema de movimiento ciliar (CMS) se ilustra en la figura 9.7.

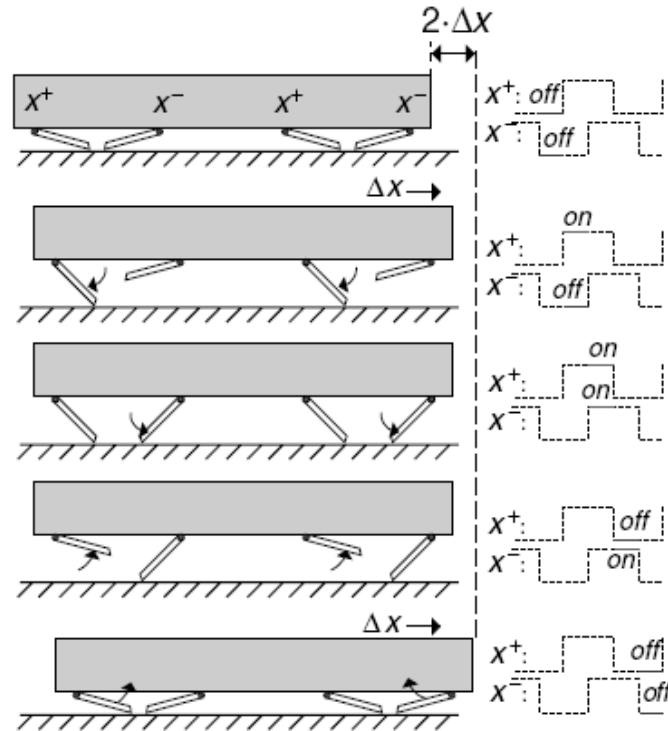


Figura 9.7 Sistema de movimiento cililar (CMS)⁶⁵

Para aplicaciones de locomoción en sistemas de transporte y robots caminantes es esencial tener actuadores. De esta manera, pueden tanto generar fuerzas para levantar un objeto o su propia estructura (es decir, evitar se pegue a la superficie), o para causar movimientos en el plano [6].

Existen sistemas sin contacto (CF) y sistemas con contacto (C). En el primer tipo, la fuerza de diferentes campos: electrostáticos, magnéticos, o neumáticos se utilizan para crear un colchón que separa los objetos de la superficie como se observa en la Figura 9.8. Para conducir el dispositivo en la dirección del plano, estos campos de fuerza necesitan ser dependientes de la dirección. Este efecto fuerza al dispositivo a ir hacia adelante (corrientes de aire dirigido por un sistema neumático para la levitación y una fuerza ortogonal de Lorentz para la conducción de un campo magnético en el sistema de accionamiento) [6].

⁶⁵ Tomado de: M. Gad-el-Hak, "MEMS: Applications", Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2005.

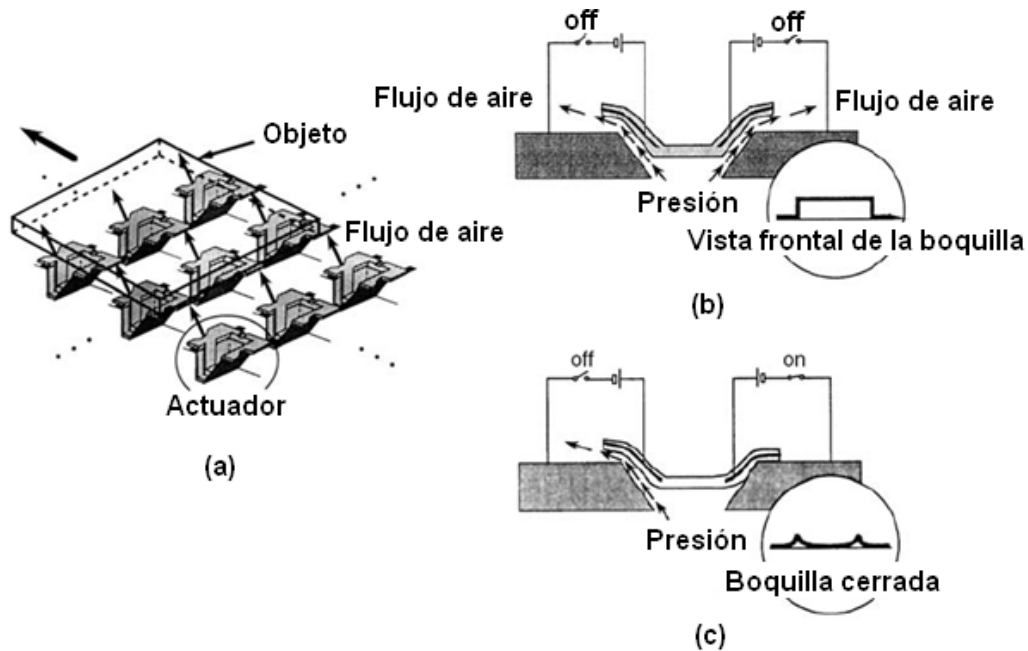


Figura 9.8 Actuadores neumáticos electrostáticos controlados por un sistema de conducción de una dimensión sin contacto.⁶⁶ (a) Distribución de los actuadores. Mecanismo de control de Flujo mediante una acción electrostática de la boquilla (b) cuando la boquilla está en condiciones normales (apagada) y (c) Se aplica una tensión al electrodo (encendido) y la boquilla esta cerrada.

9.2.4. Dispositivos micro-robóticos

Un dispositivo micro-robótico puede ser simple, o un robot complejo el cual camina de manera autónoma, equipado con diversas herramientas. Entre estas tenemos:

1. Micro-pinzas y micro-herramientas
2. Micro-transportadores
3. Micro-robots MEMS caminantes.

Cada uno de estos dispositivos micro-robóticos será presentado con más detalle a continuación.

⁶⁶ Tomado de: M. Gad-el-Hak, "MEMS: Applications", Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2005.

9.2.4.1. Micro-pinzas y otras Micro-herramientas

El primer dispositivo micro-robótico se basó en actuación electrostática. Esta micro-pinza tenía dos brazos de agarre relativamente delgados como se muestra en la figura 9.9. Existen otros basados en estructuras cuasi-tridimensional.

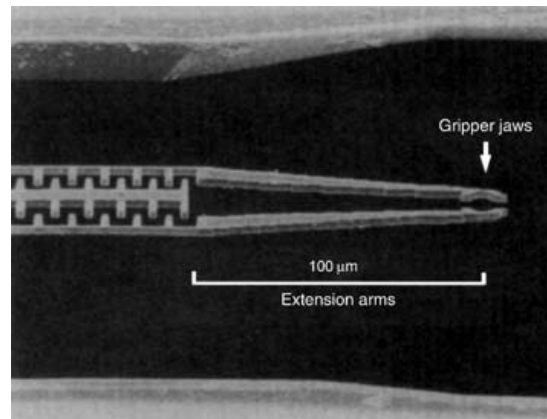


Figura 9.9 Primer plano de las tenazas de las pinzas y las estructuras de la extensión de los brazos.⁶⁷

Uno de los parámetros críticos es lograr actuadores con gran desplazamiento y gran capacidad de generación de fuerzas. Los actuadores térmicos son conocidos por su capacidad para generar grandes fuerzas. Un actuador térmico de un material único sería fácil de fabricar. Sin embargo, el desplazamiento debido a la expansión térmica de una viga simple es muy pequeño. Se utiliza para fabricar micro-pinzas a partir de níquel y poli-silicio técnicas de replicación y micro-moldeo, llamados HEXSIL,.

En el proceso de HEXSIL el molde está formado por un hueco profundo grabado en el substrato de silicio. Una capa de sacrificio de óxido se deposita en el molde de silicio para ser rellenado con poli-silicio. A continuación, la estructura de poli-silicio se libera del molde por el “etching” (remoción de material), después el molde puede ser reutilizado. Una ventaja de este proceso es la capacidad de hacer estructuras de poli-silicio de espesor de 100μm o más (estructuras cuasi-tridimensional).

⁶⁷ Tomado de: M. Gad-el-Hak, “MEMS: Applications”, Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2005.

La figura 9.10 muestra un primer plano del diseño de una micro-pinza HEXSIL. Esta estructura está formada por una gran viga resistiva calentada por la aplicación de la corriente, y posteriormente otras vigas en el sistema se enlazan para rotar y abrir la pinza. Cuando se ha enfriado, se produce la contracción del elemento térmico y se cierra la pinza.

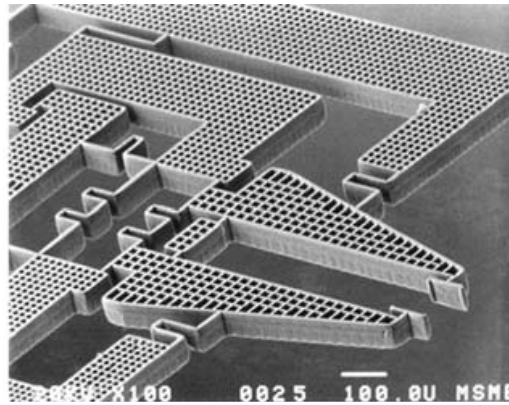


Figura 9.10 Primer plano de una micro-pinza HEXSIL⁶⁸

Los sistemas de apalancamiento a veces combinado con los engranajes para la transferencia de la fuerza son técnicas útiles para la obtención de grandes desplazamientos o fuerzas. Otra forma de lograr un efecto multiplicador es el uso inteligente de diseños geométricos para la expansión de un solo material. Uno de estos métodos es la poliamida en ranuras en V (PVG). El propósito de la micro-pinza PVG es la integración fácil con una plataforma micro-robótica con movilidad.

Varias micro-pinzas han sido fabricadas con la técnica LIGA. La razón para el uso de LIGA es conseguir estructuras cuasi-tridimensional similar a las pinzas hexil. El proceso LIGA también se ha utilizado para producir material individual en el plano de actuadores térmicos para aplicaciones de micro-posicionamiento [6].

Micro-pinzas biológicas basadas en la actuación eléctrica, térmica, magnética, o alto voltaje podrían fácilmente matar o destruir las muestras biológicas. Una alternativa a las pinzas calientes es el uso de la aleación con memoria de forma de actuadores (SMA). Las micro-pinzas basadas en SMA a menudo requieren temperaturas más bajas.

⁶⁸ Tomado de: M. Gad-el-Hak, "MEMS: Applications", Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2005.

En la figura 9.11 podemos observar como una micro-pinza sirve para manejar objetos delicados como la pata de un insecto en este ejemplo.

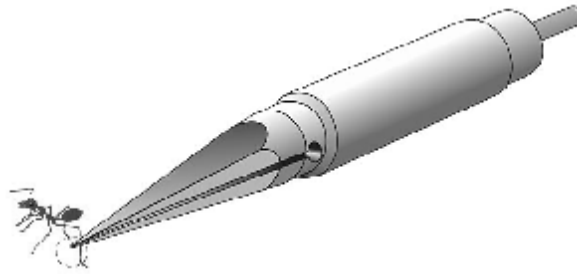


Figura 9.11 Utilidad de una micro-pinza⁶⁹

En el campo de la biotecnología, las micro-herramientas sirven para la manipulación de células individuales. En este tipo de aplicación, las micro-pinzas generalmente deben operar en un medio acuoso, y se necesita utilizar polímeros conductores para evitar cortocircuitos. Tales polímeros conductores, se someten a cambios de volumen durante la oxidación y reducción. Generalmente los polímeros electroactivos (EAP) son utilizados como material común en los brazos micro-robóticos para la manipulación de dispositivos de una sola célula.

Uno de los muchos experimentos realizados con los brazos del robot fabricado con los diversos micro-músculos se muestra en la figura 9.12. [6]

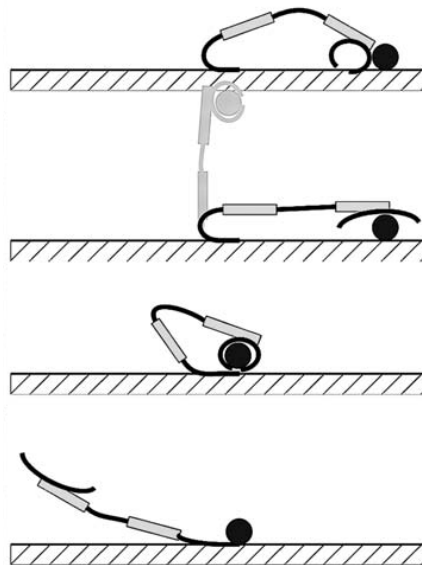


Figura 9.12 Brazo de robot fabricado con micro-músculos

⁶⁹ Tomado de: Kamrath & Weiss, "The Micro Tweezers", Germany. [Online] Disponible: http://www.kamrath-weiss.com/sonder/fotos/f_5-6ag.jpg

9.2.4.2. Micro-transportadores

Recientemente, se ha presentado una variedad de conceptos de MEMS para la realización de sistemas de locomoción micro-robóticos en forma de micro-transportadores se ha presentado. Los micro-transportadores se clasifican en dos grupos: los sistemas de contacto y aquellos sin contacto, dependiendo de si el transportador está en contacto con el objeto en movimiento. Además puede ser sincrónico o asincrónico, dependiendo de la forma que se manejan los actuadores. La figura 9.13 nos indica un sistema de transporte utilizados en la naturaleza para trasladar objetos. Los voladizos (pelo ciliar) son accionados por un cambio de fase determinada.

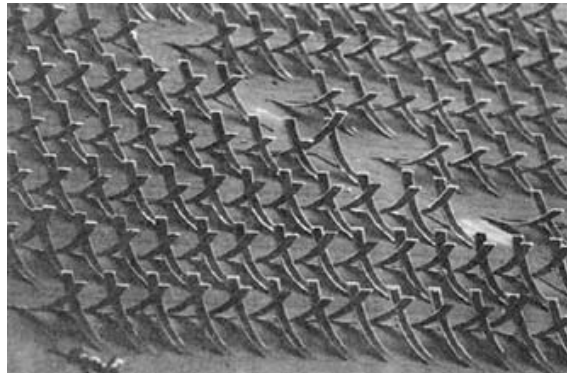


Figura 9.13 Principio del movimiento ciliar utiliza en la mayoría de los sistemas micro-robóticos basados en contacto⁷⁰

Los sistemas sin contacto se realizan utilizando las fuerzas neumática, electrostática o electromagnética para crear un amortiguador donde el transportador puede levitar. La levitación magnética se puede lograr mediante el uso de imanes permanentes, electroimanes, u organismos diamagnéticos (un superconductor). La principal ventaja de los sistemas sin contacto es la baja fricción. El inconveniente de estos sistemas es su alta sensibilidad al amortiguador (dependiente de la carga). También puede ser muy difícil de controlar. Además, este tipo de sistema de transporte a menudo tiene la capacidad de carga baja.

⁷⁰ Tomado de: M. Gad-el-Hak, "MEMS: Applications", Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2005.

Los sistemas donde los actuadores están en contacto con el objeto en movimiento se han realizado sobre la base de las matrices de las piernas movibles levantándose de la superficie de la oblea de silicio. Las piernas han sido accionados mediante el uso de diferentes principios. Tales como la actuación térmica, electrostática y magnética.

Los principios magnéticos y neumáticos de actuación de transporte sin contacto tienen la desventaja de requerir un motor magnético diseñado especialmente para esta aplicación. En tanto que con un sistema de contacto a partir de actuadores térmicos, es posible mover objetos de diversa índole. Sin embargo, el aumento de la temperatura de la pierna en contacto con el objeto puede ser una limitación en algunas aplicaciones. [6].

9.2.4.3. Micro-robots MEMS caminantes

El enfoque para el estudio de los Micro-robots MEMS caminantes son los sistemas en contacto. Estos sistemas, poseen dispositivos con piernas para caminar o saltar. Como se ilustra en la figura 9.14, la fuente de alimentación a través de cables puede influir en el rango de funcionamiento del robot. También la rigidez de los cables puede degradar la capacidad de control. Por otro lado, si se considera el medio de transmisión, la comunicación inalámbrica, ésta requiere electrónica compleja en el robot.

Muchos actuadores utilizados en la micro-robótica requieren alto consumo de energía, y la cantidad limitada de energía transmitida a través del medio inalámbrico es una gran limitación para posibles aplicaciones del robot autónomo. Para evitar la necesidad de cables de interconexión se han propuesto para los robots móviles, los diseños basados en las células solares, actuadores piezoeléctricos de bajo consumo de energía o actuadores de tornillo sin fin.

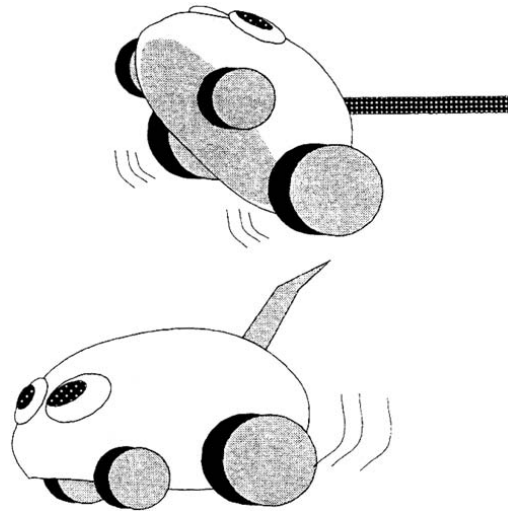
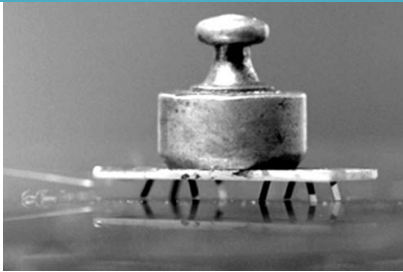
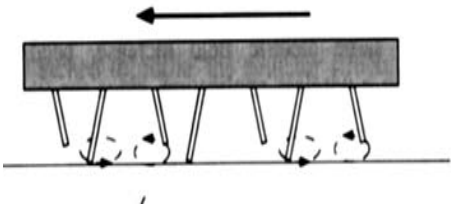


Figura 9.14 Influencia de los cables de energía en los micro-robots⁷¹

Algunos de los principios más viables para las plataformas MEMS caminantes se enumeran a continuación en la tabla 9.9:

FIGURA	PRINCIPIO	DESCRIPCIÓN
	<p>Movimiento ciliar</p>	<p>Utilizado por Ebefors (1999) para los robots de ocho patas</p>
	<p>Movimientos de pierna elípticos</p>	<p>Propuesto por Ruffieux y Rooij (1999) y Ruffieux (2000), el principio es adoptado del reino animal.</p>

⁷¹ Tomado de: M. Gad-el-Hak, "MEMS: Applications", Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2005.

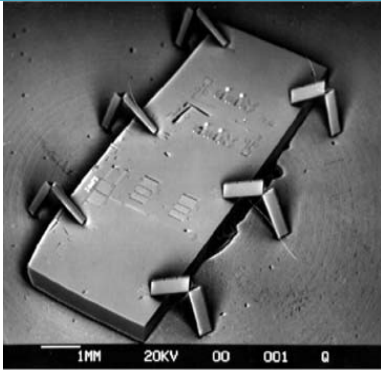
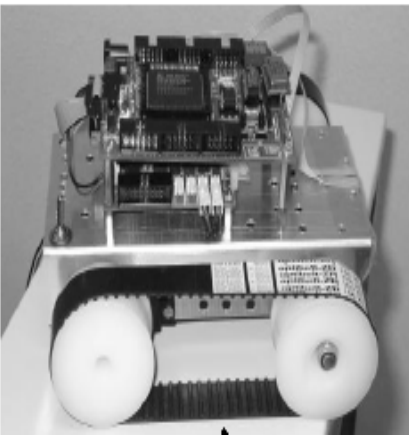
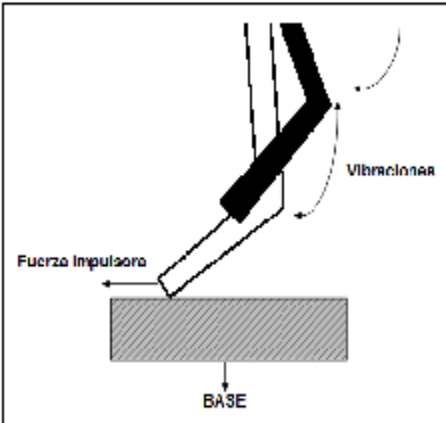
FIGURA	PRINCIPIO	DESCRIPCIÓN
	<p>Imitación de marcha de los insectos de seis patas</p>	<p>Similar a la caminata de un cangrejo ha sido propuesto por varios grupos de investigación.</p>
	<p>Oruga robots</p>	<p>Imitan a una oruga donde dichas técnicas se aprovechan de las fuerzas de fricción en vez de tratar de evitar.</p>
	<p>Piernas de silicio de película delgada con campos de vibración y resonancia y articulaciones de poliimida.</p>	<p>Han sido utilizados por Shimoyama</p>

Tabla 9.9 Plataformas MEMS para caminar

El principal problema asociado a la fabricación de robots de silicio es lograr la suficiente fuerza en las piernas movibles y en las articulaciones de rotación. Al momento se utilizan técnicas de micro-mecanizado de superficie dando lugar a la fabricación de las piernas. Para la marcha de micro-robots se utiliza la técnica de micro-bisagra para doblar la pierna fuera del plano. La estructura del robot sólo puede soportar una carga cuatro veces el peso muerto del robot. Eso no es

suficiente para obtener la caminata locomotora. Un aspecto crítico en el diseño de grandes sistemas distribuidos de micro-movimiento basado en arreglos de actuadores distribuidos es la necesidad del alto rendimiento en los actuadores.

La forma más sencilla para dirigir un micro-robot caminante es controlar la fase de las dos filas de los actuadores del robot. Al conducir hacia delante y atrás, hacia un lado y al otro hace que el robot cambie de posición. Otros enfoques para dirigir micro-robots a la izquierda y la derecha son:

- Energía: Mayor longitudes de movimiento por un lado puede ser producido por el aumento de la energía. Pero esto también producen mayores medidas de esta manera el robot puede caminar con una inclinación.
- Frecuencia: Aumentar el número de pasos de un lado del robot producen permite que este camine con una inclinación.
- Combinación de la frecuencia y la energía: Igualdad de longitudes de carrera, pero más rápido en un lado, permitiría suavizar los movimientos del robot.
- Permitirá obtener robots orientables caminantes el uso de grandes matrices de dos dimensiones con varias filas de patas orientadas en las direcciones x e y. [6].

9.2.5. Sistema multi-robot

En 1959 la Sociedad Americana de Física de Feynman, describe un campo nuevo y emocionante de la física llamado miniaturización de los sistemas. Estos sistemas permiten el uso de pequeñas máquinas para construir máquinas más pequeñas. Sin embargo, esto aún no se ha realizado en el campo de MEMS. En su lugar, se utiliza máquinas más grandes y más grandes para lograr la miniaturización física y el estudio a una escala muy pequeña. Sin embargo, a nivel de investigación existe el interés en las micro-fábricas.

La tecnología MEMS utiliza versiones en miniatura de las herramientas tradicionales típicas para el procesamiento como el taladrado, fresado, entre otros. Se podría utilizar micro-fábricas, donde un gran número de dispositivos micro-robóticos como transportadores y robots trabajen en paralelo para apoyar a las micro-herramientas con material.

Este tipo de sistema de multi-robots, ilustrado en la figura 9.15, introduce requisitos especiales para los micro-robots. Estos requisitos incluyen una fuente de energía inalámbrica y la comunicación inter-robot. [6]

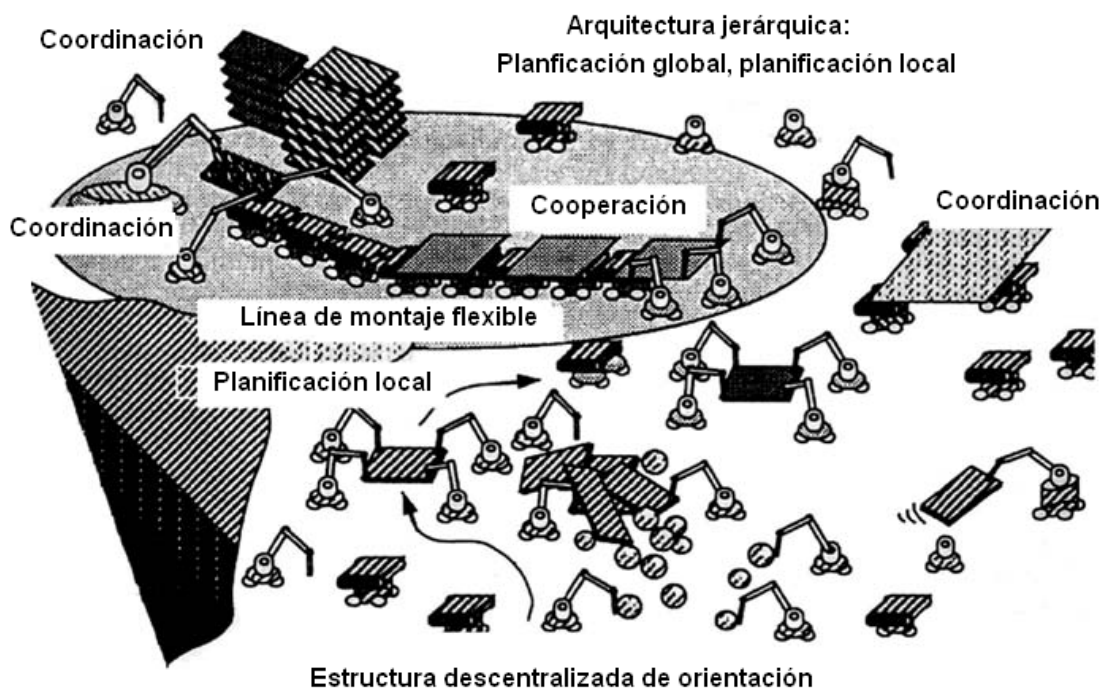


Figura 9.15 Concepto de sistema multi-micro-robot flexible descentralizado ⁷²

Durante la última década, se han hecho esfuerzos para desarrollar diversos conceptos de sistema multi-micro-robot, especialmente en Japón, también en Europa y EE.UU. Donde el término más utilizado es la fabricación de la "estación de escritorio" (Desktop Factories). La idea de este enfoque es permitir la producción de dispositivos pequeños. A menudo, otros factores como el ahorro de energía, el espacio y los recursos también se consideran importantes. De esta manera el proceso de fabricación podría ser más rentable para los microsistemas

⁷² Tomado de: M. Gad-el-Hak, "MEMS: Applications", Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2005.

de bajo volumen. Todavía es imposible predecir si estas técnicas serán competitivas con el estándar de producción por lotes de MEMS. Dos ventajas importantes del sistema multi-robot son la flexibilidad y la libertad geométrica.

La “Micro-factoría” y la “estación de escritorio automatizada con robots micro-manipulación”, propuesto por Fatikow se ilustra en la figura 9.16. La atención se centra en el montaje de diferentes tipos de micro-dispositivos, fabricados por lotes y técnicas de MEMS.

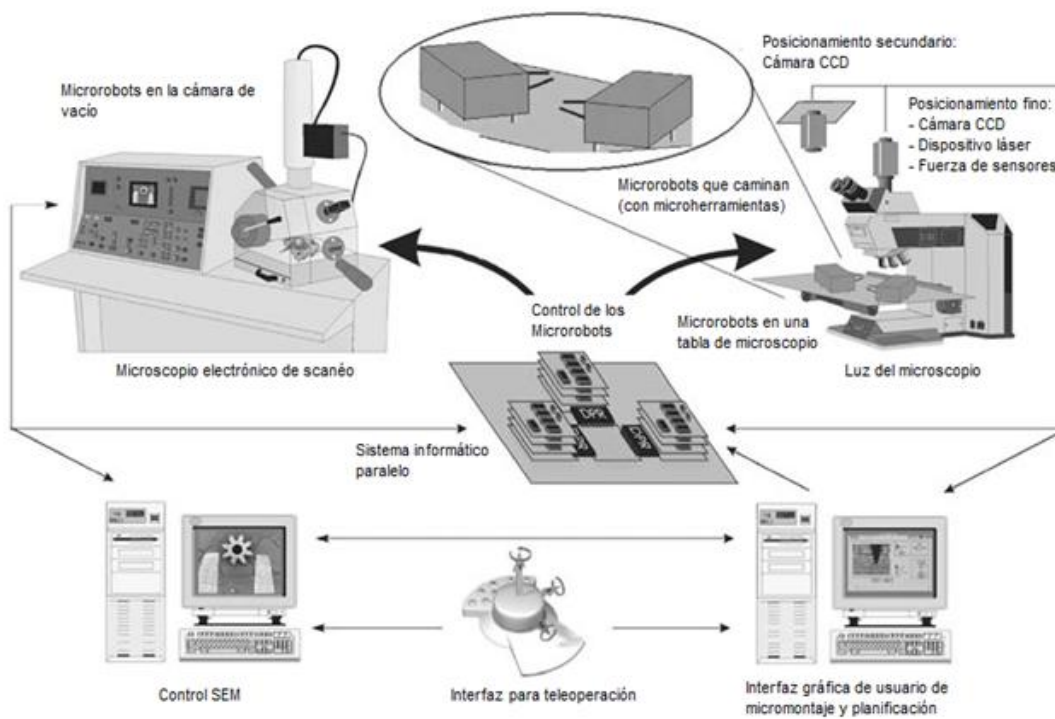


Figura 9.16 Concepto de la estación flexible de micro-montaje basados en micro-robots (FMMS)⁷³

En la actualidad, no hay fuentes de energía disponibles para alimentar un micro-robot totalmente autónomo. Algunos actuadores del robot, como el actuador poliamida y los térmicos, tienen el inconveniente de alto consumo de energía.

⁷³ Tomado de: M. Gad-el-Hak, “MEMS: Applications”, Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2005.

Varios grupos de investigación están trabajando en el desarrollo de fuentes de micro-energía como por ejemplo, micro-generadores varios elementos piro-eléctricos, baterías solares, pilas de combustible, energía, entre otros. Las baterías de bajo peso se han utilizado para micro-robots voladores. Aunque la vida útil de dichas baterías y los sistemas de convertidor DC-DC es corto. Las células solares hechas de Si-H para aplicaciones de micro-robot permitirán tener una tensión de aproximadamente 10V.

Además de los problemas asociados con las fuentes de energía, se requiere una mayor investigación sobre la transmisión inalámbrica de señales de dirección al micro-robot y sobre otros medios de comunicación entre los micro-robots. La comunicación se puede lograr mediante el uso de acústica, óptica, electromagnética, o la transmisión térmica de la señal de control del robot.

En la naturaleza, la hormiga crea un rastro de olor para guiar a las hormigas compañeros. Laboratorios Shimoyam (Universidad de Tokyo) ha estado trabajando en sistemas híbridos compuestos de partes mecánicas y los organismos vivos. Mediante el uso de "sensores de vida" en forma de antenas de insectos, fueron capaces de dirigir y controlar un robot móvil por la estimulación de feromonas. Yuichiro Aoyama (Miembro de Laboratorios Shimoyam) en 1997 presentó los micro-robots los cuales dejan una huella magnética para ser detectada por otros robots. La comunicación y la orientación del movimiento de estos micro-robots se ilustra en la figura 9.17. Estas huellas se desvanecen con el tiempo, siendo necesario utilizar varios robots en miniatura a la vez.

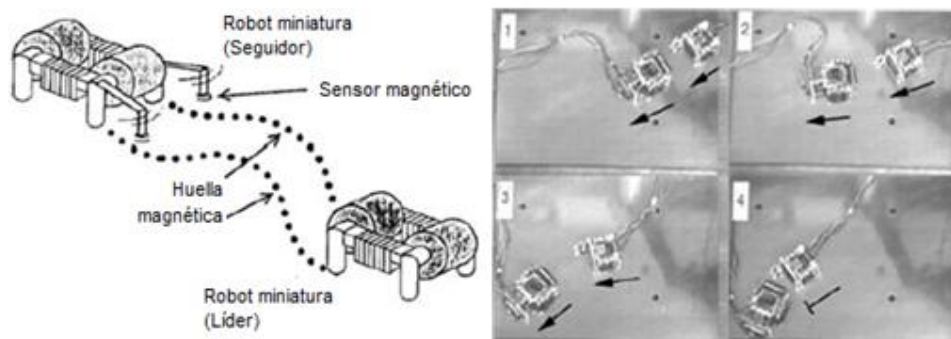


Figura 9.17 Comunicación entre robots miniatura

El gran desafío de todos los sistemas multi-robots es lograr una comunicación autónoma entre diferentes dispositivos micro-robóticos. Normalmente, las diversas soluciones de telemetría para la transferencia de energía inalámbrica también se proponen para la comunicación.

CAPÍTULO X

FUTURO DE LOS MEMS

Introducción: En este capítulo se explicarán los últimos avances de los MEMS, en los diferentes campos de la electrónica. Se estudiarán los nuevos materiales y procesos de fabricación de MEMS. Finalmente se realizará un análisis y proyección en el mercado de esta tecnología.

