



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN
MICROSENSOR RECOLECTOR DE
ENERGÍA BASADO EN TECNOLOGÍA
MEMS**

Tesis Profesional

Para obtener el grado de:
LICENCIADA EN ELECTRÓNICA

PRESENTA:

SAMANTHA OSNAYA GAMBOA

ASESORES:

DRA. BLANCA SUSANA SOTO CRUZ

DR. FRANCISCO LÓPEZ HUERTA

H. PUEBLA DE ZARAGOZA. OCTUBRE 2019

Dedicatoria

A ustedes mis padres, Lucy y Miguel Ángel.

Y mis hermanas Pamela y Carolina.

Agradecimientos

A mis padres, que estuvieron presentes en cada paso que di y cada que sentía que no podía dar más de mí misma me impulsaban a salir adelante y demostrar que podía hacerlo mejor y dar más. Y por su gran apoyo que por ello ahora culmino este camino.

A mis hermanas por estar a mi lado, echarme porras con cada proyecto que hice y al igual que mis padres ayudarme a salir adelante en cada caída.

A Héctor por estar conmigo en cada desvelada, enojo, berrinche y dificultad durante todo este camino. Por levantarme cada que no encontraba salida y ayudarme en todo lo que podía cada día.

A mi asesor, el Dr. Francisco López Huerta, por su gran ayuda y su paciencia. Y más que nada por ser quien creyera y confiara en mi para culminar este camino y etapa de mi vida.

A mi asesora, la Dr. Blanca Susana Soto, por brindarme su ayuda y su confianza en la culminación de este trabajo.

A mis amigos Cynthia y David que me toleraron por 6 años y compartieron conmigo momentos llenos de estrés, felicidad y logros.

Y a un pequeño ser que durante 17 años me acompañó y hasta el último de sus días nunca me dejó sola en las noches de desveladas, a ti mi mascota FAIFOR.

Índice

Dedicatoria	2
Agradecimientos.....	3
Introducción.....	8
Justificación.....	11
Objetivo general	13
Objetivos específicos	13
Hipótesis.....	13
Introducción de los dispositivos MEMS	14
Capítulo 1. Antecedentes	15
1. Micromaquinado en volumen.....	19
2. Micromaquinado superficial	22
3. LIGA.....	23
4. Encapsulado	26
Capítulo 2.....	30
1. Efecto Piezoeléctrico	31
1.1 Materiales piezoeléctricos	31
2. Materiales Poliméricos.....	33
3. Cerámica Policristalina	34
4. Propiedades de los materiales piezoeléctricos	35
5. Aplicaciones.....	39
Capítulo 3. Resultados	43
3.1 Metodología de Diseño MEMS.....	44
3.2 Características de Diseño MEMS.....	45
3.3 Simulación de Diseño MEMS	50
3.4 Resultados del análisis modal	51
3.5 Resultados del análisis armónico	56
Capítulo 4. Conclusiones	59
4.1. Conclusiones del trabajo	59
4.2. Trabajo Futuro.....	59

Índice de Figuras

Figura i. Diferentes tipos de recolectores de energía [11].	9
Figura ii. Mapa conceptual de la recolección de energía [12].	9
Figura iii. Diagrama a bloques para el aprovechamiento de la energía [14].	10
Figura iv. Aprovechamiento de energía en un microbot (insecto) [15].	11
Figura v. Prototipo para la recolección de energía basado en vibraciones mecánicas [20].	14
Figura 1.1. Productos de Analog Devices	18
Figura 1.2 (a-c). Flujo del proceso de fabricación de un MEMS utilizando micromaquinado en volumen con grabado isotrópico.	21
Figura. 1. 3 (a-c). Flujo del proceso de fabricación de un MEMS utilizando micromaquinado de volumen con grabado anisotrópico.	21
Figura 1.4 (a-c). Flujo del proceso para un MEMS en tecnología de micromaquinado superficial.	23
Figura 1.5. Diagrama de un proceso de fabricación LIGA: a) Depósito de capa protectora a rayos X; b) mascarilla para rayos X; c) exposición de alta energía con rayos X; d) revelado de la capa protectora por rayos X; e) electro-deposito y f) liberación de la capa protectora.	26
Figura. 1.6. Clasificación de MEMS [21].	29
Figura 2.1. Representación del cambio en la estructura cristalina fuente.	31
Figura 2.2. a) Antes del proceso de polarización b) Después del proceso de polarización.	32
Figura 2.3. Efecto piezoeléctrico en el cuarzo.	33
Figura 2.4 El eje z coincide con la dirección de polarización. Los ejes x, y y z se representan con los subíndices 1, 2 y 3; los subíndices 4, 5 y 6 representan la rotación alrededor de los ejes.	35
Figura 2.5. a) modelo 31 b) modelo 33	37
Figura 2.6. Dimensiones y sistema de referencia para las constantes y coeficientes piezoeléctricos. V_e es la tensión a través de los electrodos; a, b y c son las dimensiones del material piezoeléctricos.	39
Figura. 2.7. a) Ilustración de zapatillas deportivas auto energizadas b) componentes separados, filamentos LED, puente rectificador y nanogenerador c) ilustración dispositivos integrados d) ilustración de funcionamiento [14].	40

Figura 2.8. Gráficas de tiempo y frecuencia de la onda recibida por el sensor piezoeléctrico, de izquierda a derecha las muestras de corrosión son 0%, 1%, 3%, 5% y 10% 15%.....	41
Figura 3.1. Materiales considerados para el diseño de los dispositivos.....	46
Figura 3.2. Vista de planta (izq.), vista lateral (der.) y muestra de masa sísmica del dispositivo recolector de energía donde se muestran las dimensiones.....	47
Figura 3.3. Vista de planta (izq.), vista lateral (der.) y muestra de masa del dispositivo recolector de energía donde se muestran las dimensiones.....	49
Figura 3.4. Mallado de la geometría con elementos hexaedro (izq.) del diseño 1 y vista de detalle del mallado en capas (der.).....	50
Figura 3.5. Mallado de la geometría con elementos hexaedro (izq.) del diseño 2 y vista de detalle del mallado en capas (der.).....	51
Figura 3.6. Tercer modo de vibración del dispositivo donde la flecha indica el movimiento de las vigas unidas a las masas sísmicas.....	52
Figura 3.7. Primer modo de vibración del diseño 2.....	53
Figura 3.8. Deformación total del diseño1 a su frecuencia de resonancia, con aceleración de 0.1g.....	56
Figura 3.9. Deformación total del diseño 2 a su frecuencia de resonancia, con aceleración de 0.1g.....	56
Figura 3.10. Partes de generación de un diferencial de potencial para el diseño 1.....	57
Figura 3.11. Partes de generación de un diferencial de potencial para el diseño 2.....	57

Índice de Tablas

Tabla 1.1 Aplicaciones de dispositivos en tecnología MEMS.....	19
Tabla 1.2. Propiedades mecánicas y térmicas de los materiales más utilizados en el proceso de encapsulado.....	27
Tabla 2.1. Propiedades del PVDF-TrFE.....	34
Tabla 2.2. Propiedades del Titanato de Bario	34
Tabla 2.3. Propiedades del Titanato de Zirconato de Plomo (PZT).....	35
Tabla 3.1. Dimensiones diseño 1.....	46
Tabla 3.2. Dimensiones diseño 2.....	47
Tabla 3.3. Propiedades isotrópicas del Silicio usado en la simulación numérica. .	51
Tabla 3.4. Modos de vibración del diseño 1 propuesto en este trabajo de tesis ...	52
Tabla 3.5. Modos de vibración del diseño 2 propuesto en este trabajo de tesis. ..	53
Tabla 3.6. Comparación de los resultados obtenidos para los diseños presentados en este trabajo.....	58

Introducción

El rápido avance tecnológico ha permitido el desarrollo de sistemas electrónicos que van desde los más simples hasta sistemas complejos; gracias a esto han empezado a emerger diferentes aplicaciones que pasan por la industria alimenticia, la agrícola, las aplicaciones militares y la medicina [1-5]. Este avance tecnológico ha requerido de fuentes alternativas, más prometedoras, como son los dispositivos recolectores de energía basados en los Sistemas Micro-Electro-Mecánicos (MEMS) [6-8]. Los sistemas recolectores de energía, mejor llamados harvesting, son una alternativa al uso de baterías convencionales, eliminando las desventajas que éstas representan, como son: la necesidad de reemplazarlas o recargarlas periódicamente y su gran tamaño comparado con los sistemas MEMS, los cuales son cada vez más pequeños [9-10]. La recolección de energía del medio ambiente es actualmente investigada a través de diferentes técnicas y métodos tales como: el uso de vibraciones mecánicas, la potencia solar, los campos electromagnéticos, los gradientes térmicos y la energía producida por el cuerpo humano o por los movimientos de los seres vivos. Entre estos métodos de recolección, la producida por vibraciones mecánicas es la más sensible. Además, es fácil de usar y puede ser aprovechada por los sistemas MEMS. La energía producida por las vibraciones mecánicas puede ser convertida en energía eléctrica usando tres tipos de transductores: electromagnéticos, electrostáticos y piezoeléctricos (Figura i).



Figura i. Diferentes tipos de recolectores de energía [11].

En la Figura ii, se muestra un mapa conceptual de la recolección de energía de acuerdo al principio de operación y aplicación.

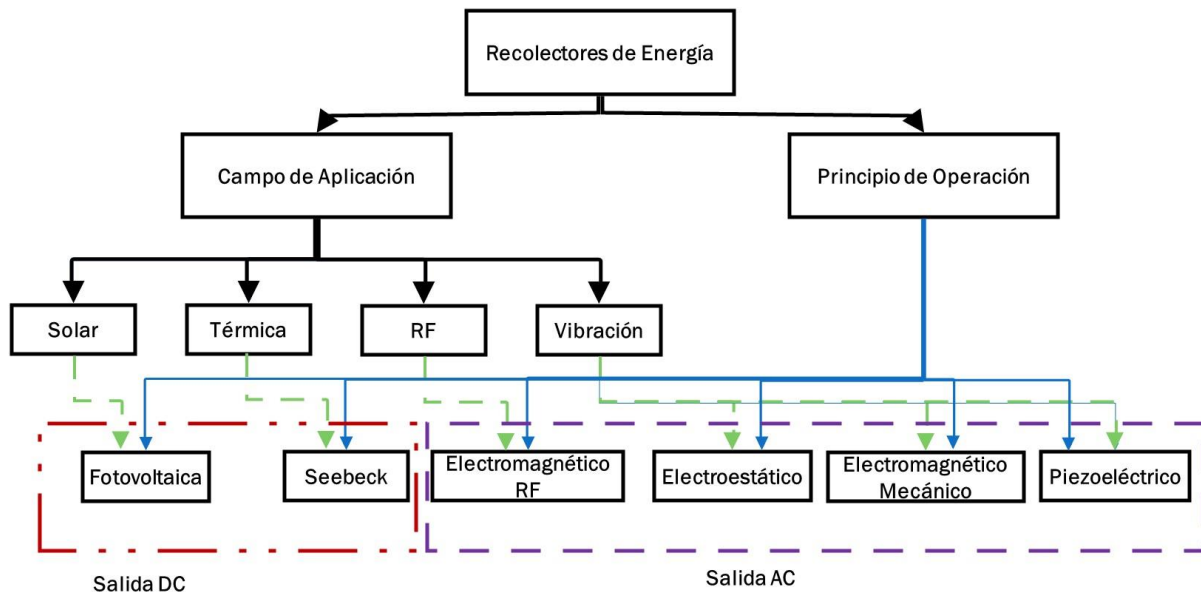


Figura ii. Mapa conceptual de la recolección de energía [12].

La investigación realizada permite sentar las bases e incentivar la realización de futuros proyectos científicos y tecnológicos para profundizar el conocimiento y desarrollo de los sistemas de los MEMS. Los sistemas recolectores de energía utilizan fuentes no

convencionales. Típicamente, una fuente de energía se convierte en energía eléctrica y se almacena en una celda, como un condensador, súper condensador, o celda de micro energía (MEC) [13]. Este sistema incluye reguladores de voltaje y supresor de picos (Figura iii). Las fuentes de energía incluyen a la radiación solar, capturada por las celdas fotovoltaicas; vibración o presión, capturado por un elemento piezoeléctrico; temperaturas diferenciales, capturado por un generador termoeléctrico; energía de radiofrecuencia (RF), y la energía producida por procesos bioquímicos, tales como las células que extraen energía del azúcar en la sangre. Si la fuente de energía no siempre está presente, entonces el sistema necesita para almacenar energía una batería, condensador. Además, dado que las fuentes de energía pueden variar, el sistema debe convertir, regular y controlar esa energía. Los circuitos y la celda de almacenamiento de energía también deben ser protegidos de exceso de voltaje o picos de tensión. La electrónica de apoyo debe ser altamente eficiente para asegurar un tiempo de vida largo de los sistemas MEMS.

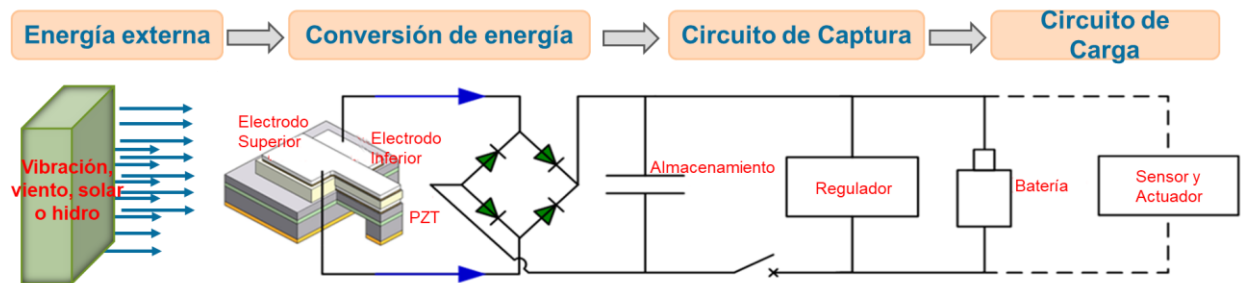


Figura iii. Diagrama a bloques para el aprovechamiento de la energía [14].

Justificación

Con el desarrollo y la reducción de tamaño de la tecnología, hoy en día el requisito de potencia para dispositivos inalámbricos y portátiles autónomos es indispensable, al igual que la búsqueda de nuevas formas de generación de energías amigables con el ambiente. Todo esto conlleva a la investigación de sistemas capaces de aprovechar todas estas energías que se desperdician diariamente a nuestro alrededor, como por ejemplo vibraciones mecánicas, fuentes electromagnéticas, flujo de aire y agua, el calor y la luz.

Con el paso del tiempo se han realizado estudios de fuentes alternativas generadoras de energía que podrían proporcionar pequeñas cantidades de electricidad a diversos dispositivos (Figura iv). Una solución encontrada a la generación de energía es por medio de los harvesting, “cosechadoras o recolectoras” de energía. Los cuales son diseñados, como su nombre lo dice, para recolectar cualquier tipo de energía liberada del ambiente para posteriormente convertirla en energía eléctrica. El desarrollo de los recolectores de energía son una alternativa al uso de baterías convencionales, lo cual conlleva a eliminar el remplazo continuo y recarga de éstas, su gran tamaño y aún más importante la reducción de desechos tóxicos durante su fabricación y su degradación.

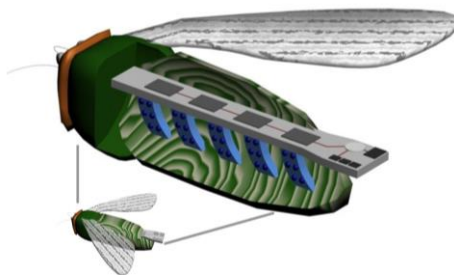


Figura iv. Aprovechamiento de energía en un microbot (insecto) [15].

Dada la miniaturización de la tecnología se busca desarrollar dispositivos basados en tecnología MEMS con las ventajas de optimización de espacio, costos y producción en masa. El avance de esta tecnología permite sentar bases e incentivar el desarrollo de proyectos científicos y tecnológicos en una amplia gama de aplicaciones [17-19]. Si se

habla de recolectores de energía a base de tecnología MEMS las aplicaciones son donde la sustitución o carga de una batería es costosa o difícil, sensores para la vigilancia remota de la salud, sensores de temperatura o humedad en lugares inaccesible o remotos, en ámbito militar puede ser una red de sensores en campos de batalla urbana, o simplemente viéndolo desde el punto ambiental.

En la actualidad la investigación de los recolectores de energía está en auge ya que son considerados una alternativa de recolección y generación de energía rentable y su diseño en tecnología MEMS se presta a que sea utilizada en varias aplicaciones tanto de comunicación, medicina, militar y de uso cotidiano.

Objetivo general

Diseñar y simular un microgenerador recolector de energía basado en tecnología MEMS y vibraciones mecánicas para alimentar dispositivos electrónicos de bajo consumo de potencia.

Objetivos específicos

- Analizar la tecnología utilizada en recolectores de energía y sus materiales
- Elegir materiales para el microgenerador
- Diseñar el microgenerador por medio de software CAD (diseño asistido por computadora) para modelado 2D y 3D
- Analizar el diseño por el método de elemento infinito
- Desarrollar modelos de elemento finito por medio de software especializado para ver el comportamiento mecánico-eléctrico del microgenerador recolector de energía.

Hipótesis

En este trabajo de tesis se determinará si el diseño de un microsensor recolector de energía basado en tecnología MEMS, puede generar energía en el orden de μW al entrar en resonancia. Se analizarán los máximos esfuerzos de la deformación y la potencia generada a través de la capa activa.

Introducción de los dispositivos MEMS

La tecnología de los sistemas Micro-Electro-Mecánicos (MEMS) ha permitido el desarrollo de dispositivos de tamaños del orden de los micrómetros capaces de integrarse en circuitos integrados más complejos, debido a la versatilidad de su fabricación. Estos dispositivos MEMS pueden encontrarse en forma de sensores o actuadores, como ejemplo, acelerómetros, giroscopios, micro espejos, microsensores de recolección de energía (Figura v). Los dispositivos de tamaño micrométrico conservan su funcionalidad teniendo un bajo consumo de energía.

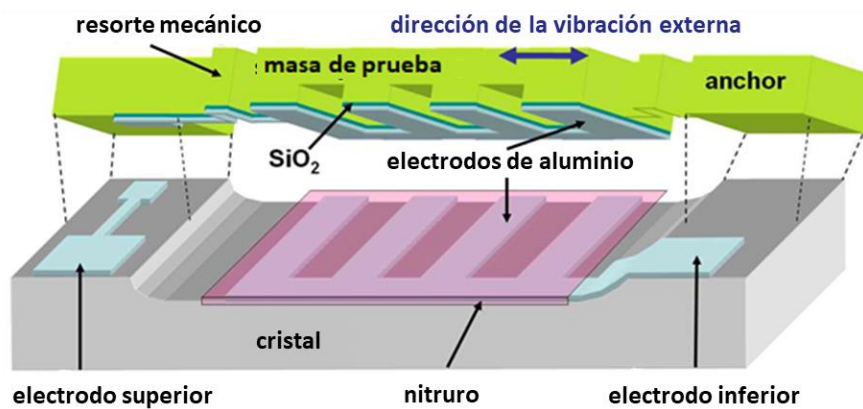


Figura v. Prototipo para la recolección de energía basado en vibraciones mecánicas [20].

Capítulo 1. Antecedentes

A medida que surgen avances tecnológicos en los procesos de maquinado es posible miniaturizar cada vez más los dispositivos de sensado o de actuación. En esta tesis se presenta el estado del arte de los sensores basados en tecnología MEMS. Los microsensores basados en tecnología MEMS proporcionan ventajas gracias a su miniaturización, las cuales incluyen la disminución del consumo de energía, peso ligero, mayor sensibilidad y resolución, alta funcionalidad y reducción de costo [16-17]. Esta tecnología es el resultado de la combinación de elementos mecánicos y eléctricos en un mismo sistema. El impacto de esta tecnología es muy grande a nivel mundial y se espera que en los próximos años se incrementen los recursos de investigación de los países tecnológicamente desarrollados y en desarrollo. Actualmente, podemos encontrar dispositivos MEMS en nuestra vida diaria. Por ejemplo, en los automóviles se utilizan acelerómetros para activar las bolsas de aire en caso de accidente. Por otro lado, los microsensores MEMS tienen un gran potencial en numerosas aplicaciones tales como la lectura de discos de almacenamiento magnético, sensores de posición y rotación, sistemas de navegación, pruebas no destructivas de materiales, sistemas de seguridad, estabilidad estructural, e instrumentos militares [16], en todos estos es posible incluir algunos microsensores recolectores de energía.

En este capítulo se presentan algunas de los procesos de fabricación utilizados en tecnología MEMS.

En el siglo XX se presentó el surgimiento de aparatos eléctricos y electrónicos que tuvieron un impacto en la vida diaria. Hasta la llegada del transistor de punto de contacto en 1947 por Bardeen y Brattain [18] y más tarde el transistor de unión por Shockley [19], los dispositivos electrónicos se basaron en el tubo de vacío inventado en 1906 por Lee De Forest. El transistor fue una gran aportación en la reducción de tamaño, requerimientos de energía y la portabilidad de los dispositivos electrónicos [21].

El 29 de diciembre de 1959, el Dr. Richard Feynman presentó una conferencia titulada "Hay un montón de espacio en el fondo" en la reunión anual de la "American Physical Society" en el Instituto de Tecnología de California (Caltech). En la conferencia, el Dr. Feynman conceptualmente presentó el deseo y las ventajas de la exploración de los dispositivos de ingeniería a pequeña escala. Esta conferencia es con frecuencia situada en el inicio conceptual de los campos de los MEMS y la Nanotecnología. El Dr. Feynman proporcionó algunos comentarios sobre el incremento de los fenómenos físicos cuando las dimensiones son reducidas, así como algunos de los futuros usos de los productos de pequeñas dimensiones [22].

Los avances técnicos claves que precipitaron la revolución microelectrónica fueron el desarrollo del transistor de silicio planar y los procesos de fabricación. El proceso de fabricación de silicio planar proporcionó una ruta que permitiría la integración de un gran número de transistores para diferentes dispositivos electrónicos, a través de continuos avances técnicos de las herramientas de fabricación (litografía, grabado, la difusión e implantación), y una reducción continua de tamaño del transistor. Esta capacidad para miniaturizar cada vez más los circuitos electrónicos durante un largo período de tiempo fue predicha por Moore en 1965 en lo que se convertiría en la conocida ley de Moore. Los efectos de esta ley continúan hoy en día y al menos por los próximos 20 años. Este desarrollo de herramientas de fabricación de cada vez más pequeñas dimensiones es un factor clave para la tecnología MEMS [23].

En 1967, Nathanson y colaboradores [24] desarrollaron el transistor de compuerta de resonancia, el cual mostró las posibilidades de construir un dispositivo mecánico-eléctrico a través del micromaquinado en silicio. En los primeros días de la microelectrónica y en la década de 1970, el micromaquinado en volumen, que utiliza las técnicas de grabado profundo, se desarrolló y fue usado para producir microsensors de presión y acelerómetros [21].

En 1982, Petersen escribió un artículo fundamental "El silicio como un material mecánico". Por lo tanto, se consideró el uso del silicio en una medida aún mayor para producir microsensors que necesitaban un elemento mecánico (elemento de

masa inercial, diafragma de presión) y un mecanismo de transducción (mecánica-eléctrica) para producir un microsensar. El micromaquinado en volumen también se utilizó para inyectores de tinta, que se estaban convirtiendo en un gran mercado comercial, debido a la necesidad de la revolución del ordenador para las impresoras de bajo costo [25].

En 1983, Howe y Müller [26] desarrollaron el esquema básico para el micromaquinado superficial y las herramientas de Microelectrónica para crear una tecnología de fabricación capaz de producir elementos mecánicos complejos, sin la necesidad de ensambles post fabricación. También en la década de 1980, el proceso de litografía, galvanizado y conformado (LIGA, por sus siglas en alemán) fue desarrollado en Alemania. El conjunto de materiales usado en LIGA es significativamente diferente a los empleados en micromaquinado en volumen y micromaquinado superficial, que tienden a utilizar las herramientas de fabricación y materiales de microelectrónica. LIGA puede ser usado para hacer piezas o moldes a partir de materias electroplateables o utilizar los moldes para la inyección de plásticos moldeados [21].

En la década de 1990 se desarrollaron productos comerciales que utilizaron la tecnología MEMS. Debido a la necesidad de una alta resolución de detección de elementos mecánicos o del direccionamiento y actuación de grandes conjuntos de elementos mecánicos, Analog Devices, Inc. desarrolló una tecnología IMEMS (Sistemas Microelectromecánicos Integrados) para facilitar el desarrollo de microsensares inerciales (acelerómetros, giroscopios) para aplicaciones de automoción (Figura 1.1). Texas Instruments desarrollaron una tecnología IMEMS para producir una gran variedad de espejos usados en proyectores, cine y televisión. Desde mediados de los 1990 hasta la actualidad ha habido un gran avance en la investigación de tecnología MEMS y en los procesos de fabricación, tanto en el desarrollo y la demostración de prototipo de microsensares y actuadores para la comercialización de productos MEMS. Estos productos van desde microsensares MEMS físicos (por ejemplo, la presión, inercia) hasta biológicos y ópticos entre otros.

BOLT™ Productos de Recolección de Energía



Figura 1.1. Productos de Analog Devices

La tecnología MEMS no sólo explota el escalamiento en dimensiones de las estructuras del orden de micrómetros vistos en el campo de la Microelectrónica, sino que también integra componentes mecánicos, ópticos, encapsulados en un chip. Lo anterior permite el diseño de dispositivos con características de portabilidad como giroscopios, acelerómetros, micro espejos y microsensores de presión, [27-29].

La industria automotriz es uno de los principales mercados de la tecnología MEMS. Aunque, este mercado se ha visto vulnerable debido a la desaceleración económica mundial del 2008, limitando el crecimiento del mercado de MEMS. Sin embargo, nuevos mercados como la telefonía celular continuarán solicitando productos electrónicos como parte de sistemas de posicionamiento global. La tecnología MEMS se espera que sea un elemento catalizador en la innovación en la industria de la telefonía celular.

Las oportunidades inmediatas que hay en México en relación con la tecnología MEMS son en el sector automotriz y en el sector salud. Otros mercados en donde los microsensores impactarán con importancia son el de los productos electrónicos para el consumidor, la tecnología de la información, el de las telecomunicaciones y el de la industria. Sin embargo, la verdadera incursión para la empresa mexicana está en la implementación de esta tecnología en su línea de productos o en su línea

de producción. La curva de crecimiento del impacto económico global de los productos y sistemas que utilizan MEMS se encuentra en su momento de auge.

La tecnología MEMS se espera siga mejorando y logre impactar en campos que aún no están siendo explotados. La Tabla 1.1 indica algunas aplicaciones de sensores en esta tecnología.

Tabla 1.1 Aplicaciones de dispositivos en tecnología MEMS.

DISPOSITIVO	APLICACIONES
Sensores de presión	Automotriz, medicina, industrial
Acelerómetros	Automotriz y sensado de movimiento industrial
Giroscopios	Automotriz y sensado de movimiento industrial
Pantallas	Cine y proyectores, teatros en casa, televisión
Dispositivos de RF	Interruptores, capacitores variables, filtros
Robótica	Sensado y actuación
Biología y medicina	Análisis químico, secuencia DNA, dopado, prótesis implantables
Recolector de energía	Generación de energía, monitoreo industria, militar (defensa)

Los procesos de fabricación actualmente usados en tecnología MEMS son micromaquinado en volumen, micromaquinado superficial, litografía, galvanizado y conformado (LIGA), técnicas de electro depósito y crecimiento de películas [1]. A continuación, se describen dichos procesos de fabricación.

1. Micromaquinado en volumen

El micromaquinado de volumen consiste en definir la estructura mediante el grabado parcial del grosor del material usado como sustrato. En este proceso de fabricación se pueden utilizar grabado seco o húmedo. La ventaja de utilizar grabado húmedo comparado con el grabado seco es que proporciona una mayor selectividad y es mucho más rápido de grabar [4]. La razón de grabado puede alcanzar pocas decenas de micras para grabado isotrópico y es reducida debajo de $1\mu\text{m}/\text{min}$ para grabado anisotrópico. La principal desventaja del grabado húmedo es que cualquier

modificación del tipo de grabado húmedo, concentración y/o temperatura puede cambiar selectivamente respecto a la orientación cristalográfica y concentración del dopaje del silicio.

Los materiales comúnmente utilizados para el micromaquinado de volumen son: silicio (Si), cuarzo (SiO_2), carburo de silicio (SiC), arseniuro de galio (GaAs), fosfato de indio (InP), germanio (Ge) y vidrio. Las Figuras 1.2 y 1.3 muestran el flujo de los procesos de micromaquinado de volumen anisotrópico e isotrópico, respectivamente. Estos procesos empiezan con el depósito y colocación de patrones en un nivel de máscara (Figuras 1.2(a) y 1.3(a)). El material de la máscara depende de la profundidad de grabado. Capas gruesas de dióxido de silicio (SiO_2) son utilizadas como una máscara durante el grabado isotrópico poco profundo. Para grabados más profundos, se requieren las máscaras no grabables de nitruro de silicio (Si_3N_4) u oro (Au) [4]. Después de realizar el patrón de la máscara, la oblea es colocada en la solución del grabado. Los grabados isotrópicos graban en todas las direcciones cristalográficas con la misma razón y generalmente se utilizan ácidos tales como el ácido hidrofúorhídrico (HF), ácido nítrico (HNO_3) y el ácido acético (CH_3COOH). Los grabados isotrópicos se dirigen hacia abajo y hacia arriba de las aberturas de la máscara y aumenta el grabado del patrón geométrico (Figura 1.2 (b)). La principal desventaja del grabado isotrópico es la dependencia de la razón de grabado con la temperatura. Por lo tanto, es difícil el control del grabado lateral para definir geometrías verticales. En cambio, el grabado anisotrópico define muy bien las geometrías con formas limitadas por los planos cristalográficos (Figura 1.3 (b)).

Los grabados anisotrópicos son usualmente soluciones acuosas alcalinas de hidróxido de potasio (KOH), hidróxido de sodio (NaOH), hidróxido de litio (LiOH), hidróxido de cesio (CsOH) e hidróxido de amonio (H_4OH). Después de completar el grabado, el patrón geométrico que deja la mascarilla es removida (Figura 1.2(c) y 1.3(c)).