10.1. Nuevos materiales

La Tecnología de semiconductores ha experimentado un enorme avance, además las exigencias de las actuales aplicaciones en el campo de los MEMS, ha conllevado al descubrimiento de nuevos materiales. Tales como: polímeros con memoria de forma, materiales adhesivos, el diamante u otros compuestos basados en carbono y los materiales nano-cristalinos.

Los materiales con memoria de forma comparten una propiedad inusual: pueden ser comprimidos, retorcidos o doblados en numerosas configuraciones como se observa en la figura 10.1. Pero cuando son calentados por encima de cierta temperatura crítica retoman su forma original. Los polímeros con memoria de forma no son un invento reciente. Este material es más blando, tiene una consistencia parecida a la de la goma, y puede ser menos propenso a dañar los tejidos circundantes cuando se le use en dispositivos biomédicos.

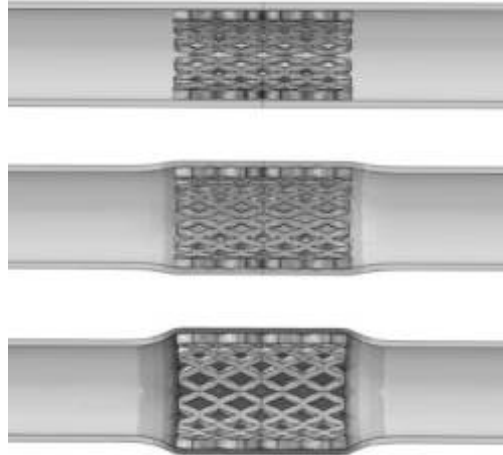


Figura 10.1 Estructuras con materiales con memoria de forma⁷⁴

Los nuevos materiales cerámicos poseen una serie de propiedades mejores en comparación con otros materiales. Tales como: gran dureza, resistencia a la abrasión y ante medios corrosivos y su aplicabilidad a altas temperaturas.

Además, el diamante y los compuestos de carbono son materiales ideales para MEMS. Debido al módulo elástico alto, dureza mecánica, bajo coeficiente de expansión térmico combinado con bajos coeficientes de fricción. El desarrollo de estos dispositivos han sido un gran reto debido a la dificultad en la fabricación de estructuras de diamante y carbono. En la figura 10.2 se muestran capas finas de este material.

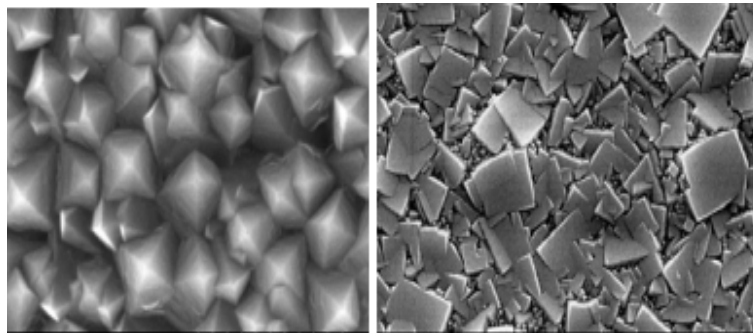


Figura 10.2 Capas finas de diamante⁷⁵

⁷⁴ Tomado de: L. S. Arias Maya, L. Vanegas Useche, "Materiales Compuestos Inteligentes", 2004. [Online]. Disponible: <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/849/84911685026.pdf>.

Se puede también nombrar al nitruro de galio, el cual ha permitido la miniaturización a gran escala en el desarrollo de dispositivos MEMS de RF utilizados en los sistemas de comunicaciones de nueva generación. Por ejemplo se tiene los dispositivos láser para suministrar la luz necesaria para las transmisiones mono-modo. Los dispositivos fabricados en base al arseniuro de galio están siendo sustituidos por los de nitruro de galio, los cuales cumple con las nuevas necesidades en el campo de las Microondas.

Los nuevos descubrimientos en el campo de la física de los materiales servirán de incentivo a los investigadores para continuar sus esfuerzos por lograr mayor miniaturización con alto rendimiento y elevado procesamiento de potencia.

10.2. Nuevas tendencias de fabricación

10.2.1. Mecanizado por haz de láser (LBM)

El uso de la tecnología láser (LBM) en el mecanizado de materiales para la fabricación de micro-productos ha sido estudiada durante la última década y se presenta como una tecnología ampliamente insertada en el mundo industrial.

Las herramientas basadas en el empleo del láser proporcionan alternativas de fabricación interesantes a escala microscópica. En particular, la posibilidad de utilizar el láser como herramienta de precisión ofrece una alternativa ventajosa en la realización de procesos de micro-fabricación. Tales como corte, soldadura, taladrado, marcado, procesos tradicionales entre las aplicaciones industriales de los láseres de potencia.

La precisión en el dominio micrométrico debe ir acompañada de unas reducidas cargas térmicas y mecánicas con relación a los procesos tradicionales de fabricación de componentes de igual tipo a mayor escala. La micro-fabricación con láser representa un desafío para los ingenieros mecánicos, los especialistas en tecnología láser y los expertos en ciencia e ingeniería de materiales. Se

⁷⁵ L. S. Arias Maya, L. Vanegas Useche, "Materiales Compuestos Inteligentes", 2004. [Online]. Disponible: <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/849/84911685026.pdf>.

emplean en la producción de micro-productos los metales, cerámicas, vidrio, polímeros y semiconductores.

En la figura 10.3 se observa un micro-producto realizado con este tipo de mecanizado

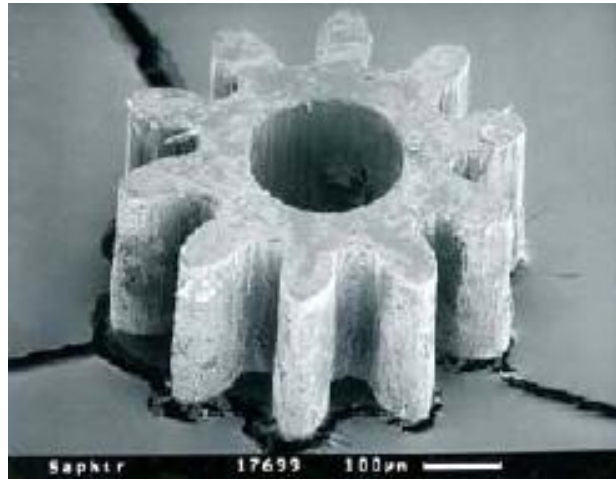


Figura 10.3 Micro-mecanizado de zafiro mediante LBM⁷⁶

El desarrollo de las aplicaciones industriales de los láseres en tareas de micro-mecanizado, requieren de longitudes de onda cada vez más cortas mientras mayor es el grado de miniaturización. La utilización de longitudes de onda cortas ofrece ventajas importantes en el micro-mecanizado de ciertos materiales [8].

10.2.2. Mecanizado por micro-electroerosión (MEDM)

El mecanizado por electroerosión es una tecnología de fabricación relativamente lenta, empleado en geometrías no convencionales de metales duros y frágiles. El material se elimina al hacer saltar chispas eléctricas a frecuencias elevadas fundiéndose y evaporándose parcialmente el material de la pieza. Al emitir pulsos de elevado voltaje entre la herramienta (cátodo) y la pieza (ánodo), siendo en ocasiones invertida la polaridad para logran mejores acabados. Tanto la

⁷⁶ I. Gallego, "Microfacturing: Microtecnologías: Pasado, Presente y Futuro," Portal del proyecto MicroManufacturing cofinanciado por el Ministerio de Ciencia e Innovación y el FEDER, 2009. [Online]. Disponible: http://www.micromanufacturing.net/didactico/Desarrollo/microtechnologies_es/1-7-clasificacion/1-7-2-energy-assisted-processes/1-7-2-5-plasma-beam-machining-pbm [Accesado: Diciembre 20, 2010]

Figura 10.4 Varilla de diámetro 12 [μm] mecanizado mediante WEDG⁷⁷

10.2.3. Mecanizado por haz de electrones (EBM)

La eliminación de material mediante haz de electrones es otra de las tecnologías en auge. Este método emplea un haz focalizado de alta velocidad de electrones, el cual funde y vaporiza el material.

La tecnología EBM se emplea para la escritura sobre una célula electro-sensible o para crear variaciones superficiales del material. Las técnicas básicas están muy desarrolladas para la producción de máscaras de los circuitos integrados y especialmente para la fabricación de estructuras superficiales. El diámetro transversal típico del haz de electrones está comprendido entre 10 y 200 [μm] para el punto de focalización sobre la pieza [8].

10.2.4. Mecanizado por haz de iones focalizados (FIB)

La tecnología FIB se clasifica como una tecnología puramente mecánica, en la cual la punta de la broca se reemplaza por un haz de iones altamente energético. Se emplea una fuente líquida de iones metálicos, por ejemplo galio, obteniendo diámetros de haz por debajo de la micra en la zona focalizada. El mecanizado por haz de iones es una tecnología idónea para el mecanizado de estructuras de dimensiones muy reducidas, gracias al diámetro de haz de 10-50 [nm]. Un ejemplo de esta estructura está en la figura 10.5 Los iones son dirigidos y focalizados desde una fuente de plasma sobre la superficie donde se elimina la materia [8].

⁷⁷ I. Gallego, "Microfacturing: Microtecnologías: Pasado, Presente y Futuro," Portal del proyecto MicroManufacturing cofinanciado por el Ministerio de Ciencia e Innovación y el FEDER, 2009. [Online]. Disponible: http://www.micromanufacturing.net/didactico/Desarrollo/microtechnologies_es/1-7-clasificacion/1-7-2-energy-assisted-processes/1-7-2-5-plasma-beam-machining-pbm [Accesado: Diciembre 20, 2010]

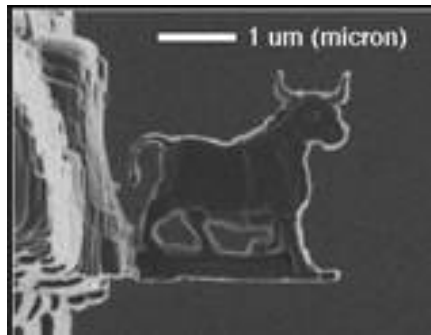


Figura 10.5 Toro mecanizado en diamante por medio de FIB⁷⁸

10.2.5. Micro-maquinado de Alta relación de aspecto (HAR)

La nueva tecnología de grabado profundo por iones reactivos ha hecho posible combinar el buen desempeño del micro-maquinado volumétrico con estructuras en peine. Si bien es común en el micro-maquinado superficial tener espesores de capas estructurales en el rango de 2 [μm], en el micro-maquinado HAR el espesor es de 10 a 100 [μm]. Los materiales comúnmente utilizados son silicio poli-cristalino denso, conocido como epi-poly, y las obleas de silicio sobre aislante (SOI) [8].

10.3. Nuevas líneas tecnológicas

10.3.1. MEMS “novedosos”

10.3.1.1. El violín más pequeño del mundo

En la Universidad de Twente (Países Bajos) se ha fabricado el violín más pequeño del mundo, funciona con tecnología MEMS. El tamaño de la cuerdas miden la décima parte de un cabello humano. El invento está compuesto por seis resonadores microscópicos, uno por nota musical, se alojan en un microchip y permiten generar melodías completas en MIDI. Para poder escuchar sus notas es necesario amplificar el resultado 10.000 veces porque de esa manera será audible a través de unos altavoces normales [80]. En la figura 10.6 se observa el dispositivo y sus elementos.

⁷⁸ I. Gallego, “Microfacturing: Microtecnologías: Pasado, Presente y Futuro,” Portal del proyecto MicroManufacturing cofinanciado por el Ministerio de Ciencia e Innovación y el FEDER, 2009. [Online]. Disponible: http://www.micromanufacturing.net/didactico/Desarrollo/microtechnologies_es/1-7-clasificacion/1-7-2-energy-assisted-processes/1-7-2-5-plasma-beam-machining-pbm [Accesado: Diciembre 20, 2010]

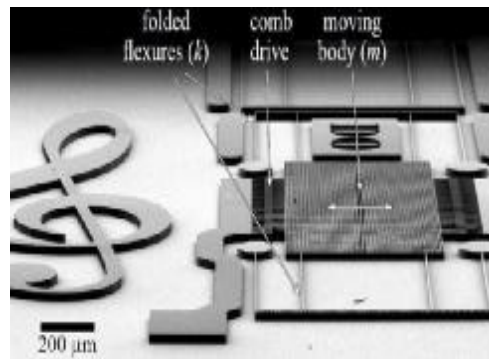


Figura 10.6 Violín con tecnología MEMS⁷⁹

10.3.1.2. Libélula artificial vuela mediante nano-músculos

La empresa “Silicon Machinery (SilMach)”, del laboratorio Femto-st de Besançon, en Francia, ha puesto en marcha un proyecto cuyo objetivo es construir y hacer volar una diminuta máquina similar a una libélula. Este robot en miniatura batirá sus cuatro alas gracias a un innovador sistema como se observa en la figura 10.7.



Figura 10.7 Libélula artificial⁸⁰

Las características de la libélula se presentan en la tabla 10.1:

CARACTERÍSTICAS	PESO
-----------------	------

⁷⁹ E. Henriquez, “El violín más pequeño del mundo funciona con MEMS”. [Online]. Disponible: <http://es.engadget.com/2010/10/04/video-el-violin-mas-pequeno-del-mundo-funciona-con-mems/>. [Accesado: Diciembre 27, 2010]

⁸⁰ Varios autores, “Tendencias tecnológicas MEMS”. [Online]. Disponible: <http://www.scribd.com/doc/23346843/TENDENCIAS-TECNOLOGICAS-MEMS> [Accesado: Diciembre 23, 2010]

Tamaño	6 [cm]
Material	Silicio
Peso total	120 [mg]
Peso estructura mecánica pasiva	18 [mg]
Peso del sistema de propulsión del batimiento de alas	2 [mg]
Peso micro-bacterias MEMS colocada en las alas, a modo de nano-músculos.	100 [mg]

Tabla 10.1 Características de la libélula artificial

El proyecto de la libélula micro-mecánica de SilMach propone distribuir la energía necesaria para el vuelo por toda la superficie de las alas, en lugar de emplear un único motor situado en la base del diminuto robot. El sistema mecánico distribuido integrará 180.000 nano-músculos artificiales de 9 nanogramos a situarse en las alas. Este dispositivo permitirá desarrollar una potencia mecánica útil de 80 [mW].

El funcionamiento es sencillo: los músculos situados en las láminas elásticas de las alas y en sus extremidades se inclinan, se contraen y se estiran en función de la tensión eléctrica (de entre 100 y 150 [V]). Desde sus puntos de anclaje se genera la flexión, a varias decenas de pulsaciones por segundo.

Uno de los desafíos tecnológicos pendientes es hallar la micro-fuente energética necesaria para hacer volar a la libélula. Un insecto volador quema sus grasas animales, dando una capacidad energética cercana a los 50.000 [J/g]. Las mejores baterías de litio actuales no producen más de 360 [J/g]. El desarrollo de una batería en miniatura y ultraligera es una tarea difícil.

En referencia al peso de los motores, en la actualidad el motor electromagnético más pequeño comercializado pesa 91 [mg], y aunque cuente con una transmisión de potencia auxiliar, no desarrolla más de 0,5 [W/g]. Por lo tanto, llevará cierto tiempo poder ver volar a la libélula electrónica.

Además de esta fuente de energía miniaturizada, este pequeño robot deberá integrar sensores, emisores de información y un cerebro para coordinar sus movimientos, antes de estar operativa.

Una aplicación de este dispositivo por parte del ejército francés sería sobrevolar territorios sin ser percibida, para transmitir información estratégica a los sistemas de defensa del país. En realidad se trata de un minúsculo avión no tripulado, es insensible a la contaminación y a las armas convencionales, aunque se le podría destruir de un manotazo [81].

10.3.1.3. Enjambres de insectos-robots sustituirán a los aviones de reconocimiento no tripulados

Los actuales aviones de reconocimiento no tripulados, obtienen información más rápida y económica de los satélites, serán sustituidos dentro de 10 o 15 años por enjambres de miles de robots. Estos dispositivos imitan el comportamiento de los insectos gracias a un sistema de inteligencia colectiva en cuyo desarrollo trabaja el ejército australiano.

Los vehículos aéreos no tripulados han adquirido creciente importancia debido al desarrollo de la tecnología. Permite recopilar información crítica de una forma más rápida y económica. Estos aparatos reducen de horas a segundos el tiempo necesario para identificar un objetivo y la información obtenida es de mayor precisión. Además su sistema de propulsión es económico.

El ejército australiano pretende perfeccionar la capacidad de estos aparatos posibilitando la asignación de una misión a un grupo de unidades, y la misma sea perfectamente coordinada entre ellos para optimizar los resultados. El medio de conseguirlo es fabricar pequeños robots cuyo comportamiento se inspira en el funcionamiento de los enjambres de insectos. También manifiestan una gran capacidad de adaptación y versatilidad en la naturaleza.

El funcionamiento coordinado de estos enjambres de robots no tripulados se consigue con la ayuda de algoritmos. Permiten desarrollar una red inteligente para

la comunicación durante la misión. Un enjambre se compone de miles de zánganos, de micro-robots los cuales caminan, suben cuevas, vuelan y navegan. Cada una de estas unidades costaría 14.000 dólares y estaría equipada con armas específicamente diseñadas para estos tamaños [81].

10.3.1.4. Robot-colibrí capaz de volar batiendo sus alas

Investigadores de la Universidad de Toronto han conseguido fabricar un robot, el cual vuela por el movimiento de sus alas. Constituye una poderosa herramienta para la exploración espacial, el espionaje y el rescate de personas en caso de tragedia. Es un robot colibrí, capaz de volar batiendo sus alas y de revolotear en círculos por espacio de diez minutos. El robot se llama Mentor y, como en el caso del colibrí, el batir de sus alas produce una especie de tornado. Se orienta por control remoto, es un MAV (Micro-Air Vehicles) y consigue un antiguo sueño de la ingeniería aeronáutica: un aparato vuela por el movimiento mecánico de las alas como se observa en la figura 10.8.

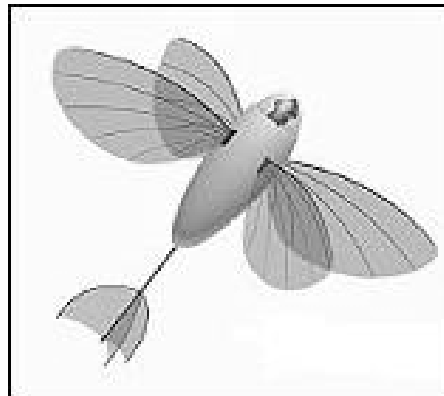


Figura 10.8 Robot colibrí⁸¹

Aunque no es la primera vez, la ingeniería consigue robots voladores con la finalidad de revolotear estable y horizontalmente. Mentor supera a sus antecesores por la nueva tecnología energética incorporada, le permite una autonomía de vuelo de 10 minutos.

⁸¹ Varios autores, "Tendencias tecnológicas MEMS". [Online]. Disponible:<http://www.scribd.com/doc/23346843/TENDENCIAS-TECNOLOGICAS-MEMS> [Accesado: Diciembre 23, 2010]

Las investigaciones sobre estos insectos robotizados interesan particularmente a la Nasa y al Pentágono. Estos micro-insectos están financiados con la finalidad de obtener sofisticados mecanismos de exploración espacial o de espionaje. El rescate de personas atrapadas en escombros es otra de las utilidades de estos robots. Por su parte, la Nasa necesita también de estos ingenios para la exploración de otros planetas, debido a su reducido tamaño y a la potencial capacidad de obtener la misma información comparada con un robot de mayor tamaño, más pesado y costoso de trasladar a distancias estelares. [81]

10.3.2. Oportunidades futuras de la industria automotriz

La aplicación de los MEMS en la industria automotriz comenzó con el sensor de presión del maníful a mediados de los 80s. La producción en masa de este dispositivo sólo era comparada con el sensor de presión sanguínea y la cabeza de impresión de inyección de tinta. En los 90s comenzó la producción en masa de acelerómetros para bolsas de aire (Analog Devices y Motorola).

Las oportunidades futuras de los sensores para esta área se muestran a continuación en la figura 10.9

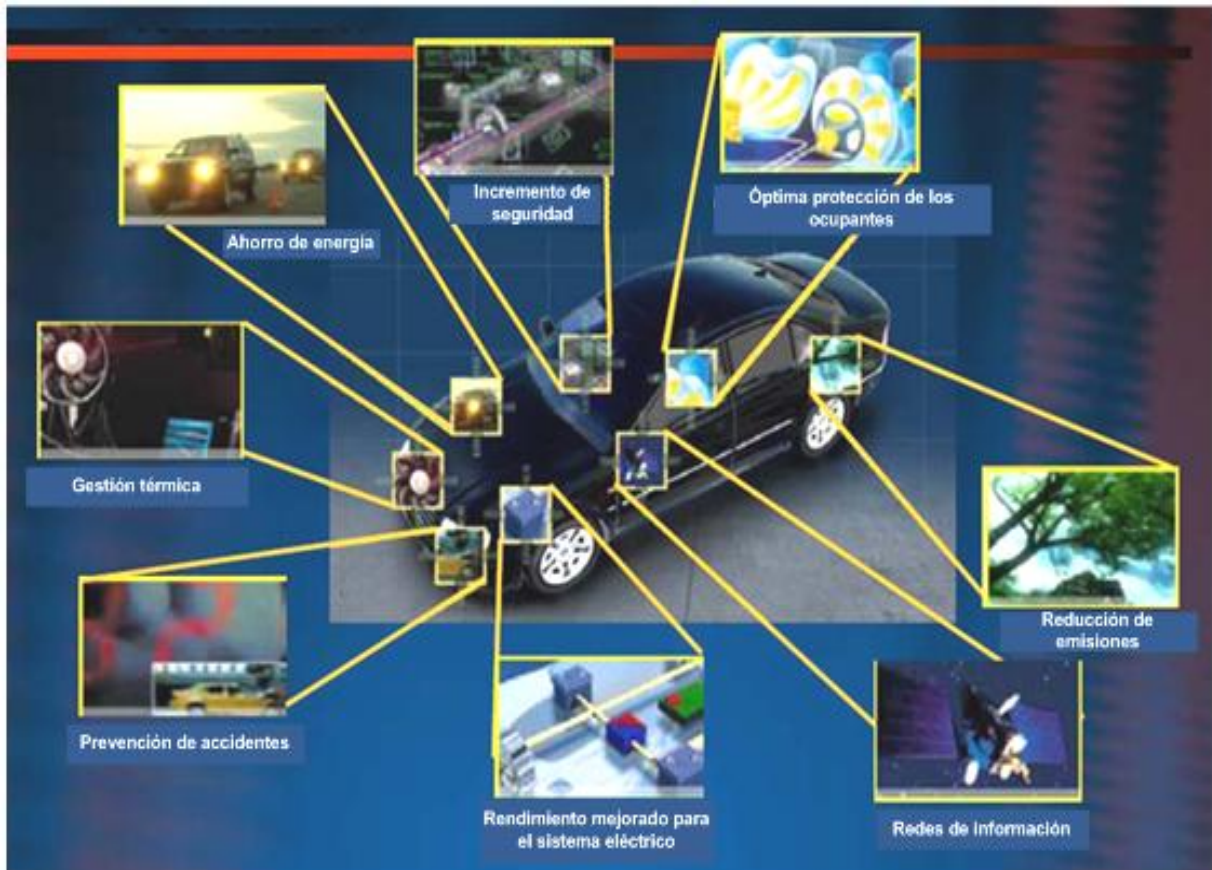


Figura 10.9 Futuro de las MEMS en la industria automotriz⁸²

Como aplicaciones futuras en esta industria se tienen:

- Razón de cambio angular
- Presión de los neumáticos
- Velocidad de las ruedas
- Frenos Activos (presión)
- Presión de vapor de gasolina (presión)
- Línea de combustible (presión)
- Posición del árbol de levas
- Transmisión electrónica
- Ocupación de asientos de pasajeros
- Sensores biométricos

⁸²Varios autores, "Aplicaciones industriales de MEMS (Industria Automotriz)". [Online]. Disponible: <http://www.simet.gob.mx/automotriz/ags/presentaciones/Bloque%202/2.3%20Aplicaciones%20industriales.pdf>. [Accesado: Diciembre 28, 2010]

La necesidad de un mejor rendimiento en la industria automotriz, propicia un mejor rendimiento, una mayor sensibilidad y menor consumo de energía. Estas características se han conseguido con la aplicación de esta tecnología, haciendo posible el crecimiento en los mercados de sensores MEMS [82].

10.3.3. PCB-MEMS

La evolución electrónica a lo largo de la revolución tecnológica industrial ha dado paso a una sub-categoría de aplicación sectorial denominada PCB-MEMS. A continuación se analizará el uso de algunos materiales empleados en la tecnología de circuitos impresos utilizados para la fabricación de microsistemas. Además algunas de las ventajas del proceso de fabricación de PCB más económicos en comparación con la tecnología convencional basada en silicio.

Para la producción de los microsistemas, los materiales más usados como sustratos son:

- El FR-4: Substancia conformada por fibra de vidrio e impregnada con una resina epóxica resistente a las llamas
- Teflón: Especialmente aquellos pertenecientes a los grupos GT y GTX
- Poliamida
- Poliestireno
- Poliestireno entrecruzado

La clase de PCB a obtenerse como resultado del uso de los materiales antes mencionados, son llamadas circuitos flexibles ó rígidos-flexibles. Aunque son complicados para fabricarlos presentan múltiples ventajas debido a su capacidad flexible, pueden ahorrar espacio en los mismos circuitos impresos como es el caso de las cámaras o audífonos. Algunas ventajas de los PCB MEMS son:

- Simplicidad en la elaboración de PCBs y de manera más barata a comparación con la tecnología con silicio.
- Reducción en el tiempo de prototipado.
- Total integración de componentes electrónicos y fluidos.
- Incorporación de dispositivos monolíticos, capaces de analizar y controlar los fluidos, para aplicaciones biológicas, médicas o químicas.

El proceso de fabricación de los PCB MEMS, se explica a continuación en la tabla 10.2:

PASOS	DESCRIPCIÓN
1	Se requiere de un sustrato de partida, en este caso sustrato de FR-4 con lámina de cobre de 32, 64 o 128 [μm]
2	El cobre eliminado químicamente formará los bordes laterales del canal fluídico.
3	Con otra lámina se cierra el canal verticalmente
4	Se utiliza una técnica adhesiva especial, estas pueden ser: <ul style="list-style-type: none"> ü Deposición de epoxis ü Soldado
5	Se realiza el acomodo de las capas a manera de un sándwich. Con varias capas tendremos gran variedad de estructuras.

Tabla 10.2 Proceso de fabricación PCB MEMS

En la figura 10.10 se observa el resultado de este proceso:

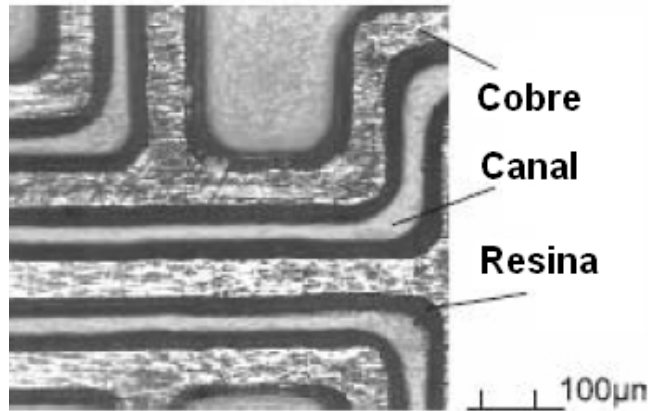


Figura 10.10 Espesor inicial de la resina ~4 [μm]⁸³

En la imagen anterior se describe la estructura de los PCBs MEMS. Se identifica la presencia de cobre, porque este metal es multi-funcional al permitir realizar cavidades para fluidos. Además da paso a la conductividad de las señales eléctricas, al calentamiento en corrientes elevadas y otros factores como la resistencia eléctrica y capacitancia. Así mismo con este método se logra un amplio espectro de aplicaciones como calentadores o sensores de temperatura, detectores de burbujas, sensores de presión capacitivos, microbombas y válvulas eléctricamente controladas. En la figura 10.11 se observa un ejemplo de una válvula eléctricamente controlada, la cual utiliza una estructura PCB [83].

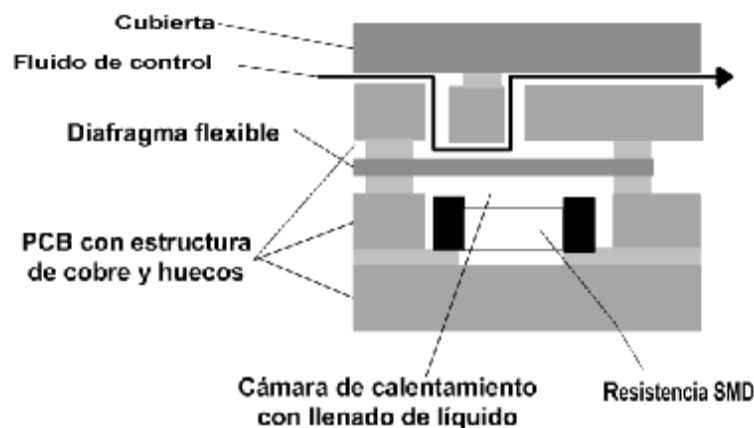


Figura 10.11 Válvula eléctricamente controlada

⁸³ Staff, "PCB-MEMS". [Online]. Disponible: http://electronicsonline.com/noticias/notas.php?id=A5100_0_1_0_C&page=7274. [Accesado: Diciembre 23, 2010]

<http://electronicsonline.com/noticias/>

10.3.4. Teléfonos móviles

La tecnología MEMS está ayudando a introducir nuevas características y servicios de valor agregado en los teléfonos móviles. Ante el desarrollo de este campo existen varias razones principales para integrar MEMS:

- Se requiere sensibilidad para detectar cambios en el mundo externo: uso de acelerómetros, giroscopios (para añadir nuevas capacidades de detección de movimientos) y autofocus para captura de imagen.
- Se necesita ampliar la vida útil del teléfono móvil: (micro-célula de combustible para sustituir baterías)
- Se requiere más integración: (módulo de RF con dispositivos MEMS)
- Mayor definición y realce: (nueva pantalla capaz de mostrar vídeo)
- Necesidad de añadir nuevas funciones: (GPS, biometría, identificación)
- Versatilidad y calidad de las funciones integradas en los teléfonos móviles.

El éxito de los “smartphones” está dando lugar a una cantidad creciente de MEMS en los teléfonos móviles para ofrecer nuevas características y servicios a los usuarios finales. De esta manera reduce los costos mediante una mayor integración y mejora el rendimiento del hardware [84]. Por ejemplo, filtros de RF y los micrófonos de silicio se han integrado en nuestros teléfonos móviles desde el año 2002. Recientemente, los acelerómetros MEMS se han establecido como una característica de muchos teléfonos inteligentes con funciones especiales. Y otros como los sensores de imagen CMOS, han experimentado un gran éxito en los últimos años, estos dispositivos se muestran en la figura 10.12

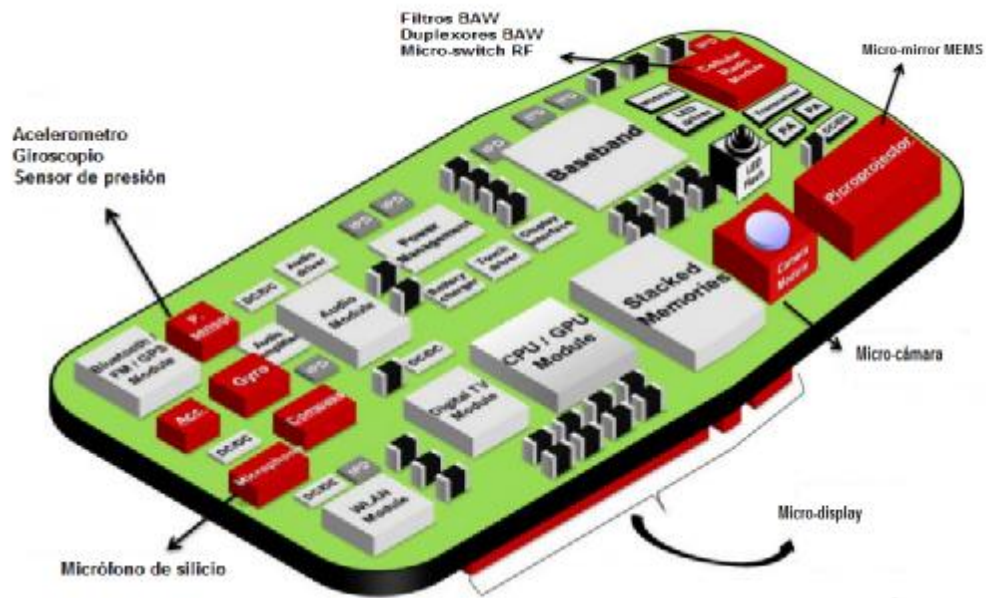


Figura 10.12 Dispositivos MEMS en la telefonía móvil ⁸⁴

El mercado de la telefonía móvil está cambiando muy rápidamente, en el 2011 nos encontramos en un punto de inflexión en la historia de MEMS y sensores para teléfonos móviles. El mercado experimentará un crecimiento de \$ 3.55B billones en 2009 a \$ 7.91billones de dólares en el 2015.

10.3.5. Bio-MEMS

Uno de los campos de desarrollo actual es el relacionado con variables biológicas (BioMEMS). En esta línea se identifican los sistemas para la creación de nuevos productos farmacéuticos junto con el suministro de los mismos de forma sistemática a diversas zonas del cuerpo. En el diagnóstico temprano de las enfermedades brindando al paciente confiabilidad en cada prueba para una oportuna respuesta ante una enfermedad, y el tratamiento y control específico de las diferentes patologías. Dentro de los retos de estas aplicaciones se encuentran las mejoras en la interfaz entre los medios biológicos (tejidos, células y sangre) y los sensores. Así como el mejoramiento de la extracción y medición de datos en proteínas, cadenas de ADN y demás estructuras biológicas. Esta tecnología

⁸⁴ Varios Autores, "El Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) Market in Mobile Phones". [Online]. Disponible: <http://www.reportlinker.com/p0240714/Micro-Electro-Mechanical-Systems-MEMS-Market-in-Mobile-Phones.html> # izzz1DJLuKyjU. [Accesado: Diciembre 23, 2010]

promete ser una solución vital y radical, brindando la esperanza de mantener una mejor calidad de vida y bienestar a la sociedad.

Los Biomems permiten el desarrollo de herramientas para diagnosticar, prevenir y tratar enfermedades. Están compuestos por sensores y actuadores en micro-escala, los cuales utilizan la micro-fluidica, la micro-óptica, junto con los sistemas de computo, comunicación y de control. De esta manera sirven de apoyo en la realización de funciones terapéuticas y en el diagnóstico médico. Por medio de los actuadores se realiza el control del entorno, con el fin de obtener el resultado deseado del dispositivo. A continuación se mencionan algunas áreas industriales donde están inmersos los MEMS:

- Ciencias forense (análisis de ADN)
- Diagnósticos clínicos (medida de glucosa en sangre)
- Administración de medicamentos (insulina o drogas)
- Control de calidad (análisis de aguas)

La tecnología MEMS puede ser ocupada para atender diversos servicios en la industria clínica, como se observa en la figura 10.13:

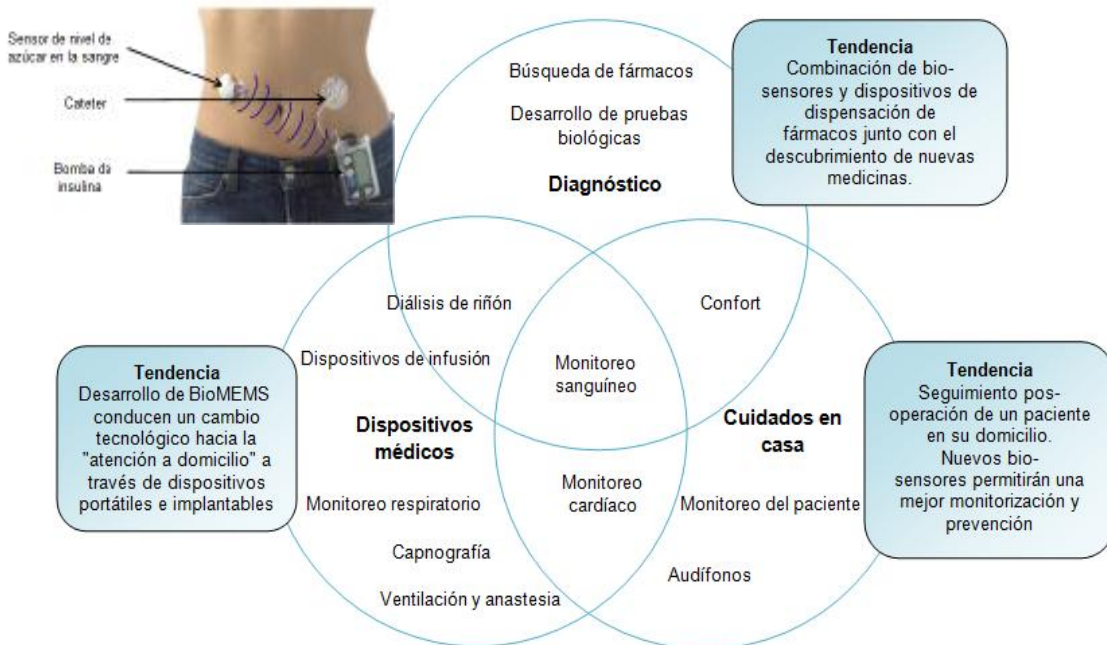


Figura 10.13 Tendencia de mercado para biomems

El interés en el desarrollo de estos dispositivos radica en [85]:

- Su tiempo de respuesta corto.
- Versatilidad: se pueden incorporar dispositivos ópticos, sustancias químicas o eléctricas dependiendo de la aplicación.
- Una vez diseñados se pueden fabricar en serie.

Los bioMEMS en aplicaciones médicas y biológicas representan un mercado innovador y fascinante pues prometen mejorar la exploración, monitoreo y control del estado de salud de una persona. En la tabla 10.3 se nombran algunas aplicaciones de bajo costo y con menores riesgos al momento de introducir estos dispositivos en el paciente. De esta manera se busca eliminar la necesidad de cirugías riesgosas o de tratamientos farmacéuticos con efectos negativos para el organismo [86].

APLICACIÓN	DESCRIPCIÓN
<p data-bbox="479 1014 703 1045">Biomems retina</p> 	<p data-bbox="927 1163 1377 1247">Mejorar la visión al implantar un microchip en la sub-retina del ojo.</p>
<p data-bbox="537 1461 643 1493">“Stent”</p>  <p data-bbox="602 1535 797 1581">Stent de malla metálica recubre el vaso coronario</p>	<p data-bbox="967 1593 1338 1677">Permiten reparar diferentes conductos en el organismo.</p>

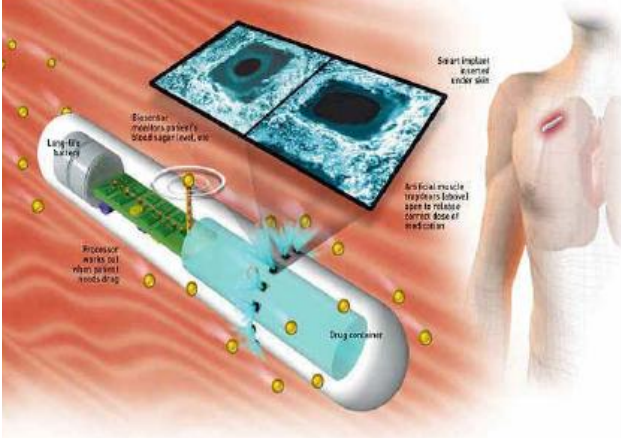
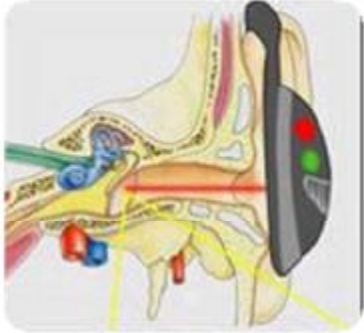
APLICACIÓN	DESCRIPCIÓN
<p style="text-align: center;">“Drug delivery”</p> 	<p>Suministro de medicamentos en el lugar y momento indicados.</p> <p>Este dispositivo debe tener elementos para el almacenamiento del medicamento</p>
<p style="text-align: center;">Micro-laser sanguíneo</p> 	<p>Sistema no-invasivo el cual se conecta al torrente sanguíneo del astronauta para determinar su estado de salud.</p>

Tabla 10.3 Aplicaciones BioMEMS

10.4. Análisis y proyección de mercado

Muchos mercados emergentes prometen para los dispositivos MEMS una larga vida de ingresos financieros para las compañías desarrolladoras debido al respaldo de la industria de los circuitos integrados y la infraestructura tecnológica.

En la actualidad existen muchos factores técnicos y comerciales determinantes para la fabricación de MEMS. Por citar algunos ejemplos se mencionando los siguientes:

- Excelentes propiedades mecánicas, debido a la estructura cristalina pura, con un contenido de silicio de 99.99%, el material no presente fatiga o histéresis mecánica. Siendo el silicio casi perfecto como material base en las aplicaciones para sensores.
- Software disponible para poder simular y diseñar estos dispositivos para futuras aplicaciones.
- Existencia de equipo sofisticado para el análisis y diagnóstico de estos dispositivos.

Otro aspecto de los MEMS es su estrecha relación con la nanotecnología. La cual recibe un gran nivel de recursos monetarios a nivel gubernamental y de forma mundial. Además genera un mercado comercial a futuro muy vasto tanto para sectores mercantes y de defensa militar. Mientras se descubran más áreas de aplicación para estos componentes, la tecnología MEMS nos va a permitir el desarrollo de productos inteligentes a través de la argumentación del uso de habilidades computacionales. Estos dispositivos usan las propiedades de control y percepción de micro-sensores y micro-actuadores.

Mientras el tiempo avanza, las necesidades humanas por desarrollar sistemas permiten tener dispositivos con menor espacio físico. La tendencia es buscar la forma más simple para realizar actividades complejas. Sin duda alguna estos elementos conforman un amplio panorama de trabajo y desarrollo. Con la siguiente gráfica estadísticas de la figura 10.14 se mostrará las áreas de aplicación de los MEMS y sus futuras proyecciones [87]:



Figura 10.14 Predicciones de ingresos del mercado MEMS

Los ingresos debido a MEMS utilizados en electrónica de consumo y teléfonos móviles alcanzo \$ 1.5 billones en 2010, un sólido 22,9% en relación al \$ 1.3 billones del año pasado. A diferencia de la mayoría de las industrias, según Jérémie Bouchaud, analista principal de MEMS de iSuppli indica el crecimiento de mercado. El cual va desde un 17% hasta un 28% durante los próximo 4 años. Gran parte del crecimiento del mercado de MEMS en el futuro será por los dispositivos que actualmente están en investigación y desarrollo. Por ello se dice: un tercio del mercado de MEMS será para aquellos dispositivos no desarrollados hace unos años atrás.

La alta demanda en el volumen de producción y ventas de MEMS se encuentra en crecimiento constante. “Los MEMS ya no son un nicho de mercado, ahora es una industria madura tratando de lograr economías de escala” argumentó Susumu Kaminaga, presidente de Sumitomo Precision Products Co. Ltd.

Más de la mitad de los dispositivos MEMS se producen en América del Norte. Japón es la segunda región productora, representando una quinta parte de los ingresos total. Alrededor del 16% provienen de centros de producción europeos. Gracias a STMicroelectronics, Singapur es también un país importante en la fabricación de MEMS, atribuyéndole un 11% de los ingresos.

De acuerdo al análisis de Yole Développement en relación a la figura 10.15, el segmento emergente de MEMS crecerá de \$ 550 millones en 2009 a más de \$ 2 millones en 2015. Mientras el conjunto del mercado de MEMS sube de \$ 7 mil millones en 2009 a más de \$ 18 mil millones en 2015. Existen nuevos dispositivos de MEMS cruzando la brecha de la Investigación y Desarrollo hacia la comercialización. Se pueden nombrar a las micro-pilas de combustible, los micro-altavoces, micro-etiquetas RFID, micro-tips para las tarjetas de la sonda, etc.

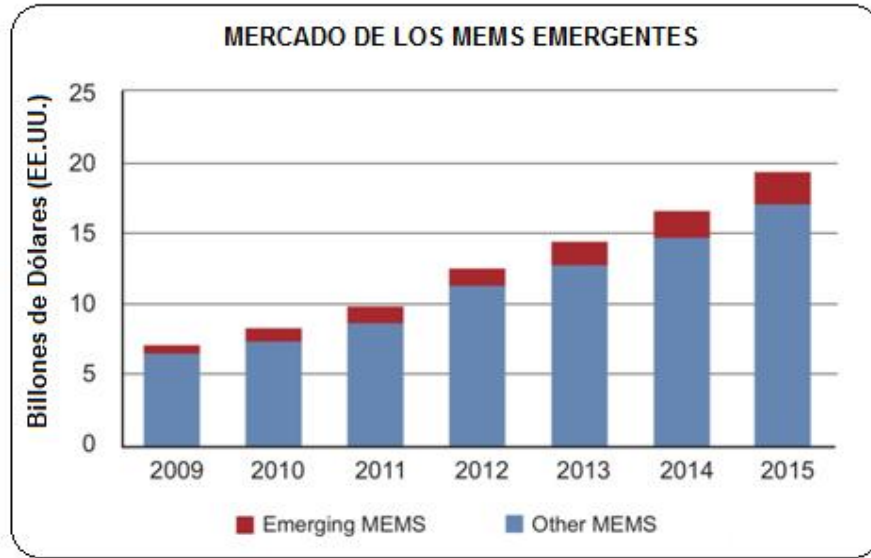


Figura 10.15 Mercado de los MEMS emergentes

10.4.1. Consumo de MEMS en el mercado

La industria de MEMS está muy fragmentada, con un gran número de fabricantes de dispositivos en todo el mundo y con una amplia variedad de campos de aplicación. Mirado en conjunto, la demanda global de dispositivos MEMS seguirá disparándose hasta el año 2015, como se puede apreciar en la figura 10.16.

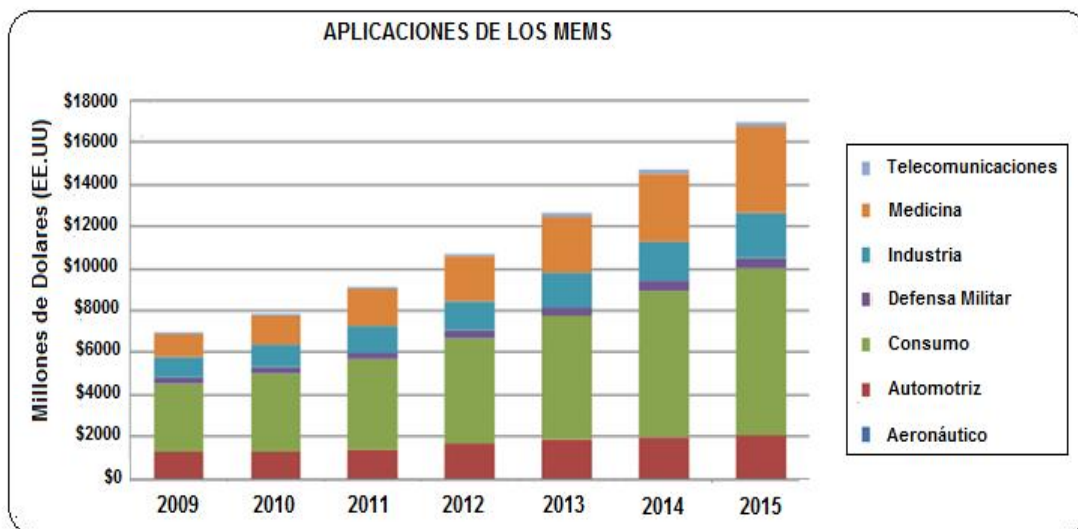


Figura 10.16 Aplicaciones de los MEMS

Los MEMS para consumo y para telefonía móvil están entre los mayores mercados de MEMS, se proyecta para convertirse en el mayor espacio de MEMS en 2015. Los sensores encuentran su camino en dispositivos de uso cotidiano, tales como ordenadores portátiles, reproductores de MP3, controles remotos y dispositivos portátiles de navegación. Los clientes se preocupan más por el rendimiento y por el costo. Por ejemplo, con la Wii de Nintendo, tanto Analog Devices y STMicroelectronics utilizan tecnología MEMS, asegurando la integridad de la aplicación. En el espacio biomédico, las aplicaciones son parte de la atención de la salud en el hogar. Las aplicaciones de MEMS están permitiendo sistemas de administración de fármacos y la monitorización de la frecuencia cardíaca y presión arterial del paciente. En el mundo de la automoción, el uso masivo de acelerómetros y giroscopios.

Existen dos buenas razones para este cambio de paradigma en la demanda. La primera es el colapso global en la producción de automóviles. Y la segunda, el deseo de los consumidores por contar con detección de movimiento en sus teléfonos y consolas de videojuegos. Cada vez se ve aplicaciones más ingeniosas, además los precios seguirán bajando en los próximos años. Y la presión por contar con estos dispositivos llegará más allá desde los teléfonos inteligentes hasta abarcar al resto de aparatos de gama media y baja [88].

10.4.2. Pronóstico de mercado: campos de aplicación y su crecimiento.

Los últimos 10 años han sido clave para el establecimiento de la infraestructura de producción de MEMS. Ahora está a punto de la industrialización de una serie de nuevos dispositivos, van desde cámaras termo-gráficas a los micro-altavoces, de brújulas digitales a los dispositivos de captación de energía. Actualmente se enfrenta a nuevos retos con el fin de facilitar el uso de dispositivos de MEMS en cualquier tipo de sistemas. El gran mercado de microfluídica hecho de polímero y vidrio, así como los magnetómetros, cronómetros, y en particular las nuevas aplicaciones biomédicas crecen. También se encuentran los giroscopios de 3 ejes, proyectores pico, y los interruptores MEMS de RF y varactores.

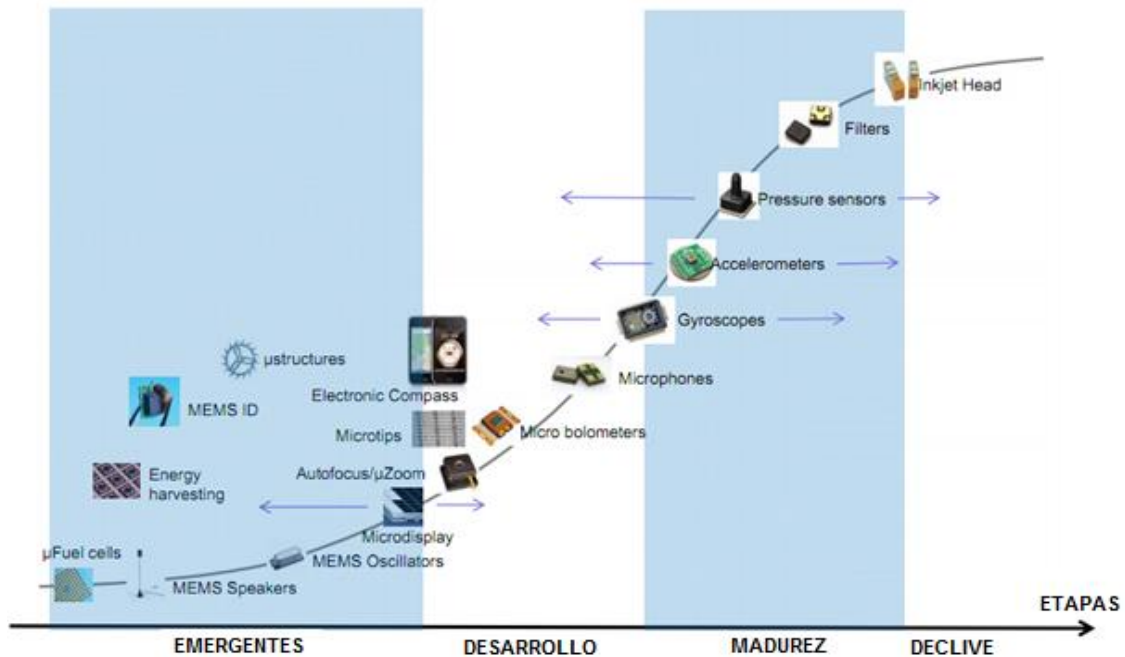


Figura 10.17 Etapas de desarrollo de los dispositivos MEMS

Varios son los dispositivos emergentes a desarrollarse entre los años 2010 y 2015 como se observa en la figura 10.17. En total, los nuevos dispositivos de MEMS aportarán en US \$ 1300 millones en 2014, frente a apenas \$ 33 millones en 2009.

10.5. Futuro de las MEMS en la Escuela Politécnica del Ejército

De acuerdo a la investigación realizada en la Escuela Politécnica del Ejército se están iniciando proyectos de investigación relacionada con los MEMS. Por esta razón, se sugiere incentivar la realización de investigaciones científicas y tecnológicas con vista a profundizar el conocimiento y desarrollar programas de enseñanza de los MEMS que aporten al desarrollo económico, político y social del país.

A continuación se proponen los proyectos que aportarán al desarrollo de esta tecnología en el área de Electrónica:

- Desarrollo e implementación de los procesos de micro-fabricación de los acelerómetros.

- Estudio y diseño de sensores inerciales MEMS de usos comerciales.
- Investigaciones de MEMS en el campo automotriz a fin de controlar la cantidad de emisiones, calidad de aceite, monitoreo de batería, y otros sistemas auxiliares.
- Desarrollo de aplicaciones de telecomunicaciones con sensores ópticos e interruptores para antenas.
- Análisis y diseño de dispositivos para biomedicina.
- Investigación y diseño de dispositivos emergentes MEMS.

Existe la expectativa de que la Escuela Politécnica del Ejército impulse la investigación en materia de MEMS a través de las siguientes actividades:

- Impulsar la adquisición e implementación de instrumentos y equipos de última tecnología para elevar la calidad de los proyectos de investigación y desarrollo de los MEMS.
- Promover la edición, publicación y difusión de trabajos teóricos y prácticos como proyectos de pregrado en el área de MEMS.
- Elaborar estudios y promover acciones de vinculación con el sector productivo para identificar sus necesidades tecnológicas y desarrollar conjuntamente programas para satisfacer sus requerimientos.
- Ofrecer cursos teóricos-prácticos y, seminarios sobre técnicas y aplicaciones relacionadas con el uso de los instrumentos y equipo científico de esta tecnología.

Para el desarrollo de la tecnología MEMS, el Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica requiere como primer paso la implementación de un Laboratorio de MEMS, cuyo estudio de pre-factibilidad se trata en el capítulo XII. Los estudiantes podrán trabajar experimentalmente en el diseño y caracterización de dispositivos. La puesta en marcha y el acceso a estos recursos hará posible en el Ecuador, la fabricación de sensores, actuadores y, diferentes micro-estructuras para aplicaciones automotrices, espaciales, médicas, de consumo, entre otros gracias al aporte investigativo de la Escuela Politécnica del Ejército en esta área.

CAPÍTULO XI

DISEÑO DE UN MEMS

Introducción: En este capítulo se modelará y simulará un dispositivo MEMS, con la finalidad de consolidar los fundamentos teóricos y la aplicación de criterios de ingeniería. En este trabajo se incluirá un modelado analítico, un modelo computacional aplicando el Método de Análisis Finitos (FEM) utilizado por el software de evaluación de MEMS para determinar las capacidades del dispositivo. El estudio se ha centrado en el diseño de un acelerómetro piezoeléctrico.

11.1. Proceso de diseño de un dispositivo MEMS

Uno de los objetivos de este proyecto es diseñar un dispositivo MEMS básico. De esta manera se demuestra la importancia de haber realizado un estudio previo del estado del arte de esta tecnología para finalmente vincular lo teórico con lo práctico. A continuación se describe los pasos a seguir en la creación de este MEMS:

1. Determinar la aplicación y sus requerimientos: Describir la aplicación en la que se utilizará el dispositivo y los parámetros de funcionamiento del sistema.

2. Analizar los requerimientos del dispositivo: En este punto se realizará una selección del tipo de dispositivo, su estructura física y los materiales a utilizar. Para poder cumplir con las especificaciones de diseño se integrarán los conocimientos adquiridos en el capítulo VIII y el capítulo II respectivamente.
3. Modelamiento matemático: Se realiza el modelamiento analítico del sistema, tomando en cuenta los fundamentos estudiados en el capítulo VI.
4. Simulación del dispositivo: Utilizar una herramienta de software para comprobar el funcionamiento del dispositivo, para lo cual es necesario seguir un determinado proceso detallado en el capítulo VII.
5. Pruebas y Comparación de resultados: Si los parámetros obtenidos cumplen con los requerimientos del dispositivo se aplicó de manera correcta el proceso de diseño, sino se debe regresar al paso 2.

11.1.1. Determinar la aplicación y sus requerimientos

El sistema AIRBAG tiene las siguientes características de funcionamiento:

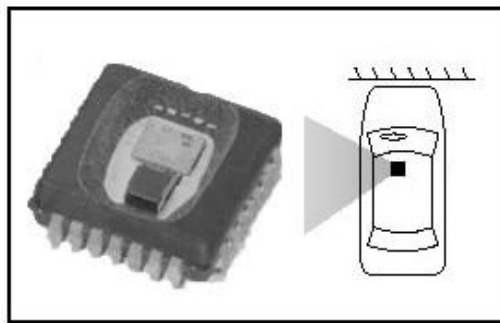


Figura 11.1 Ubicación del acelerómetro en el automóvil

- **Margen de medida:** 50-100 [g]
- **Sensibilidad:** 10 [mV/g]
- **Frecuencia de vibración del sistema:** 150 [Hz].

Esta frecuencia corresponderá a la frecuencia de trabajo del acelerómetro. Esta frecuencia podrá variar ya que depende del movimiento relativo de los componentes del vehículo, de las maniobras de conducción, de la interacción con la superficie del camino y, de las condiciones del medio ambiente.

11.1.2. Requerimientos y especificaciones

En base a lo estudiado en el capítulo VIII se modelará y caracterizará un sensor que se utilizará en el Airbag de un automóvil para la protección de ocupantes como se muestra en la figura 11.1. El sensor MEMS que se utiliza en esta aplicación es un acelerómetro, el cual deberá ser colocado en el sistema de suspensión del automóvil

De acuerdo a la aplicación, el sensor a diseñarse debe tener las siguientes características:

- **Tipo de sensor:** Acelerómetro MEMS
- **Número de ejes:** 1
- **Sensibilidad de voltaje:** ≥ 10 y < 100 [mV / g] en la dirección vertical
- **Rango de medición:** 1 a 1000 [Hz]

Después de tener las especificaciones del dispositivo, se consideran los siguientes 3 puntos para iniciar el proceso de diseño:

1. Selección del tipo de micro-acelerómetro
2. Selección del tipo de material
3. Selección del tipo de estructura

11.1.2.1. Selección del tipo de micro-acelerómetro

Como se estudió en el capítulo VIII los diferentes tipos sensores, se escogió dentro de los sensores inerciales a los 3 tipos de acelerómetros más utilizados según la información adquirida a lo largo de esta investigación.

A continuación en la tabla 11.1 se analizan sus características, con la finalidad de determinar el tipo de acelerómetro a diseñar, además se tomó en cuenta las características de las técnicas de transducción estudiadas en el capítulo IV:

CARACTERISTICAS	PIEZO-RESISTIVO	CAPACITIVO	PIEZO-ELECTRICO
Elemento Sensible	Elemento Resistor	Capacitor	Material Piezoeléctrico
Margen de medida [g]	0-2000	0-1000	0-2000
Rango de Frecuencia [Hz]	0-10000	0-2000	1-15000
Exactitud	Medio	Alto	Medio/Alto
Robustez	Alto	Medio	Alto
Sensibilidad	Baja	Alta	Alta
Dependencia a la Temperatura	Alta	Baja	Media
Consumo de Potencia	Medio	Bajo	Bajo
Estructura	Simple	Compleja	Simple
Costo	Bajo	Alto	Bajo

Nota: La aceleración se mide en g , $1 [g]=9.8 [m/s^2]$

Tabla 11.1 Tipos de Micro-acelerómetros

La elección del acelerómetro adecuado se hará en función de los siguientes criterios:

- Frecuencia de trabajo o margen de frecuencias de uso.
- Los valores máximos y mínimos del nivel de la señal que esperamos.
- Consideraciones acerca de la forma de montaje, consumo de potencia y estructura

Comparados con otros tipos de transductores, los acelerómetros piezoeléctricos tienen las siguientes ventajas:

- Un rango de medición bastante elevado, con bajo ruido de salida
- Excelente linealidad en todo su rango dinámico
- Amplio rango de frecuencias
- Consumo de potencia bajo
- Tamaño Compacto

11.1.2.2. Selección del tipo de material

El silicio será el material estructural del dispositivo. Este material presenta un alto coeficiente de elasticidad pero a la vez es ligero. Los materiales con un alto módulo de Young pueden mantener una mejor relación lineal entre la carga aplicada y las deformaciones inducidas. Además tiene excelentes propiedades mecánicas, tales como: alto rendimiento y buena resistencia al desgaste.

En la mayoría de los acelerómetros piezoeléctricos se utiliza el cuarzo o el PZT como el elemento de transducción. Por esta razón se va a centrar el estudio en estos 2 materiales cuyas propiedades se estudiaron en el capítulo II. En la tabla 11.2 se realiza una comparación de las características influyentes en el diseño del acelerómetro:

CARATERÍSTICAS	CUARZO	PZT
Obtención del material	Material piezoeléctrico natural	Se producen en un entorno de laboratorio a través de un proceso altamente controlado.
Estabilidad a largo plazo	Si	No
Rango de frecuencia	MHz	Hz – KHZ
Constante de carga piezo-eléctrica [m/V]	2.3×10^{-12}	480×10^{-12}
Factor de conversión electromecánica K	0.1	0.72

CARACTERÍSTICAS	CUARZO	PZT
Módulo de Young [Pa]	0.56×10^9	142.5×10^9
Aplicaciones	<ul style="list-style-type: none"> • Sensores • Osciladores • Instrumentos ópticos 	<ul style="list-style-type: none"> • Actuadores • Sensores

Tabla 11.2 Tipos de materiales piezoeléctricos

Luego de realizar este breve análisis, se decidió utilizar PZT por ser un material que trabaja a frecuencias bajas (Hz-KHz) pues el dispositivo a diseñar trabajará en estos rangos. Tiene una constante de carga mayor al cuarzo, esto permite tener un voltaje de respuesta mayor frente al desplazamiento producido por la aceleración. Este material posee un factor de conversión electromecánica mayor y esto significa que un 72% de la energía aportada puede ser transformado, esto nos indica una eficiente transducción. El módulo de Young es mayor que el de cuarzo permitiendo tener un mayor rango elasticidad al material. Además este material es utilizado para sensores. Como en el mercado existen distintos tipos de PZT se escogió el PZT-5A por ser el material más utilizado en acelerómetros.

11.1.2.3. Selección del tipo de estructura

En el capítulo VIII se estudiaron los distintos tipos de acelerómetros y se definió el modelo de un acelerómetro típico. Este sensor utiliza la configuración general de un desplazamiento sísmico unidireccional de movimiento traslativo, esto se observa en la figura 11.2 donde:

- m =Masa
- K =Resorte
- B =Amortiguador
- Z_o =Transductor

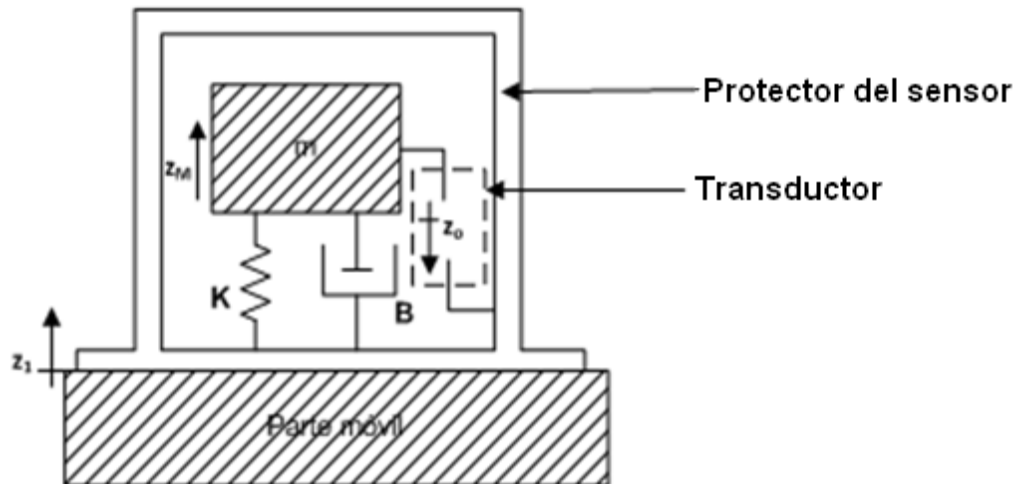


Figura 11.2 Modelo de un acelerómetro típico

Un sistema vibratorio tiene una estructura masa – resorte con 4 características básicas:

1. Una masa que experimenta un movimiento donde una fuerza excitadora a llamada también fuerza perturbadora mantiene o propaga la vibración.
2. El resorte experimenta una fuerza restauradora que tiende a regresar la masa a una posición de equilibrio.
3. Una fuerza amortiguadora que siempre se opone al movimiento de la masa.
4. Un transductor para convertir el desplazamiento en una señal eléctrica.

Además, la aceleración X_i del objeto en movimiento es la cantidad física a investigar. Esta magnitud causará un desplazamiento relativo X_o de la masa sísmica y de la base del sensor.