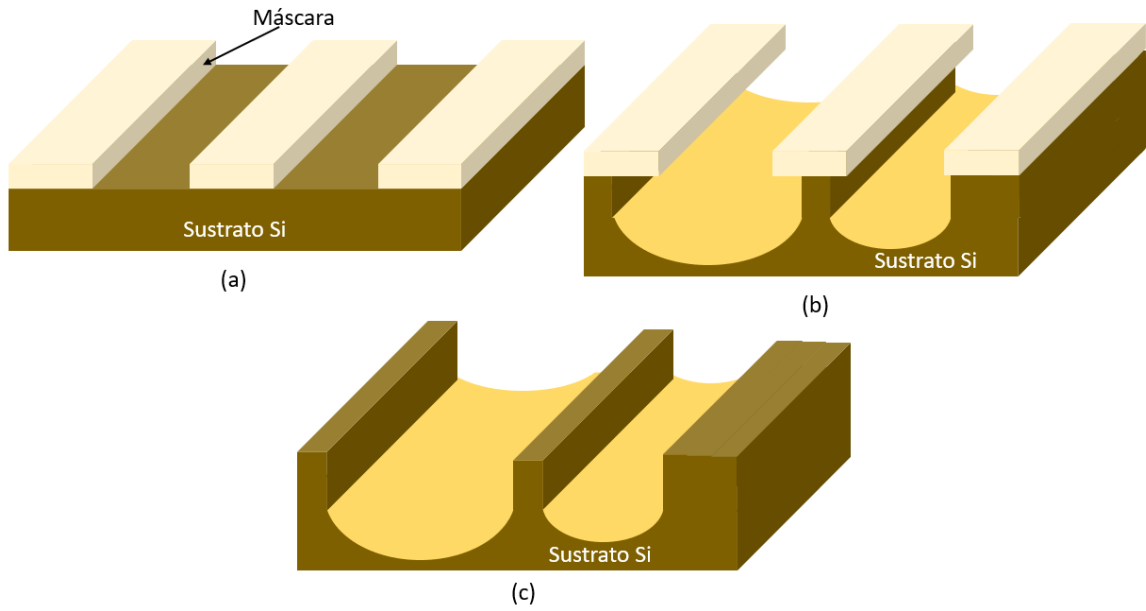


Figura 1.2 (a-c). Flujo del proceso de fabricación de un MEMS utilizando micromaquinado en volumen con grabado isotrópico.

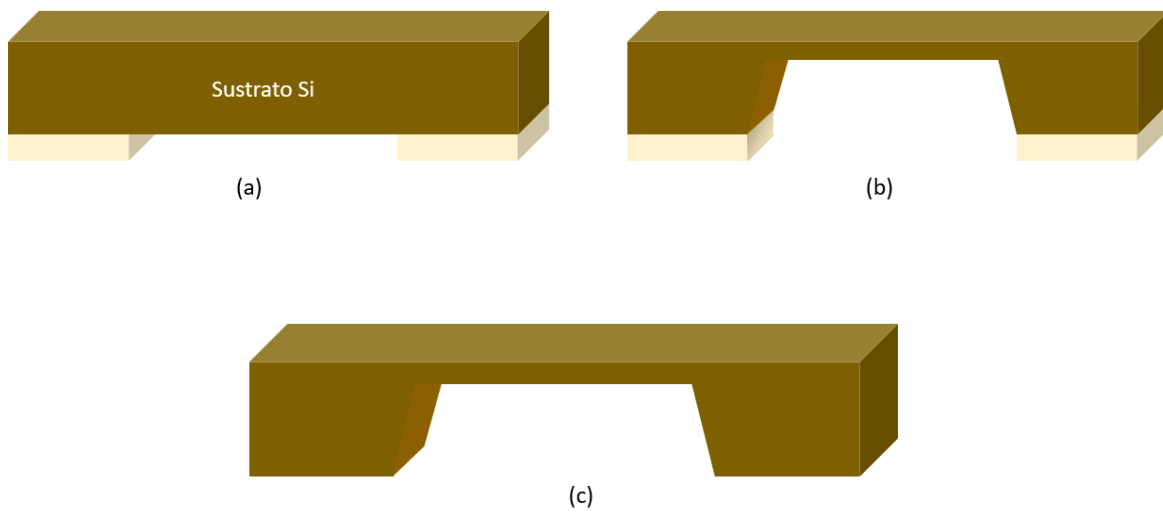


Figura. 1. 3 (a-c). Flujo del proceso de fabricación de un MEMS utilizando micromaquinado de volumen con grabado anisotrópico.

2. Micromaquinado superficial

En el proceso de micromaquinado superficial las estructuras son construidas capa por capa sobre la superficie de un sustrato. Las formas geométricas de las estructuras en el plano xy son definidas por litografía seguida por grabado seco. Un proceso de fabricación común de micromaquinado de superficie se muestra en la Figura 1.4. Primero, en la parte superior del sustrato se deposita una capa de sacrificio. Después los puntos de anclaje del dispositivo son definidos (Figura 1.4 (a)). A continuación, se deposita el patrón de la capa estructural del MEMS (Figura 1.4 (b)). Finalmente, la capa de sacrificio es removida y es obtenida una estructura suspendida (Figura 1.4 (c)). Ésta es la parte más crítica del proceso de fabricación porque la tensión superficial puede deformar la estructura suspendida y adherir la estructura con la superficie del sustrato. Existen una amplia variedad de capas de sacrificio que pueden ser utilizadas incluyendo a: vidrio de fosfosilicato (PSG), dióxido de silicio (SiO_2) depositado por el depósito químico en fase de vapor a baja presión (LPCVD, por sus siglas en inglés) o depósito químico en fase de vapor activado por plasma (PECVD, por sus siglas en inglés), nitruro de silicio (Si_3N_4) en LPCVD y PECVD, silicio policristalino (poly-Si) en LPCVD, germanio policristalino (poly-Ge) en LPCVD, aluminio (Al) y oro (Au) [4]. Las capas estructurales pueden ser de silicio policristalino, poly $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, Si_3N_4 en LPCVD y PECVD, Ti, SiO_2 y tungsteno (W) por depósito químico en fase de vapor (CVD).

El proceso de micromaquinado de superficie es más complicado que el micromaquinado de volumen porque implica el depósito de varias capas. Por otra parte, dependiendo de la técnica de depósito utilizada para las diferentes capas, el espesor de éstas puede variar entre unas decenas de nanómetros hasta unas micras. Además, el proceso de micromaquinado superficial implica el depósito de películas policristalinas, las cuales tienen una menor piezorresistencia en comparación con el silicio cristalino. En la actualidad se producen volúmenes considerables de dispositivos con técnicas de micromaquinado superficial y se espera que estos predominen en el mercado [21].

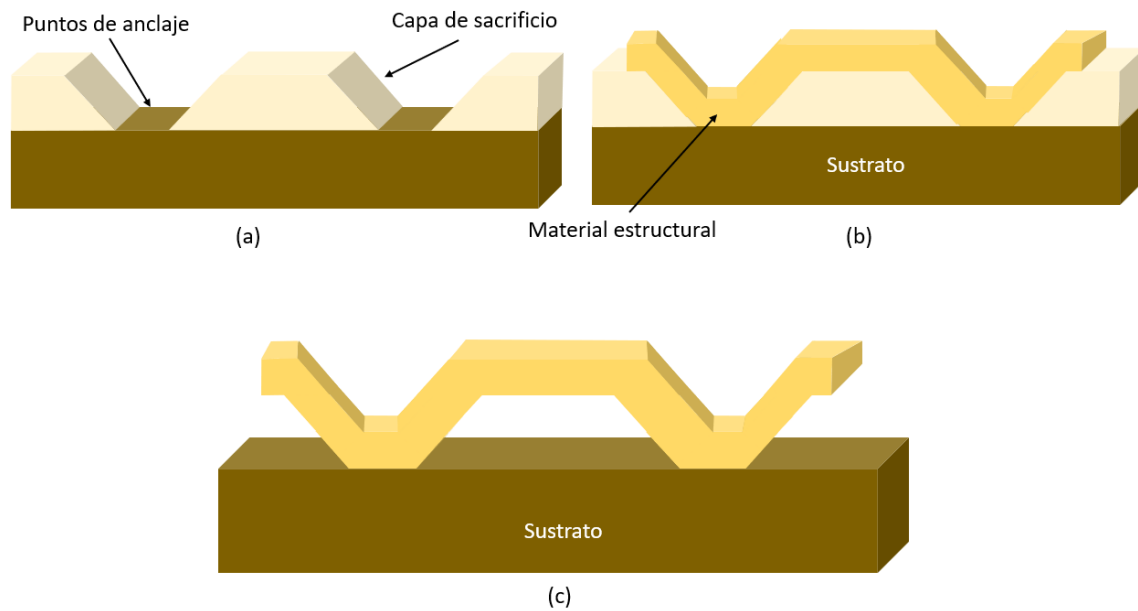


Figura 1.4 (a-c). Flujo del proceso para un MEMS en tecnología de micromaquinado superficial.

3. LIGA

El proceso LIGA es un proceso utilizado para la fabricación de microsistemas, desarrollado hacia fines de los años 70 en *Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK)*. Este proceso originalmente se desarrolló en los cuadros de trabajo sobre la separación de los isótopos de uranio. La sigla "LIGA" proviene del alemán y es una abreviación de "Röntgenlithographie, Galvanoformung, Abformung", que representan las diferentes etapas de este proceso. Se trata de una técnica de obtención de microestructuras a partir de moldes creados mediante litografía de rayos X, seguida de metalizado o simplemente la obtención de las propias microestructuras realizadas por litografía de rayos X con metalizado.

La litografía de rayos X: a partir de una primera máscara realizada con la ayuda de un cañón de electrones, el patrón en dos dimensiones de las microestructuras es duplicado por litografía de rayos X sobre una capa de polímero fotosensible. El espesor y el material de la máscara como el tamaño de las microestructuras

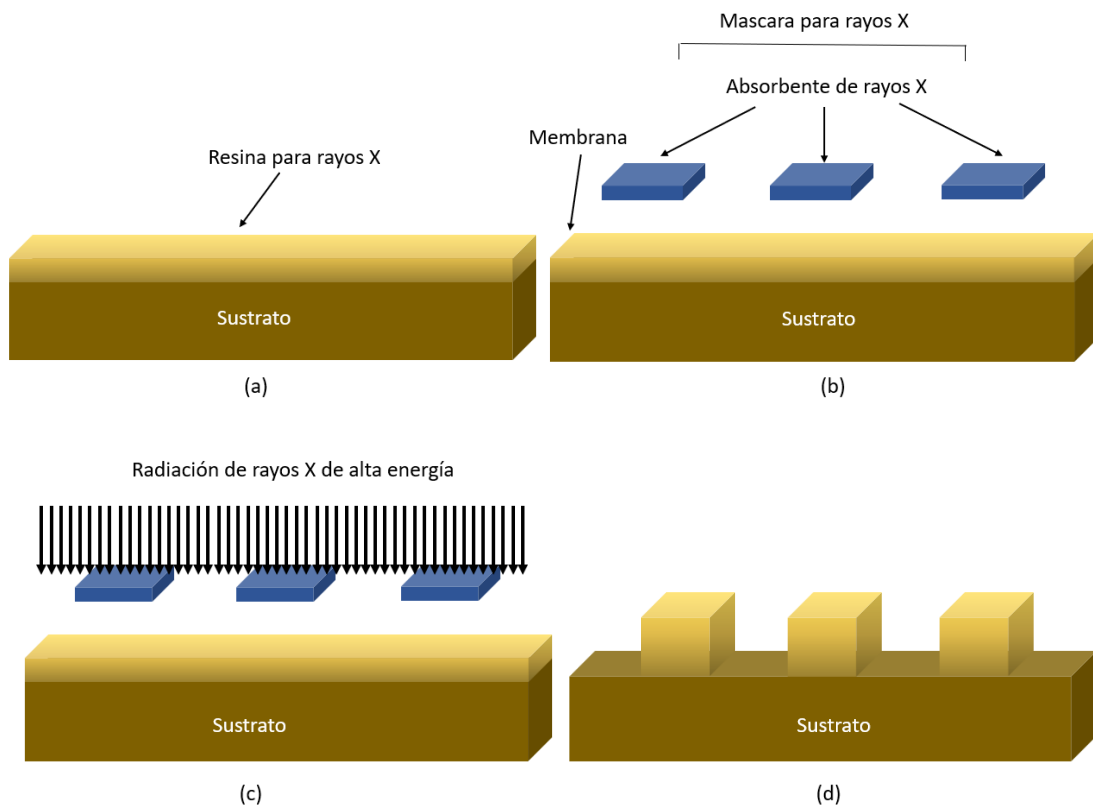
determinan el espesor máximo de la capa de polímero. El patrón es a continuación revelado para poder pasar a la etapa siguiente.

La galvanización por electrodeposición: el metal es depositado sobre las microestructuras reveladas, sobre todo el espesor de la capa de polímero remanente. La estructura obtenida sirve directamente a la formación en la etapa siguiente si el espesor es lo suficiente para la aplicación prevista (el metal depositado es entonces el níquel u otras aleaciones de níquel, las cuales presentan una buena conductividad y las cualidades requeridas para una electrodeposición de calidad, como buenas propiedades mecánicas para el conformado), o son utilizadas en tanto que la máscara para repetir la primera etapa de litografía de rayos X. Esto es realizado para obtener estructuras más gruesas (el metal depositado entonces es el oro, que presenta excelentes cualidades electrónicas para el electro-deposito, así como una alta absorción de rayos X).

El conformado: después de la disolución del polímero remanente alrededor del cual se ha desarrollado la galvanización, el bloque de metal es preparado para servir de herramienta de formación. Se pueden fabricar en serie microestructuras en polímero por formación (en matrices, estampado o moldeado por inyección).

La Figura 1.5 muestra la descripción general de un proceso típico de LIGA. Este proceso implica una capa gruesa protectora de rayos X que va desde unas micras a centímetros, (Figura 1.5 (a, b)), y mediante una alta exposición de energía con rayos X se obtiene una estructura de capa protectora en tres dimensiones (Figura 1.5 (c, d)). El electro depósito es utilizado para llenar el molde de la capa protectora con metal (Figura 1.5 (e)). Posteriormente, se remueve esta capa protectora y se obtiene una estructura aislada (Figura 1.5 (f)). La fotoresina para rayos X debe tener una alta sensibilidad a rayos X, alta resolución, resistente a grabado seco y húmedo y estabilidad térmica. La capa protectora no expuesta debe ser absolutamente insoluble durante el desarrollo del proceso, tener muy buena adhesión al sustrato, ser compatible con el proceso de electroplastia y tener bajo esfuerzo residual para evitar daño mecánico a las microestructuras. La máscara para rayos X está compuesta de una capa de material absorbente depositada sobre una membrana.

El absorbente es usualmente realizado por materiales que tienen un alto número atómico para absorber rayos X (por ejemplo, Au) y produce alta atenuación (mayor a 10 dB). Además, la capa absorbente debe ser estable en condiciones de poca radiación sobre periodos prolongados, flexible para generar patrones y tener poca distorsión. La principal desventaja del proceso LIGA es el uso de litografía con rayos X, la cual no es utilizada por los procesos convencionales de fabricación de circuitos integrados. Esto provoca que LIGA sea extremadamente costoso y poco popular. Además, la fabricación de máscaras para rayos X es mucho más difícil y costosa que las máscaras convencionales de circuitos integrados [21].