El acelerómetro piezoeléctrico va a tener 4 elementos equivalentes a las características antes mencionadas de la estructura masa - resorte:

1. Una masa sísmica suspendida.
2. Cuatro vigas en suspensión situados en el centro de cada lado de la estructura de soporte de manera simétrica.
3. Un soporte rígido.
4. Transductores distribuidos en las vigas de manera simétrica para permitir la detección de la aceleración. Cada transductor piezoeléctrico se compone de un electrodo superior y un electrodo inferior formado por una capa piezoeléctrica. Los mismos se deben colocar alejados de la masa sísmica y de la estructura de soporte para evitar la no linealidad debido a la rigidez.

Se colocan ocho electrodos distribuidos dos en cada viga de manera simétrica para permitir la detección de la aceleración. Dichos electrodos han sido conectados en serie. Los electrodos en el dispositivo piezoeléctrico recogen la carga a ser transmitida a un acondicionador de señal.

De esta manera se detecta una medida más real donde los dos elementos de la película fina de PZT se conectan a través de los electrodos inferiores. Mientras los terminales de salida eléctrica (conexiones) se realizan a través de dos electrodos de la parte superior.

Para el diseño de este micro-acelerómetro piezoeléctrico se escogió la estructura de la figura 11.3, a continuación se explican la distribución de los elementos:

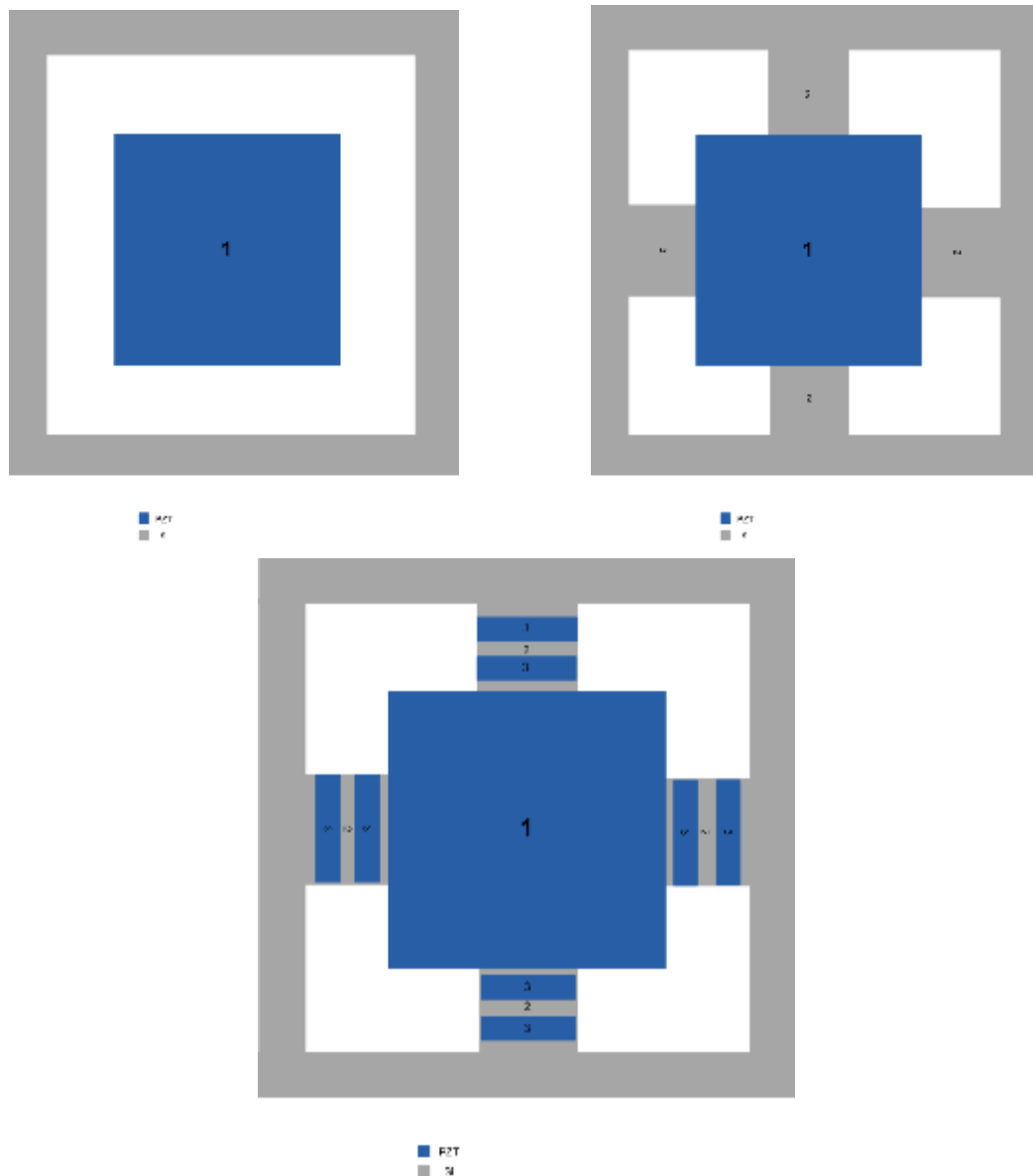


Figura 11.3 Estructura del acelerómetro piezo-éлектриco (1) masa sísmica, (2) vigas y (3) electrodos

Para el estudio en el eje z (vertical) del acelerómetro piezoelectrico, una fuerza inercial provocará flexiones en las vigas produciendo un cambio en la carga en los transductores piezoelectricos obteniendo un voltaje proporcional.

La respuesta típica de un acelerómetro piezoelectrico, tiene un pico de resonancia en f_r , y las frecuencias máxima y mínima delimitan el rango útil de medición. Todos los sistemas mecánicos presentan una sola frecuencia de resonancia, a la cual el dispositivo no debe trabajar ya que puede conducir a

errores relativamente grandes en la señal medida y daño del dispositivo. Por eso una práctica común es mantener la medición hasta un tercio de la frecuencia de resonancia, $f_r/3$, de esta forma se garantiza que la medida sea la adecuada. En la figura 11.4 se muestra la curva de respuesta del acelerómetro piezoeléctrico.

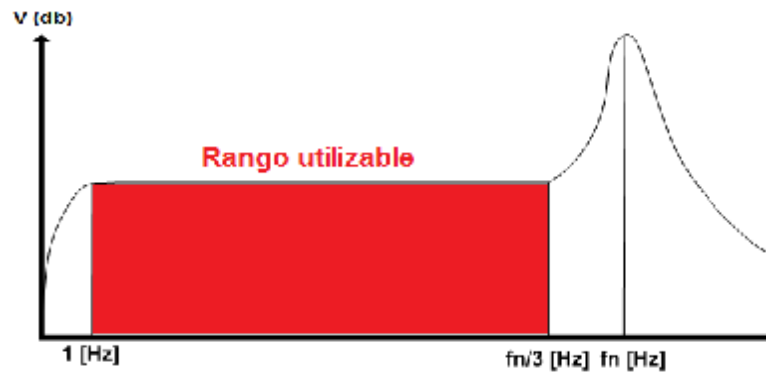


Figura 11.4. Respuesta típica del acelerómetro piezoeléctrico

11.2. Modelamiento

En el capítulo VI se explicaron los pasos para esta etapa de diseño, a continuación se desarrollaran los 3 puntos para iniciar con el modelamiento del dispositivo:

1. Seleccionar el nivel de modelamiento
2. Establece los parámetros y sus variables
 - a. Análisis de las consideraciones de diseño
 - b. Determinación de las dimensiones físicas de la estructura
3. Seleccionar el método de modelamiento

11.2.1. Seleccionar el nivel de modelamiento

Según los conocimientos adquiridos en el capítulo VI, el nivel utilizado en el modelamiento del acelerómetro MEMS piezo-eléctrico es el de geometría porque se acerca a la realidad y a los fenómenos físicos descritos a través de ecuaciones. La solución numérica de estas ecuaciones se obtiene a través de la técnica conocida como el método de elementos finitos (FEM).

11.2.2. Establece los parámetros y sus variables

11.2.1.1. Análisis de las consideraciones de diseño

Las siguientes 7 consideraciones se toman en cuenta para el establecimiento del modelamiento del micro-acelerómetro:

1. La masa efectiva de las vigas de apoyo en comparación con la masa sísmica es muy pequeña y puede ser ignorada.
2. La masa sísmica y la estructura de soporte son rígidas.
3. Las dos capas de PZT y Si deben ser elásticas. De esta manera obedecen la ley de Hooke.
4. El material elástico es isotrópico.
5. La masa central sometida a la aceleración produce una vertical por la deflexión de las vigas.
6. La masa sísmica y el elemento piezoeléctrico conforman un sistema mecánico que define la frecuencia de resonancia y condiciona la frecuencia de operación máxima del acelerómetro
7. Este rango de frecuencias se puede aumentar si se reduce la masa sísmica, no obstante, debe tomarse en cuenta que conforme se reduce la masa también se reduce la sensibilidad del acelerómetro. Por lo tanto, existe un compromiso entre el ancho de banda y la sensibilidad.

También se nombran 8 relaciones que pueden determinar y/o relacionar los parámetros de funcionamiento del dispositivo:

1. La masa sísmica es muy importante, pues cuando el acelerómetro es sometido a una fuerza, esta masa y las vigas unidas a ella se desplazan produciendo una deformación y por ende un cambio de voltaje.
2. A mayor masa del acelerómetro, menor frecuencia de resonancia y menor gama de frecuencia útil.
3. A menor masa sísmica el rango de aceleración a medir crece.
4. A mayor masa sísmica existirá mayor sensibilidad.
5. A menor sensibilidad de carga mayor será la frecuencia de resonancia

6. Un acelerómetro puede usar alrededor de $1/3$ de su frecuencia natural. Datos arriba de esta frecuencia se acentuarán debido de la respuesta resonante, pero se pueden usar si se toma en cuenta este efecto.
7. El rango de las capas finas de Si y PZT debe estar en el rango 10 y 100 μm .
8. La influencia del espesor y las propiedades elásticas de películas piezoeléctricas se deben tomar en cuenta en el análisis estructural y modelado. Esta consideración proporciona una estimación del rendimiento del dispositivo.

11.2.1.2. Determinación de las dimensiones físicas de la estructura

La estructura del micro-acelerómetro tiene una masa sísmica centrada suspendida por 4 vigas simétricas como se observa en la figura 11.3. Cuando la aceleración está actuando en la estructura la masa sísmica sube y baja sin movimientos en otras direcciones. El transductor piezo-eléctrico consiste de dos electrodos hechos de una capa fina de PZT-5A, montados sobre la viga de suspensión.

Para determinar las dimensiones físicas del dispositivo, se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

1. Establecer la aplicación en la cual se va a utilizar el acelerómetro para determinar el rango de medición y la sensibilidad de voltaje.
2. Considerar que la frecuencia de resonancia y la sensibilidad están determinados por las dimensiones de la masa sísmica y sus 4 vigas en suspensión.
3. La masa sísmica debe estar centrada en la estructura.
4. El ancho de las vigas debe ser proporcional a $1/4$ del ancho de la masa sísmica.
5. El largo de las vigas debe ser como mínimo un $1/3$ de la masa sísmica y el valor máximo es el largo existente entre la masa sísmica y el soporte de la estructura.

6. Cuando los electrodos se conecten en serie, el largo de los electrodos debe ser $2/5$ del largo de la viga. Cuando los electrodos se conectan en paralelo, el largo de los electrodos debe ser del largo de la viga.
7. La masa del transductor no debe ser superior a $1/10$ de la masa sísmica de dispositivo.
8. El espesor de las vigas (H_V) con respecto al espesor del material transductor (H_T) debe cumplir la siguiente relación: $\frac{H_T}{H_V} = \sqrt{\frac{E_V}{E_T}}$ donde E_V es el Módulo de Young del material elástico y E_T es el Módulo de Young del material transductor.

Tomando en cuenta el paso 2, se realizaron ciertos reajustes en las medidas del dispositivo al utilizar el programa de Matlab, con la finalidad de obtener parámetros cercanos a los requerimientos de diseño del dispositivo. (Ver Anexo B)

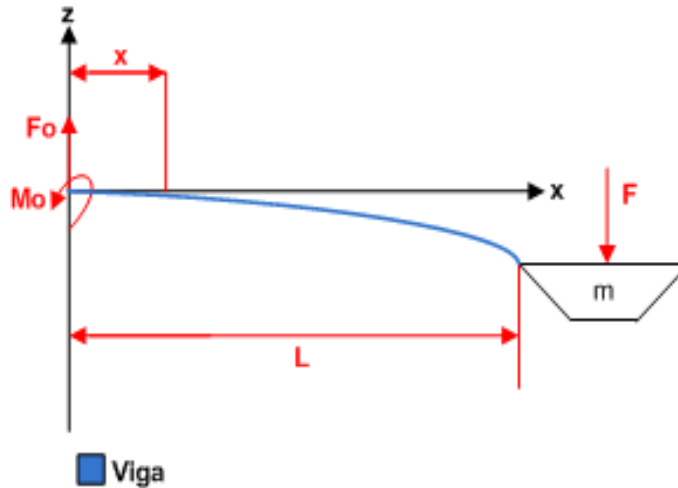
11.2.1.3. Seleccionar el método de modelamiento

Se utilizará la teoría de Bernoulli-Euler porque nuestro dispositivo está formado por vigas.

11.2.3. Modelamiento matemático analítico

Cuando la masa sísmica está sujeta a una aceleración normal, la fuerza de inercia produce una deflexión en la viga de suspensión. Como se tiene 4 vigas simétricas, se realiza el estudio solo de una.

El diagrama del cuerpo libre de la viga de suspensión será como se observa en la figura 11.5:



Nota: Fo= Fuerza de reacción del momento, Mo=Momento, m= masa sísmica

Figura 11.5 Diagrama de cuerpo libre de la viga de suspensión

Se tendrá una fuerza de reacción en el momento Mo la cual se representa con la ecuación 11.1:

$$F_o = \frac{1}{4} m\ddot{z}$$

Ecuación 11.1 Fuerza de reacción en el momento Mo

Donde:

m= masa central

z̈ = aceleración en g (1g=9.8 m/s²)

De las condiciones de borde y la simetría de la estructura de acuerdo a la Teoría de la Viga de Bernoulli-Euler descritas en el capítulo VI. Se puede obtener las ecuaciones descritas en la tabla 11.3:

DESCRIPCIÓN	ECUACIÓN
Momento de flexión en la viga	$M(x) = F_o \cdot L$
	$M(x) = \frac{1}{4} m\ddot{z} \left(\frac{L}{2} - x \right) = [N \cdot m]$
	Donde:
	L = longitud de la viga

DESCRIPCIÓN	ECUACIÓN
Deformación de la viga	$\epsilon = \frac{l}{R_c} \vec{k}$ <p>Donde: R_c = Radio de la superficie curva.</p>
Esfuerzo sobre la capa de material	$\sigma = E \cdot \epsilon$ <p>Donde: E = Módulo de Young del material utilizado</p>

Tabla 11.3 Calculo de parámetros de una viga formada por un solo material

Como las vigas para el dispositivo a diseñar tienen dos capas de materiales diferentes se debe encontrar ecuaciones las cuales lleven a encontrar un material equivalente. De esta manera se halla la deformación y esfuerzos correspondientes. La figura 11.6 muestra la sección transversal de la viga de silicio con una capa de PZT donde Y es el eje neutro de esta sección. Este gráfico nos servirá para hallar las nuevas ecuaciones.

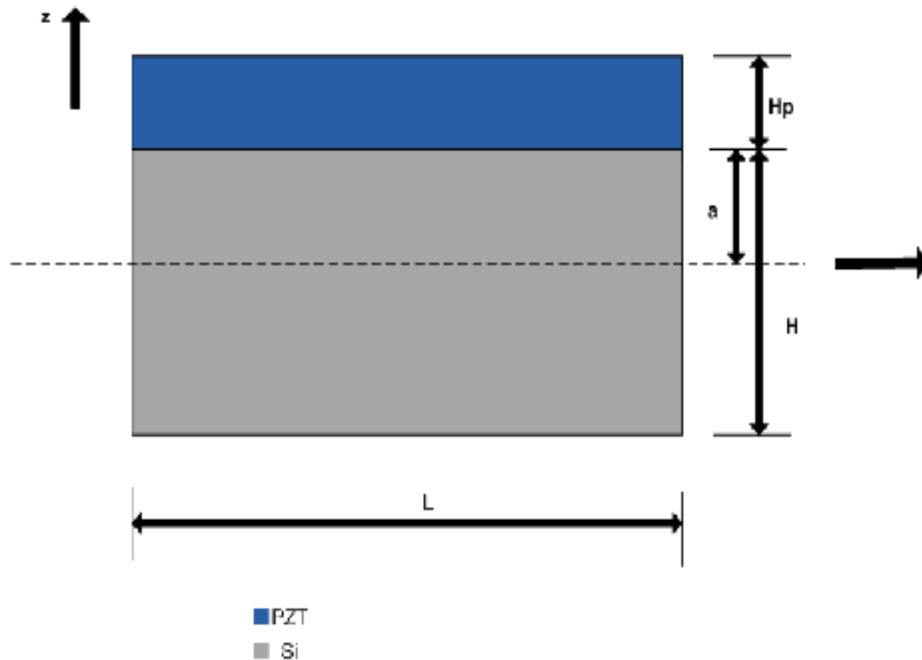


Figura 11.6 Área de la sección transversal de la viga de suspensión de PZT/Si en el dispositivo

Al tener la deformación se puede encontrar el esfuerzo σ_1 , mediante el uso de la ley de Hooke. Como se tienen 2 capas se tendrán 2 esfuerzos que dependen del módulo de Young de cada material, esto se expresa en la ecuación 11.2:

$$(1) \sigma_1 = E_{Si} \cdot \varepsilon_1$$

$$(2) \sigma_2 = E_{PZT} \cdot \varepsilon_1$$

Ecuación 11.2 Ley de Hooke (1) Para la capa de silicio (2) Para la capa de PZT

Donde:

E_{Si} = Módulo de Young del silicio

E_{PZT} = Módulo de Young del PZT

Ahora se considera el área de la sección transversal indicada en la figura 11.6; se obtienen las ecuaciones de equilibrio en una dirección (ecuación 11.3), estas son:

$$(1) \int_{-(H-a)}^a W \cdot E_{Si} \frac{z}{\rho} dz + \int_a^{H_p+a} W \cdot E_{PZT} \frac{z}{\rho} dz = 0$$

$$(2) \int_{-(H-a)}^a W \cdot E_{Si} \frac{z}{r} z \cdot dz + \int_a^{H_p+a} W \cdot E_{PZT} \frac{z}{r} z \cdot dz = M(x)$$

Ecuación 11.3 Ecuaciones de equilibrio (1) Suma de fuerzas (2) Suma de Momentos

Donde:

z = Desplazamiento en el eje "z"

a = Distancia al eje neutral en la capa de sustrato medido desde la interfaz

W = Ancho de la viga

H = Espesor de la capa de sustrato

H_p = Espesor de la capa de PZT

$M(x)$ = Momento del área transversal

Se integra la ecuación 11.3 (1) y se encuentra la distancia a (ecuación 11.4), señalada en la figura 11.6:

$$a = \frac{1}{2} \frac{E_{Si} \cdot H^2 - E_{PZT} \cdot H_p^2}{E_{Si} \cdot H + E_{PZT} \cdot H_p}$$

$$a = 5.8876 [\mu\text{m}]$$

Ecuación 11.4 Distancia a

Al integrar la ecuación 11.3 (2) se encuentra el radio de la superficie curva (ecuación 11.5), lo que nos permite encontrar la deformación de la viga:

$$\frac{1}{R_c} = \frac{M(x)}{\left(\frac{W \cdot E_{Si}}{3} \right) \cdot (H^3 - 3 \cdot a \cdot H^2 + 3 \cdot a^2 \cdot H) + \left(\frac{W \cdot E_{PZT}}{3} \right) \cdot (H_p^3 + 3 \cdot a \cdot H_p^2 + 3 \cdot a^2 \cdot H_p)}$$

$$\frac{1}{R_c} = 0.0079 \left[\frac{1}{\text{m}} \right]$$

Ecuación 11.5 Radio de la superficie curva

Con este valor se puede llegar a obtener la deformación de la viga reemplazando en la ecuación 11.2:

$$e_1 = 0.0079 \bar{k}$$

Ecuación 11.6 Deformación unitaria de la viga

También según la ley de Hooke se tiene la ecuación 11.7:

$$\frac{1}{R_c} = \frac{M(x)}{E \cdot I_{eq}} = \left[\frac{1}{\text{m}} \right]$$

Ecuación 11.7 Deflexión de la viga de acuerdo de la Ley de Hooke

Donde:

$$E \cdot I_{eq} = \left(\frac{W \cdot E_{Si}}{3} \right) \cdot (H^3 - 3 \cdot a \cdot H^2 + 3 \cdot a^2 \cdot H) + \left(\frac{W \cdot E_{PZT}}{3} \right) \cdot (H_p^3 + 3 \cdot a \cdot H_p^2 + 3 \cdot a^2 \cdot H_p) = [N \cdot \text{m}^2]$$

$$E \cdot I_{eq} = 3.2756 \cdot 10^{-6} [N \cdot \text{m}^2]$$

Ecuación 11.8 Modulo de Young equivalente por Inercia equivalente

Ahora se debe sustituir la ecuación 11.2, ecuación 11.4 y la ecuación 11.7 en la ecuación 11.3 (2) para obtener el esfuerzo de la capa PZT (ecuación 11.9):

$$\sigma_1 = \frac{E_{PZT}}{\rho} \left(\frac{H_p}{2} + a \right) = \frac{E_{PZT}}{E \cdot I_{eq}} \left(\frac{H_p}{2} + a \right) \cdot M(x)$$

$$\sigma_1 = 1.8728 \cdot 10^4 \left[\frac{N}{m^2} \right]$$

Ecuación 11.9 Esfuerzo sobre la capa PZT

Si todas las tensiones causadas por la flexión en las películas piezo-eléctricas son insignificantes. La contribución de una porción infinitesimal del material piezoeléctrico a la carga total para ningún campo eléctrico externo, D_3 , es la siguiente (ecuación 11.10):

$$D_3 = d_{33} \cdot \sigma_1$$

$$D_3 = 7.0044 \cdot 10^{-6}$$

Ecuación 11.10 Contribución a la carga eléctrica

Donde:

d_{33} = Coeficiente piezo eléctrico

Ahora se integra la ecuación 11.11, aquí se substituye el esfuerzo por la ecuación 11.9 y podemos encontrar la salida de carga de las películas piezo-eléctricas (ecuación 11.11):

$$Q = \int_{0.05L}^{0.40L} D_3 \cdot W dx - \int_{0.5L}^{0.95L} D_3 \cdot W dx = \frac{(0.05 \cdot W) \cdot \left(a + \frac{H_p}{2} \right) \cdot \left(L^2 \cdot m \cdot d_{33} \cdot E_{PZT} \cdot z \right)}{E \cdot I_{eq}}$$

$$Q = 1.4955 \cdot 10^{-13}$$

Ecuación 11.11 Carga de salida de las capas piezo-eléctricas

Como se sabe estos dos elementos (PZT-Si), están conectados en serie (figura 11.7), la capacitancia está dada por la ecuación 11.12:

$$C = \frac{0.45 \cdot \epsilon_{33} \cdot L \cdot W}{2 \cdot H_p}$$

$$C = 0.41524 [\text{pF}]$$

Ecuación 11.12 Capacitancia de la capa PZT

Donde:

ϵ_{33} =Permitividad dieléctrica de la capa PZT ($\epsilon_{33} = \epsilon_r \cdot \epsilon_0$)

ϵ_0 = Permitividad del vacío

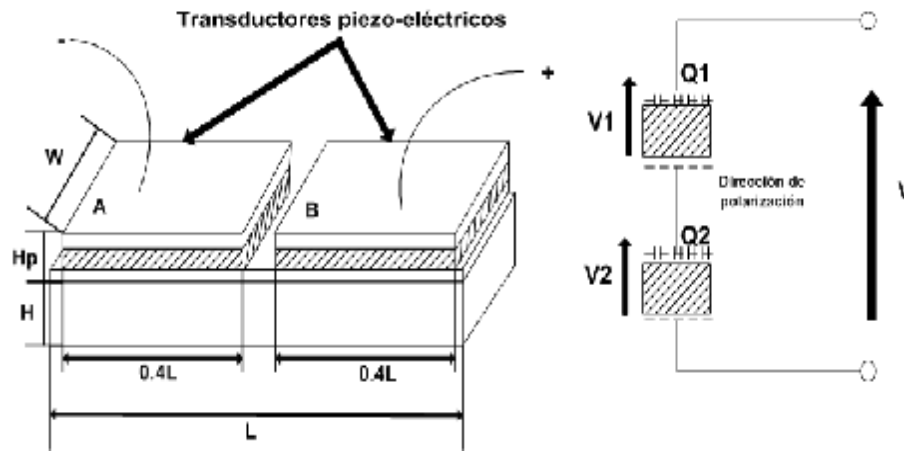


Figura 11.7 Ubicación de los elementos en el dispositivo

Generalmente, los dos parámetros importantes en la evaluación de acelerómetros son la sensibilidad y el rango de frecuencia de funcionamiento. La sensibilidad puede ser definida como la carga generadora por la aceleración aplicada. Mientras el rango de frecuencias es el intervalo donde el dispositivo realiza la medición.

La sensibilidad de voltaje del sensor en circuito abierto S_v , se define como la relación del voltaje y la aceleración (ecuación 11.13):

$$S_v = \frac{V}{\ddot{z}} = \frac{Q}{\ddot{z} \cdot C} = \frac{(0.05 \cdot W) \cdot \left(a + \frac{H_p}{2}\right) \cdot (L^2 \cdot m \cdot d_{33} \cdot E_{PZT})}{E \cdot I_{eq}}$$

$$S_v = 3.6 [\text{mV/g}]$$

Ecuación 11.13 Sensibilidad de voltaje del sensor

La sensibilidad de carga del sensor se encuentra con la ecuación 11.14:

$$S_C = C \cdot S_v$$

$$S_C = 0.15 [\text{pC/g}]$$

Ecuación 11.14 Sensibilidad de carga

La ecuación 11.2 muestra el máximo $M(x)$ cuando $x = 0$. Cuando se aplica una aceleración vertical a la masa sísmica central, se causa la deformación en el transductor de las vigas. Por lo tanto, la tensión máxima (σ_{\max}) se puede obtener ya sea en la superficie superior o en la superficie inferior del electrodo (ecuación 11.15).

$$(1) \sigma_{\max 1} = \frac{1}{8} \frac{E_{Si} \cdot m \cdot z \cdot L}{E \cdot I_{eq}} (H + a)$$

$$\sigma_{\max 1} = 1.9563 \cdot 10^6 \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right]$$

$$(2) \sigma_{\max 1} = \frac{1}{8} \cdot \frac{E_{Si} \cdot m \cdot z \cdot L}{E \cdot I_{eq}} \cdot (H + a)$$

$$\sigma_{\max 2} = 2.1414 \cdot 10^6 \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right]$$

Ecuación 11.15 Esfuerzo máximo (1) En la superficie superior (2) En la superficie inferior

La frecuencia natural de resonancia se calcula mediante la ecuación 11.16:

$$f_n = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{K}{(m + mev)}} = [\text{Hz}]$$

Ecuación 11.16 Frecuencia natural de resonancia del sensor

Donde:

mev= Masa efectiva de las vigas [kg]

K= Constante de rigidez, siendo $K = \frac{48 \cdot E \cdot I_{eq}}{L^3} = \left[\frac{\text{N}}{\text{m}} \right]$

En la tabla 11.4 se tienen las constantes utilizadas en los diferentes cálculos:

CONSTANTES UTILIZADAS			
Propiedad	Unidad	Material	
		PZT	Si
E	[10^9 Pa]	142.5	170
ρ	[kg.m ⁻³]	7750	2329
d_{33}	[10^{-10} C/N]	3.74	
ϵ_r	-	1700	11.7
Permitividad del vacío, ϵ_0	[N ⁻¹ .m ⁻² .C ²]	8.8544x10 ⁻¹²	

Nota: Los parámetros son tomados del software COMSOL Multiphysics.

Tabla 11.4 Constantes

Los cálculos se realizaron en un programa realizado en MATLAB, en el Anexo B se encuentra el código fuente de este programa (figura 11.8):

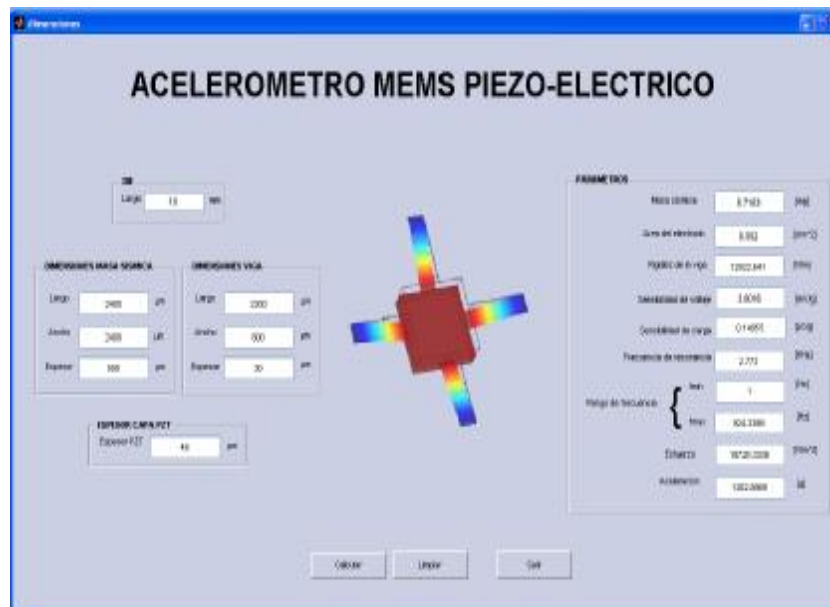


Figura 11.8 Interfaz gráfica del programa en MATLAB para el modelamiento analítico del acelerómetro piezoeléctrico

A continuación se resumen en las tablas 11.5, 11.6 y 11.7 los parámetros de fabricación y las variables de geometría del acelerómetro piezo-eléctrico diseñado.

PARÁMETROS DE FABRICACIÓN		
Parámetro	Unidad	Dato
Material	-	Si PZT-5A

Tabla 11.5 Parámetros de fabricación.

VARIABLES DE GEOMETRIA		
Parámetro	Unidad	Dato
Largo de la masa sísmica (L_m)	μm	2400
Ancho de la masa sísmica (W_m)	μm	2400
Espesor de la masa sísmica (H_m)	μm	500
Largo de las vigas (L)	μm	2300
Ancho de las viga (W)	μm	600
Espesor de las vigas(H)	μm	30
Espesor del PZT (H_p)	μm	45
Área del DIE	mm^2	100
Masa del dispositivo	mg	13.75
Masa de la masa sísmica	mg	8.71

Tabla 11.6 Variables geométricas del dispositivo

CARACTERÍSTICAS DEL ELECTRODO		
Área del electrodo 1 (A_1)	mm^2	0.552
Área del electrodo 2 (A_2)	mm^2	0.552

Figura 11.7 Características del transductor

En la figura 11.9 se observa una vista superior del acelerómetro MEMS.

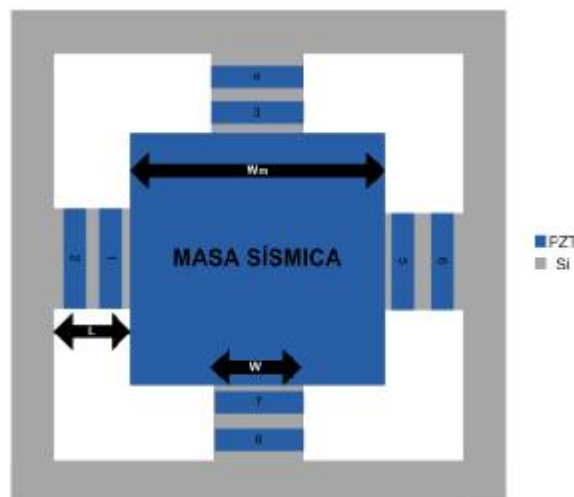


Figura 11.9 Vista superior del dispositivo

En la figura 11.10 se observa una vista lateral del dispositivo.

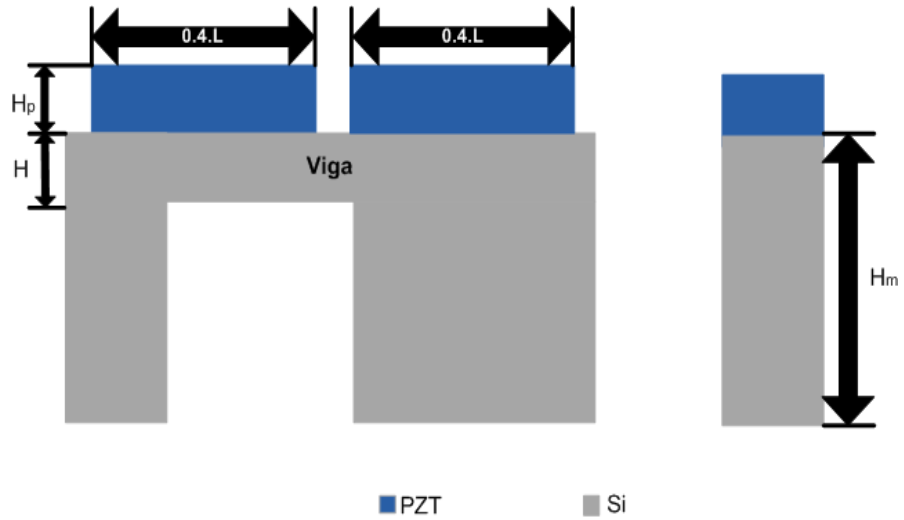


Figura 11.10 Vista lateral del dispositivo

Para el cálculo del rango de frecuencia se tomó como frecuencia mínima 1 [Hz] y como frecuencia máxima $f_n/3$, siendo el rango lineal de medición el que se observa en la figura 11.11:

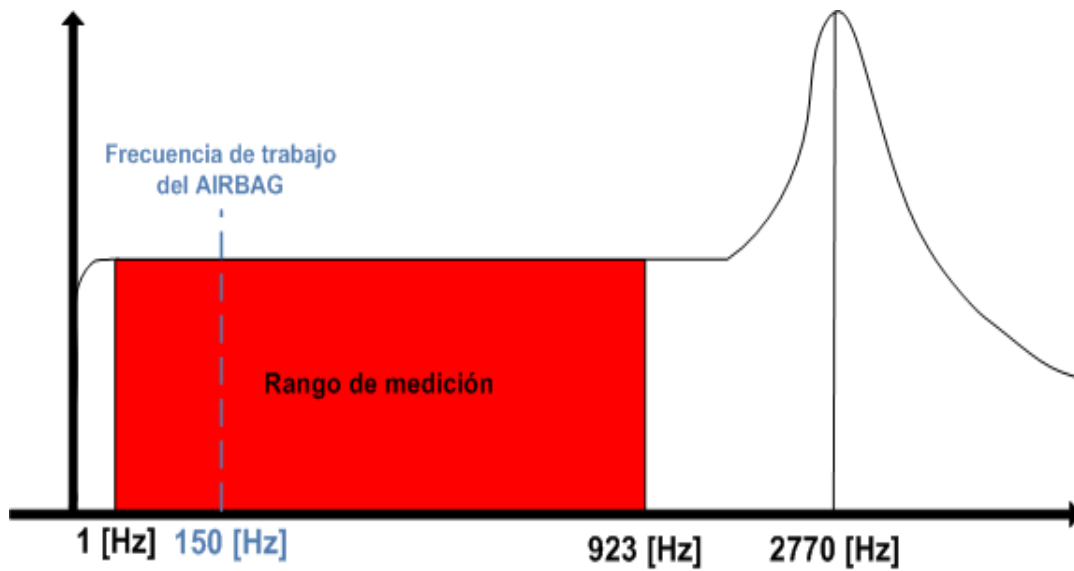


Figura 11.11 Rango de frecuencias de medición

Los resultados de la simulación se muestran en la tabla 11.8:

VARIABLES DE FUNCIONAMIENTO		
Parámetro	Unidad	Dato
Número de ejes	-	1 (Eje z)
Rango de frecuencia	Hz	1-923
Frecuencia de resonancia natural	KHz	2.77
Sensibilidad de carga (S_Q)	pC/g	0.15
Sensibilidad de voltaje (S_V)	mV/g	32,41

Nota: La unidad de medida de la aceleración es el [g] ($1g = 9.8m/s^2$)

Tabla 11.8 Variables de funcionamiento del acelerómetro piezo-eléctrico

Para los cálculos del voltaje proporcionado por los transductores se divide la fuerza para 4 porque se asume que dicha fuerza se divide de forma simétrica en cada viga. Se utiliza la siguiente ecuación:

$$V = \frac{d_{33} \cdot |F_v| \cdot H}{e_0 \cdot e_r \cdot A}$$

Donde:

A= Área del electrodo

H= Espesor del electrodo

F_v=Fuerza aplicada sobre las vigas

ε_r= Permitividad relativa

ε₀= Permitividad de espacio libre

d₃₃= Coeficiente piezoeléctrico

Los datos constantes utilizados para este cálculo se muestran en la tabla 11.9. Los resultados obtenidos al aplicar dicha ecuación se observan en la tabla 11.10.

Constante	Unidades	Valor
d_{33}	[C/N]	3,74e-10
H	[m]	0,000045
ϵ_0	[C ² /N·m ²]	8,8544E-12
ϵ_r	-	1700
A	[m ²]	0,000000552

Tabla 11.9 Valores de parámetros

F	$F_V=F/4$	Voltaje
[N]	[N]	[V]
- 0,01	- 0,0025	0,0050
- 0,04	- 0,01	0,0202
- 0,08	- 0,02	0,0405

Tabla 11.10 Cálculo del voltaje de salida teórico

11.3. Simulación

En el desarrollo de la simulación se pueden distinguir 6 etapas, las cuales fueron descritas en el capítulo VII. A continuación se detalla cada paso realizado en la simulación del acelerómetro piezoeléctrico:

1. Selección del software
2. Definición del sistema
3. Formulación del modelo
4. Colección de datos
5. Aplicación del modelo matemático y simulación
6. Interpretación de resultados

11.3.1. Selección del software

Para realizar la simulación se ha escogido el software COMSOL Multiphysics™ porque es un paquete de software diseñado para el análisis de

elementos finitos en diversos campos de la física y la ingeniería. La interfaz de COMSOL ayuda a organizar la simulación mediante la presentación de una visión clara del modelo en cualquier momento. Utiliza la forma funcional, la estructura y la estética como el medio para lograr la simplicidad en las tareas complejas de modelado.

11.3.2. Definición del sistema

Se realizar la simulación de un acelerómetro piezoeléctrico para determinar los parámetros de funcionamiento tales como:

- Rango de frecuencias donde el dispositivo realiza la medición,
- Desplazamiento de la masa sísmica
- Voltaje de salida proporcional a la aceleración medida.

11.3.3. Formulación del modelo

Se realizar una simulación del tipo Análisis, porque es necesario estimar una respuesta del sistema real y determinar su funcionamiento ante valores de entradas específicas. A continuación en la tabla 11.11 se definen las variables de sistema:

TIPO DE VARIABLE	NOMBRE	DESCRIPCION
Variables de entrada	Fuerza	Se encuentra implícita la aceleración porque $F=ma$ donde la masa es 8.71×10^{-6} siendo este un mismo un valor constante.
	Voltaje	Proporcional a la aceleración medida.
Variables de salida	Desplazamiento	Distancia medida en el eje Z debido al cambio de posición de la masa sísmica por la fuerza aplicada

Tabla 11.11 Tipos de variables

11.3.4. Colección de datos

Los datos necesarios para crear la estructura del acelerómetro piezoeléctrico se muestra en la siguiente tabla 11.12:

PARÁMETRO	UNIDAD	DATO
Largo de la masa sísmica (L_m)	μm	2400
Ancho de la masa sísmica (W_m)	μm	2400
Espesor de la masa sísmica (H_m)	μm	500
Largo de las vigas (L)	μm	2300
Ancho de las viga (W)	μm	600
Largo de los electrodos	μm	920
Ancho de los electrodos	μm	600
Espesor de las vigas(H)	μm	30
Espesor del PZT (H_p)	μm	45

Tabla 11.12 Dimensiones del dispositivo

Los materiales a utilizarse en el dispositivo se describen en la tabla 11.13:

ESTRUCTURA	MATERIAL
Masa sísmica	Si
Vigas	Si
Electrodos	PZT-5A

Tabla 11.13 Materiales del acelerómetro piezoeléctrico

11.3.5. Aplicación del modelo matemático y simulación

El método de modelado implementado en el software COMSOL Multiphysics es el método de elementos finitos (FEM). Esta técnica de cálculo es utilizada para obtener soluciones aproximadas sobre micro-sistemas, con este método se divide a la estructura en miles de fragmentos (elementos finitos). El comportamiento de cada elemento se representa mediante una ecuación sencilla.

Al final todos los elementos se vuelven a conectar. El resultado de las ecuaciones algebraicas se resuelve con el uso de una computadora.

Para llevar a cabo la simulación del acelerómetro MEMS a diseñar se utiliza un modelo 3D. Además se definen los parámetros físicos, propiedades de los materiales, condiciones de contorno y el tipo de estudio a aplicarse. Se realizan diferentes simulaciones en función de la fuerza aplicada sobre la masa sísmica. Entre los resultados arrojados por los estudios se muestran las tensiones medidas por los electrodos al producirse una deformación debida a la aceleración y los respectivos desplazamientos experimentados por la masa sísmica en el eje Z. (Ver Anexo C)

El proceso de generación de la solución mediante FEM se da en 5 pasos descritos en el capítulo VI, a continuación se detalla cada uno:

a. Definición de la Estructura

Se utiliza la herramienta CAD en 3D para determinar la geometría del acelerómetro piezoeléctrico. La figura 11.12 muestra la estructura final del dispositivo.

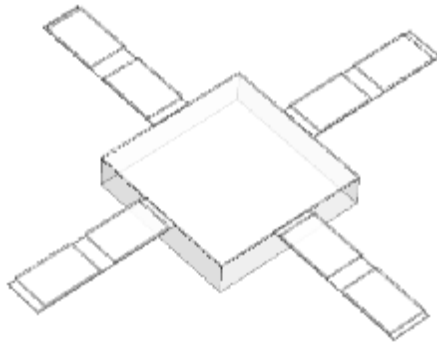


Figura 11.12 Geometría del Acelerómetro

b. Definir el modelo matemático a resolver.

Se requiere definir algunos parámetros para determinar el modelamiento y permitir la simulación adecuada del acelerómetro, entre ellos se tienen:

i. Especificación del régimen a estudiar

Se realiza un estudio en el dominio de la frecuencia. De esta manera se determinará el rango de frecuencia de medición del dispositivo y la frecuencia de resonancia a la que el dispositivo no debe trabajar.

ii. Asignación de las propiedades físicas de los materiales

Se utilizan dos tipos de materiales: el silicio (Si) y el Zirconato Titanato de Plomo (PZT-5A). A cada uno de los objetos generados en la fase anterior se le especifica el material correspondiente.

En la figura 11.13 se indican los elementos de color plomo formado de Si como son las vigas y la parte inferior de la masa sísmica. También se muestran los elementos de color azul formados PZT-5A. Tales como los electrodos colocados sobre las vigas y la capa superior de la masa sísmica.

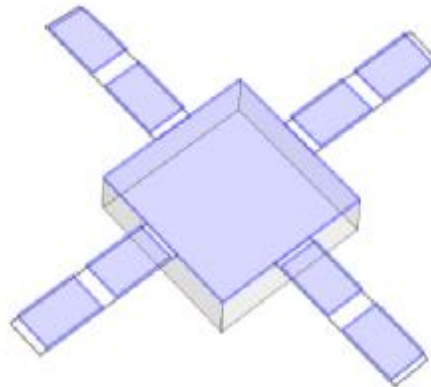


Figura 11.13 Electrodo y capa superior de la masa sísmica de PZT-5A (color azul), vigas y capa inferior de la masa sísmica de Si (color gris)

iii. Asignación de los modelos

Se debe proponer un modelo para el comportamiento de cada uno de los materiales. Deben incluir todos los factores que influyen en la respuesta del dispositivo respecto a las variables de fuerza y de desplazamiento en determinadas condiciones.

También es importante considerar las constantes físicas o mecánicas de las propiedades de los materiales. Se definen 2 modelos, los cuales se describen en la tabla 11.14:

MODELO	CARACTERÍSTICAS
Materiales Piezoeléctricos	Determina las propiedades constitutivas del PZT-5A y el tipo de deformación del material debido a la fuerza aplicada.
Materiales linealmente elásticos	<ul style="list-style-type: none"> • Un material tiene un comportamiento linealmente elástico, cuando al cesar las cargas, el material recupera su forma original. • El silicio es considerado como un material isotrópico porque posee las mismas propiedades físicas en todas las direcciones.

Tabla 11.14 Modelos utilizados en los materiales del dispositivo

iv. Aplicación de las cargas

La fuerza se aplica sobre la masa sísmica por lo cual es necesario definir 4 puntos para determinar la superficie sobre la cual se va aplicar la fuerza. En la figura 11.14 se puede identificar a los mismos con rombos de color azul.

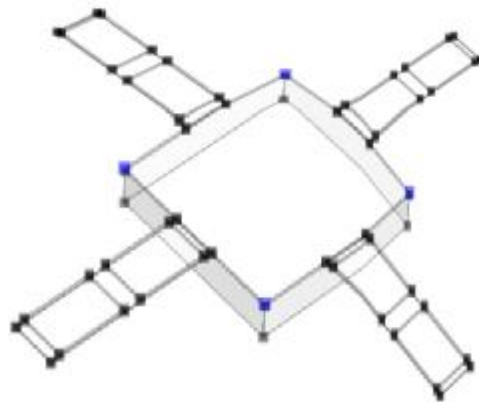


Figura 11.14 Puntos de carga en la geometría del acelerómetro

c. Mallado de la geometría

El mallado aplicado en COMSOL es del tipo Tetraedro como se muestra en la figura 11.15. De esta manera se divide el dispositivo en elementos muy pequeños para realizar el análisis.

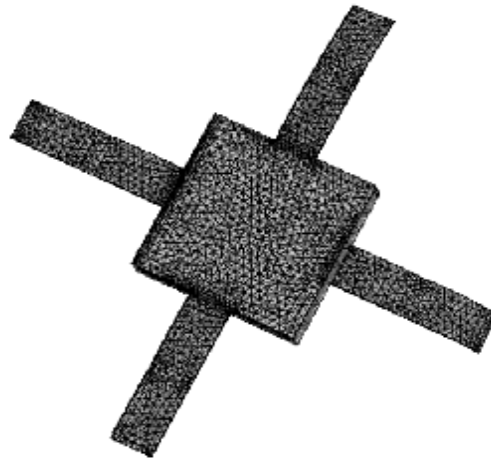


Figura 11.15 Mallado de la geometría

d. Resolución del problema

El software COMSOL Multiphysics reúne las ecuaciones algebraicas en forma de matriz. Luego las resuelve automáticamente para proveer los resultados adecuados y determinar los valores de las variables en estudio. Dicho procesamiento puede tardar varios minutos. En esta fase del proceso, es donde se aplica el método de análisis por elementos finitos para obtener la solución del problema.

11.4. Pruebas y comparación de resultados

En esta fase del proceso se analizan los resultados y se determina el funcionamiento del dispositivo acorde a los requerimientos de diseño. Adicionalmente se representa gráficamente la distribución y los parámetros correspondientes al voltaje de salida y el desplazamiento de la masa sísmica.

En el cálculo del rango de frecuencia donde el dispositivo funcionará de acuerdo a las especificaciones de diseño se observa en la figura 11.16. Se toma como frecuencia mínima 1 [Hz] y como frecuencia máxima $f_n/3$, de esta manera se obtiene los resultados de la tabla 11.15.

FRECUENCIAS	VALOR
Frecuencia de resonancia	2.25 [KHz]
Frecuencia mínima	1 [Hz]
Frecuencia máxima	750 [Hz]

Tabla 11.15 Frecuencias de trabajo

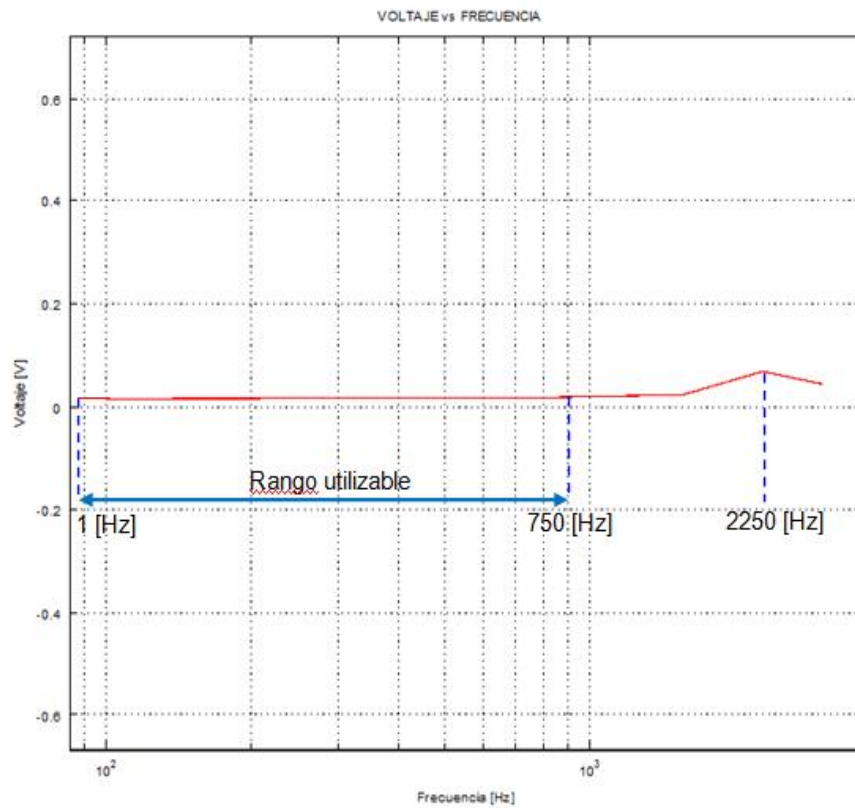


Figura 11.16 Rango de frecuencias de trabajo

A continuación, se analizan los resultados obtenidos luego de la simulación del acelerómetro de un eje:

- **FUERZA APLICADA = -0.01[N]**

Cuando se aplica una fuerza de -0.01[N] sobre la masa sísmica, se produce un desplazamiento proporcional a la aceleración siendo esta la variable a ser medida. Los transductores proporcionan un voltaje en función de la deflexión y deformación de las vigas. Mientras aumenta la frecuencia mayor será el voltaje de salidas y el error de medición como se puede observar en la tabla 11.16.

Además se aprecia que los transductores internos (cerca de la masa sísmica) están sometidos a la tensión aplicada. Sin embargo, los transductores externos (cerca de la estructura de soporte) están sometidos al esfuerzo de compresión. De esta manera se observa que están sujetos a fuerzas en diferentes direcciones.

FRECUENCIA [Hz]	VOLTAJE TOTAL ELECTRODOS INTERNOS [m V]	VOLTAJE TOTAL ELECTRODOS EXTERNOS [m V]	VOLTAJE SALIDA [m V]
100	9,00	12,60	3,60
325	9,30	12,90	3,60
750	9,50	13,20	3,70
825	10,00	14,00	4,00
1550	14,20	19,80	5,60
2275	40,40	57,20	16,80
3000	25,20	36,00	10,80

Tabla 11.16 Voltajes de salida para una fuerza aplicada de -0.01N

Se observa en la figura 11.17 la curva característica, la cual describe el funcionamiento del dispositivo cuando se aplica la fuerza de -0.01[N]. Donde la frecuencia de resonancia es de 2250[Hz] y el rango de trabajo está entre 1[Hz] – 750[Hz] y su el voltaje de salida es de 3,60 [mV].

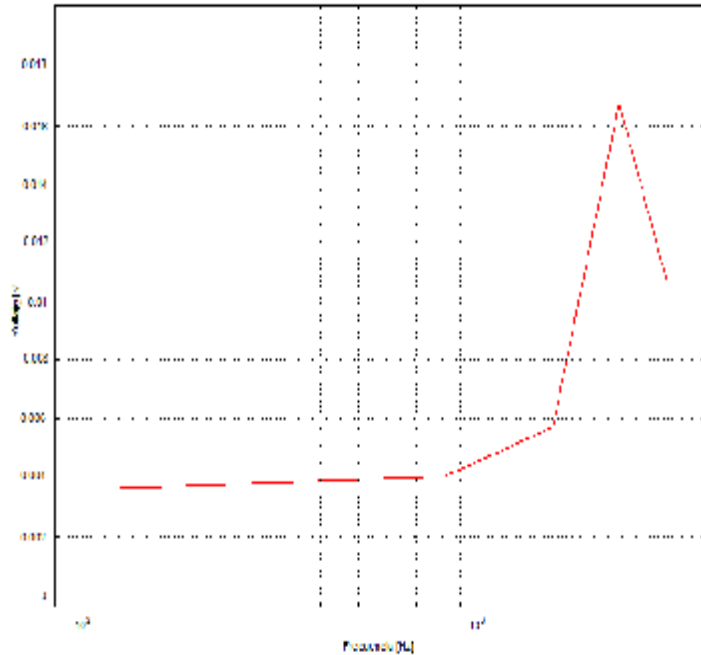
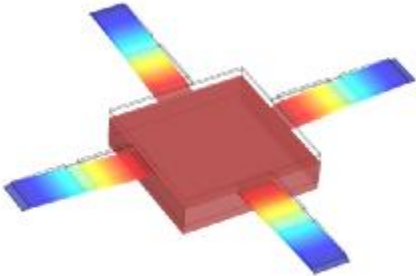
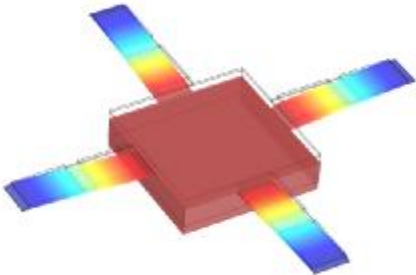
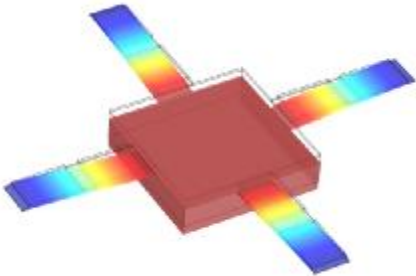
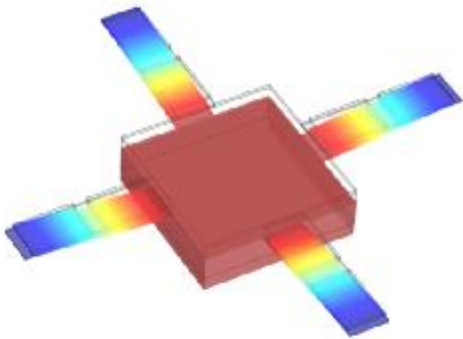
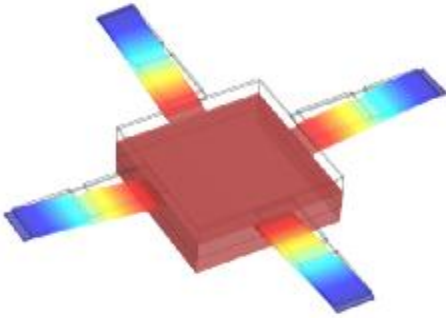


Figura 11.17 Curva característica aplicando una $F=-0.01[N]$

Cada resultado de la simulación debida al desplazamiento de la masa sísmica ante el cambio de frecuencia, se representa utilizando una determinada coloración como un indicador para la fuerza aplicada en la dirección z. El color rojo oscuro indica grandes desplazamiento a observarse en el extremo de la masa sísmica. Mientras la gama de colores celeste y amarillo indica un desplazamiento insignificante como se puede observar en la porción intermedia de la viga, como se observa en la tabla 11.17

FRECUENCIA [Hz]	DESPLAZAMIENTO MASA SÍSMICA [pm]	GRAFICA
100	94,11	

FRECUENCIA [Hz]	DESPLAZAMIENTO MASA SÍSMICA [μm]	GRAFICA
325	94,11	
750	96,20	
825	100,46	
1550	147,13	

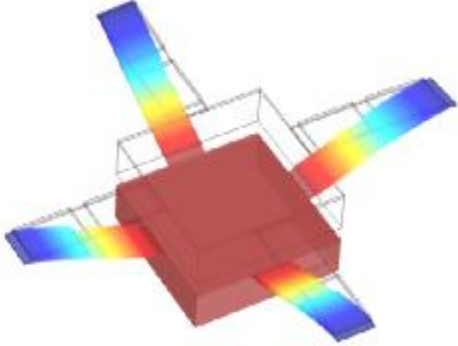
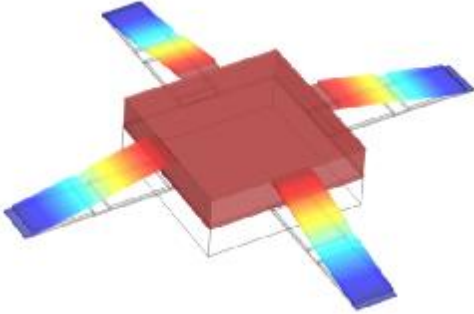
FRECUENCIA [Hz]	DESPLAZAMIENTO MASA SÍSMICA [pm]	GRAFICA
		
2275	424,07	
3000	265,65	

Tabla 11.17 Desplazamiento de la masa sísmica ante el cambio de frecuencia

- **FUERZA APLICADA = -0.04[N]**

Cuando se aplica una fuerza de -0.04[N] sobre la masa sísmica, se produce un desplazamiento proporcional a la aceleración siendo esta la variable a ser medida. Los transductores proporcionan un voltaje en función de la deflexión y deformación a lo largo de las vigas. Mientras aumenta la frecuencia mayor será el voltaje de salida y error de medición como se puede observar en la tabla 11.18.

Además se aprecia que los transductores internos (cerca de la masa sísmica) están sometidos a la tensión aplicada. Sin embargo, los transductores externos (cerca de la estructura de soporte) están sometidos al esfuerzo de compresión. De esta manera se observa que están sujetos a fuerzas en diferentes direcciones.

FRECUENCIA [Hz]	VOLTAJE TOTAL ELECTRODOS INTERNOS [mV]	VOLTAJE TOTAL ELECTRODOS EXTERNOS [mV]	VOLTAJE SALIDA [mV]
100	36,0	50,4	14,4
325	37,8	52,3	14,5
750	39,7	54,6	14,9
825	40,0	56,0	16,0
1550	56,2	79,0	22,8
2275	160,4	227,4	67,0
3000	100,8	143,6	42,8

Tabla 11.18 Voltajes de salida para una fuerza aplicada de -0.04N

Se observa en la figura 11.18 la curva característica, la cual describe el funcionamiento cuando se aplica una fuerza de -0.04[N]. Donde la frecuencia de resonancia es de 2250[Hz] y el rango de trabajo está entre 1[Hz] – 750[Hz] y el voltaje de salida es de 14,50 [mV].

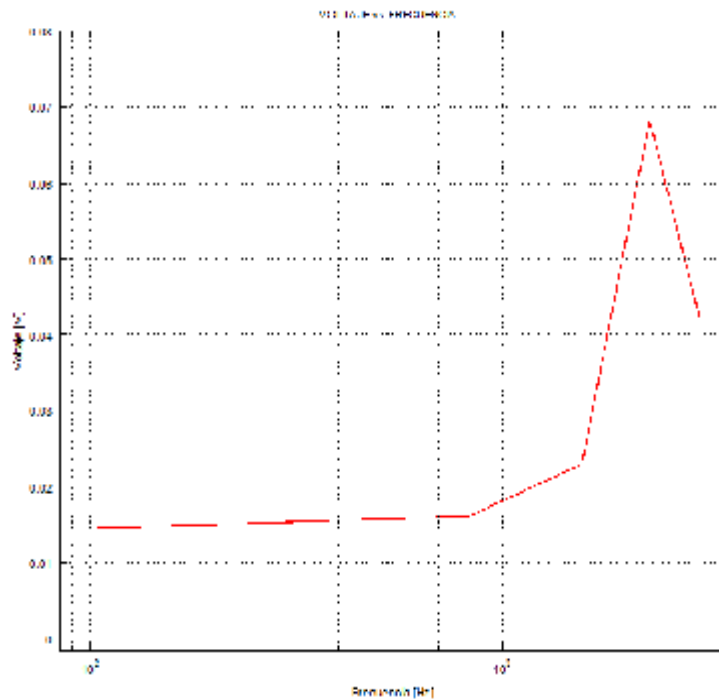
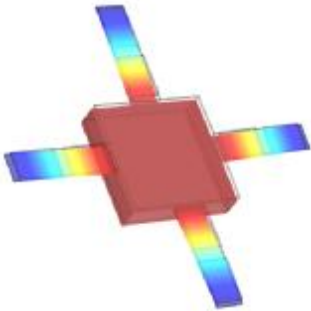
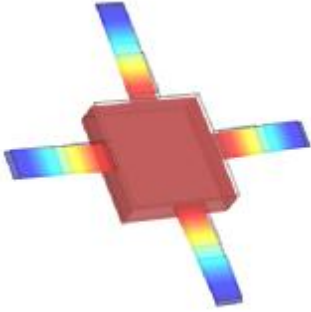
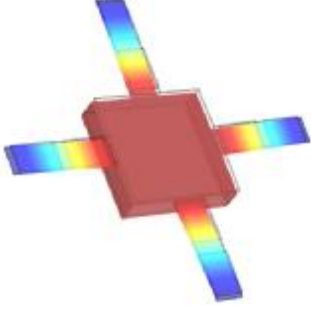


Figura 11.18 Curva característica aplicando una $F=-0.04$ [N]

Cada resultado de la simulación debida al desplazamiento de la masa sísmica ante el cambio de frecuencia, se representa utilizando una determinada coloración como un indicador para la fuerza aplicada en la dirección z. El color rojo oscuro indica grandes desplazamiento a observarse en el extremo de la masa sísmica. Mientras la gama de colores celeste y amarillo indica un desplazamiento insignificante como se puede observar en la porción intermedia de la viga, como se observa en la tabla 11.19

FRECUENCIA [Hz]	DESPLAZAMIENTO MASA SÍSMICA [pm]	GRÁFICA
100	376,47	
325	376,53	
750	378,10	

FRECUENCIA [Hz]	DESPLAZAMIENTO MASA SÍSMICA [pm]	GRÁFICA
825	418,76	
2275	1700,00	
3000	1100,00	

Tabla 11.19 Desplazamiento de la masa sísmica ante el cambio de frecuencia

- **FUERZA APLICADA = -0.08[N]**

Cuando se aplica una fuerza de -0.08[N] sobre la masa sísmica, se produce un desplazamiento proporcional a la aceleración siendo esta la variable a ser medida, los transductores proporcionan un voltaje en función de la deflexión y deformación a lo largo de las vigas. Mientras aumenta la frecuencia mayor será el voltaje de salida como se observa en la tabla 11.20.

Además se aprecia que los transductores internos (cerca de la masa sísmica) están sometidos a la tensión aplicada. Sin embargo, los transductores externos (cerca de la estructura de soporte) están sometidos al esfuerzo de

compresión. De esta manera se observa que están sujetos a fuerzas en diferentes direcciones.

FRECUENCIA [Hz]	VOLTAJE TOTAL ELECTRODOS INTERNOS [mV]	VOLTAJE TOTAL ELECTRODOS EXTERNOS [mV]	VOLTAJE SALIDA [mV]
100	71,80	100,60	28,50
325	72,30	101,20	28,90
750	76,50	105,90	29,20
825	79,80	112,00	32,20
1550	111,80	157,60	45,80
2275	313,20	445,80	132,60
3000	200,00	284,80	84,80

Tabla 11.20 Voltajes de salida para una fuerza aplicada de -0.08N

La curva característica describe el funcionamiento cuando se aplica una fuerza de -0.08[N] se observa en la figura 11.19. Donde la frecuencia de resonancia es de 2250[Hz] y el rango de trabajo está entre 1[Hz] – 750[Hz] y el voltaje de salida es de 29,00 [mV].