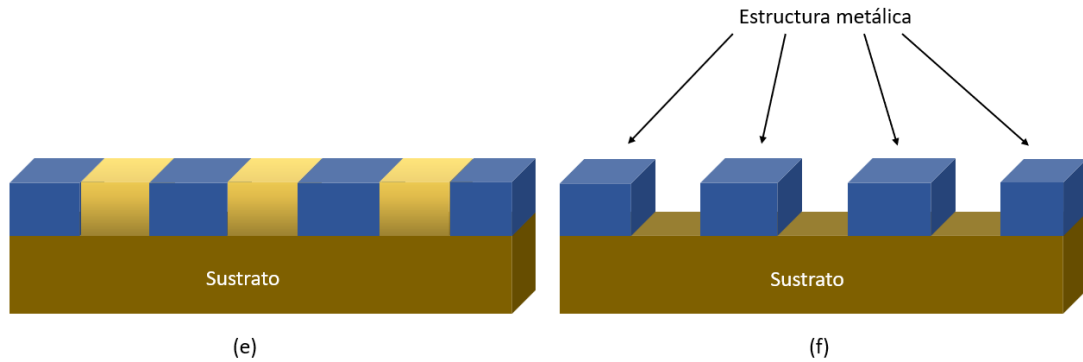


Figura 1.5. Diagrama de un proceso de fabricación LIGA: a) Depósito de capa protectora a rayos X; b) mascarilla para rayos X; c) exposición de alta energía con rayos X; d) revelado de la capa protectora por rayos X; e) electro-depósito y f) liberación de la capa protectora.

4. Encapsulado

El objetivo de un encapsulado puede tener varias perspectivas. Las operaciones de encapsulado pueden consistir de varios procesos para que el dispositivo funcione apropiadamente. Así, como el ensamblado del dispositivo MEMS en un siguiente nivel o como producto final. El encapsulado que contiene al dispositivo MEMS debe proveer las siguientes funciones [21].

Soporte mecánico. El encapsulado debe contener al dispositivo MEMS de modo que pueda funcionar de manera individual o dentro de otro sistema. El encapsulado debe proteger físicamente el dispositivo de MEMS.

Interconexión. El encapsulado debe prever la comunicación entre la conexión de un dispositivo de microescala de MEMS y la conexión que se utiliza para la función o interfaz con el dispositivo. Las conexiones pueden abarcar una variedad de fenómenos físicos como los eléctricos, biológicos ópticos, fluidos.

El control de medio ambiente. El encapsulado debe controlar el ambiente necesario para que el dispositivo MEMS pueda funcionar correctamente durante toda su vida. Los controles medioambientales necesarios pueden ser el control de la contaminación por partículas, o de la atmósfera del ambiente.

La secuencia del proceso del encapsulado se divide en los siguientes pasos:

Procesamiento posfabricación. Un procesamiento adicional debe realizarse para obtener la funcionalidad de los dispositivos MEMS. Estos procesos pueden incluir en dados, la liberación y el revestimiento del dispositivo.

Selección del encapsulado. El encapsulado proporciona las funciones del soporte mecánico, la interconexión y el control ambiental para los dispositivos MEMS. Dependiendo de la aplicación, el encapsulado podría ser del tipo comercial usado en circuitos integrados o un encapsulado diseñado específicamente para el dispositivo.

Unión del MEMS. El dado del MEMS es fijado al encapsulado para proveer soporte e interconexión.

Alambrado y sellado. Esta etapa considera la conexión del dado MEMS al encapsulado. El encapsulado será sellado para proteger al MEMS a causa de la manipulación o la contaminación. Este encapsulado sellado puede proporcionar un ambiente inerte a los MEMS para evitar la corrosión o la humedad, lo cual puede afectar el rendimiento del dispositivo. Alternativamente, el encapsulado puede proporcionar un vacío que puede ser necesario para algunos dispositivos de MEMS. En la Tabla 1.2 se muestran algunos materiales empleados como base para la fabricación de encapsulados y se enlistan sus propiedades comparándolas con el silicio [4].

Tabla 1.2. Propiedades mecánicas y térmicas de los materiales más utilizados en el proceso de encapsulado [21].

Materiales		Coef. de expansión térmica (ppm/°C)	Conductividad térmica (W/m*K)	Resistencia a la tensión (MPa)
	Silicio	2.6	150	
Metales	Aluminio	21	250	45
	Acero inoxidable	17	6	700
	Kovar	5.3	17	517
	Alumina	6.5	22	300
Cerámicas	Vidrio-cerámica	2.5	2	200
	AlN	4	100-170	300

La mayoría de los trabajos publicados sobre MEMS reportan el empleo de materiales compatibles con la tecnología del silicio, el cual ha sido la base fundamental del desarrollo alcanzado por la microelectrónica. Sin embargo, también se observa en la actualidad, otra fuerte tendencia que consiste en el desarrollo de nuevas combinaciones de materiales y procesos complejos para construir transductores [4].

Los MEMS se clasifican según su funcionalidad en sensores y actuadores, ambos son formas de transductores, los cuales son dispositivos que pueden transformar un determinado tipo de energía de entrada en otro tipo de energía a la salida. Un sensor es un transductor de entrada que detecta una forma de energía mecánica, química, térmica, entre otras y transforma su salida en otro tipo de señal, normalmente eléctrica. Alternativamente, un actuador es un transductor de salida y en la mayoría de los casos, transforma una forma de energía en una mecánica de salida [21].

A su vez los sensores y actuadores se clasifican por su principio de detección, y fenómeno físico que emplean en la transducción (Figura 1.6). Entre las técnicas de detección destacan la detección piezorresistiva, capacitiva, óptica, térmica, piezoeléctrica, entre otras, y entre los fenómenos físicos que podemos mencionar para la detección de variables se encuentran el efecto de la fuerza de Lorentz, efecto Peltier, efecto Seebeck y efecto magnetoresistivo entre otros.

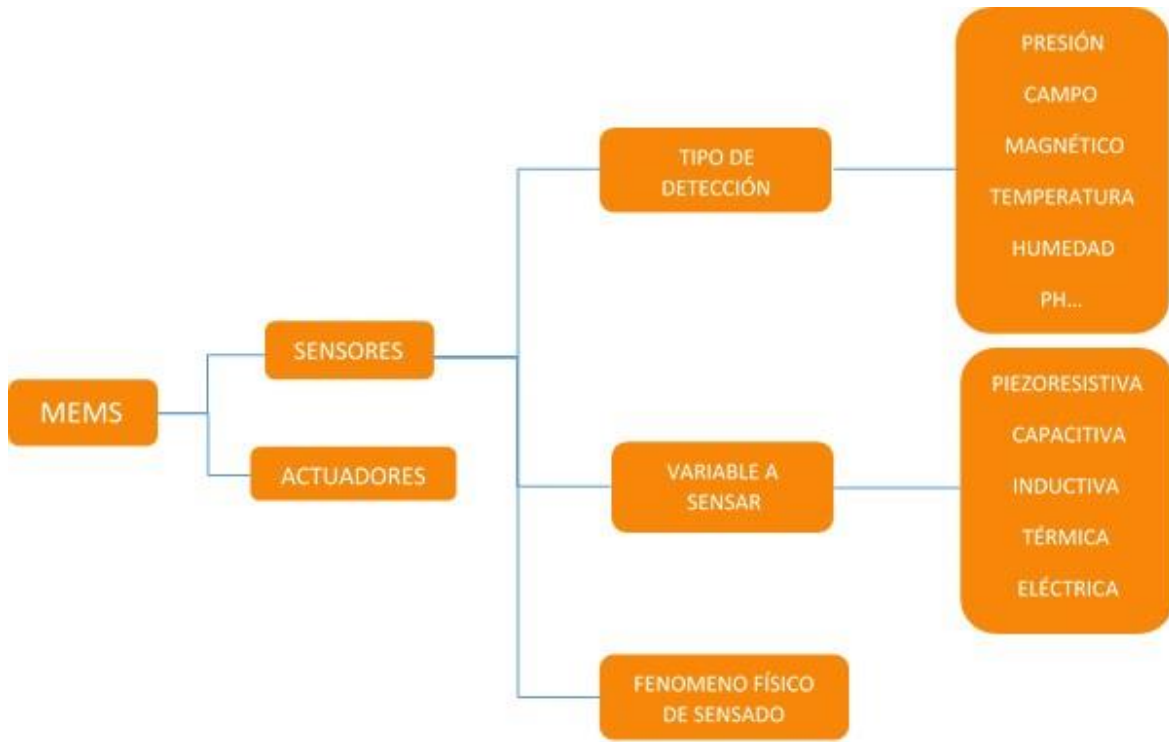


Figura. 1.6. Clasificación de MEMS [21].

Capítulo 2.

La recolección de energía es un tema de mucho interés en el mundo actual, esto se debe a que las fuentes de energía tradicionales pueden llegar a agotarse. Por esta razón es importante el estudio y desarrollo de microsensores recolectores de energía.

En este capítulo se presentan algunas de los materiales más utilizados para fabricar los microsensores recolectores basado en tecnología MEMS y aplicaciones.

Existen diferentes principios por los cuales se puede obtener energía eléctrica a nivel micro o nano; los fenómenos piezoeléctrico, triboeléctrico, termoeléctrico y electromagnético son algunos de los más importantes. Los métodos que usamos en nivel macro, no son fácilmente transferibles a nivel micro, de los anteriormente mencionados los fenómenos piezoeléctrico y triboeléctrico resaltan por su compatibilidad para transformar movimiento mecánico en energía. En este sentido, llama la atención que es un fenómeno dependiente del tamaño que ha demostrado tener su máxima eficiencia a nivel de submicrométrico [30-35]. El fenómeno piezoeléctrico ocurre cuando se transforma un esfuerzo mecánico en energía eléctrica, mientras que el fenómeno **piezoeléctrico inverso** transforma energía eléctrica en movimiento mecánico. La piezoelectricidad se produce cuando los átomos forman una estructura cristalina sin centro de simetría, éstos son sometidos a tensión o compresión, por lo que el arreglo de átomos cambia ligeramente, provocando una polarización de los átomos que forman la estructura cristalina, esta polarización es directamente proporcional a la fuerza ejercida (Figura 2.1).

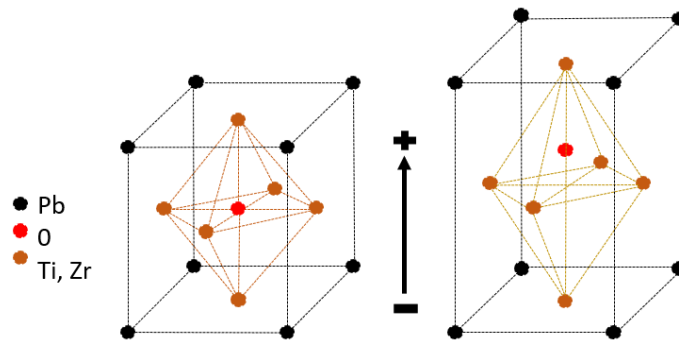


Figura 2.1. Representación del cambio en la estructura cristalina fuente.

1. Efecto Piezoeléctrico

El efecto piezoeléctrico, en esencia, es la separación de carga dentro de un material como resultado de una deformación aplicada [36]. Dicha separación crea un campo eléctrico dentro del material, esto es llamado: efecto piezoeléctrico directo. Así como hay un efecto piezoeléctrico directo hay uno inverso, en el cual hay formaciones de tensiones en un material provocadas por el campo eléctrico aplicado, cabe mencionar que el efecto piezoeléctrico es reversible al dejar de someter al material a la tensión o campo eléctrico.

1.1 Materiales piezoeléctricos

Los materiales piezoeléctricos presentan un comportamiento anisotrópico [37]. Lo cual representa que las propiedades del material dependen de la dirección de la deformación, la polarización y la orientación de los átomos, al igual que la posición de los electrodos.

Por naturaleza hay ciertos materiales piezoeléctricos, pero cuando se trata de un material de ingeniería piezoeléctrica estos son sometidos a un proceso llamado polarización para que su comportamiento sea piezoeléctrico. En dicho proceso se aplica un campo eléctrico muy alto que orienta permanentemente los dipolos en la dirección del campo (Figura 2.2).

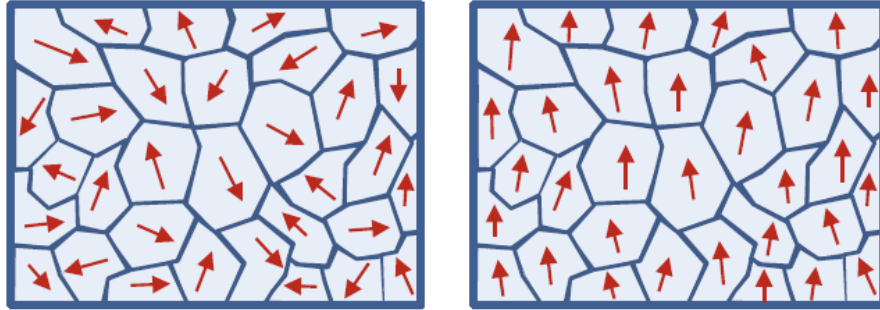


Figura 2.2. a) Antes del proceso de polarización b) Después del proceso de polarización.

El proceso de polarización induce propiedades piezoeléctricas en el material. En la Figura 2.2 a) se muestra el material antes del proceso de polarización donde se aprecia que los dipolos están aleatoriamente. En la Figura 2.2. b) se ha realizado el proceso de polarización y los dipolos están en una sola dirección de polarización.

Las formas más disponibles de materiales piezoeléctrico son:

- Cristales: Cuarzo (SiO_2), (Figura 2.3); Berlinita (AlPO_4), Ortofosfato de Galio (GaPO_4), Turmalina.
- Cerámica policristalina: Titanato de Bario (BaTiO_3), Titanato de Zirconato de Plomo (PZT).
- Materiales no ferroeléctricos de película delgada: Óxido de Zinc pulverizado (ZnO), Nitrato de Aluminio (AlN)
- Materiales poliméricos: Fluoruro de Polivinilidina (PVDF)
- Películas gruesas imprimibles en pantalla basadas en polvos piezocerámicos y compuestos como polivinilideno-trifluoroetileno-PZT (PVDF-TrFE)
- Cristales orgánicos: Cloruro de Disopropilamonio Monocristalino (DIPAC) y Bromuro de Disopropilamonio (DIPAB)

Los materiales piezoeléctricos más comunes son los poliméricos, los piezo-compuestos y en esencia los cerámicos.

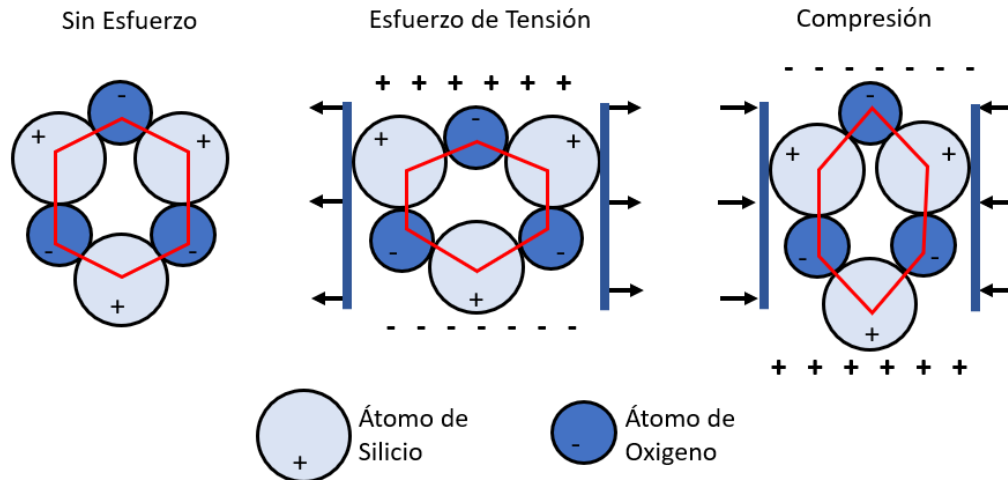


Figura 2.3. Efecto piezoeléctrico en el cuarzo.