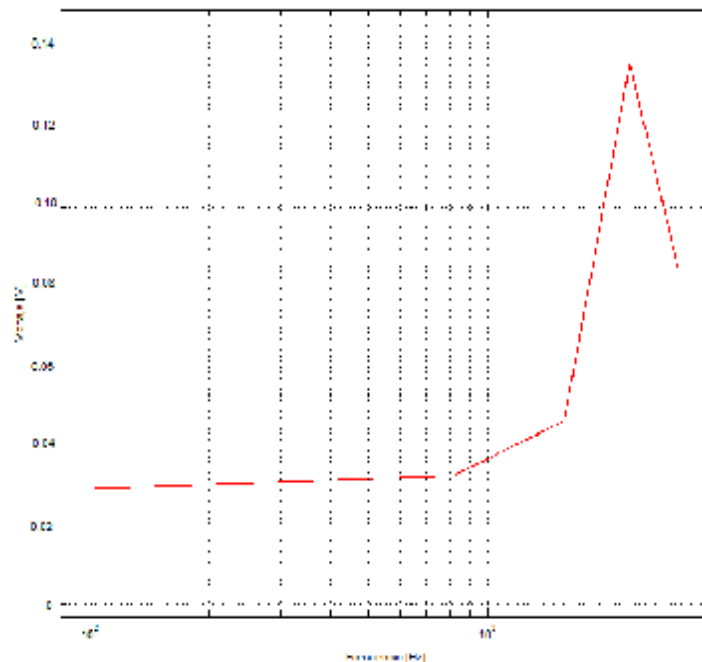
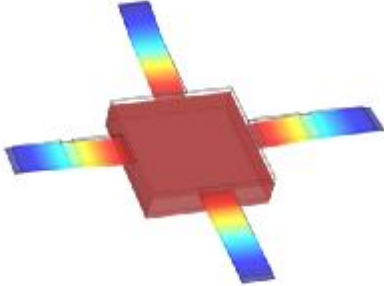
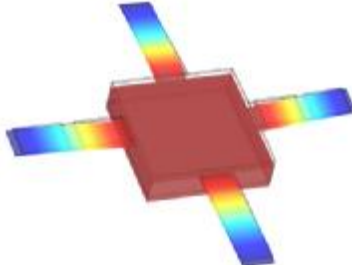
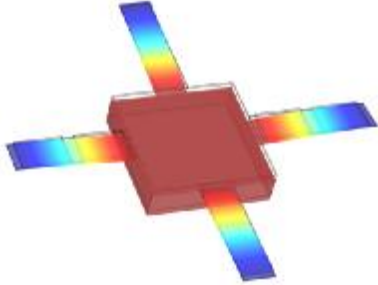


Figura 11.19 Curva característica aplicando una F=-0.08[N]

Cada resultado de la simulación debida al desplazamiento de la masa sísmica ante el cambio de frecuencia, se representa utilizando una determinada coloración como un indicador para la fuerza aplicada en la dirección z. El color rojo oscuro indica grandes desplazamiento a observarse en el extremo de la masa sísmica. Mientras la gama de colores celeste y amarillo indica un desplazamiento insignificante como se puede observar en la porción intermedia de la viga, como se observa en la tabla 11.21

FRECUENCIA [Hz]	DESPLAZAMIENTO MASA SÍSMICA [pm]	GRÁFICA
100	752,94	
325	752,97	
750	754,02	

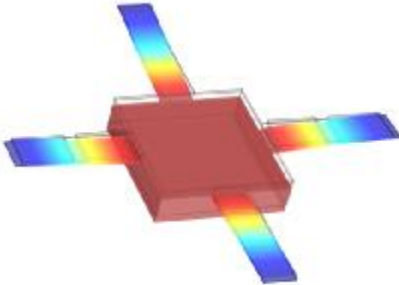
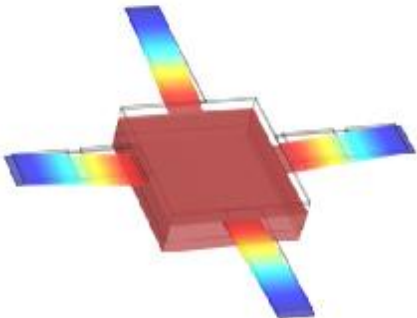
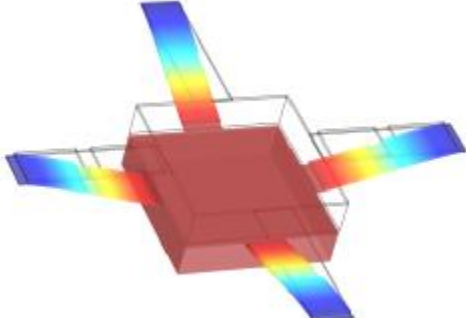
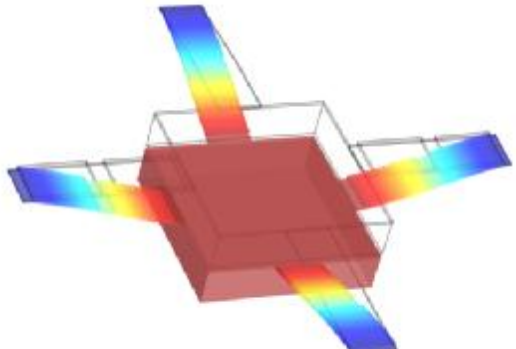
FRECUENCIA [Hz]	DESPLAZAMIENTO MASA SÍSMICA [µm]	GRÁFICA
825	837,53	
1550	1200,00	
2275	3400,00	
3000	2100,00	

Tabla 11.21 Desplazamiento de la masa sísmica ante el cambio de frecuencia

A continuación en la tabla 11.22 se determina la aceleración a medirse por el acelerómetro utilizando la segunda ley de Newton. Además se relaciona con el voltaje de salida proporcional a la deformación de las vigas cuando se aplican diferentes valores de fuerzas:

FUERZA APLICADA [N]	MASA [mg]	Voltaje [m V]	ACELERACION [m/s ²]	ACELERACION [g]
-0.01	8,71	3,60	1148,11	117,15
-0.04	8,71	15,00	4592,43	468,62
-0.08	8,71	30,00	9184,86	937,23

Tabla 11.22 Determinación de la aceleración a medir de acuerdo a la fuerza aplicada

De acuerdo al análisis de la figura 11.20, el voltaje es directamente proporcional a la aceleración medida. Donde el voltaje de salida por unidad de aceleración es de 30.72 [mV/g] siendo este parámetro la sensibilidad de voltaje.

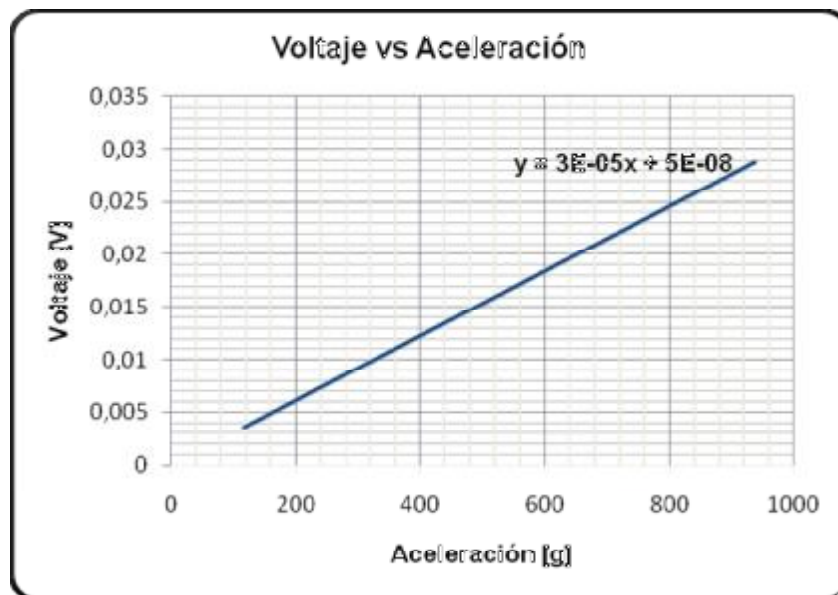


Figura 11.20 Curva de voltaje vs aceleración

Luego de este análisis, se concluye que la procedimiento empleado en el diseño del sensor fue adecuado ya que el dispositivo satisface los requerimientos de funcionamiento para trabajar en la aplicación del sistema airbag. La comparación de resultados se observa en la tabla 11.23:

CARACTERÍSTICAS	REQUERIMIENTOS	RESULTADOS
Tipo de sensor	Acelerómetro piezo-eléctrico MEMS	
Número de ejes	1	1
Sensibilidad de voltaje	≥ 10 y < 100 [mV/g]	30,72 [mV/g]
Rango de medición	1-1000 [Hz]	1-750 [Hz]

Tabla 11.23 Comparación entre los requerimientos y resultados del diseño del dispositivo MEMS

La sensibilidad de voltaje obtenida esta dentro del rango establecido en los requerimientos ya que el sistema a medir produce vibraciones de alta amplitud entre 50[g] y 100[g].

Con dicha sensibilidad de voltaje se obtuvo una frecuencia de resonancia alta de 2250 [Hz], lo cual determina un amplio rango de medición para el sensor. De esta manera se incrementa la vida útil del dispositivo porque los sistemas mecánicos se deterioran al trabajar en frecuencias cercanas a la frecuencia de resonancia.

Si bien es cierto el rango de frecuencias para la medición es menor al establecido como requerimiento, pero no representa un problema ya que el sistema airbag trabaja con frecuencias menores a 750[Hz]. Además este dispositivo podrá ser utilizado en otros sistemas auxiliares del automóvil.

CAPÍTULO XII

LABORATORIO DE MICRO-MAQUINADO

Introducción: Este capítulo tiene como objetivo presentar un análisis técnico - económico de las alternativas disponibles e innovadoras en el mercado para la adquisición de una "Micro-machining Station" de baja escala. Este estudio permitirá en un futuro cercano implementar un Laboratorio de MEMS con equipos de última tecnología proporcionando las garantías, tanto para su funcionamiento como para su mantenimiento.

12.1. Conocimientos previos para implementar un laboratorio MEMS

Para poder implementar un laboratorio de MEMS, se debe conocer:

1. Componentes de un laboratorio
2. Normas

12.1.1. Componentes de un laboratorio

No existen limitantes en cuanto a los componentes de un laboratorio MEMS. De manera general se debe contar con un conjunto de equipos como los detallados en la tabla 12.1:

CUARTO	EQUIPOS
1. Cuarto limpio	<ul style="list-style-type: none"> • Mesas de trabajo • Microscopio esteroscopico con cámara • Herramientas de Micro-Simulación • Equipos de Medición y Pruebas • Equipos de caracterización
2. Cuarto amarillo	<ul style="list-style-type: none"> • Equipo para fotolitografía • Deposición • Micro-mecanizado • Recolector de soluciones utilizadas • Horno • Refrigerador
3. Laboratorio de computo	<ul style="list-style-type: none"> • Programa de Diseño • Programa de Análisis MEF • Programa de Cálculo
4. Laboratorio de degradado	<ul style="list-style-type: none"> • Campana de Extracción. • Sistema de Degradado.
5. Equipo complementario	<ul style="list-style-type: none"> • Tanque de gas nitrógeno • Extinguidor • Botiquín de primeros auxilios • Lavabo

Tabla 12.1 Laboratorio para MEMS

12.1.1.1. Cuarto Limpio

Un Cuarto Limpio es un laboratorio de procesos donde se realiza la fabricación de las obleas, la preparación y dopaje de los materiales. Además se debe controlar diferentes parámetros ambientales. Por ejemplo: la humedad del aire, la temperatura y la cantidad de partículas presentes, con el propósito de proteger cualquier tipo de contaminación al proceso y al producto. En el caso de un laboratorio destinado a la microelectrónica es fundamental disminuir al máximo

la contaminación de partículas. Las posibles fuentes de este tipo de contaminación son:

- El aire exterior
- El personal
- Los materiales
- Los procesos.

La clasificación de las salas limpias está dada por un número (número de clase) el cual indica el máximo de partículas por pie cúbico, el mismo se observa en la Tabla 12.2

N. clase	Número máximo permitido de partículas/m ³						
0	25	6 (1)	NA	1	NA	NA	NA
1	250	63 (1)	28 (1)	10	NA	NA	NA
2	2500	625	278 (1)	100	25	NA	NA
3	25000	6250	2778 (1)	1000	250	10	NA
4	NS	62500	2777 (1)	10000	2500	100	25
5	NS	NS	NS	100000	25000	1000	250
6	NS	NS	NS	1000000	250000	10000	2500
7	NS	NS	NS	10000000	2500000	100000	25000

NS: Límite sin especificar. NA: No aplicable (1): Valores aproximados

Tabla 12.2 Clasificación de Salas Limpias⁸⁵

Se puede tener un cuarto limpio para un laboratorio MEMS con un conjunto de filtros y ventiladores localizados en la parte superior y un sistema de iluminación. En la Figura 5.3 (a) y (b) podemos observar dos diseños donde se presentan filtros de alta eficiencia ofreciendo limpieza y flujo de aire unidireccional o laminar.

⁸⁵ Tomado de: J. Castejón, "Consideraciones sobre diseño de salas blancas", Diciembre 2009. [Online] Disponible: <http://www.alcion.es/Download/ArticulosPDF/mi/09articulos.pdf>. [Accesado: Octubre 6, 2010]

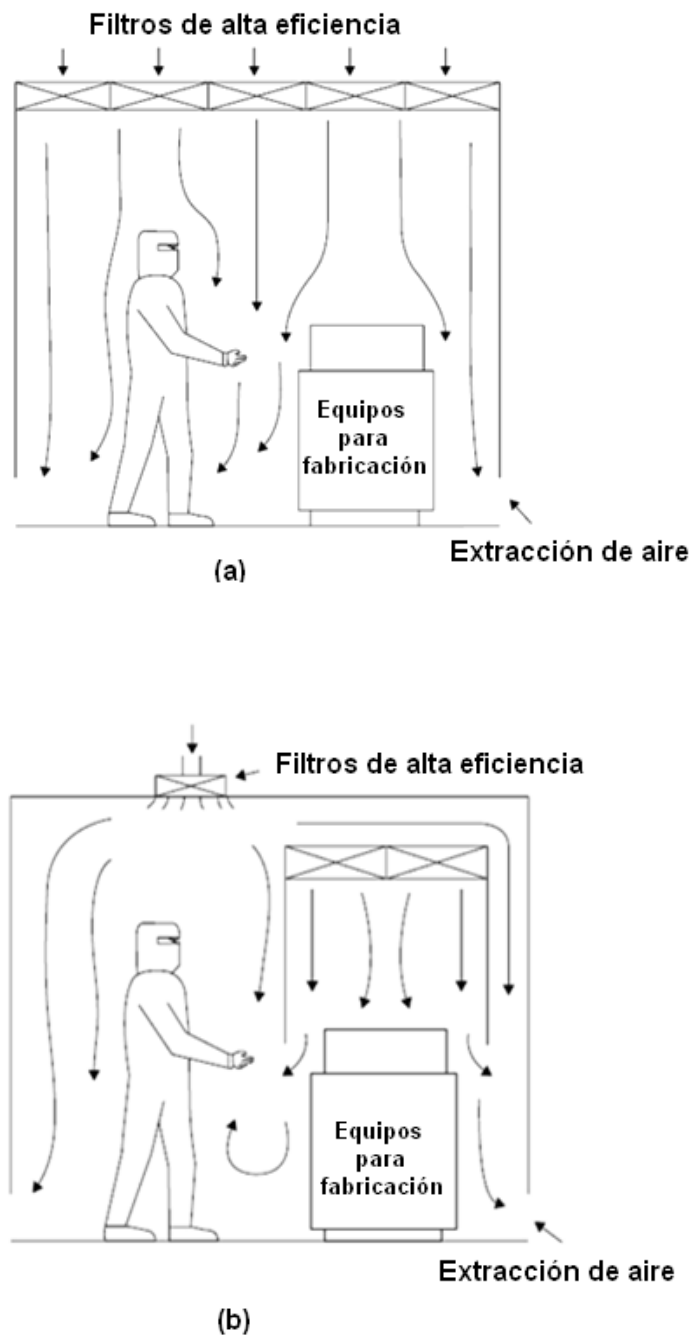


Figura 12.1 Diseño de Cleanroom: (a) Flujo de aire unidireccional en todo el cuarto y (b) Flujo laminar solo sobre los equipos de procesos⁸⁶

⁸⁶ Tomado de: W. Whyte, "Cleanroom Design", John Wiley & Sons, 2nd edition, 1999

12.1.1.2. Cuarto Amarillo

En este cuarto se realizan todos los procesos relacionados con:

- Fitolitografía
- Deposición
- Micro-maquinado

Se debe en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Todos los químicos a emplearse en ese laboratorio se deben conservar frescos y en buen estado.
- Se manipulan las sustancias con guantes.
- Los desechos se deben recolectan en recipientes de vidrio correctamente cerrados y se deberían entregan a una compañía encargada de tratar con este tipo de residuos.
- La estancia prolongada de las personas en este cuarto de luz ámbar o amarilla no debe ser excesiva puesto que puede llegar a producir malestar. Por esta razón es conveniente contar con todo el material y herramientas necesarias antes de comenzar a trabajar, para evitar pérdidas de tiempo y recursos.

12.1.1.3. Laboratorio de Cómputo

El objetivo de este laboratorio es realizar los diseños en formato electrónico, para su posterior manufactura. Esto implica, como en todo laboratorio de diseño por cómputo, el uso de procesadores de alta velocidad y pantallas de alta resolución.

Algunos de los programas son: AUTOCAD, ANSYS, FEMLAB, COVENTOR, COMSOL, MATLAB.

12.1.1.4. Equipo Complementario

El equipo complementario es variado, se pueden incluir tantas herramientas como se desee. Tales como lentes de aumento, pinzas de diferentes tamaños las cuales pueden ser de acero inoxidable o plástico, recipientes petri, goteros, envases, entre otros. Es muy importante contar con un buen equipo de primeros auxilios, así como las Hojas de Seguridad de las soluciones químicas conocidas como MSDS (Material Safety Data Sheet). Además se debe tener extinguidor y fuentes de agua como lavabos y regadera.

12.1.2. Normas

Dentro de los parámetros de comportamiento y utilización de los laboratorios se deben considerar a los siguientes:

- Zonificación de la sala siempre y cuando sea posible en sectores de clase diferente, dividirla en zonas por procesos.
- Vestimenta adecuada: traje, guantes, gafas (para proteger a la sala, no a la persona).
- Plan de trabajo preparado con antelación
- Seguimiento de los procedimientos normalizados.
- De acuerdo al método de fabricación a utilizar se selecciona los materiales, equipos, tipo de almacenamiento, herramientas necesarias y las plantillas adecuadas al proceso.
- Estudio ergonómico de la actividad de las personas y número máximo de las mismas compatible con el mantenimiento de laboratorio.

12.2. Análisis de pre-factibilidad del Laboratorio de MEMS

Al realizar el análisis de prefactibilidad del laboratorio de MEMS en la ESPE, se concluye que la universidad no cuenta actualmente con un lugar que cumpla las normativas necesarias para realizar dicha implementación. Por otra parte, la implementación de toda la infraestructura necesaria sería elevada, y

dado que el presupuesto inicial para este proyecto es de \$100 000 se sugiere iniciar con un laboratorio que tenga equipos de cómputo con software especializado para diseñar y simular dispositivos MEMS. Además se puede incluir maquinas de micro-fabricación que no requieran un cuarto especializado.

Es preciso indicar que para comprobar el funcionamiento del dispositivo se requiere de equipos de caracterización y pruebas. Cabe indicar que estos equipos no serán propósito de análisis en este proyecto. Sin embargo se sugiere que se lo realice a fin de contar con herramientas que permitan comprobar el funcionamiento y realizar mediciones en el laboratorio.

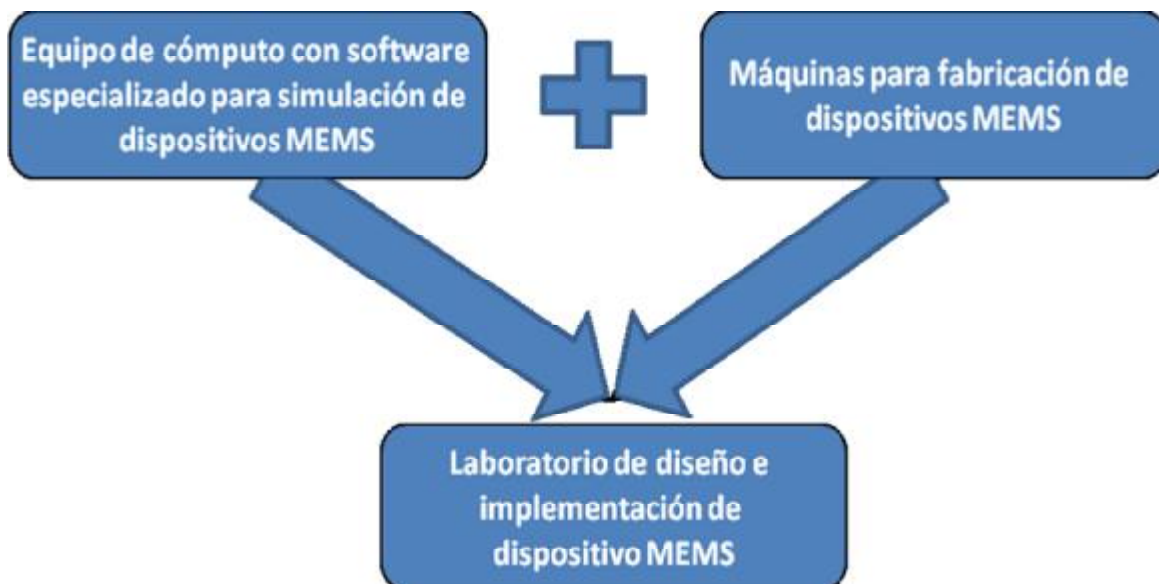


Figura 12.2 Análisis de pre-factibilidad para el Laboratorio de MEMS

12.2.1. Máquinas disponibles en el mercado para la fabricación de dispositivos MEMS

A continuación se va a realizar el análisis de 3 tipos de maquinas para micro-fabricación a fin de seleccionar aquella que se enmarque dentro de los requerimientos.

12.2.1.1. Sistema de micro-fabricación láser Oxford avanzado: SERIE E

Los sistemas láser serie E están pensados para convertir el trabajo de micro fabricación lo más simple posible. Con una gama completa de láseres y accesorios, la serie E es la herramienta ideal para la investigación. Esta máquina asocia la flexibilidad con una precisión de alto nivel y estabilidad.

En la figura 12.3 se observa la estructura de esta máquina.



Figura 12.3 Sistema de micro-fabricación Oxford

Además todos los sistemas láser de Oxford utilizan un control numérico computarizado (CNC), permitiendo utilizar un modelo CAD para realizar el mecanizado de la pieza, en una única interfaz. El sistema de visión en el eje permite la inspección de las partes como son los de fabricación, y ayuda en la alineación.

La amplia gama de accesorios pueden ser instalados en el sistema permitiendo configurarlos para micro-perforación laser, micro-corte, micro-fresado, marcado, trazado, corte en dados, etc.

El sistema puede ser actualizado para permitir las tareas no previstas a realizar, las actualizaciones pueden ser:

- Rotación de ejes adicionales
- Control de la forma cónica
- Enfoque automático
- Alineación automática
- Sensores de profundidad
- Estabilización de la temperatura
- Extracción de humo
- Sistema de cámaras de alta resolución fuera del eje.

Para la micro-perforación láser, se tiene una alta precisión, esta propiedad permite una alta velocidad de micro-perforación de agujeros muy pequeños con gran control de forma cónica. El diámetro del orificio se puede seleccionar con sólo cambiar la configuración en el equipo. Entre las principales aplicaciones de este sistema se tienen:

- Micro-fluídica
- Empacado de dispositivos micro-electrónicos
- Dispositivos para generación de energía
- Dispositivos biomédicos
- Micro-perforación
- Micro-fresado
- Ablación (Técnica de micro-fabricación)
- Grabado

En la tabla 12.3 se describen los parámetros de este sistema de micro-fabricación:

ESPECIFICACIONES	
Parámetros	Descripción
Duración de pulsación del láser	Nanosegundos
Longitud de onda	Según la aplicación, se tienen las siguientes opciones: <ul style="list-style-type: none"> • 1064nm, 532nm, 355nm, 266nm
Tipo de láser	Láser de estado sólido, bombeado por diodos de estado sólido
Dimensiones	2800(A) x 1560(E) x 2050(A) [mm]
Peso	2300 [kg]
Instalación eléctrica	Mono-fásico
Costo	US\$400 000,00

Tabla 12.3 Especificaciones del sistema de micro-fabricación Serie E de Oxford Láser

12.2.1.2. Impresora de materiales Dimatix DMP-2831

FUJIFILM Dimatix aprovecha su tecnología de inyección de tinta piezoeléctrica y procesos de fabricación de MEMS para producir una impresora de materiales diseñados específicamente para pruebas de viabilidad.

La impresora de materiales Dimatix (DMP) (figura 12.4) es una solución rentable, de precisión y un sistema de deposición de materiales fácil de utilizar.



Figura 12.4 Impresora de materiales Dimatix DMP-2831

DMP-2831				
Descripción del sistema	Cámara	Cabezales de impresión	Software de aplicación	Elementos reemplazables
<ul style="list-style-type: none"> • Sistema de deposición “inkjet” (tinta a chorro) • Bajo costo. • Utiliza piezo-cartuchos. • Capacidad de la caída de chorro sistema de observación • Cámara para la alineación de sustrato y la medición • Interfaz gráfica de usuario (GUI). • Capacidad de inyección de una amplia gama de fluidos • Cartucho de limpieza de la estación • El sistema Incluye PC, monitor y el software 	<ul style="list-style-type: none"> • Permite la alineación del sustrato con las marcas de referencia • Proporciona la medición de las características y ubicaciones • Proporciona control y captura de la imagen del patrón impreso • Proporciona alineación de los cartuchos utilizando cartuchos múltiples • Permite la colocación de la gota previamente al modelado del sustrato 	<ul style="list-style-type: none"> • DMC-11601 • DCM-11610 	<ul style="list-style-type: none"> • Pre-cargado plantillas de modelado • Patrón de vista previa • Editores: Diseño, ciclo de limpieza, ajuste de sustrato • Archivos de extensiones DXF, Gerber, GDSII y OASIS • Conversión de archivos a Bitmaps 	<ul style="list-style-type: none"> • Cartucho de impresión con el depósito para recargarlo una sola vez • Estación de limpieza

Tabla 12.4 Impresora de materiales DMP-2831

Las principales aplicaciones de esta impresora son:

- Desarrollo y evaluación de de material fluido
- Prototipo y de generación de muestras
- Fluidos y evaluación sustrato interacciones
- Desarrollo de productos
- Optimización y evaluación de los patrones digitales
- Depósito de fluidos biológicos como los patrones de células, los arrays de ADN, la proteómica

En la tabla 12.5 se explica cuales son las especificaciones de la impresora de materiales DMP-2831

ESPECIFICACIONES	
Parámetros	Descripción
Área de impresión	<ul style="list-style-type: none"> • Sustrato <0,5 mm de grosor: 210 mm x 315 mm (8.27 "x 12.4 in) • Sustrato 0,5 a 25 mm de grosor: 210 mm x 260 mm (8.27 "x 10.2)
Repetibilidad	± 25 m (± 0,001 in)
Peso aproximadamente	43 kilogramos (95 libras)
Alimentación	100-120/200-240 V CA 50/60 Hz 375 W máximo
Rango operativo:	De 15-40 °C a 50-80% de humedad relativa sin condensación
Seguridad	Cumplimiento norma EMC: EN61326-1 Clase A, FCC Part 15 Clase Seguridad: NRTL certificado con la norma EN 61010-1, UL 61010-1, CSA 22.2 No. 61010-1
Costo	US\$ 49 500,00+ costo de envío

Tabla 12.5 Especificaciones de la DMP 2831

12.2.1.3. Impresora de materiales Dimatix DMP-3000

La impresora de materiales Dimatix DMP-3000 (figura 12.5) cuenta con un área más grande de impresión de 300 x 300 mm, y mantiene una precisión de posicionamiento y repetibilidad de ± 5 micras y ± 1 micras, respectivamente. Esta utiliza un cristal de exposición al vacío a temperatura controlada con precisión para registrar, mantener y gestionar térmicamente sustratos durante la impresión. Estos sustratos incluyen plástico, vidrio, cerámica y silicio, así como sustratos flexibles de membranas, geles y películas delgadas de productos de papel.



Figura 12.5 Impresora de materiales Dimatix DMP-3000

Esta impresora incluye cabezales de impresión de 1 y 10 picolitros. Basados en la propiedad de FUJIFILM Dimatix de la tecnología MEMS de silicio, el cartucho Dimatix 16-jet está diseñado para utilizar una alta resolución en una amplia gama de aplicaciones. El cartucho de un 1 picolitro puede depositar características tan pequeñas como 20 micras para fabricar productos tales como transistores orgánicos de película delgada (TFT) y circuitos impresos. En la tabla 12.6 se realiza una descripción del sistema y sus partes.

En la tabla 12.7 se explican cuales son las especificaciones principales de la impresora DMP-3000:

DMP-3000				
Descripción del sistema	Cámara	Cabezales de impresión	Software de aplicación	Elementos reemplazables
<ul style="list-style-type: none"> • Sistema de deposición de inyección de tinta • El usuario puede rellenar los cartuchos de inyección de tinta piezoeléctrica y cabezales de impresión • Cámara vigilante del sistema de chorro • Cámara para la alineación de sustrato y la medición • Resolución de impresión variable • Controlado por PC con el software de interfaz gráfica • Amplia rango de fluidos compatibilidades • Mantenimiento del cabezal de impresión y limpieza de la estación • Incluye PC, el monitor y el software 	<ul style="list-style-type: none"> • Permite la alineación del sustrato con las marcas de referencia • Permite la impresión donde se necesita el posicionamiento o punto de referencia donde coincida con la colocación de sustrato • Proporciona ubicación y función de medición • Proporciona la inspección post-impresión de patrón y de captura de imágenes. 	<ul style="list-style-type: none"> • DMC-11601 • DMC-11610 • D-128/1 DPN • D-128/1 DPN • SX3 • SE-DPN • SE3 	<ul style="list-style-type: none"> • Pre-cargado de plantillas de modelado • Patrón de vista previa • Editores: Forma de Onda y el ciclo de limpieza • Archivos de extensiones DXF, Gerber, GDSII y OASIS • Conversión de archivos a Bitmaps 	<ul style="list-style-type: none"> • Cartucho de impresión con el depósito para ser recargado una sola vez. • SX3, SE3 y SE-DPN • D-128 / 1 DPN y DPN D-128/10 • Boquilla de material secante para la limpieza de la estación

Tabla 12.6 Descripción del sistema DMP-3000

ESPECIFICACIONES	
Parámetros	Descripción
Área de impresión	300 x 300 mm con sustratos de hasta 30 mm
Precisión del sistema de posicionamiento	± 5 micra
Peso aproximadamente	1100 kg
Alimentación	100-120/200-240 V CA 50/60 Hz 375 W máximo
Rango operativo:	15 a 40 ° C 5-80% de humedad relativa
Seguridad	Cumplimiento norma EMC: CE / FCC / UL / RoHS / WEEE
Costo	US\$180 000,00 + costo de envío.

Tabla 12.7 Especificaciones de la DMP 3000

12.2.1.4. Máquina recomendada

Luego del análisis de las características y costos se sugiere adquirir una máquina simple ya que se va a trabajar a baja escala de integración, la cual sirva para implementar aplicaciones básicas y no tenga un costo elevado. Por estas razones se sugiere se compre la impresora de materiales Dimatix DMP-2831, con las características mencionadas en la tabla 12.8

PARÁMETROS	DMP-2831
Área de impresión	<ul style="list-style-type: none"> Sustrato <0,5 [mm] de grosor: 210 x 315 [mm] Sustrato 0,5 a 25 [mm] de grosor: 210 x 260 [mm]
Peso	43 [kg]
Costo	Bajo
Cámara	<ul style="list-style-type: none"> Para la alineación de sustrato y la medición

PARÁMETROS	DMP-2831
Tecnología de micro-fabricación	Inyección a tinta de material piezo-eléctrico

Tabla 12.8 Características principales de las impresoras de materiales Dimatix

A continuación en la tabla 12.9 se encuentra la información necesaria del contacto para adquirir la impresora de materiales Dimatix DM-2831

EMPRESA	CONTACTO	TELEFONO	DIRECCIÓN	E-MAIL
FUJIFILM Dimatix, Inc.	Tim Luong	Tlf: 1-408-565- 7455 Fax: 1-408-565- 9151	2230 Martin Avenue Santa Clara, CA 95050 USA	tluong@dimatix.com www.dimatix.com

Tabla 12.9 Contacto para adquirir impresora de materiales Dimatix DMP-2831

12.2.2. Software recomendado para la simulación de MEMS

Se requieren computadoras con el software necesario para la simulación de MEMS. Este proyecto fue realizado en COMSOL Multiphysics, durante su empleo se pudo constatar las bondades del programa de simulación. Tales como interfaz amigable al usuario, versatilidad y respaldo técnico on-line. Por lo tanto se recomienda su adquisición considerando que además tiene precios muy competitivos en el mercado. En la tabla 12.10 se muestra los precios de esta plataforma

PRODUCTO	CPU ¹ /NSL ²	FNL ³
COMSOL Multiphysics	US\$ 9 995,00	US\$ 19 990,00

Tabla 12.10 Costos de la plataforma COMSOL Multiphysics

En la tabla 12.11, 12.12 y 12.13 se observa los costos de las herramientas y módulos, las cuales se pueden aumentar en el software.

HERRAMIENTAS PARA EL MODELADO	CPU/NSL	FNL
Librería de materiales	US\$ 2 495,00	US\$ 4 990,00
Módulo de optimización	US\$ 2 495,00	US\$ 4 990,00

Tabla 12.11 Costos de herramientas para el modelado

MÓDULOS DE APLICACIÓN ESPECÍFICA	CPU/NSL	FNL
AC/DC Module	US\$ 4 995,00	US\$ 9 990,00
Acoustics Module	US\$ 5 995,00	US\$ 11 990,00
Batteries & Fuel Cells Module	US\$ 5 995,00	US\$ 11 990,00
Chemical Reaction Engineering Module	US\$ 4 995,00	US\$ 9 990,00
Earth Science Module	US\$ 3 995,00	US\$ 7 990,00
Heat Transfer Module	US\$ 5 995,00	US\$ 11 990,00
MEMS Module	US\$ 5 995,00	US\$ 11 990,00
Plasma Module	US\$ 9 995,00	US\$ 19 990,00
RF Module	US\$ 3 995,00	US\$ 7 990,00
Structural Mechanics Module	US\$ 3 995,00	US\$ 7 990,00

Tabla 12.12 Costos de los distintos módulos de la plataforma COMSOL Multiphysics

INTERFACES RELACIONADAS CON COMSOL MULTIPHYSICS	CPU/NSL	FNL
LiveLink™ for Inventor®	US\$3 995,00	US\$ 7 990,00
LiveLink™ for Pro/ENGINEER®	US\$3 995,00	US\$ 7 990,00
LiveLink™ for Solidworks®	US\$3 995,00	US\$ 7 990,00
LiveLink™ for MATLAB®	US\$995,00	US\$ 1 990,00
File Import for CATIAV5	US\$ 4 995,00	US\$ 9 990,00

Tabla 12.13 Costos de la interfaces relacionadas con COMSOL Multiphysics

En la tabla 12.14 se muestra el costo de un curso de entrenamiento del software:

CURSOS DE ENTRENAMIENTO	1-DÍA DE CURSO	2-DÍAS DE CURSO
COMSOL Multiphysics	US\$695,00	US\$ 1 295,00

Tabla 12.14 Costos del curso de entrenamiento

Una ventaja adicional es que COMSOL permite tener una licencia utilizada para la investigación académica y la enseñanza.