2. Materiales Poliméricos

Estos materiales presentan una mayor flexibilidad en el proceso de fabricación dado que son más ligeros, duros y su fabricación se puede realizar en grandes superficies, así como cortarse en muchas formas a temperaturas bajas; poseen baja constante dieléctrica, baja rigidez elástica, baja impedancia acústica y mecánica.

- Fluoruro de Polivinilidina (PVDF) este tipo de material es termoplástico semicristalino en que dominan tres fases cristalinas (α , β , γ). Cuando coexisten las fases α y β a temperatura ambiente son las responsables de que el material sea piezoeléctrico por la orientación de los átomos en su estructura molecular. Se caracteriza por su bajo costo, se obtienen películas delgadas fácilmente, es biológicamente compatible y presenta buenas propiedades mecánicas.

Actualmente es posible encontrar materiales poliméricos mezclados con otros materiales los cuales se conocen como piezocompuestos. Estos son materiales formados por dos fases, una activa y una pasiva, donde la activa es un cerámico piezoeléctrico y la pasiva puede ser un polímero o un vidrio. Esto permite un diseño en ventaja en cuanto flexibilidad. El más utilizado es el polivinilideno-trifluoroetileno-PZT (PVDF-TrFE).

Tabla 2.1. Propiedades del PVDF-TrFE.

Propiedad	Valor
Densidad	1780 kg/m ³
Constante de deformación (piezoeléctrico)	2.3 e ⁻¹¹ m/V
Módulo de Young	2 GPa
Constante Dieléctrica a temperatura ambiente	20
Constante Dieléctrica a 100 °C	60

3. Cerámica Policristalina

Estas cerámicas son constituidas por innumerables cristales ferroeléctricos. Para que el material cerámico obtenga la actividad piezoeléctrica este es expuesto a un fuerte campo eléctrico externo a alta temperatura así los dipolos naturales del material desaparecen y son creados nuevamente de forma espontánea cuando la temperatura disminuye. Los cerámicos piezoeléctricos están constituidos por mezclas policristalinas: titanatos de bario, de calcio, de plomo o titanato de zirconato de plomo (PZT), estos se obtienen por la compresión del polvo a altas temperaturas, siendo moldeadas y cocidas en un horno.

- Titanato de bario (BaTiO₃). - este fue el primer material ferroeléctrico cerámico desarrollado y fabricado a grandes producciones ya que es muy utilizado dentro del mercado de los componentes electrónicos. Su piezoelectricidad se presenta cuando hay un campo eléctrico.

Tabla 2.2. Propiedades del Titanato de Bario

Propiedad	Valor
Densidad	5800 kg/m ³
Contante de deformación (piezoeléctrico)	78 pC/N
Módulo de Young	67 GPa

- Titanato de Zirconato de Plomo (PZT). - son compuestos por óxidos de plomo, zirconio y titanio. Tiene un desempeño ferroeléctrico, coeficientes piezoeléctricos y constantes dieléctricas altos. Su desventaja es que es el alto contenido de plomo provocando problemas ambientales y su volatilidad de vapores tóxicos de plomo hace peligrosa su producción.

Tabla 2.3. Propiedades del Titanato de Zirconato de Plomo (PZT)

Propiedad	Valor
Densidad	7500 kg/m ³
Contante de deformación (piezoeléctrico), d31	1.8 e ⁻¹⁰ m/V
Contante de deformación (piezoeléctrico), d33	3.6 e ⁻¹⁰ m/V
Contante de deformación (piezoeléctrico)	1.1 e ⁻¹⁰ m/V
Coefficiente de voltaje (piezoeléctrico), g31	0.011 V*m/N
Coefficiente de voltaje (piezoeléctrico), g33	0.025 V*m/N
Módulo de Young	63 Gpa

4. Propiedades de los materiales piezoeléctricos

Debido al comportamiento anisotrópico de estos materiales las propiedades de cumplimiento, acoplamiento y permitividad son de segundo orden, dando como resultado que sus constantes definidas para su caracterización tengan dos subíndices, “uno relacionado con la fuerza aplicada, el esfuerzo, y el otro relacionado con el cambio de longitud, la deformación.” El sistema de coordenadas para indicar la dirección de tensión y deformación se muestra en la Figura 2.4.

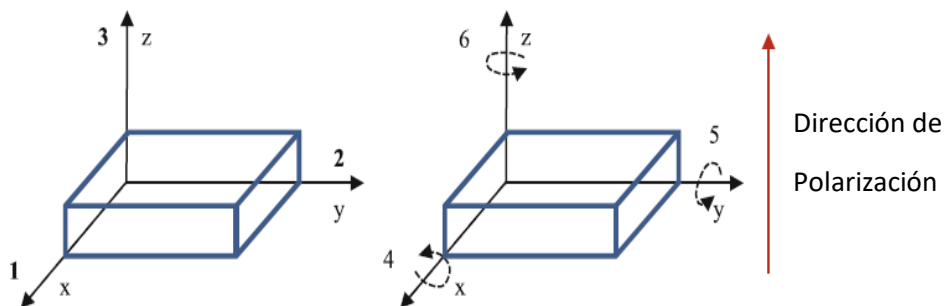


Figura 2.4 El eje z coincide con la dirección de polarización. Los ejes x, y y z se representan con los subíndices 1, 2 y 3; los subíndices 4, 5 y 6 representan la rotación alrededor de los ejes.

Dichas constantes son: i) constante de tensión/carga piezoeléctrica, d ; ii) constante de tensión/tensión piezoeléctrica, g ; iii) el coeficiente de acoplamiento electromecánico, k , y iv) la permitividad ϵ .

Para las magnitudes piezoeléctricas mecánicas y eléctricas se utilizan subíndices dobles (k_{ij}). El subíndice ij designa el eje paralelo a la dirección de la excitación y de respuesta.

- Constante esfuerzo/carga, d_{ij} . - “expresa la relación entre la deformación a lo largo o alrededor de un eje y el campo eléctrico aplicado paralelo a un eje cuando todas las tensiones externas son constantes”.

$$d_{ij} = \frac{\text{tension desarrolla a lo largo de } j - \text{eje}}{\text{tension desarrollada a lo largo de } i - \text{eje}} \left[\frac{m}{V} \right]$$

- Constante tensión/carga. - “relación entre la carga de cortocircuito por unidad de área que fluye a través de los electrodos conectados perpendiculares a un eje y la tensión aplicada a lo largo o alrededor de un eje”.

$$d_{ij} = \frac{\text{corto} - \text{flujo de carga del circuito perpendicular de } i - \text{eje}}{\text{tension aplicada sobre } j - \text{eje}} \left[\frac{C}{N} \right]$$

- Constante tensión/voltaje, g_{ij} . - “relación entre el campo eléctrico del circuito abierto desarrollado a lo largo de un eje y la tensión aplicada a lo largo o alrededor de un eje.”

$$g_{ij} = \frac{\text{campo del circuito abierto a lo largo de } i - \text{eje}}{\text{tension aplicada a lo largo de } j - \text{eje}} \left(\frac{Vm}{N} \right)$$

- Constante tensión/voltaje también es definida como “la relación entre la deformación desarrollada a lo largo de un eje y la densidad de carga eléctrica aplicada a electrodos”

$$g_{ij} = \frac{\text{tensio desarrollada a lo largo de } j - \text{eje}}{\text{densidad normal de carga aplicada a } j - \text{eje}} \left(\frac{m^2}{C} \right)$$

En el caso de los coeficientes de acoplamiento electromecánicos, k_{ij} , describen la conversión de energía mecánica a energía eléctrica o viceversa. Para el subíndice,

i , da la dirección del campo eléctrico y el subíndice, j , indica la dirección de la deformación mecánica. Cabe destacar que estos coeficientes no tienen dimensiones.

Como se ha mencionado antes los materiales piezoeléctricos tienen una polarización incorporada por ello responden de manera diferente a las tensiones aplicadas dependiendo de su dirección. Hay dos tipos de modos primarios de acoplamiento electromecánico para los materiales piezoeléctricos:

- Modo 31.- donde el campo eléctrico se produce sobre un eje ortogonal al eje de deformación (Figura 2.5 (a)).
- Modo 33.- el campo eléctrico producido se encuentra en el mismo eje que la deformación aplicada (Figura 2.5 (b)).

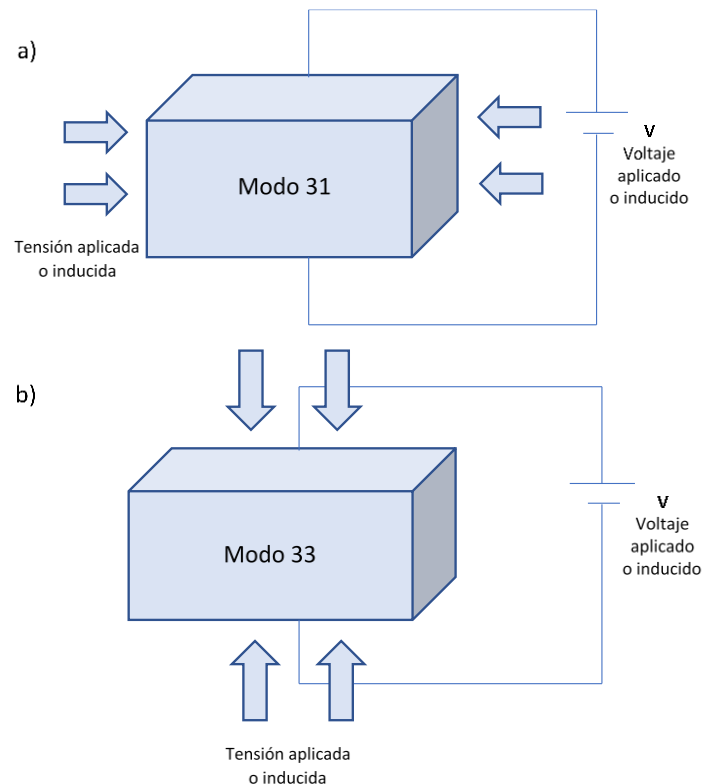


Figura 2.5. a) modelo 31 b) modelo 33

En un microsensar recolector de energía las constantes y los coeficientes piezoeléctricos más utilizados, basándose en la Figura 2.6, son:

- d_{31} : representa la relación entre la carga Q , que fluye entre los electrodos en cortocircuito, donde $V_e = 0 V$, que son ortogonales al eje de polarización (3-z), y una fuerza aplicada a lo largo del eje 1. Donde:

$$Q(V_e = 0 V) = d_{31} F \frac{b}{c} \quad (1)$$

- d_{33} : representa la relación entre la carga Q , que fluye entre los electrodos en cortocircuito que son ortogonales al eje de polarización (3-z) y una fuerza aplicada en el eje (3-z). Donde:

$$Q(V_e = 0 V) = d_{33} F \quad (2)$$

- g_{31} : expresa la relación entre el campo eléctrico inducido a lo largo del eje de polarización (3-z) y la fuerza aplicada igual en dirección ortogonal al eje de polarización (3-z). Donde el voltaje inducido es:

$$V_e(Q = 0 C) = g_{31} \frac{F}{a} \quad (3)$$

- g_{33} : expresa la relación entre el campo eléctrico inducido a lo largo del eje de polarización (3-z) y la fuerza aplicada en la dirección del eje de polarización (3-z). Donde el voltaje inducido es:

$$V_e(Q = 0 C) = g_{33} F \frac{c}{ab} \quad (4)$$

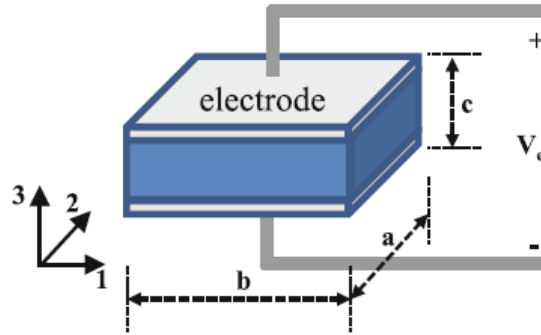


Figura 2.6. Dimensiones y sistema de referencia para las constantes y coeficientes piezoeléctricos. V_e es la tensión a través de los electrodos; a , b y c son las dimensiones del material piezoeléctricos.

Cabe destacar que la orientación de los materiales es muy importante, por lo que deben de tenerse en cuenta para poder realizar el modelado y análisis de la estructura que se desea implementar.

5. Aplicaciones

Existe un gran número de propuestas de micro y nano generadores para sistemas autónomos, sin embargo, muchos de estos se encuentran en fase de investigación tratando de aumentar los valores de salida, mejorando el rango de operación del dispositivo o aumentando las fuentes de recolección de energía hibridando estructuras y fenómenos, esto se lleva a cabo para conseguir alimentar circuitos con alguna función en específico [10] sentando así los primeros precedentes. Al depositar una lámina de PVDF para generar energía a partir del movimiento de los músculos simulando el movimiento con un motor lineal, dio la posibilidad de emplearlo en varias partes para coleccionar la energía [13]. Uno de los primeros trabajos que aparecieron con aplicaciones reales fue el uso en zapatos, donde los sensores están colocados en las suelas para coleccionar la energía; se propusieron tres diseños de material piezocerámico, en este reporte, el mejor diseño obtuvo hasta 1 W de potencia [16]. El diseño fue usado para energizar una etiqueta de radiofrecuencia. Recientemente se han trabajado más nanogeneradores en la suela de zapatos y componen una ventana de oportunidad importante para el desarrollo de sistemas autosustentados, debido al alto potencial de entrega de energía. Sin embargo, los trabajos más

recientes en este tipo de diseños van centrados en mejorar la entrega de energía mediante el principio de operación triboeléctrico, donde se fabricó una suela modular con aluminio, Kapton y PTFE. De igual manera se reportó un generador tridimensional creado con impresora 3D para la iluminación en el calzado con filamentos de LED si bien no requiere una gran cantidad de energía [17-18], el método de fabricación sencillo lo hace muy atractivo para aplicaciones comerciales, en la Figura 2.7 se muestra el generador en comparación al zapato.

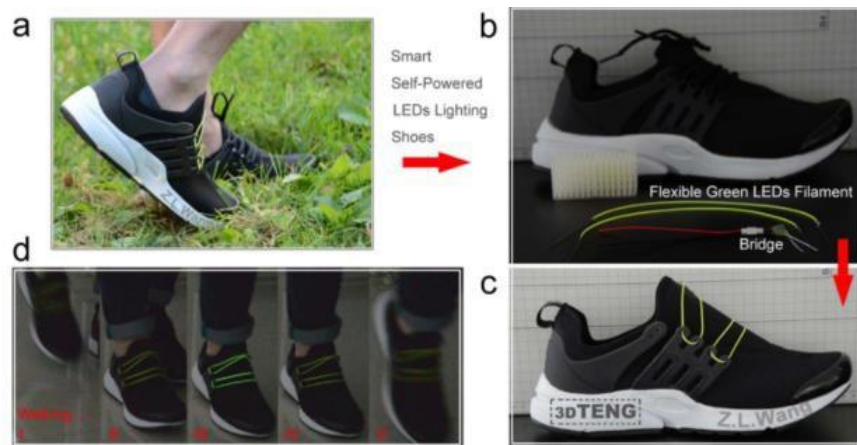


Figura. 2.7. a) Ilustración de zapatillas deportivas auto energizadas b) componentes separados, filamentos LED, puente rectificador y nanogenerador c) ilustración dispositivos integrados d) ilustración de funcionamiento [14].

Otra aplicación es evaluar las ondas ultrasónicas transmitidas a través de concreto para medir la corrosión del acero estructural, las propiedades físicas del concreto reforzado cambian con el progreso de la corrosión, es posible calcular la tendencia de pérdida de masa antes y después de ser corroído de acuerdo a las leyes de Faraday, por ello el actuador debe tener una gran constante y pocas perdidas. Para ello usaron PZT-4 embebido en el concreto, la señal emitida por este actuador se verá atenuada por el concreto por lo que PZT-5 es usado para la fabricación del sensor receptor por su mayor sensibilidad. Cuando las ondas ultrasónicas son transmitidas en el medio, su patrón de onda, frecuencia y amplitud se ven afectados por la reflexión, refracción y difracción de la interfaz por lo que la corrosión se mide de acuerdo a la atenuación de las señales acústicas. En la Figura 2.8 se muestran las gráficas de tiempo y frecuencia

de la onda recibida por el piezoeléctrico cerámico [19].

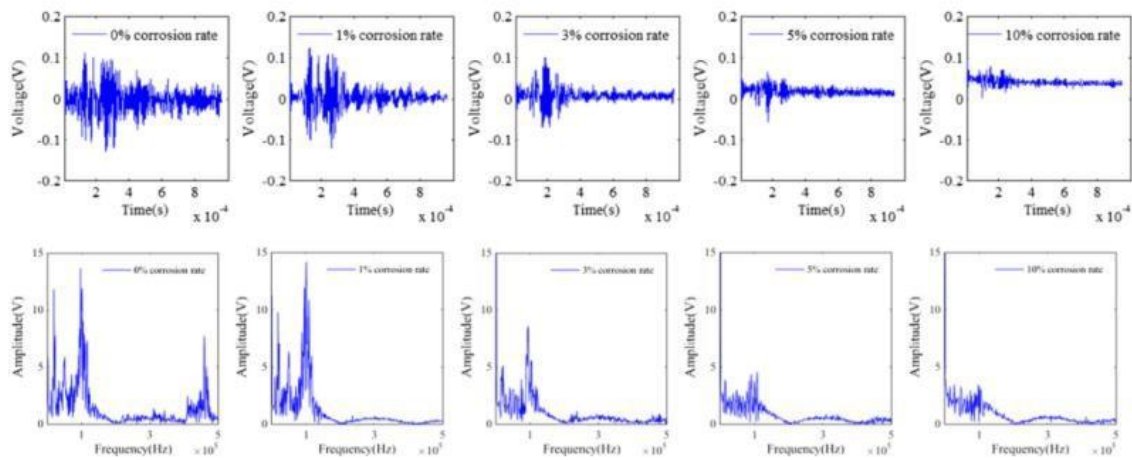


Figura 2.8. Gráficas de tiempo y frecuencia de la onda recibida por el sensor piezoeléctrico, de izquierda a derecha las muestras de corrosión son 0%, 1%, 3%, 5% y 10%.

Bajo la misma idea del aprovechamiento de ondas ultrasónicas aplicado a Bio-MEMS es el uso de piezoeléctricos, no como una fuente que reemplace a una batería sino como una forma de extender la vida de las baterías. Es el caso de los marca pasos con tecnología CMOS, los cuales han permitido tener dispositivos muy eficientes. Sin embargo, la sustitución de las baterías de un marcapasos puede ser un procedimiento tedioso y que puede llevar a complicaciones en la salud del paciente. Una solución es el uso de diafragmas piezoeléctricos para recolectar la energía ultrasónica con alta eficiencia [21], esta idea se trató en el pasado con sistemas de transmisión inductivos, más estos a la larga generan daños en los tejidos con la transferencia de potencia. Con el método ultrasónico de transferencia de potencia sería posible recargar las baterías de los marcapasos con un método no invasivo y sin efectos secundarios sobre el paciente, mediante un resonador externo se emiten ondas ultrasónicas que polarizan la película piezoeléctrica transmitiendo la energía para cargar las baterías del marcapasos. La fabricación de este tipo de dispositivo es probable que pueda implementarse en poco tiempo con aplicaciones comerciales debido a la compatibilidad con procesos de fabricación existentes.

Estas son algunas de las aplicaciones que existen para el uso de micro y nano sensores recolectores de energía, conforme avance con los años la capacidad de generación de energía aparecerán más aplicaciones, algunas en desarrollo bajo otros principios de operación son el monitoreo ambiental, protección anódica de estructuras, sistemas de posicionamiento global (GPS) autosustentados, regeneración de tejidos.

Capítulo 3. Resultados

Dentro de la ingeniería cuando hay un proceso de análisis hay dos objetivos importantes: la capacidad de identificar los principios físicos básicos que rigen el comportamiento de un sistema y transformar esos principios en modelos matemáticos para predecir el comportamiento cuantitativo y cualitativo del sistema. Este modelo matemático está compuesto de una o de un sistema de ecuaciones. En la actualidad los sistemas suelen ser más complejos y su análisis se torna difícil mediante el uso de sistemas tradicionales, por lo que una solución es el uso de un método de aproximación o un método numérico para extraer la información relacionada con el comportamiento del sistema. En los últimos años el método de elemento finito (MEF) se ha convertido en la alternativa de la solución a estos sistemas complejos.

El método de análisis por elemento finito es una técnica de análisis numérica que provee una alta capacidad para resolver un número elevado de ecuaciones e interacciones. En este tipo de análisis el modelo o los modelos físicos son divididos en elementos y estos están conectados por medio de nodos. Las ecuaciones de estudio que son difíciles o complicadas de resolver analíticamente en diseños complejos se resuelven de manera más simple con este método, sobre una malla de nodos interconectados. Las simulaciones por el método de elemento finito, son una de las herramientas que se usan mayormente al diseñar CI y MEMS [26]. También se emplea para predecir el comportamiento termo-eléctrico-mecánico, en MEMS y la influencia que este pueda tener sobre el comportamiento de los resortes y elementos sensibles.

En nuestro caso nos interesa tener información sobre la generación de energía a través del movimiento mecánico. En especial conocer la distribución de esfuerzos y el voltaje generada por la geometría del microsensor recolector de energía, ya que dicha geometría tiene un impacto importante en la generación de potencia. El objetivo de estas simulaciones es la optimización de las dimensiones de la geometría propuesta.

3.1 Metodología de Diseño MEMS

El proceso para llevar a cabo una simulación puede ser dividido en 5 partes:

1.- Definición del tipo de estudio a realizar:

El tipo de estudio comprende el dominio en el que lo haremos, si es un análisis estacionario, si es un modelo que cambia con el tiempo o si la respuesta esperada es bajo el dominio de la frecuencia, ya dentro del software no es necesario hacer un solo tipo de estudio, usando la misma geometría es posible hacer más de un tipo de estudio.

2.- Crear una geometría que es una representación simplificada del modelo real a simular:

Para crear nuestra geometría empleamos software de diseño asistido por computadora o CAD. Para este trabajo se empleó el software Solidworks y Ansys Workbench, sin embargo, el mismo software de elemento finito contiene herramientas propias para generar geometrías.

3.- Definición de las condiciones de frontera bajo las que opera y restricciones:

En esta sección se deben establecer las condiciones de frontera para el problema, aquí deben ir concentradas las condiciones como las cargas a las que es sometida la geometría, las restricciones de movimiento de dispositivo, los materiales y las conexiones externas del dispositivo

4.- Mallado y Resolución del problema por nodos

En la parte de mallado se realiza la discretización de la geometría en pequeños volúmenes de control, el software realiza esta parte automáticamente, sin embargo, esta es quizás la parte más importante de toda la simulación, puesto que se deben elegir volúmenes de control adecuados para obtener la información necesaria de nuestro modelo computacional. Un mallado más disperso será más sencillo para la computadora, más podríamos estar perdiendo información si hay

nodos muy dispersos en una zona en donde es importante conocer más información, por otro lado, un mallado demasiado exhaustivo podría resultar en un costo computacional y un tiempo de procesamiento muy altos, o inclusive que nuestro equipo de cómputo no tenga los recursos necesarios si es demasiado complejo. Por ello se debe tratar de optimizar lo más posible la malla, es por eso que se deben correr varias simulaciones con diferentes mallados hasta obtener el máximo de información sin afectar el costo computacional.

5.- Visualización de los Resultados

En esta parte es donde podemos hacer gráficas, cortes, contornos para mostrar gráficamente los resultados tales como deformaciones máximas, los potenciales generados, también se pueden hacer escaneos variando valores como por ejemplo la resistencia para obtener la potencia máxima que entrega dispositivo diseñado.

3.2 Características de Diseño MEMS

El microsensar recolector de energía puede tener distintas configuraciones dependiendo del material a usar, según las técnicas existentes de fabricación y opciones de modelado. Los diseños de películas delgadas son los más comunes por tener una fabricación sencilla, por lo que básicamente tendremos un material soportando el conjunto y dos electrodos, entre los cuales se haya el material piezoeléctrico. Los grosores de las capas se aproximan de trabajos ya existentes para su comparación y obtener las apropiadas condiciones de simulación. Para el estudio se realizan pruebas distintas:

- a) En modo estacionario, para comprobar su respuesta a un estímulo individual.
- b) Estudio en el tiempo, para caracterizar su comportamiento.
- c) Estudio de frecuencia, dependiendo de la fuerza de estimulación, en la literatura encontramos casos de estimulación acústica, vibraciones, pulsos mecánicos y deformación de las películas.

En esta sección se muestran los detalles del dispositivo recolector de energía, así como las propiedades mecánicas y piezoeléctricas del PZT-5H que es la cerámica piezoeléctrica usada en el dispositivo. Posteriormente, se dan detalles del análisis modal y la respuesta de los análisis armónicos realizados.

Los diseños se basaron considerando dos materiales, silicio y PZT-5H (Figura 3.1) los cuales se pueden considerar como una viga a los cuales se les adiciona una masa sísmica de acuerdo a cada diseño, el espesor de cada material cambia de acuerdo al diseño propuesto.



Figura 3.1. Materiales considerados para el diseño de los dispositivos.

El diseño del dispositivo 1 (Figura 3.2) está simulado en una capa de 2 μm de PZT-5H sobre una capa de 3 μm de Si y en la parte inferior una masa del mismo material de 390 μm .

Tabla 3.1. Dimensiones diseño 1

Espesor	390.00 μm
Capa PZT-5H	2 μm
Capa de Silicio	3 μm
Radio	2046.60 μm
Base Triangulo	869.56 μm
Lado Triangulo	1546.77 μm
Apertura	42.32 μm
Grosor de Ancla	250.00 μm
Grosor de ancla Central	1000.00 μm

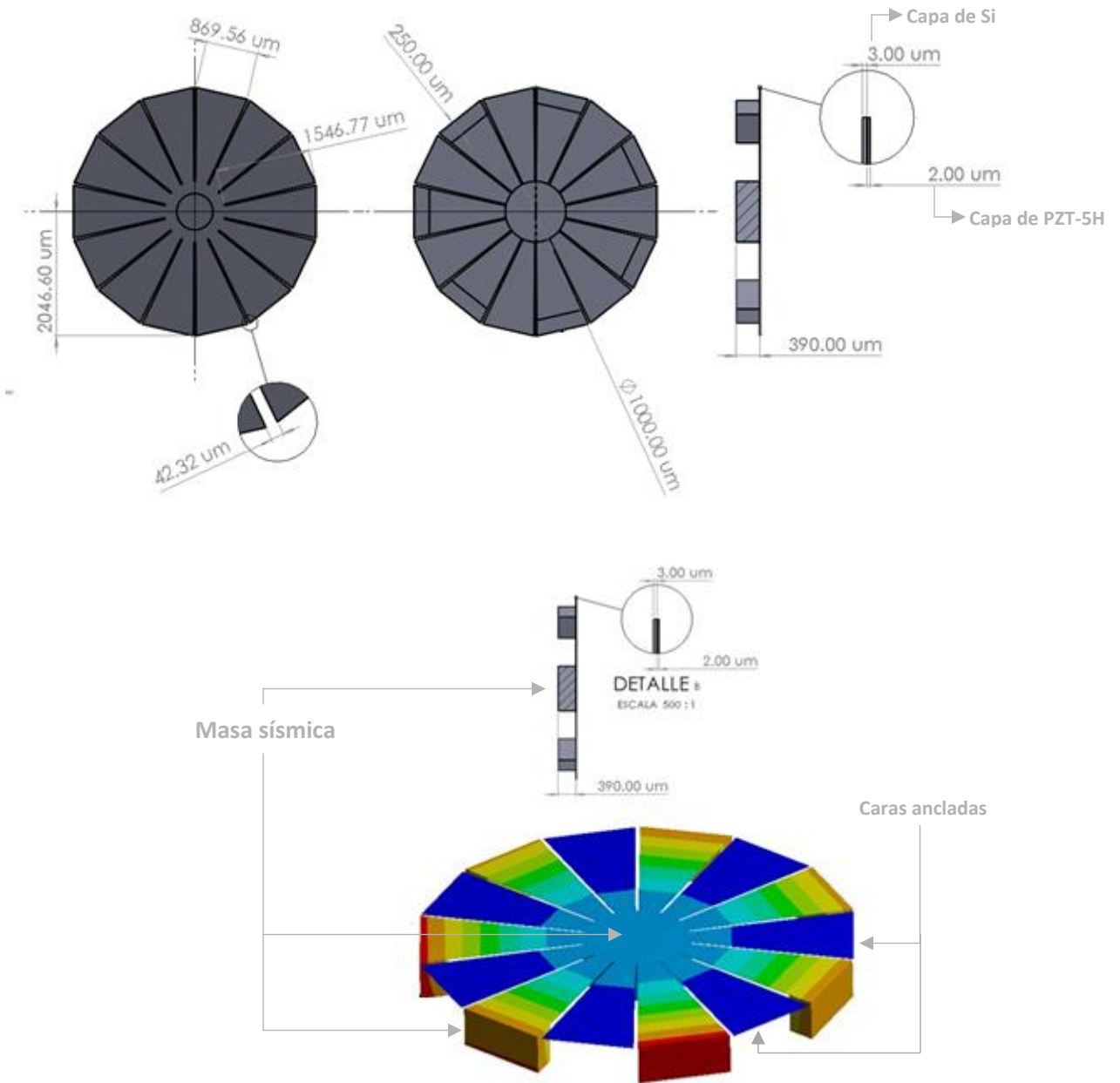


Figura 3.2. Vista de planta (izq.), vista lateral (der.) y muestra de masa sísmica del dispositivo recolector de energía donde se muestran las dimensiones.

El diseño del dispositivo 2 (Figura 3.3) está simulado en una capa de 2 μm de PZT-5H sobre una capa de 10 μm de Si y en la parte inferior una masa del mismo material de 400 μm .