- CPU¹: Licencia para una sola persona, puede utilizar una sesión en un único equipo designado en un momento dado.
- NSL²: Usuario único: una sola persona podrá utilizar un máximo de una sesión paralela del software. No se permiten el acceso o el uso del software a través de una red.
- FNL³: Licencia para una red de computadoras.

En la tabla 12.15 se encuentra la información necesaria del contacto para adquirir el software COMSOL Multiphysics

EMPRESA	CONTACTO	TELEFONO	E-MAIL
COMSOL Inc.	Mauricio Sanchez	Tlf: 1 781-273-3322	masc@comsol.com

Tabla 12.15 Contacto para adquirir el software COMSOL Multiphysics

CAPÍTULO XIII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

13.1. CONCLUSIONES

- Luego de profundizar en los fundamentos de los MEMS y conseguir una valiosa información expresada a lo largo de todo el estudio, se concluye que esta tecnología tiene un futuro prometedor porque permite integrar en un solo dispositivo del tamaño de las micras, toda un sistema que contiene estructuras mecánicas, sensores, actuadores, procesadores, memorias, buses de comunicaciones y fuentes de energía.
- Luego de estudiar las propiedades físicas, mecánicas, químicas y eléctricas de los materiales usados para la transducción, se comprendió que estas sufren cambios y se ven afectadas por factores externos, determinando así el comportamiento del material. Por lo tanto, este conocimiento permitirá seleccionar el material más adecuado para cada aplicación. Además de acuerdo al nivel de escalado se pueden mejorar las capacidades o incluso hacer posible aplicaciones que a macro escala son imposibles.
- Al analizar y comparar las 3 técnicas de micro-fabricación de MEMS, se pudo observar que existe una tendencia a emplear la deposición y remoción de capas delgadas de diferente material, de esta manera el micro-maquinado superficial y volumétrico son los más empleados para construir diferentes estructuras. Por otra parte actualmente existe la posibilidad de utilizar técnicas convencionales de mecanizado a micro-escala tales como

micro-corte, micro-fresado, micro-taladro, micro-torneado, entre otros; lo que flexibiliza y economiza las tecnologías de micro-fabricación.

- Dado que es una tecnología nueva se busco poder simular el diseño del acelerómetro piezoeléctrico en distintos software para determinar la herramienta más óptima. Sin embargo, no se pudo realizar la comparación de resultados obtenidos de Comsol Multiphysics con otras herramientas de simulación de MEMS existentes en el mercado, porque es difícil adquirir estos programas con todas las prestaciones durante un periodo corto, por su elevado costo, por su poca información en Internet y, por su limitado asesoramiento técnico para la adquisición y manejo del mismo.
- Al finalizar el diseño, modelamiento y simulación del acelerómetro se concluye que la metodología fue la correcta ya que el sensor obtenido cumple con los requerimientos de funcionamiento para trabajar en la aplicación del sistema del airbag. Adicionalmente el dispositivo puede ser utilizado en otros sistemas auxiliares del automóvil. Como prueba de que la metodología fue acertada se pudo observar lo siguiente:
 - ü La respuesta del sensor fue lineal en su rango de frecuencias para la medición comprobándose que la fuerza aplica es directamente proporcional al voltaje de salida del acelerómetro
 - ü El acelerómetro fue capaz de soportar golpes de 1[g] hasta 1200 [g] con una fuerza igual al esfuerzo máximo soportado por las vigas, lo que demuestra la amplia gama de aplicaciones en los cuales puede ser utilizado.
- El presente estudio sirve de base importante para el desarrollo de proyectos de investigación en diferentes campos de la electrónica pues esta tecnología permite generar dispositivos versátiles de bajo consumo de energía, de alto desempeño y de bajo costo. A manera de ejemplo se pueden citar varias áreas interdisciplinarias de desarrollo afines a sistemas auxiliares para automóviles, sistemas de posicionamiento, Bio-MEMS, sistemas de telecomunicaciones, entre otros.

- Luego de realizar el análisis de pre-factibilidad de un laboratorio de micro-fabricación en el Departamento de Eléctrica y Electrónica de la Escuela Politécnica del Ejército se concluye que la mejor alternativa al momento es adquirir una impresora de materiales Dimatix DMP-2831 basado en la tecnología de inyección de tinta. Esta máquina es simple, permite implementar aplicaciones básicas y no requiere de un cuarto especializado. Adicionalmente el laboratorio deberá incluir equipos de cómputo y software especializado en la simulación de MEMS
- Los estudiantes de pregrado tiene potencial investigativo en nuevas tecnologías, tal como es el caso de la tecnología MEMS que antes de este proyecto era desconocida. Demostrando que dentro del área de pregrado es posible estimular el espíritu de investigación de los estudiantes del Departamento de Eléctrica y Electrónica para desarrollar futuros proyectos de investigación e implementación aportando al área de investigación en tecnología aplicada de la Escuela Politécnica del Ejército.

13.2. RECOMENDACIONES

- Debe realizarse un estudio profundo de los capítulos teóricos desarrollados en este proyecto pues esto nos permite comprender el estado del arte de estos dispositivos lo que facilitará el desarrollo de futuros proyectos de implementación en esta nueva tecnología en la Escuela Politécnica del Ejército.
- Se sugiere que al diseñar un acelerómetro para aplicaciones automotrices se especifique un rango amplio de frecuencia ya que la frecuencia de vibración correspondiente a la frecuencia de trabajo del dispositivo depende del movimiento relativo de los componentes del vehículo, de las maniobras de conducción, de la interacción con la superficie del camino y, de las condiciones del medio ambiente.

- En el diseño de un acelerómetro se recomienda tener en cuenta la sensibilidad, la cual depende de los niveles de amplitud de la vibración a medir. Si el sistema a medir produce vibraciones de alta amplitud ($> 10[g]$), se elegirá un acelerómetro de baja sensibilidad (≥ 10 [mV/g]). Si las mediciones de interés son de baja amplitud ($< 10[g]$) se requiere un acelerómetro de media sensibilidad (≥ 100 [mV/g]). Si los niveles de vibración a medir son muy pequeños (< 2 [g]) la selección más adecuada será un acelerómetro de alta sensibilidad (≥ 1000 [mV/g]).
- Se recomienda tener una sensibilidad de voltaje baja a fin de obtener una frecuencia de resonancia alta, lo cual determina un amplio rango de medición para el sensor. De esta manera se incrementa la vida útil del dispositivo porque los sistemas mecánicos se deterioran al trabajar en frecuencias cercanas a la frecuencia de resonancia.
- Se recomienda utilizar como constantes de las propiedades de los materiales, los datos proporcionados por el software utilizado para la simulación, de esta manera el error disminuye entre los resultados del modelamiento analítico y numérico.
- Se recomienda a la Escuela Politécnica del Ejército y al Departamento de Eléctrica y Electrónica adquirir el software de simulación para MEMS Comsol Multiphysics, pues presenta mejores prestaciones respecto a otros simuladores del mercado. Por ejemplo una interfaz amigable, mayores módulos de trabajo y, asesoramiento técnico para el manejo.
- Para usuarios o desarrolladores que deseen empezar a explorar y manejar el software de simulación Comsol Multiphysics se recomienda acceder a los tutoriales proporcionados en su página web. Se sugiere prestar especial atención al diseño del modelo del dispositivo.
- Para el montaje del laboratorio de Micro-maquinado se recomienda prestar atención a las características técnicas del equipo, disponibilidad de espacio físico, y las necesidades que el equipo requiere para su funcionamiento.

- Se sugiere dar impulso a proyectos de investigación relacionados con tecnología MEMS, ya que el desarrollo de micro-dispositivos está adquiriendo gran relevancia por su rendimiento y viabilidad de detectar y/o medir parámetros físico, mecánicos, biológicos, entre otros, en ámbitos como el control de condiciones ambientales, automatización industrial, domótica, biomédica y telecomunicaciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Gardner, V. Varadan, O. Awadelkarim, “*Microsensors MEMS and Smart Devices*”, John Wiley & Sons Ltd., 2001.
- [2] M. Gad-el-Hak, “*MEMS: Introduction and Fundamentals*”, 2da Ed., Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2006.
- [3] J. Jack, “Microelectromechanical systems (MEMS): fabrication, design and Applications”, Noviembre 2001. [Online]. Disponible: stacks.iop.org/SMS/10/1115. [Acceso: Julio 31, 2010]
- [4] H. De Los Santos, G. Fischer, H. Tilmans, J. T.M. van Beek, “Fabricación de RF MEMS”, Diciembre 2009. [Online]. Disponible: http://conocimientosmems.blogspot.com/2009_12_22_archive.html [Accesado: Agosto 31, 2010]
- [5] R.Marabini, C. Arrieta, S. Reich, M. Negri, L. Dori, J. Gimenez, A. Lamagna, “Preliminary results of a first prototype of an e-nose for indoor air quality control”, IBERSENSOR2000, 2000
- [6] M. Gad-el-Hak, “*MEMS: Aplicaciones*”, Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2005.
- [7] S. E. Lishevsky, “*Nano- and Microelectromechanical Systems: Fundamentals of Nano- and Microengineering*”, CRC Press, 2001.

- [8]l. Gallego, "Microfacturing: Microtecnologías: Pasado, Presente y Futuro," Portal del proyecto MicroManufacturing cofinanciado por el Ministerio de Ciencia e Innovación y el FEDER, 2009. [Online]. Disponible: http://www.micromanufacturing.net/didactico/Desarollo/microtechnologies_es/1-5-expectativas-de-mercado/. [Accesado: Agosto 31, 2010]
- [9] A. Torres, A. Murguía y R. Ramos, "A MSM Thin Film High Speed Photo-Detector Based on a-SiGe:H,F", Joint International Meeting of the ECS, 2006.
- [10] Tai-Ran Hsu, "*MEMS and microsystems: design, manufacture, and nanoscale engineering*", 2008.
- [11] T. Castillo, "Tecnología de los materiales Semiconductores", Universidad de Oriente. [Online] Disponible: <http://mt2435.googlepages.com/unidad1.pdf>
- [12] S. M. Colás, "Optimización de sensores de presión piezo-resistivos de silicio para instrumentación biomédica y aplicaciones a alta temperatura", Universidad de Barcelona. [Online] Disponible: http://www.tesisenxarxa.net/ TESIS_UB/ AVAILABLE/TDX-1029109-085040//04.SMC_4de6.pdf
- [13] S. Kasap, "*Principles of Electronic Materials and Devices*", McGraw-Hill Companies, 2005
- [14] D. Askeland, P. Phulé, "*The Science and Engineering of Materials*" , Thomsom Canada Limited, 1994
- [15] "Chapter 6. Scaling Laws in MiniaturizationJ. Rodriguez", Lectures on MEMS and Microsystems Design and Manufacture, [Online]. Disponible: http://www.engr.sjsu.edu/trhsu/ME189_Chapter%206.pdf. [Accesado: Septiembre 19, 2010]
- [16] M. Wautelet, "Scaling laws in the macro-,micro – and nano Word", European Journal of Physics, 2001

[17] S. Baglio, S. Castorina, N. Savalli “*Scaling Issues and Design of MEMS*”, Willey, 2007. Elwenspoek, M. and Wiegerink, R. (2001) *Mechanical Microsensors*. Germany:Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2001.

[18] M. Madou, “*Fundamentals of microfabrication: the science of miniaturization*”, 2da Edición, CRC Press, 2002

[19] S. Beeby, G. Ensell, M. Kraft, N. White, “*MEMS Mechanical Sensors*”, Artech house, 2004

[20] A. L.Herrera May, A. R. Cortés Pérez, L. A. Aguilera Cortés, “Los microacelerómetros en la actualidad”, Mayo-Agosto, año/vol. 18, número 002 [Online]. Disponible: <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/html/416/41618204/41618204.html> [Accesado: Septiembre 23, 2010]

[21] J. Duarte, F. Fernández, M. Moreno Sereno, “Técnicas de medida para pequeños desplazamientos”, Junio 2009. [Online]. Disponible: <http://redalyc.uaemex.mx/pdf/496/49612069017.pdf> [Accesado: Septiembre 22, 2010]

[22] D. S. Greywall, Chien-Shing Pai, Sang-Hyun Oh, Chorng-Ping Chang, D. M. Marom, P. A. Busch, R. A. Cirelli, J. Taylor, F. Klemens, T. Sorsch, J. Bower, W. Y.-C. Lai, H. Soh, “Monolithic Fringe-Field-Activated Crystalline Silicon Tilting-Mirror Devices”, [Online], Disponible: http://engineering.ucsb.edu/sohlab/pdf/monolithic_fringe.pdf [Accesado: Septiembre 22, 2010]

[23] Tudor, M. J., S. P. Beeby, “*Resonant Sensors: Fundamentals and State of the Art*,” Sensors and Materials, Vol. 9, No. 3, 1997.

[24] Elwenspoek, M. and Wiegerink, R. “*Mechanical Microsensors*”, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2001.

- [25] H. Tilmans, M. Elwenspoek, J. Fluitman, "Sensors and Actuators", Micro resonant force gauges, 1992. *paginas* 30, 35-53.
- [26] T. Akiyama y S. Katsufusa, "A New Step Motion of Polysilicon, Microstructures," *Proc MEMS*, 1993.
- [27] J. Bustillo, RT Howe y RS Muller, "Surface micro-machining for microelectromechanical systems", IEEE, Vol 86, 1998.
- [28] A. Malshe, C. O'Neal, S. Singh, W. Brown, W. Eaton y W. Miller, "Challenges in the packing of MEMS", International Journal of Microcircuits and Electronic Packaging, Vol. 22, 1999.
- [29] L. Alting, F. Kimura, H. Hansen, G. Bissacco, "Micro Engineering", Annals of the CIRP 52, 2003
- [30] J. Ortiz, "RED TEMÁTICA: Ingeniería de Superficies y Capas Delgadas", 2008. [Online]. Disponible: <http://www.icmm.csic.es/fis/espa/pvd.html>. [Accesado: Octubre 15, 2010]
- [31] D. Angelescu, E. Donzier, A. Goodwin, M. Manrique, Y. Tai, "Un mundo pequeño pero comprometedor", Oilfield Review, 2007
- [32] H. Stone, A. Stroock y A. Ajdari A, "A New Wave of Microfluidic Devices," The Industrial Physicist 9, No. 4, 2003.
- [33] M. J. López Fernández, "Introducción a los sistemas microelectromecánicos MEMS", Sevilla, Octubre 2005.[Online]. Disponible: <http://www.aeih.org/ih/Congresos/Congreso-23/Documentacion/Documentos/B3-4-D.pdf>
- [34] Varios autores, "Obleas: tratamientos y recubrimientos". [Online]. Disponible: http://www.uv.es/martinep/DISPOSITIVOS_archivos/Clase%203%20Recubrimientos%20dopado.pdf.

[35] S. Fatikow, U. Rembold, "*Microsystems Technology and Microrobotics*", Springer, New York, 1997

[36] Varios autores, "Microelectromechanical Systems (MEMS)". [Online] Disponible: http://www.wiley-vch.de/vch/journals/2081/books/2081_rel_title_varadan.pdf

[37] M. Gad-el-Hak, "*The MEMS Handbook*", CRC PRESS, 2002

[38] M. Villarroya Gaudó, "Diseño y fabricación de sistemas micro / nano electromecánicos integrados monolíticamente para aplicaciones de sensores de masa y sensores biológicos con palancas como elementos transductores", 2005. [Online]. Disponible: <http://conocimientosrfmemscircuit.blogspot.com/2010/02/publicacion-13.html>. [Accesado: Octubre 6, 2010]

[39] M. Esashi, K. Minami, T. Ono, "Silicon bulk micromachining and nanomachining", Condensed Matter News 6:31-44, Tohoku University, Japan, 1998.

[40] M.J. Madou, "Fundamentals of Microfabrication", CRC Press, ISBN 0-8493-0826-7, 2001.

[41] M. J. López Fernández, "Introducción a los sistemas microelectromecánicos MEMS.", Octubre 2005. [Online]. Disponible: <http://www.aeih.org/ih/Congresos/Congreso-23/Documentacion/Documentos/B3-4-D.pdf> [Accesado: Octubre 9, 2010]

[42] G. Pelz, "*Mechatronic Systems, Modeling and Simulation with HDSL*", Wileys.

[43] D. Shuvra, "Modeling MEMS devices for Automotive Applications", 2005-01-1447. [Online] Disponible: <http://eng-sci.udmercy.edu/courses/e478/PDFs/2005-01-1447.pdf>

[44] V. A. Kolchuzhin, "Methods and Tools for Parametric Modeling and Simulation of Microsystems based on Finite Element Methods and Order Reduction Technologies", 11. Enero, Novosibirsk. [Online] Disponible: <http://www.qucosa.de/fileadmin/data/qucosa/documents/5980/data/dissertation.pdf>

[45] X. Zhao, "Modeling and Simulation of MEMS Devices", August 2, 2004, Blacksburg, Virginia. [Online] Disponible: <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-08122004-151112/unrestricted/dissertation.pdf>

[46] Varios autores, "Theory: Beam Equation", efunda. [Online] Disponible: http://www.efunda.com/formulae/solid_mechanics/beams/theory.cfm

[47] Varios autores, "Timoshenko beam theory", Diciembre 11, 2010. [Online]. Disponible: http://en.wikipedia.org/wiki/Timoshenko_beam_theory. [Accesado: Noviembre 30, 2010]

[48] K. Timoshenko, "Modelo de elementos finitos para el cálculo de arcos. Validación en estructuras agroindustriales de acero", 1989.

[49] S. Gutierrez, G. Etse, "Elemento finito isoparametrico de placa para Continuos micropolares cosserrat", 2004, Argentina. [Online]. Disponible: <http://www.amcaonline.org.ar/ojs/index.php/mc/article/viewFile/283/271>. [Accesado: Noviembre 29, 2010]

[50] J. Figueroa, G. Barrientos, R. Riquelme, R. Sampaio, "Dinámica no-lineal de vigas flexibles curvas con Grandes deformaciones" , Mecánica Computacional Vol. XXII, Argentina, 2003. [Online]. Disponible: <http://www.amcaonline.org.ar/ojs/index.php/mc/article/viewFile/717/679> [Accesado:Diciembre 7, 2010]

[51] J. Gómez, "Desarrollo de un modelo constitutivo para problemas de fatiga termomecanica acoplada con efectos de tamaño via la mecanica del daño continuo", Universidad Tecnológica de Pereira., Scientia et Technica Año XIII,

2007. [Online] Disponible: <http://www.utp.edu.co/php/revistas/ScientiaEtTechnica/docsFTP/92547129.pdf> [Accesado: Diciembre 5, 2010]

[52] I. Aguirre, "Aplicación del método "Dual Boundary" para el cálculo de los parámetros de la mecánica de fractura elástica lineal de probetas tipo SE(T), DE(T) y M(T)", 2005, Bolivia. [Online] Disponible: <http://www.ucbcba.edu.bo/Publicaciones/revistas/actanova/documentos/v3n3/v3.n3.aguirre.pdf> [Accesado: Diciembre 7, 2010]

[53] Varios autores, "Función de Green", Septiembre, 2010. [Online]. Disponible: http://es.wikipedia.org/wiki/Funci%C3%B3n_de_Green. [Accesado: Noviembre 30, 2010]

[54] Varios autores, "Método de elementos de frontera", Diciembre, 2010. [Online]. Disponible: http://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9todo_de_elementos_de_frontera [Accesado: Diciembre 8, 2010]

[55] I. Sánchez, "Diseño y modelación de un transductor tipo arreglo en versión MEM para aplicaciones médicas", México, 2009. [Online]. Disponible: http://smcsyv.fis.cinvestav.mx/supyvac/23_1/SV2312310.pdf [Accesado: Diciembre 6, 2010]

[56] M. Escribano, "El análisis por elementos finitos", Universidad Complutense de Madrid, España. [Online]. Disponible: <http://www.uv.es/asepuma/XIV/comunica/117.pdf>. [Accesado: Diciembre 9, 2010]

[57] E. Frías Valero, "Aportaciones al estudio de las máquinas eléctricas de flujo axial mediante la aplicación del método de los elementos finitos", Departamento de Ingeniería Electrónica UPC, 2004. [Online] Disponible: http://www.tdr.cesca.es/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-1214104-114808//06Efv06de23.pdf [Accesado: Diciembre 3, 2010]

[58] A. Carnicero, "Introducción al método de los elementos finitos". [Online] Disponible:http://www.iit.upcomillas.es/~carnicero/Resistencia/Introduccion_al_ME_F.pdf. [Accesado: Noviembre 4, 2010]

[59] J. Duarte, F. Fernández, "La simulación por computador en investigación y desarrollo", 2005. [Online]. Disponible: http://tecnura.udistrital.edu.co/downloads/revista_16/recreacion2.pdf [Accesado: Diciembre 15, 2010]

[60] D. Principe, "Importancia de la Simulación", 2009. [Online]. Disponible: <http://daily-principe-unefa.blogspot.com/2009/06/importancia-de-la-simulacion.html>. [Accesado: Diciembre 16, 2010]

[61] A. Law, W. Kelton, "*Simulation Modeling & Analysis*", McGraw-Hill, New York, 1991.

[62] A. Drummond, "Microsystems retos de simulación", ASM International, 2007. [Online]. Disponible: http://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=2013&lang=es#_MEMS_Simulations. [Accesado: Diciembre 18, 2010]

[63] Varios autores, "COMSOL Multiphysics". [Online] Disponible: <http://www.addlink.es/productos.asp?pid=91>. [Accesado: Diciembre 15, 2010]

[64] Varios autores, "CoventorWare for MEMS CAD Design, Multiphysics Modeling and Simulation". [Online] Disponible: <http://www.coventor.com/coventorware.htm>. [Accesado: Diciembre 16, 2010]

[65] Varios autores, "Microsystems (MEMS) Industry". [Online] Disponible: <http://www.ansys.com/industries/microsystems.asp>. [Accesado: Diciembre 17, 2010]

[66] Varios Autores, "MEMS Pro v7.0". [Online] Disponible: <http://www.deeblesales.com/data/datasheets/MEMS%20Pro%20Datasheet.pdf>. [Accesado: Diciembre 18, 2010]

[67] Varios autores, "Todo sobre medición de presión", TESTO, 26/09/2006. [Online]. Disponible: http://www.testo.es/online/embedded/Sites/ESP/MainNavigation/ServiceAndSupport/DownloadCenter/guiaspracticas/Guia_presion.pdf

[68] K.Gilleo, "*MEMS/ MOEMS packaging: Concepts, Desing, Materials and Processes*", McGraw Hill Nanoscience and Technology Series.

[69] C. Cipolletti, "Sensores de presión", E.E.T., Tecnología de Control. [Online]. Disponible: <http://www.scribd.com/doc/4560444/TC-UNIDAD-4-Sensores-de-Presion>. Accesado: 6 Noviembre, 2010.

[70] B. Bhushan, "Handbook of nanotechnology", Springer, volume 2

[71] Varios autores, "Sensores externos". [Online]. Disponible: <http://www.dccia.ua.es/dccia/inf/asignaturas/ROB/optativos/Sensores/externos.html>

[72] J. A. Pérez Magni, "MEMS, Acelerómetros", Universidad de Cantabria. [Online]. Disponible en: http://www.scribd.com/doc/13713749/MEMS#open_download. Accesado: 7 Noviembre, 2010

[73] Candelas, Corrales, "Giroscopios en el Sistema GypsyGyro-18", publicación interna Nº 4. Grupo de Automática, Robótica y Visión Artificial de la Universidad de Alicante, España, febrero 2007.

[74] Universidad Politécnica de Valencia, "Sensores de fibra óptica-SENSORES", octubre 2002. [Online]. Disponible: <http://server-die.alc.upv.es/asignaturas/lased/2002-03/Sensores PIC/fopticos2.pdf>

[75] J. Brignell, "Smart Sensors. A Comprehensive Survey," University of Southampton, UK. ISBN . 1989.

[76] K. Najafi, "Smart sensors," Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 1, No. 2, 1991.

[77] Geschke, Klank & Telleman, "Microsystem Engineering of Lab-on-a-chip Devices", John Wiley & Sons, 2004.

[78] J.García, "Análisis de nuevas tecnologías para microactuadores en la exploración espacial", Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales Universidad Nacional de Córdoba. [Online] Disponible: <http://www.efn.uncor.edu/dep/aero/Asignaturas/SisEqAvi/Microactuadores.pdf>.

[79] L. S. Arias Maya, L. Vanegas Useche, "Materiales Compuestos Inteligentes", 2004. [Online]. Disponible: <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/849/84911685026.pdf>.

[80] E. Henriquez, "El violín más pequeño del mundo funciona con MEMS". [Online]. Disponible: <http://es.engadget.com/2010/10/04/video-el-violin-mas-pequeno-del-mundo-funciona-con-mems/>. [Accesado: Diciembre 27, 2010]

[81] Varios autores, "Tendencias tecnológicas MEMS". [Online]. Disponible:<http://www.scribd.com/doc/23346843/TENDENCIAS-TECNOLOGICAS-MEMS> [Accesado: Diciembre 23, 2010]

[82] (Varios autores, "Aplicaciones industriales de MEMS (Industria Automotriz)". [Online]. Disponible: <http://www.simet.gob.mx/automotriz/ags/presentaciones/Bloque%202/2.3%20Aplicaciones%20industriales.pdf>. [Accesado: Diciembre 28, 2010]

[83] Staff, "PCB-MEMS". [Online]. Disponible: http://electronicosonline.com/noticias/notas.php?id=A5100_0_1_0_C&page=7274. [Accesado: Diciembre 23, 2010]

[84] Varios Autores, "El Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) Market in Mobile Phones". [Online]. Disponible:

<http://www.reportlinker.com/p0240714/Micro-Electro-Mechanical-Systems-MEMS-Market-in-Mobile-Phones.html#ixzz1DJLuKyjU>. [Accesado: Diciembre 23, 2010]

[85] Varios autores, "BioMEMS". [Online]. Disponible: http://www.uninorte.edu.co/extensiones/IDS/Ponencias/PONENCIAS%20BIOINGENIERIA/Biomems_MIGUEL_SOTAQUIRA.pdf [Accesado: Diciembre 26, 2010]

[86] Plancarte F., "'Troya MEMS", [Online]. Disponible: <http://www.monografias.com/trabajos40/troya-biomems/troya-biomems2.shtml> [Accesado: Diciembre 27, 2010]

[87] Varios autores, "Factores de interés de los MEMS". [Online]. Disponible: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/vazquez_r_fj/capitulo3.pdf [Accesado: Diciembre 26, 2010]

[88] Varios autores, "Global MEMS/Microsystems Markets and Opportunities" [Online]. Disponible: <http://www.gersteltec.ch/userfiles/1199612044.pdf>. [Accesado: Diciembre 28, 2010]

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Ley de Moore.....	2
Figura 1.2 Road map de la micro-fabricación	3
Figura 1.3 Comparación entre el desarrollo tecnológico y la naturaleza en escala métrica.....	4
Figura 1.4 Variables de MEMS	5
Figura 1.5 Sensor de gas MEMS.....	5
Figura 1.6 Elementos de una MEMS	6
Figura 1.7 Nodos de gran escala y primarios	7
Figura 1.8 Tipo de arquitecturas MEMS	7
Figura 1.9 Proyección en el mercado de los MEMS, 2008-2014	9
Figura 1.10 Proyección del mercado de los Micro-sensores	9
Figura 2.1 Oblea.....	14
Figura 2.2 Horno utilizado en el método Czochralski para el cultivo de mono cristales.....	15
Figura 2.3 Lingote de silicio mono cristal a 300 mm en un dispositivo de manipulación de materiales	16
Figura 2.4 Estructura de un cristal de silicio	17
Figura 2.5 Célula sub-cúbica de una red de diamantes en un cristal de silicio.....	18
Figura 2.6 Calibradores de tensión de silicio.....	23
Figura 2.7 Forma del cuarzo.....	25
Figura 2.8 Estructura del cuarzo.....	26
Figura 2.9 Micro-sensor utilizando polímeros	29
Figura 2.10 Conversión de energía mecánica a eléctrica y viceversa en los cristales piezoeléctricos.....	29
Figura 3.1 Escalamiento de un giroscopio.....	34
Figura 3.2 Dimensiones de un cubo	39

Figura 3.3 Placas paralelas conductoras	40
Figura 3.4 Relación de las fuerzas con respecto al tamaño de los objetos	43
Figura 3.5 Viga voladiza	49
Figura 3.6 Modelado de un sensor inercial.....	52
Figura 3.7 Condensador de placas paralelas	54
Figura 4.1 Medidor de deformación de papel de aluminio.	60
Figura 4.2 Deformación vs. Esfuerzo.....	60
Figura 4.3 Vista isométrica superior de un acelerómetro piezo-resistivo.....	62
Figura 4.4 Sección transversal de un micro-acelerómetro piezo-resistivo.....	63
Figura 4.5 Tensión de salida en función del tiempo para un transductor piezoeléctrico.....	64
Figura 4.6 Circuito eléctrico equivalente de un material piezo-eléctrico	65
Figura 4.7 Curva de respuesta frecuencia vs. Impedancia de un material piezo-eléctrico	65
Figura 4.8 Ejemplo del efecto piezo-eléctrico	66
Figura 4.9 Diferencia de voltaje vs carga.....	68
Figura 4.10 Ejemplos de sensores de desplazamiento de capacitancia: (a) placa móvil, (b) de área variable, y (c) se mueve el dieléctrico.	70
Figura 4.11 Sensor de capacitancia diferencial	70
Figura 4.12 Sistema de detección de la intensidad modulación	73
Figura 4.13 Curva de respuesta	74
Figura 4.14 Micro-sensor óptico	75
Figura 4.15 Interferómetro de Michelson	76
Figura 4.16 Sistema de medida de la posición espacial.....	77
Figura 4.17 Geometría de un sistema de triangulación óptica.....	77
Figura 4.18 Curva de calibración de un sistema de triangulación óptica:.....	78
Figura 4.19 Ejemplo del principio de superposición de 2 ondas iguales en magnitud y frecuencia. Cuando se presenta la interferencia, las ondas se suman constructiva o destructivamente.	79
Figura 4.20 Diagrama de Bloques de un Sensor Resonante.....	80
Figura 4.21 Esquema del principio de actuación del sensor resonante. (a) Sin elemento sensor y (b) con elemento sensor.....	80
Figura 4.22 Curva característica de un Sistema de Resonancia	81

Figura 4.23 Esquema del mecanismo de excitación electrostática y detección capacitiva.....	83
Figura 4.24 Esquema del mecanismo de excitación y detección magnética	84
Figura 4.25 Esquema de un resonador con excitación y detección magnética ...	85
Figura 4.26 (a) Viga en condiciones iniciales. (b) excitación electro-termal produce elevación de temperatura y por lo tanto flexión mecánica	86
Figura 4.27 Esquema del mecanismo de excitación opto-termal y detección óptica	88
Figura 4.28 Esquema del principio de excitación y detección dieléctrico	89
Figura 4.29 Principio de actuación electrostática.....	91
Figura 4.30 Curva de Paschen	92
Figura 4.31 Comportamiento de un actuador piezoeléctrico	93
Figura 4.32 Una micro-bomba simple con un actuador piezoeléctrico: (a) sin aplicar tensión, y (b) el efecto de la aplicación de un voltaje a la capa piezoeléctrica.....	94
Figura 4.33 Comportamiento de un actuador térmico.....	95
Figura 4.34 Comportamiento de un actuador magnético.....	96
Figura 5.1 Proceso de micro-fabricación	100
Figura 5.2 Diagrama de flujo típico para la fabricación de MEMS	102
Figura 5.3 (a) antes y (b) después de la aplicación del método spin-casting	103
Figura 5.4 Deposición química en fase de vapor.....	105
Figura 5.5 Crecimiento epitaxial	105
Figura 5.6 Crecimiento epitaxial	106
Figura 5.7 Proceso de pulverización de plasma	107
Figura 5.8 Proceso de litografía.....	108
Figura 5.9 Perfiles de grabado.....	109
Figura 5.10 Proceso LIGA	112
Figura 5.11 Fabricación de un micro-engrane	113
Figura 5.12 Micro-maquinado superficial	114
Figura 5.13 Proceso de micro-maquinado superficial de 1 máscara	116
Figura 5.14 Proceso de micro-maquinado superficial de 2 máscaras	117
Figura 5.15 Micro-maquinado volumétrico.....	119
Figura 6.1 Etapas de modelamiento	123
Figura 6.2 Deformación de una viga.....	128

Figura 6.3 Tensión de acción directa en la cara de la viga	130
Figura 6.4 Tensiones directas.....	131
Figura 6.5 Tensiones tangenciales	131
Figura 6.6 Fuerzas y momentos que actúan sobre una pequeña sección de la viga	132
Figura 6.7 Deformación en vigas de Timoshenko.....	136
Figura 6.8 Fuerzas actuando en una viga de Timoshenko	137
Figura 6.9 Barra de Cosserat.....	139
Figura 6.10 Configuración de la viga	140
Figura 6.11 Referencias geométricas de una sección	141
Figura 6.12 Elementos de un sistema en el método FEM	146
Figura 6.13 Proceso de obtención de la solución mediante análisis por elementos finitos	147
Figura 6.14 Viga en voladizo con una carga puntual en el extremo	149
Figura 6.15 Discretizado del dominio de una viga en voladizo	149
Figura 6.16 Diagrama esquemático de un condensador de placas paralelas.....	154
Figura 6.17 Estructura esquemática de un capacitor “air gap”	155
Figura 6.18 Interacción fluido-estructura de un movimiento determinado en una simulación de engranajes	156
Figura 7.1 Etapas de la simulación.....	164
Figura 7.2 Modelos de COMSOL Multiphysics	169
Figura 7.3 Pasos para simular un dispositivo MEMS.....	172
Figura 7.4 Proceso de diseño de MEMS en el software ANSYS	174
Figura 7.5 Módulos utilizados en el software de simulación SoftMEMS	177
Figura 8.1 Tipos de presión	181
Figura 8.2 Sensor de presión.....	183
Figura 8.3 Esquema de los principales componentes de sensor de presión	183
Figura 8.4 Esquema de un sensor de presión MEMS	184
Figura 8.5 Diafragma de silicio	185
Figura 8.6 Esquema de la sección transversal de un sensor de presión.....	187
Figura 8.7 Sensor de presión capacitivo.....	188
Figura 8.8 Sensor de presión resonante de Druck	189
Figura 8.9 Esquema de un micrófono.....	190
Figura 8.10 Representación esquemática de un micro-sensor de torque.....	192

Figura 8.11 Principio de una célula de carga basado en la compresión de silicio	192
Figura 8.12 Resonador metálico.....	193
Figura 8.13 Elemento de detección de torque sobre la base a) líneas de retardo reflexivo de SAW b) resonadores SAW.....	194
Figura 8.14 Principio del sensor de fuerza de un condensador de distancia variable	195
Figura 8.15 Cabeza de un sensor micro-maquinado.....	196
Figura 8.16 Pinza Endoscópica con sensor táctil integrado	197
Figura 8.17 Modelo físico sobre el cual se basa el funcionamiento de los acelerómetros integrados	199
Figura 8.18 Elementos de un acelerómetro mecánico.....	201
Figura 8.19 Funcionamiento de un acelerómetro capacitivo. a) sensor en reposo y b) respuesta a una aceleración aplicada	202
Figura 8.20 Acelerómetro piezo-eléctrico	202
Figura 8.21 Acelerómetro piezo resistivo.....	203
Figura 8.22 Uso del giroscopio en un iPhone.....	204
Figura 8.23 Estructura del Sensor “lift force”	211
Figura 8.24 Vista lateral del sensor de flujo.....	211
Figura 8.25 Curvas de desviación de las placas superior e inferior con respecto a la velocidad del flujo	211
Figura 8.26 Sensor de flujo másico de efecto coriolis.....	212
Figura 8.27 Arquitectura de un sensor inteligente	214
Figura 8.28 Componentes de un LOC	216
Figura 9.1 Funcionamiento de un micro-actuador	219
Figura 9.2 Definición de linealidad.....	221
Figura 9.3 Micro-actuadores: (a) axial, (b) transversal y (c) flexión	225
Figura 9.4 Fenómeno del electromagnetismo.....	226
Figura 9.5 Partes de un micro-actuador	227
Figura 9.6 Cambio en la estructura cristalina de las SMA producido por el cambio de fase.....	228
Figura 9.7 Sistema de movimiento ciliar (CMS).....	235
Figura 9.8 Actuadores neumáticos electrostáticos controlados por un sistema de conducción de una dimensión sin contacto. (a) Distribución de los actuadores.	