Tabla 3.2. Dimensiones diseño 2

Espesor	400.00 μm
Capa PZT-5H	2 μm
Capa de Silicio	10 μm
Diámetro total	3577.71 μm
Radio Total	1800.00 μm
Radio Interno	1788.85
Radio interno 1	1600.00
Radio interno 2	1550.00
Radio interno 3	1350.00
Radio interno 4	1250.00
Radio Ancla	2500.00
Unión Ancla- Resortes	400.00
Ancho Ancla Resorte	101.21
Unión Resortes	200.00
Separación entre Resortes	400.00
Ancho Resortes	453.75
Separación 1	800.00

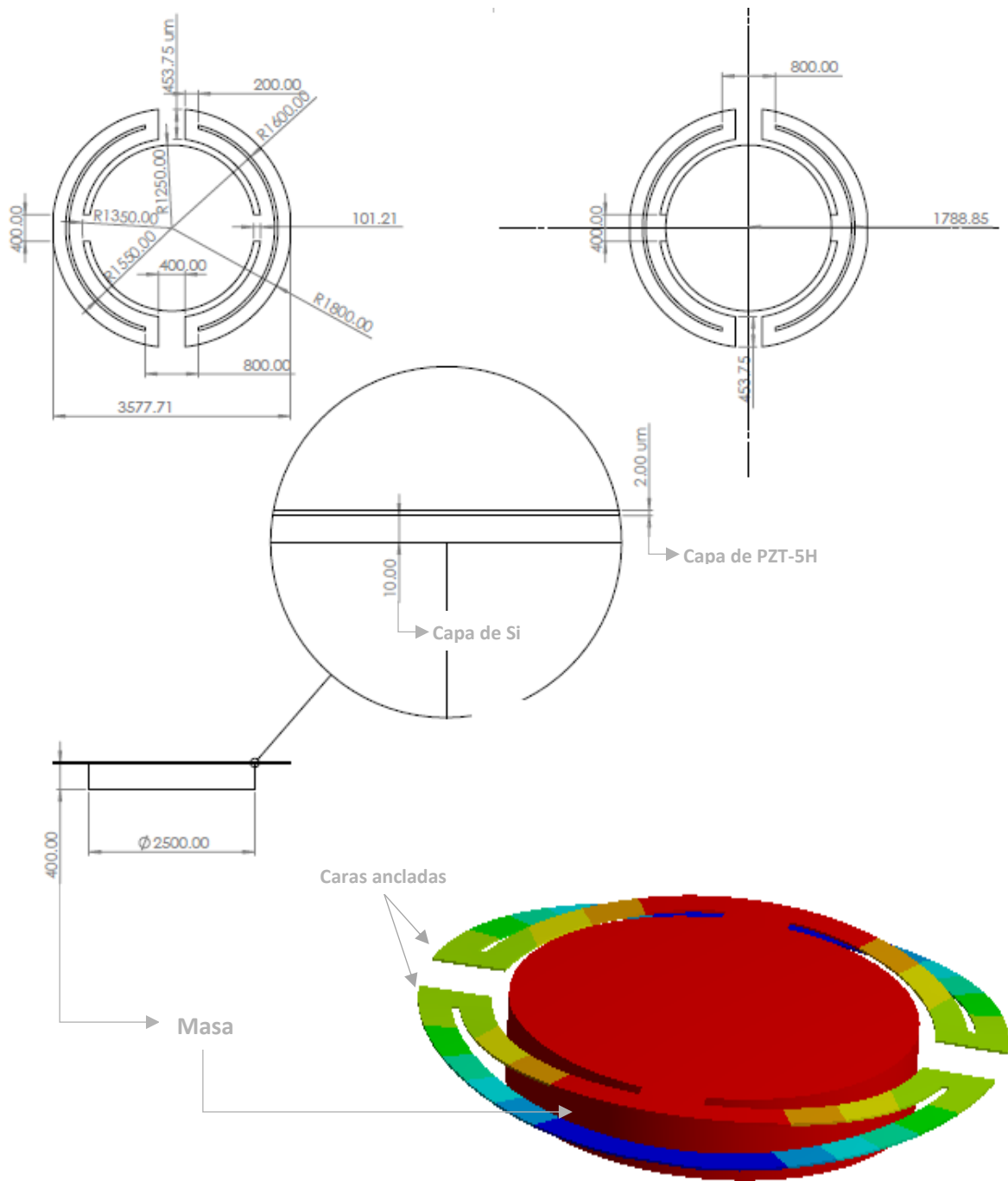


Figura 3.3. Vista de planta (izq.), vista lateral (der.) y muestra de masa del dispositivo recolector de energía donde se muestran las dimensiones.

3.3 Simulación de Diseño MEMS

El mallado se realizó con elementos hexaedro distribuidos en capas con un tamaño máximo de $40\ \mu\text{m}$ en las superficies. Para lograr este mallado, se usó un control de mallado local que consiste en dividir en segmento las aristas que representan el espesor de los materiales. Se renombraron las caras superior e inferior que serán usadas para la simulación.

En la Figura 3.4 y 3.5 se muestra el mallado tanto para el diseño 1 y diseño 2, en donde se muestra el mallado fino en las zonas de interés y el mallado gradual en toda la estructura.

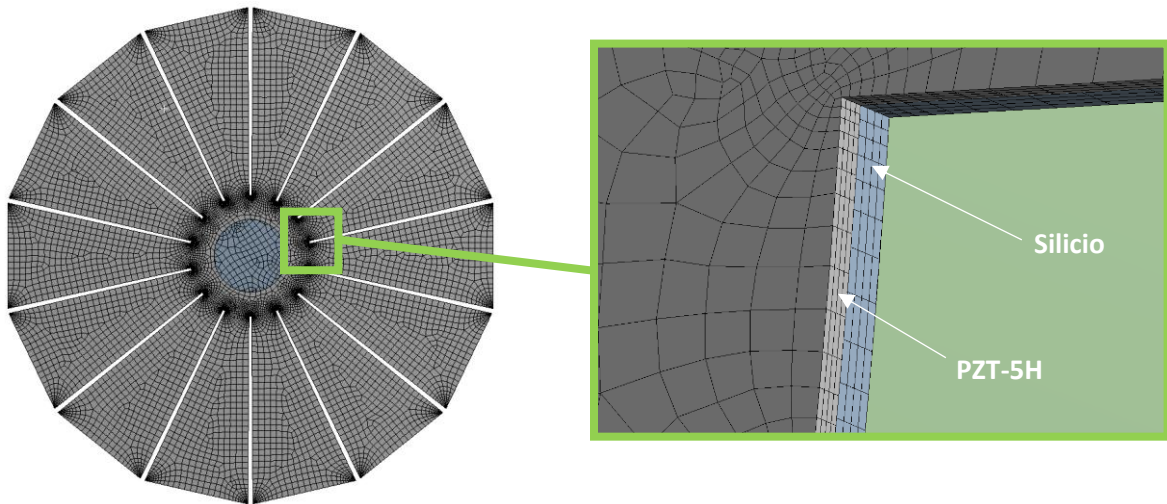


Figura 3.4. Mallado de la geometría con elementos hexaedro (izq.) del diseño 1 y vista de detalle del mallado en capas (der.).

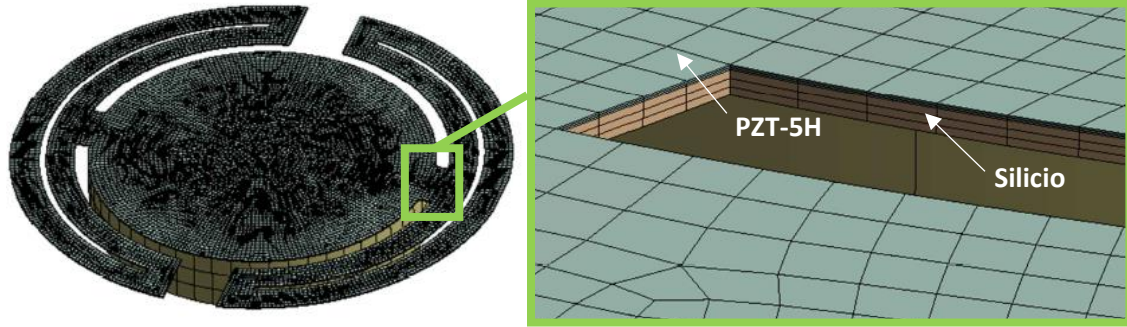


Figura 3.5. Mallado de la geometría con elementos hexaedro (izq.) del diseño 2 y vista de detalle del mallado en capas (der.).

3.4 Resultados del análisis modal

Primero se realizó un análisis modal que tiene la finalidad de encontrar las frecuencias de resonancia del dispositivo, así como sus respectivos modos de vibración. Para este análisis se fijaron los dos extremos del dispositivo (Figura 3.2 y 3.3) y se asignaron las propiedades mecánicas adecuadas a cada material. Para el Si se tomaron en cuenta las propiedades de elasticidad isotrópica de la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Propiedades isotrópicas del Silicio usado en la simulación numérica.

Propiedad	Silicio (Si)	PZT-5H
Densidad (kg/m ³)	2330	7500
Módulo de Young (GPa)	160	40
Relación de Poisson	0.278	0.34

Para el PZT-5H se usó la matriz 1 que representa las propiedades elásticas anisotrópicas de dicho material.

$$[c] = \begin{pmatrix} 12.6 & 7.95 & 8.41 & 0 & 0 & 0 \\ 7.95 & 12.6 & 8.41 & 0 & 0 & 0 \\ 8.41 & 8.41 & 11.7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2.3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.325 \end{pmatrix} \times 10^{10} \text{ N/m}^2 \quad (1)$$

Del análisis modal se obtuvieron los primeros 6 modos de vibración (Tabla 3.4), el tercer modo es de interés debido a la masa tiene desplazamiento transversal (Figura 3.6).

Tabla 3.4. Modos de vibración y frecuencias obtenidas del diseño 1 propuesto en este trabajo de tesis.

Modo	Frecuencia [Hz]
1.	144.84
2.	145.10
3.	158.26
4.	173.38
5.	174.44
6.	175.20

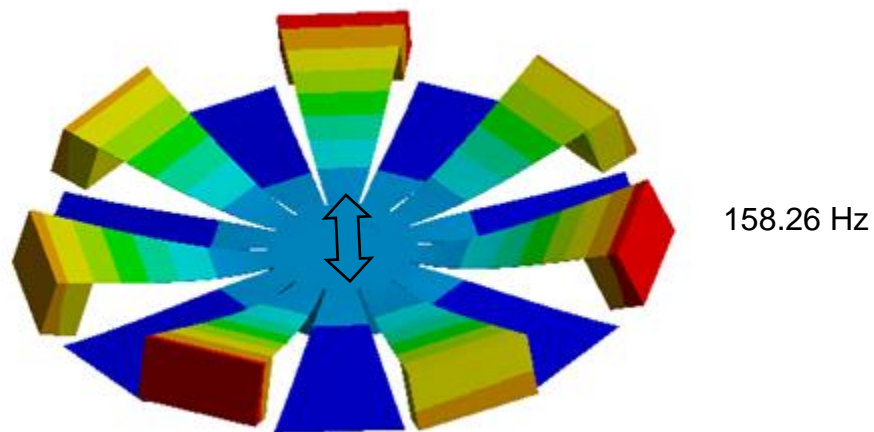


Figura 3.6. Tercer modo de vibración del dispositivo donde la flecha indica el movimiento de las vigas unidas a las masas sísmicas.

Del análisis modal se obtuvieron los primeros 6 modos de vibración para el diseño 2 (Tabla 3.5), el primer modo es de interés debido a la masa tiene desplazamiento transversal (Figura 3.7).

Tabla 3.5. Modos de vibración y frecuencias obtenidas del diseño 2 propuesto en este trabajo de tesis.

Modo	Frecuencia [Hz]
1.	235
2.	383
3.	419
4.	2677
5.	2697
6.	2731

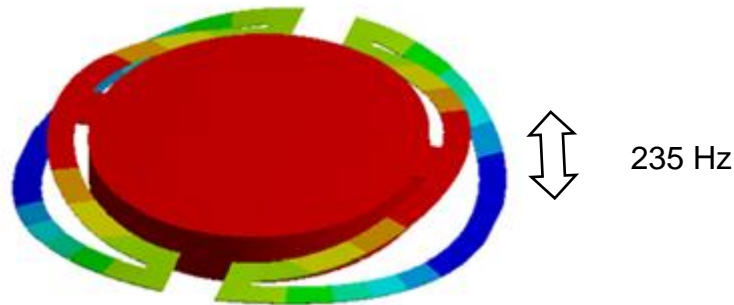


Figura 3.7. Primer modo de vibración del diseño 2.

De acuerdo a las simulaciones realizadas las frecuencias de resonancia para los diseños se encuentran en el orden de cientos de micras, como es mencionado anteriormente hay modos de vibración de interés para los diseños los cuales nos generar un desplazamiento transversal y a la vez nos favorecen la generación de potencial.

Después de haber obtenido la frecuencia de resonancia, se realizó un análisis de respuesta armónica en la estructura con una aceleración de 0.1g, este valor de aceleración nos permite excitar correctamente nuestros diseños. Además, si se supera este valor de aceleración aumenta los esfuerzos mecánicos y a largo plazo la estructura puede presentar envejecimiento y fatiga. En este punto del análisis se

le asignaron las propiedades piezoeléctricas al PZT-5H que son la matriz piezoeléctrica (2).

$$e = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 17 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 17 & 0 & 0 \\ -6.5 & -6.5 & 23.3 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} C/m^2 \quad (2)$$

Y la matriz de permitividad relativa (3).

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \begin{pmatrix} 1700 & 0 & 0 \\ 0 & 1700 & 0 \\ 0 & 0 & 1470 \end{pmatrix} \quad (3)$$

También se agregó mediante comandos de APDL, un elemento CIRCU94 que representa una resistencia de carga conectada a las caras inferior y superior del PZT-5H. La cara inferior a su vez se colocó a 0 V y el valor de la resistencia se estableció a 10 kΩ. El código usado para crear la resistencia de carga se muestra a continuación.

```
ET, # , CIRCU94, 0 !crea elemento, numero de elemento, definir como resistencia
R, 1 , 10000      ! resistencia,1, valor de resistencia
D, BOTTOM_ELECTRODO, VOLT ,0  ! asigna al electrodo inferior voltaje = 0
E, TOP_ELECTRODO, BOTTOM_ELECTRODO ! define las caras donde se
conecta la ! resistencia
```

La razón de amortiguamiento (ζ) de una estructura resonante necesaria para el análisis, es aproximadamente el recíproco del doble del factor de calidad.

$$\zeta = \frac{1}{2Q}, \quad (4)$$

Considerando las 7 superficies que tienen una masa sísmica unida en uno de sus extremos como vigas o cantilever. El factor de calidad (Q) debido a la presión atmosférica se puede obtener usando el modelo de Bloom [2].

$$Q = \frac{f_r \rho_p b h L}{3\mu R(1+R/\delta)}, \quad (5)$$

con

$$\delta = \sqrt{\frac{\mu}{\pi \rho_a f_r}}, \quad (6)$$

$$R = \sqrt{\frac{bL}{\pi}}, \quad (7)$$

donde f_r es la frecuencia de resonancia del dispositivo, ρ_p la densidad del silicio, b es el ancho, h es el espesor, L es la longitud de las vigas, μ y ρ_a son la viscosidad y la densidad del aire, respectivamente. Debido a que las vigas tienen forma trapezoidal, para el cálculo de b se tomó un promedio entre las bases mayor y menor del mismo. Posteriormente este valor se multiplicó por el número de vigas con masa sísmica en uno de sus extremos. El valor calculado de la razón de amortiguamiento y del factor de calidad es 0.03 y 16.51, respectivamente.

3.5 Resultados del análisis armónico

Después de resolver el análisis armónico para el diseño 1, se obtuvo que, a la frecuencia de resonancia la estructura se deforma $9.58 \mu\text{m}$ (Figura 3.8.).