Mecanismo de control de Flujo mediante una acción electrostática de la boquilla (b) cuando la boquilla está en condiciones normales (apagada) y (c) Se aplica una tensión al electrodo (encendido) y la boquilla esta cerrada.	236
Figura 9.9 Primer plano de las tenazas de las pinzas y las estructuras de la extensión de los brazos.	237
Figura 9.10 Primer plano de una micro-pinza HEXSIL	238
Figura 9.11 Utilidad de una micro-pinza	239
Figura 9.12 Brazo de robot fabricado con micro-músculos.....	239
Figura 9.13 Principio del movimiento ciliar utiliza en la mayoría de los sistemas micro-robóticos basados en contacto	240
Figura 9.14 Influencia de los cables de energía en los micro-robots.....	242
Figura 9.15 Concepto de sistema multi-micro-robot flexible descentralizado	245
Figura 9.16 Concepto de la estación flexible de micro-montaje basados en micro-robots (FMMS).....	246
Figura 9.17 Comunicación entre robots miniatura	247
Figura 10.1 Estructuras con materiales con memoria de forma.....	250
Figura 10.2 Capas finas de diamante	250
Figura 10.3 Micro-mecanizado de zafiro mediante LBM.....	252
Figura 10.4 Varilla de diámetro 12 [µm] mecanizado mediante WEDG	254
Figura 10.5 Toro mecanizado en diamante por medio de FIB.....	255
Figura 10.6 Violín con tecnología MEMS.....	256
Figura 10.7 Libélula artificial	256
Figura 10.8 Robot colibrí.....	259
Figura 10.9 Futuro de las MEMS en la industria automotriz	261
Figura 10.10 Espesor inicial de la resina ~4 [µm]	264
Figura 10.11 Válvula eléctricamente controlada	264
Figura 10.12 Dispositivos MEMS en la telefonía móvil	266
Figura 10.13 Tendencia de mercado para biomems	267
Figura 10.14 Predicciones de ingresos del mercado MEMS	270
Figura 10.15 Mercado de los MEMS emergentes.....	272
Figura 10.16 Aplicaciones de los MEMS	272
Figura 10.17 Etapas de desarrollo de los dispositivos MEMS	274
Figura 11.1 Ubicación del acelerómetro en el automóvil	277
Figura 11.2 Modelo de un acelerómetro típico.....	282

Figura 11.3 Estructura del acelerómetro piezo-éctrico (1) masa sísmica, (2) vigas y (3) electrodos.....	284
Figura 11.4. Respuesta típica del acelerómetro piezoeléctrico.....	285
Figura 11.5 Diagrama de cuerpo libre de la viga de suspensión	289
Figura 11.6 Área de la sección transversal de la viga de suspensión de PZT/Si en el dispositivo	290
Figura 11.7 Ubicación de los elementos en el dispositivo.....	294
Figura 11.8 Interfaz gráfica del programa en MATLAB para el modelamiento analítico del acelerómetro piezoeléctrico.....	296
Figura 11.9 Vista superior del dispositivo	297
Figura 11.10 Vista lateral del dispositivo	298
Figura 11.11 Rango de frecuencias de medición.....	298
Figura 11.12 Geometría del Acelerómetro.....	303
Figura 11.13 Electrodo y capa superior de la masa sísmica de PZT-5A (color azul), vigas y capa inferior de la masa sísmica de Si (color gris).....	304
Figura 11.14 Puntos de carga en la geometría del acelerómetro	305
Figura 11.15 Mallado de la geometría	306
Figura 11.16 Rango de frecuencias de trabajo	307
Figura 11.17 Curva característica aplicando una $F=-0.01[N]$	309
Figura 11.18 Curva característica aplicando una $F=-0.04[N]$	312
Figura 11.19 Curva característica aplicando una $F=-0.08[N]$	315
Figura 11.20 Curva de voltaje vs aceleración	318
Figura 12.1 Diseño de Cleanroom: (a) Flujo de aire unidireccional en todo el cuarto y (b) Flujo laminar solo sobre los equipos de procesos	323
Figura 12.2 Análisis de pre-factibilidad para el Laboratorio de MEMS	326
Figura 12.3 Sistema de micro-fabricación Oxford.....	327
Figura 12.4 Impresora de materiales Dimatix DMP-2831	329
Figura 12.5 Impresora de materiales Dimatix DMP-3000	332

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Resistividad eléctrica típica de los semiconductores	15
Tabla 2.2 Propiedades mecánicas y termofísicas del silicio	19
Tabla 2.3 Propiedades del SiO ₂	21
Tabla 2.4 Propiedades mecánicas y termofísicas del carburo de silicio	21
Tabla 2.5 Propiedades del nitruro de silicio	22
Tabla 2.6 Temperatura de la dependencia de la resistividad y piezoresistividad del silicio piezoresistor.....	23
Tabla 2.7 Propiedades mecánicas del poli silicio.....	24
Tabla 2.8 Comparación entre GaAs y Si en micromaquinado	25
Tabla 2.9 Propiedades del cuarzo	26
Tabla 2.10 Propiedades de los cristales piezoeléctricos	31
Tabla 2.11 Materiales para empaquetado de MEMS.....	33
Tabla 3.1 Escalamiento directo de magnitudes	39
Tabla 3.2 Fórmulas de cálculo de las magnitudes del escalamiento por geometría	39
Tabla 3.3 Magnitudes para escalamiento electrostático	40
Tabla 3.4 Calculo del factor de escala de la energía potencial.....	41
Tabla 3.5 Calculo del factor de escala de las fuerzas electrostáticas.....	41
Tabla 3.6 Magnitudes eléctricas y factor de escalamiento, valores (+) indican decremento y valores (-) indican incremento	42
Tabla 3.7 Escalamiento de parámetros eléctricos	42
Tabla 3.8 Relación con los parámetros de la dinámica	44
Tabla 3.9 Factores de conversión mecánica de MKS para uMKSV	47
Tabla 3.10 Factores de conversión térmica de MKS para uMKSV	47
Tabla 3.11 Factores de conversión eléctrica de MKS para uMKSV	48
Tabla 3.12 Factores de conversión eléctrica de MKS para uMKSV	48

Tabla 3.13 Resultados viga voladiza	50
Tabla 3.14 Sensibilidad de la frecuencia de resonancia de la viga.....	51
Tabla 3.15 Energía requerida para lograr un desplazamiento	52
Tabla 3.16 Sensibilidad de un sensor inercial.....	54
Tabla 3.17 Actuadores electrostáticos.....	55
Tabla 4.1 Parámetros de los materiales piezo-resistivos.....	62
Tabla 4.2 Características de la técnica: piezo-resistiva	63
Tabla 4.3 Constantes piezo-eléctricas del material	67
Tabla 4.4 Características de la técnica piezoeléctrica.....	68
Tabla 4.5 Características de la técnica capacitiva.....	71
Tabla 4.6 Características de la técnica óptica	72
Tabla 4.7 Características de la Técnica: excitación electrostática y detección capacitiva.....	84
Tabla 4.8 Características de la técnica: excitación y detección magnética	85
Tabla 4.9 Características de la técnica: excitación y detección piezoeléctrica	86
Tabla 4.10 Características de la técnica: excitación electro-termal y detección piezo-resistiva.....	87
Tabla 4.11 Características de la técnica: excitación opto-termal y detección óptica	88
Tabla 4.12. Características de la técnica: excitación y detección dieléctrico.....	89
Tabla 4.13 Comparación entre las técnicas de transducción.....	90
Tabla 4.14 Características de la técnica: actuación electrostática.....	92
Tabla 4.15 Características de la técnica: actuación piezoeléctrica.....	94
Tabla 4.16 Características de la técnica: actuación térmica	95
Tabla 4.17 Características de la técnica: actuación magnética	97
Tabla 4.18 Características de los métodos de actuación	98
Tabla 5.1 Revisión de las tecnologías de fabricación de micro-productos por Mazusawa.....	101
Tabla 5.2 Materiales utilizados en el micro-maquinado superficial.....	115
Tabla 5.3 Proceso de micro-maquinado superficial de 1 máscara	115
Tabla 5.4 Proceso de micro-maquinado superficial de 2 máscaras.....	117
Tabla 5.5 Micro-maquinado volumétrico.....	119
Tabla 5.6 Comparación entre las técnicas de micro-maquinado superficial y volumétrico	120

Tabla 5.7 Análisis comparativo de las 3 técnicas de micro-fabricación de MEMS	121
Tabla 6.1 Niveles de modelamiento de un MEMS	124
Tabla 6.2 Tipos de parámetros	124
Tabla 6.3 Variables de diseño	126
Tabla 6.4 Métodos para modelar los componentes MEMS	127
Tabla 6.5 Viga de timoshenko	137
Tabla 6.6 Parámetros del Modelo de Cosserat.....	142
Tabla 6.7 Elementos del método FEM.....	146
Tabla 6.8 Pasos del modelamiento FEM	148
Tabla 6.9 Comparación entre métodos de modelamiento analíticos	151
Tabla 6.10 Comparación entre métodos de modelamiento numéricos.....	151
Tabla 7.1 Evolución del tiempo de desarrollo de un modelo de simulación.....	161
Tabla 7.2 Variables de diseño de un sistema	162
Tabla 7.3 Modos de simulación	163
Tabla 7.4 Ventajas y desventajas de la simulación	166
Tabla 7.5 Software de simulación.....	167
Tabla 7.6 Organización del programa de simulación CONVENTOR	171
Tabla 7.7 Características del software ANSYS.....	173
Tabla 7.8 Módulos del programa de simulación ANSYS	174
Tabla 7.9 Comparación entre los software de simulación.....	179
Tabla 8.1 Unidades de presión.....	180
Tabla 8.2 Tipos de presión	182
Tabla 8.3 Técnicas de detección de presión.....	190
Tabla 8.4 Características de los sensores de presión	191
Tabla 8.5 Características de sensores de torque o fuerza.....	197
Tabla 8.6 Tipos de acelerómetros	204
Tabla 8.7 Principios básicos de funcionamiento de los giroscopios	205
Tabla 8.8 Elementos de los sensores térmicos de flujo.....	206
Tabla 8.9 Tipos de sensores de flujo térmicos	207
Tabla 8.10 Estructuras de micro-sensores de flujo.....	208
Tabla 8.11 Tipos de micro-sensores “drag force”	210
Tabla 8.12 Elementos del sensor de flujo por fuerza de coriolis.....	212
Tabla 8.13 Características de los sensores de flujo	213

Tabla 8.14 Características de los elementos de un sensor inteligente	215
Tabla 8.15 Descripción de los elementos del lab-on-chip.....	216
Tabla 8.16 Aplicaciones de los micro-sensores.....	218
Tabla 9.1 Precisión de posicionamiento	221
Tabla 9.2 Descripción de los fenómenos dinámicos indeseados.....	222
Tabla 9.3 Clasificación de los Micro-actuadores.....	223
Tabla 9.4 Tipos de micro-actuadores piezoeléctricos	225
Tabla 9.5 Ventajas de los Actuadores Piezoeléctricos	226
Tabla 9.6 Parámetros de diseño.....	226
Tabla 9.7 Clasificación de Robots por el tipo de Tecnología de Fabricación.....	230
Tabla 9.8 Clasificación de los robots por su funcionalidad y movilidad	232
Tabla 9.9 Plataformas MEMS para caminar	243
Tabla 10.1 Características de la libélula artificial	257
Tabla 10.2 Proceso de fabricación PCB MEMS	263
Tabla 10.3 Aplicaciones BioMEMS	269
Tabla 11.1 Tipos de Micro-acelerómetros.....	279
Tabla 11.2 Tipos de materiales piezoeléctricos	281
Tabla 11.3 Calculo de parámetros de una viga formada por un solo material ...	290
Tabla 11.4 Constantes.....	296
Tabla 11.5 Parámetros de fabricación.....	297
Tabla 11.6 Variables geométricas del dispositivo.....	297
Tabla 11.7 Características del transductor	297
Tabla 11.8 Variables de funcionamiento del acelerómetro piezo-eléctrico	299
Tabla 11.9 Valores de parámetros.....	300
Tabla 11.10 Calculo del voltaje de salida teórico.....	300
Tabla 11.11 Tipos de variables.....	301
Tabla 11.12 Dimensiones del dispositivo.....	302
Tabla 11.13 Materiales del acelerómetro piezoeléctrico.....	302
Tabla 11.14 Modelos utilizados en los materiales del dispositivo.....	305
Tabla 11.15 Frecuencias de trabajo	307
Tabla 11.16 Voltajes de salida para una fuerza aplicada de -0.01N.....	308
Tabla 11.17 Desplazamiento de la masa sísmica ante el cambio de frecuencia	311
Tabla 11.18 Voltajes de salida para una fuerza aplicada de -0.04N.....	312
Tabla 11.19 Desplazamiento de la masa sísmica ante el cambio de frecuencia	314

Tabla 11.20 Voltajes de salida para una fuerza aplicada de -0.08N.....	315
Tabla 11.21 Desplazamiento de la masa sísmica ante el cambio de frecuencia	317
Tabla 11.22 Determinación de la aceleración a medir de acuerdo a la fuerza aplicada	318
Tabla 11.23 Comparación entre los requerimientos y resultados del diseño del dispositivo MEMS	319
Tabla 12.1 Laboratorio para MEMS.....	321
Tabla 12.2 Clasificación de Salas Limpias.....	322
Tabla 12.3 Especificaciones del sistema de micro-fabricación Serie E de Oxford Láser.....	329
Tabla 12.4 Impresora de materiales DMP-2831	330
Tabla 12.5 Especificaciones de la DMP 2831.....	331
Tabla 12.6 Descripción del sistema DMP-3000	333
Tabla 12.7 Especificaciones de la DMP 3000.....	334
Tabla 12.8 Características principales de las impresoras de materiales Dimatix	335
Tabla 12.9 Contacto para adquirir impresora de materiales Dimatix DMP-2831	335
Tabla 12.10 Costos de la plataforma COMSOL Multiphysics	335
Tabla 12.11 Costos de herramientas para el modelado	336
Tabla 12.12 Costos de los distintos módulos de la plataforma COMSOL Multiphysics	336
Tabla 12.13 Costos de la interfaces relacionadas con COMSOL Multiphysics...	336
Tabla 12.14 Costos del curso de entrenamiento	336
Tabla 12.15 Contacto para adquirir el software COMSOL Multiphyiscs	337

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 2.1 Factor de conversión de energía mecánica en eléctrica	30
Ecuación 2.2 Factor de conversión de energía eléctrica en mecánica	30
Ecuación 2.3 Campo eléctrico generado en materiales piezo-eléctricos	30
Ecuación 2.4 Deformación en materiales piezo-eléctricos	30
Ecuación 2.5 Obtención del módulo de Young	30
Ecuación 3.1 Notación matemática de escalamiento	44
Ecuación 3.2 Desplazamiento de masas	53
Ecuación 3.3 Desplazamiento de masas en función de la frecuencia	53
Ecuación 3.4 Respuesta en frecuencia del sistema	53
Ecuación 3.5 Frecuencia de resonancia del sistema	53
Ecuación 3.6 Frecuencia del sistema aproximada	53
Ecuación 3.7 Sensibilidad de un sensor inercial	54
Ecuación 3.8 Expansión térmica	56
Ecuación 3.9 Energía potencial elástica	56
Ecuación 3.10 Fuerza ejercida por el actuador térmica	56
Ecuación 3.11 Energía térmica	57
Ecuación 3.12 Densidad de energía térmica	57
Ecuación 3.13 Constante de tiempo térmica	57
Ecuación 4.1 Módulo de elasticidad o módulo de Young	61
Ecuación 4.2 Frecuencia de resonancia y de anti-resonancia	66
Ecuación 4.3 Capacitancia de un condensador de placas paralelas	69
Ecuación 4.4 Relación entre tensión de salida diferencial y la deflexión	71
Ecuación 4.5 Frecuencia de una radiación óptica	78
Ecuación 4.6 Factor de calidad relacionando la frecuencia de resonancia	81
Ecuación 6.1 Tensión directa	129
Ecuación 6.2 Relación entre x , y , $u(x,y)$	129
Ecuación 6.3 Tensión directa	129

Ecuación 6.4 Sección transversal de la viga.....	129
Ecuación 6.5 Ecuación simple de Hooke.....	130
Ecuación 6.6 Momento resultante	131
Ecuación 6.7 Resultante de corte	131
Ecuación 6.8 Suma de las tensiones.....	132
Ecuación 6.9 Fuerza resultante de corte V	132
Ecuación 6.10 Momento resultante M	133
Ecuación 6.11 Combinación de las 2 ecuaciones de equilibrio	133
Ecuación 6.12 Reemplazo del momento resultante en función de la tensión.....	133
Ecuación 6.13 Uso de la relación constitutiva para reemplazar σ en términos de ϵ	133
Ecuación 6.14 Ecuación en términos de w (<i>desplazamiento normal</i>).....	134
Ecuación 6.15 Área del momento de inercia de la viga.....	134
Ecuación 6.16 Ecuación de Euler-Bernoulli.....	134
Ecuación 6.17 Momentos de área	140
Ecuación 6.18 Momentos de inercia.....	141
Ecuación 6.19 Energía cinética de la viga Cosserat.....	142
Ecuación 6.20 Componentes de los tensores.....	142
Ecuación 6.21 Tensión, fuerza y torque	142
Ecuación 6.22 Distribución eléctrica.....	153
Ecuación 6.23 Fuerza de atracción entre dos conductores de placas paralelas	153
Ecuación 8.1 Ecuación característica de un diafragma rectangular	186
Ecuación 8.2 Frecuencia de resonancia no amortiguada	186
Ecuación 8.3 Aceleración de un objeto vibrante	199
Ecuación 8.4 Fuerza aplicada por el resorte.....	199
Ecuación 8.5 Ecuación diferencial donde se relaciona x,y	199
Ecuación 8.6 Deformación Y	200
Ecuación 8.7 Frecuencia natural	200
Ecuación 8.8 Diferencia entre deformaciones	200
Ecuación 8.9 Deformación del resorte.....	200
Ecuación 8.10 Ley de Ohm equivalente para Fluidos.....	207
Ecuación 11.1 Fuerza de reacción en el momento M_o	289
Ecuación 11.2 Ley de Hooke (1) Para la capa de silicio (2) Para la capa de PZT	291

Ecuación 11.3 Ecuaciones de equilibrio (1) Suma de fuerzas (2) Suma de Momentos.....	291
Ecuación 11.4 Distancia a	292
Ecuación 11.5 Radio de la superficie curva.....	292
Ecuación 11.6 Deformación unitaria de la viga.....	292
Ecuación 11.7 Deflexión de la viga de acuerdo de la Ley de Hooke	292
Ecuación 11.8 Modulo de Young equivalente por Inercia equivalente.....	292
Ecuación 11.9 Esfuerzo sobre la capa PZT.....	293
Ecuación 11.10 Contribución a la carga eléctrica.....	293
Ecuación 11.11 Carga de salida de las capas piezo-eléctricas	293
Ecuación 11.12 Capacitancia de la capa PZT	294
Ecuación 11.13 Sensibilidad de voltaje del sensor	294
Ecuación 11.14 Sensibilidad de carga.....	295
Ecuación 11.15 Esfuerzo máximo (1) En la superficie superior (2) En la superficie inferior.....	295
Ecuación 11.16 Frecuencia natural de resonancia del sensor.....	295

GLOSARIO

Anisotrópico: Distinto en todas las direcciones y sentidos, dependiente de la dirección. El término se utiliza en este sentido para describir propiedades distintas en la física, en la ciencia de los materiales, en la cristalografía y en las matemáticas.

Boule: Lingote de silicio monocristalino que se obtiene con el método de Czochralski.

Cilios: Son estructuras finas de gran longitud que proporcionar movimiento.

Crecimiento Epitaxial: Es un método de deposición cristalino en el que se consigue depositar finas capas de material sobre un sustrato. En la deposición se consigue la misma estructura cristalina del sustrato.

CVD (Deposición Química de Vapor): Permite la aplicación de recubrimientos sobre un material, partiendo de unos determinados gases que reaccionan por medio de una activación térmica.

EAP (Polímeros electro-activos): Son nuevos polímeros que responden a estímulos eléctricos con cambios significativos de forma o tamaño

EBM (Mecanizado con un haz de electrones): En este método se emplea un haz focalizado de alta velocidad de electrones, el cual funde y vaporiza el material. La tecnología EBM se emplea para la escritura sobre una célula electrosensible o para crear variaciones superficiales del material.

ECM (Mecanizado Electroquímico): Proceso de maquinado que remueve material mediante el uso de corrientes eléctricas. El maquinado electroquímico consiste básicamente en un proceso de decapado

EDM (Mecanizado por descarga eléctrica): El proceso de electroerosión consiste en la generación de un arco eléctrico entre una pieza y un electrodo en un medio dieléctrico para arrancar partículas de la pieza hasta conseguir reproducir en ella las formas del electrodo. Ambos, pieza y electrodo, deben ser conductores, para que pueda establecerse el arco eléctrico que provoque el arranque de material.

Grabado: Es el proceso que remueve material de acuerdo a determinados patrones.

Heteroepitaxia: El material se deposita en un sustrato de diferente material.

Homoepitaxia: La deposición es del mismo material que el sustrato donde se deposita las nuevas capas.

Isotrópico: Isotrópico significa que tiene las mismas propiedades en todas direcciones.

LBM (Mecanizado por rayo laser): Se basa en la generación de un rayo láser de alta potencia que es dirigido contra la pieza mediante un sistema de espejos de alta precisión. En la zona de incidencia del rayo se consigue una elevada densidad de potencia que produce la volatilización del material. El rayo láser erosiona el material en múltiples capas obteniendo, de este modo, la geometría y profundidad requerida.

Ley de Moore: Esta ley, basada en una predicción realizada en 1965, establece que la densidad de los transistores se duplica cada 18-24 meses. Permite la miniaturización de los circuitos integrados.

Lingote: En la industria de los semiconductores, es un material fabricado de silicio que se procesa para conseguir silicio en un solo cristal.

Litografía: Técnica de microfabricación empleada para diseñar el patrón para los sistemas micro-electro-mecánicos.

Máscara: Placa de vidrio o cuarzo que contiene la imagen fotográfica de los patrones de obleas y que define una sola capa del proceso. La máscara se expone a una capa fotosensible y cubre la superficie de una oblea para exponer/ocultar las zonas seleccionadas a los distintos procesos de fabricación.

MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems): Es la integración de elementos mecánicos, sensores, actuadores y electrónicos en un sustrato común de silicón a través de tecnología de microfabricación. MEMS promete revolucionar casi cualquier categoría de productos entregando juntos microelectrónicos con micromaquinaria basados en silicón, haciendo posible la fabricación de sistemas completos en un chip.

Metalización: Es el depósito de capas de metal mediante la electrolisis o por reducción química controlada de sales minerales por un agente reductor en presencia de un catalizador adecuado.

Micro-encapsulación: Recubrimiento de material sólido pulverizado o líquidos con una película de material polímero o grasa originando partículas de flujo libre del tamaño de micras.

Micro-maquinado superficial: Esta es una técnica de fabricación aditiva para construir micro-estructuras sobre la superficie de un "wafer" o sustrato, mediante sucesivos procesos de depósito de capas finas, transmisión de patrones sobre dichas capas (litografía) y ataque selectivo.

Micro-maquinado volumétrico: Esta es una técnica de fabricación subtractiva para construir micro-estructuras por eliminación de material sobrante de un sustrato base.

Micrómetro: Unidad métrica de medida lineal igual a la millonésima parte del metro o a 10.000 angstroms.

Micro-robot: Hace referencia a una imaginaria máquina o "robot micro" de una escala de pocos centenares de micrómetros construido para tareas específicas.

Micro-sensores: Dispositivos diseñados micrométricamente encargados de detectar una determinada acción externa, temperatura, presión, compuesto químico etc.

Modulo de Young: Es un parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico, según la dirección en la que se aplica una fuerza, también se conoce como módulo elástico longitudinal

Movimiento ciliar: Los cilios se mueven de forma sincrónica, es decir que todos los cilios están en la misma posición, esto implica la presencia de algún mecanismo regulador. En el cilio se produce una excitación en un momento determinado, produciéndose como consecuencia el movimiento, esta excitación se transmite al cilio siguiente y así sucesivamente.

Nodo: Punto de intersección en el que confluyen dos o más elementos.

Nodo a gran escala: Puede integrar el procesador (toma de decisiones, control, procesamiento de señales y, capacidades de adquisición de datos), memorias, dispositivos de E / S, bus de comunicación, circuitos, antenas, actuadores, sensores y, estructuras inteligentes.

Nodo primario: Puede ser simplemente una estructura inteligente, actuador o sensor. Este nodo elemental puede ser controlado por el campo electromagnético externo.

Oblea: Una parte fina de caras paralelas cortadas de un cristal semiconductor.

Piezo-resistividad: Se define como un cambio en la resistencia eléctrica de los sólidos cuando se someten a los campos de esfuerzos.

PCB (Placa de circuito impreso): Tarjeta formada por material aislante de bajo coste, específicamente dieléctrico para ser compatible con los componentes electrónicos mecánicamente y conectarlos eléctricamente. La placa de circuito impreso emplea vías conductivas o rastros, decapados de las hojas de cobre laminadas sobre un sustrato no conductivo.

Puller: Aparato utilizado en el método de Czochralski (método empleado en el 90% de los casos para obtener silicio monocristalino a partir de silicio policristalino). Consta de tres componentes principales, son: un horno, mecanismo de crecimiento del cristal y, mecanismo del control de ambiente.

Pulverización de plasma: Técnica en la que se origina un plasma mediante la ionización de un gas, generalmente argón o helio. El material se inyecta en forma de polvo justo a la salida de la boquilla y es arrastrado por el plasma que sale a gran velocidad, el cual se funde sobre el sustrato debido a la alta temperatura.

PVD (Deposición Física de Vapor): La deposición física de vapores es una de las técnicas más utilizadas en la generación de recubrimientos finos, especialmente cerámicos sobre herramientas de corte. Los procesos PVD puros utilizan medios físicos para obtener directamente las especies de un material, evaporarlas y depositarlas al vacío alto sobre el sustrato.

PZT (Zirconato Titanato de Plomo): Se componen de plomo y del compuesto químico titanato de zirconio que se agrupan bajo temperaturas altas, es un eficiente material para el uso en dispositivos micro-electrónicos, con óptima relación tamaño-capacidad, elementos piezoeléctricos, detectores piroeléctricos y memorias ferroeléctricas.

RIE (Grabado por iones reactivos): El grabado por iones reactivos es una combinación de grabado en seco por pulverización física y reactivos químicos a baja presión, que se puede aplicar en casi todos los materiales en la electrónica y

en la óptica. El RIE utiliza bombardeo iónico para lograr un grabado direccional, y también un gas químicamente reactivo para mantener una buena selectividad de la capa de grabado.

Sala blanca: La zona cerrada que se emplea en fabricación con una clase definida que limita los niveles de contaminación y controla la humedad, la temperatura y las partículas del aire.

Semiconductor: Material sólido con características de conductividad eléctrica que se encuentra entre el conductor y el aislante.

Silicio: Elemento de la tabla periódica empleado en la fabricación de semiconductores.

SMA (aleación con memoria de forma): El efecto térmico de memoria es un efecto propio de los materiales llamados inteligentes, como los músculos artificiales y otros materiales, que producen una reacción ante un estímulo dado

Sustrato: Objeto plano macroscópico en el cual el proceso de micro-fabricación se llevará a cabo. En los microsistemas, sirve con un propósito adicional: actuar como transductor de la señal, además ayuda a otros transductores para convierten las acciones mecánicas en salidas eléctricas o viceversa.

Técnica LIGA: Esta es una técnica de obtención de microestructuras a partir de moldes creados mediante litografía de rayos X seguida de metalizado, o simplemente obtención de las propias microestructuras realizadas por litografía de rayos X con metalizado.

μMKS_V: Sistema de unidades basado en el SI, y tiene como unidades base: la micra, el kilogramo, el segundo, y el voltio.

Wafer: En microelectrónica, un wafer u oblea es una capa delgada de material semiconductor, generalmente silicio. Los wafers son muy importantes en la fabricación de dispositivos semiconductores. De estos se obtienen los sustratos.

FECHA DE ENTREGA DEL PROYECTO

El presente proyecto de grado fue entregado al Departamento de Eléctrica y Electrónica, reposando en la Escuela Politécnica del Ejército desde:

Sangolquí, 18 de Mayo de 2011

Ing. Víctor Proaño.

**COORDINADOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

Andrea Carolina Santana Pérez

AUTORA

Gabriela Alexandra Verdezoto Carranco

AUTORA