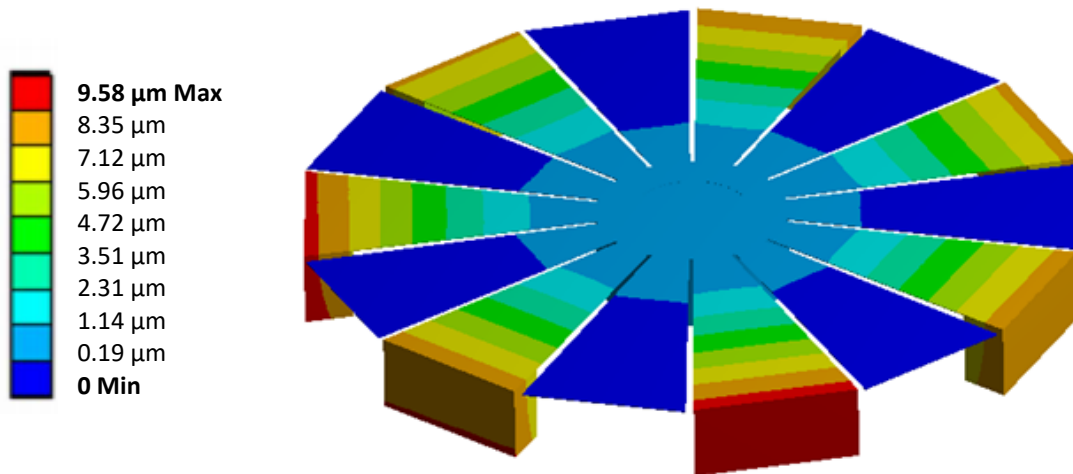


Figura 3.8. Deformación total del diseño 1 a su frecuencia de resonancia, con aceleración de 0.1g.

Después de resolver el análisis armónico para el diseño 2, se obtuvo que, a la frecuencia de resonancia la estructura se deforma $15.56 \mu\text{m}$ (Figura 3.9.).

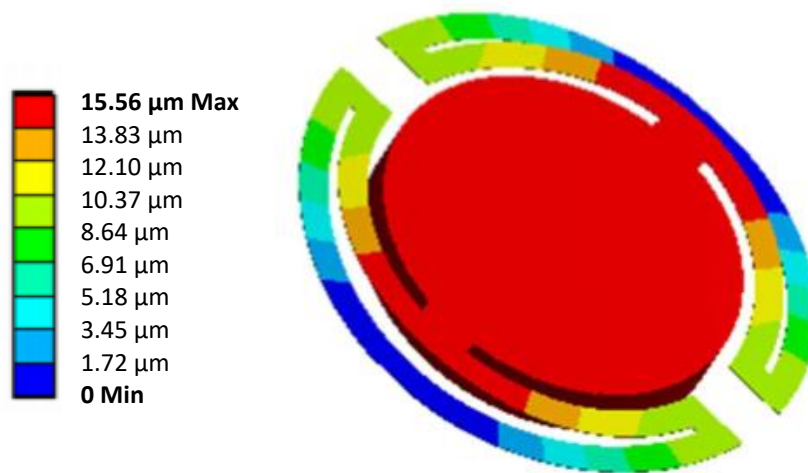


Figura 3.9. Deformación total del diseño 2 a su frecuencia de resonancia, con aceleración de 0.1g.

Del análisis se obtuvo que el diseño 1 genera una diferencia de potencial de 139 mV (Figura 3.10). Con la resistencia de carga conectada en las caras superior e inferior del material piezoeléctrico y el voltaje anterior se calculó que el dispositivo genera una potencia de 1.93 μW .

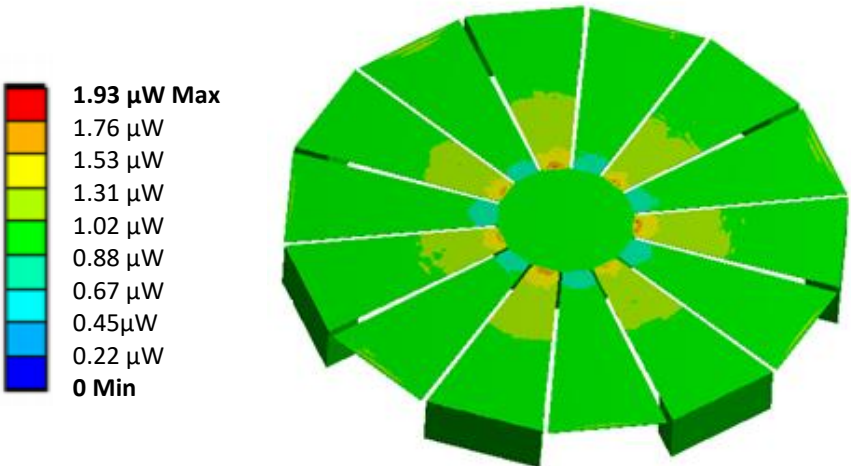


Figura 3.10. Partes de generación de un diferencial de potencial para el diseño 1.

Del análisis se obtuvo que el diseño 2 genera una diferencia de potencial de 96 mV (Figura 3.11). Con la resistencia de carga conectada en las caras superior e inferior del material piezoeléctrico y el voltaje anterior se calculó que el dispositivo genera una potencia de 0.96 μW .



Figura 3.11. Partes de generación de un diferencial de potencial para el diseño 2.

En la Tabla 3.6 y 3.7 se muestran los resultados para los diseños propuestos en este trabajo.

Tabla 3.6. Resultados obtenidos para el diseño 1 presentados en este trabajo.

Parámetros	Diseño 1
Área (mm)	1.3158
Esfuerzos (MPa)	11.89
Potencia (μW)	1.93
Voltaje (mV)	139
Desplazamiento (μm)	9.58
Modos de vibración (Hz)	158.26
Resistencia de carga (k Ω)	10

Tabla 3.7. Resultados obtenidos para el diseño 2 presentados en este trabajo.

Parámetros	Diseño 2
Área (mm)	1.0178
Esfuerzos (MPa)	8.5
Potencia (μW)	0.96
Voltaje (mV)	96
Desplazamiento (μm)	15.56
Modos de vibración (Hz)	235
Resistencia de carga (k Ω)	10

Capítulo 4. Conclusiones

4.1. Conclusiones del trabajo

El análisis numérico nos proporcionó información referente a los esfuerzos máximos encontrados en la estructura en movimiento, concentrándose en el borde del soporte los esfuerzos cortantes, cuyos valores se encuentran alrededor de 12 MPa los cuales se encuentran por debajo de la resistencia a la fractura del PZT, una estructura de este tipo podría soportar los esfuerzos a los que es sometido. Sin embargo, conocer el funcionamiento en la vida real requeriría estudios adicionales ya que el PZT es susceptible a fallas por fatiga, por ello es importante mantener bajos los esfuerzos. Mediante las simulaciones realizadas a través del método de elemento finito se obtuvieron potencias en el orden de micro watts. Para el primer diseño de 1.93 y de 0.96 μ watts para el segundo diseño. Los diseños generaron un voltaje de 139 y 96 mV para el diseño 1 y el diseño 2, respectivamente. Estos resultados concuerdan con la hipótesis planteada para la obtención de bajo consumo de potencia al encontrarse en resonancia los microgeneradores de energía.

El dispositivo busca aprovechar el mayor espacio posible en un diseño delgado en silicio para sustentar los materiales del colector piezoeléctrico para propiciar la implementación con procesos de fabricación existentes, cuya abundancia en la industria podría ser explotada como una plataforma lista para generadores piezoeléctrico.

4.2. Trabajo Futuro

Como trabajo futuro se plantea diseñar otras estructuras que mejoren la generación de voltaje, para poder aplicarlos a un circuito integrado para aprovechar la energía obtenida.

Bibliografía

1. V. R. Gonzalez-Díaz, M. A. García-Andrade, G. Espinosa Flores-Verdad, F. Maloberti, Efficient Dithering Digital Sigma-Delta Modulators for Fractional Frequency Synthesizers, *IEEE Trans. Circuits Syst. I*, 54, **2010**.
2. F. López-Huerta, J. J. Estrada-López, A. L. Herrera-May, C. Zúñiga-Islas, M. Linares-Aranda, Experimental Performance Analysis of a CMOS Amplifier Considering Different Layout Techniques, *Analog Integr. Circ. Sig. Process*, **2014**.
3. López-Huerta F, Herrera-May AL, Estrada-López JJ, Zuñiga-Islas C, Cervantes-Sanchez B, Soto E, Soto-Cruz BS. Alternative Post-Processing on a CMOS Chip to Fabricate a Planar Microelectrode Array. *Sensors*. **2011**.
4. Bonanno A, Sanginario A, Marasso SL, Miccoli B, Bejtka K, Benetto S, Demarchi D. A Multipurpose CMOS Platform for Nanosensing. *Sensors*. **2016**.
5. Wen Jong, Wu, y Bor Shiun, Lee (**2012**). Piezoelectric MEMS Power Generators for Vibration Energy Harvesting, Small-Scale Energy Harvesting, Dr. Mickaël Lallart (Ed.), InTech, DOI: 10.5772/51997. Available from: <https://www.intechopen.com/books/small-scale-energy-harvesting/piezoelectric-mems-power-generators-for-vibration-energy-harvesting>
6. Sang-Gook, Kim, Priya, Shashank, y Kanno, Isaku. Piezoelectric MEMS for Energy Harvesting. *MRS Bulletin* 37, **2012**.
7. M. Galindo-Mentle, C. Zúñiga-Islas, R. Palomino-Merino, F. López-Huerta, W. Calleja-Arriaga, Javier de la Hidalga, Victor M. Castaño. Boron-Doped Hydrogenated amorphous Semiconductor MEMS. *Materials and Technology*. 49, **2015**.
8. Mansoor, M.; Haneef, I.; Akhtar, S.; Rafiq, M.A.; De Luca, A.; Ali, S.Z.; Udrea, F. An SOI CMOS-Based Multi-Sensor MEMS Chip for Fluidic Applications. *Sensors*. **2016**.
9. Miguel Lara-Castro, Adrian Herrera-Amaya, Marco A. Escarola-Rosas, Moisés Vázquez-Toledo, Francisco López-Huerta, Luz A. Aguilera-

- Cortés, Agustín L. Herrera-May. Design and Modeling of Polysilicon Electrothermal Actuators for a MEMS Mirror with Low Power Consumption, *Micromachines*, **2017**, 8(7), 203
10. S. Mendoza-González, V. H. Téllez-Izquierdo, G. M. Chávez-Campos, J. Correa-Goómez, M. Martínez-Orobio, J. A. Salazar-Torres, J.D. Bárcenas-Torres, Micro-energy harvesting system for a H-type Microbial Fuel Cell based in an avarage, *Power, Electronic and Computing (ROPEC)*, **2016**.
 11. <https://www.slideshare.net/Funk98/energy-harvesting-for-iot>
 12. R. Calìò, U. Bhaskar Rongala, D. Camboni, M. Milazzo, C. Stefanini, G. De Petris, C. Maria Oddo, "Piezoelectric Energy Harvesting Solutions", *Sensors*, 14, 4755-4790, **2014**.
 13. C. Cenedese, Micro-Energy Harvesting (μ -EH), Electrolux Italia SpA, Global Technology Center, **2013**.
 14. <https://www.intechopen.com/books/small-scale-energy-harvesting/piezoelectric-mems-power-generators-for-vibration-energy-harvesting>
 15. MEMS microbots harness insect "know-how"_Colin Johnson
 16. M. Lara-Castro, A. L. Herrera-May, R. Juárez-Aguirre, F. López-Huerta, C. A. Cerón-Álvarez, I. Cortes-Mestizo, E. Morales-Gonzalez, H. Vazquez-Leal, S. Dominguez-Nicolas. Portable signal conditioning system of a MEMS magnetic field sensor for industrial applications. *Microsystem Technologies*, **2016**.
 17. P. Gkotsis, M. Lara-Castro, F. López-Huerta, A. L. Herrera-May, J. P. Raskin. Mechanical Characterization and Modelling of Lorentz Force Based MEMS Magnetic Field Sensors. *Solid-State Electronics*, **2015**.
 18. J. Bardeen, W. H. Brattain, The transistor, a semiconductor triode, *Phys. Rev.*, **1948** 74, 130–231.
 19. W. Shockley, A unipolar field-effect transistor, *Proc. IRE*, **1952**, 40, 1365.
 20. <https://perso.esiee.fr/~bassetp/unrj.html>
 21. James J. Allen, *Micro electro mechanical system design*, CRC Press, **2005**
 22. R.P. Feynman, There's plenty of room at the bottom, *Eng. Sci.* (California Institute of Technology), **1960**, 22–36,

23. G.E. Moore, Cramming more components onto integrated circuits, *Electronics*, 38(8), **1965**.
24. H.C. Nathanson, W.E. Newell, R.A. Wickstrom, J.R. Davis, The resonant gate transistor, *IEEE Trans. Electron Devices*, ED-14, **1967**, 117–133.
25. K.E. Petersen, Silicon as a mechanical material, *Proc. IEEE*, 70(5), **1982**. 420–457.
26. R.T. Howe, R.S. Muller, Polycrystalline silicon micromechanical beams, *J. Electrochem. Soc.: Solid-State Sci. Technol.*, 130(6), **1983**, 1420–1423.
27. Chang, H.; Xue, L.; Qin, W.; Yuan, G.; Yuan, W. An integrated MEMS gyroscope array higher accuracy output. *Sensors*, **2008**, 8, 2886-2899.
28. Herrera-May, A.L.; Cortés-Pérez, A.R.; Aguilera-Cortés, L.A. Microaccelerometers: Present (Translation of spanish paper). *Acta Universitaria*, **2008**, 18, 24-32.
29. Singh, J.; Teo, J.H.S.; Xu, Y.; Premachandran, C.S.; Chen, N.; Kotlanka, R.; Olivo, M.; Sheppard, C.J.R. A two axes scanning SOI MEMS micromirror for endoscopic bioimaging. *J. Micromech. Microeng*, **2008**, 18, 025001.
30. Chang, C., Tran, V. H., Wang, J., Fuh, Y. K., & Lin, L. (2010). Direct-write piezoelectric polymeric nanogenerator with high energy conversion efficiency. *Nano Lett*, 10(2), 726-731. doi:10.1021/nl9040719
31. Chang, C., Fuh, Y.-K., Lin, L. (2009). A DIRECT-WRITE PIEZOELECTRIC PVDF NANOGENERATOR. *Transducers*, 1485-1488.
32. B. Chen, W. Tang, T. Jiang, L. Zhu, X. Chen, C. He, L. Xu, H. Guo, P. Lin, D. Li, J. Shao, Z. L. Wang, Three-dimensional ultraflexible triboelectric nanogenerator made by 3D printing. *Nano Energy*, 45, 380-389, **2018**, doi:10.1016/j.nanoen.2017.12.049
33. X. Chen, M. Han, H. Chen, X. Cheng, Y. Song, Z. Su, Y. Jiang, H. Zhang, A wave-shaped hybrid piezoelectric and triboelectric nanogenerator based on P(VDF-TrFE) nanofibers. *Nanoscale*, 9(3), 1263-1270, **2017**, doi:10.1039/c6nr07781a
34. Chen, X., Xu, S., Yao, N., & Shi, Y. (2010). 1.6 V nanogenerator for

- mechanical energy harvesting using PZT nanofibers. *Nano Lett*, 10(6), 2133-2137. doi:10.1021/nl100812k
35. Nabar, B. P., Çelik-Butler, Z., & Butler, D. P. (2014). Piezoelectric ZnO nanorod carpet as a NEMS vibrational energy harvester. *Nano Energy*, 10, 71-82. doi:10.1016/j.nanoen.2014.07.023
 36. Wang, Z. L., & Song, J. (2006). Piezoelectric nanogenerators based on zinc oxide nanowire arrays. *Science*, 312(5771), 242-246. doi:10.1126/science.1124005
 37. Yang, Jiashi,(2006). Analysis of Piezoelectic Devices. World Scientific Publishing Ca. Pte. Ltd.