

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.

Andrea Carolina Santana Pérez
Gabriela Alexandra Verdezoto Carranco

Director: Ing. Alejandro Chacón
Codirector: Ing. Vanessa Vargas

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO
Av. El Progreso s/n, Sangolquí, Ecuador

Resumen. El presente trabajo está titulado "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". El estudio cumple un papel importante del proceso investigativo de la tecnología MEMS en la ESPE, ya que es el primer proyecto relacionado en este campo y será la base para el desarrollo de futuros proyectos.

Cabe mencionar que estos dispositivos micrométricos, reúnen todas las capacidades necesarias para satisfacer los actuales requerimientos en multitud de sectores como: automoción, aeronáutica, aeroespacial, la industria de las telecomunicaciones y, la tecnología biomédica. Por esta razón, que esta tecnología se ha convertido en una de las áreas de más rápido crecimiento de la industria.

Este estudio empieza con el análisis del estado del arte de esta tecnología. También se incluye el diseño de un dispositivo MEMS con la finalidad de consolidar los fundamentos teóricos y la aplicación de criterios al emplear un determinado modelamiento y realizar la simulación en un Software de Evaluación.

Dado el avance tecnológico mundial es imprescindible que el Ecuador se fortalezca en el desarrollo de la micro-tecnología. De esta manera, esta investigación sirve para desarrollar programas de enseñanza de los MEMS que aporten al desarrollo económico, político y social del país.

Abstract. This paper is called "State of the Art, modeling and simulation of MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems) towards the design prototype Applied to the Career of Control and Automation Systems". This study has an important role in the investigation of this technology at the ESPE, due to the fact that it is the first project related to this field and will be the basis of the development of future projects.

It is important to note that these micrometer devices have all the necessary capabilities for requirements in many sectors like: automotive design, aeronautics, aerospace, the telecommunications industry, and biomedical technology. This is the reason why the industry is investing in the development of these systems. Consequently, this has become one of the fastest growing industrial technologies.

This study begins with the analysis of this state of the art technology. It also includes a specific MEMS design in order to reinforce its theoretical principles. Furthermore, the modeling and simulation processes allow us to demonstrate a methodology for design. Finally, this study encourages the continuation of development of new projects in this area.

Given the advancements in micro-technology throughout the world, it is essential that Ecuador strengthens its development in this area as well. This study contributes to development teaching programs, new researches about MEMS that promote economic, political and social development.

I. INTRODUCCION

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 las siguientes:

- 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 [1].

Es por este motivo que la tendencia tecnológica actual se ha inclinado hacia el desarrollo de herramientas que permitan explorar el mundo microscópico.

De esta manera surgen los MEMS como dispositivos integrados por elementos mecánicos (partes móviles) y electrónicos (o eléctricos) que funcionan como sensores y actuadores de tamaños micrométricos, fabricados por medio de técnicas y materiales usados en semiconductores. Estos dispositivos están elaborados con componentes entre 1 a 1000 [um] y, los dispositivos totales miden generalmente cerca de 10 [mm].

Adicionalmente, la tecnología MEMS posee arquitecturas específicas para cada aplicación, dentro de las cuales se pueden integrar los siguientes elementos dispuestos en arreglo de N nodos. En la Figura 1 se observan los elementos de un MEMS:

- Actuadores o sensores
- Procesador y memoria
- Buses de comunicación
- Estructuras inteligentes
- Antenas
- Entrada(s) y salida(s) del dispositivo [2]

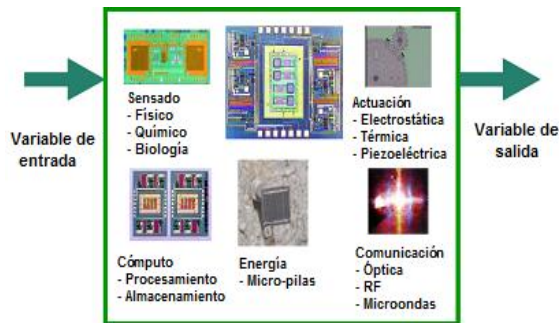


Figura 1 Elementos de un MEMS

II. ESTADO ACTUAL DE LOS MEMS

En la actualidad los MEMS son una tecnología emergente, la cual no sólo se remite a una aplicación o a un solo dispositivo sino a implementar diferentes componentes en un mismo chip. De esta manera, la microelectrónica promueve la generación de productos inteligentes.

Para el diseño es fundamental la selección, análisis y procesamiento de materiales son fundamentales.

En la actualidad, la tecnología MEMS está cambiando del uso del Si como material principal al uso de semiconductores compuestos, polímeros, cerámicas, diamantes y carbono [3]. De esta

manera, se abre grandes posibilidades para el desarrollo emergente de nuevos micro-dispositivos. Tales como: cámaras termo-gráficas, micro-altavoces, brújulas digitales, dispositivos de captación de energía, micro-proyectores, sistemas auxiliares para automóviles, micro-implantes, sistemas de suministro de medicamentos, entre otros. [4]

Dentro de los procesos de micro-fabricación, se ha clasificado a los materiales involucrados en cinco categorías principales, como se muestra en la Figura 2

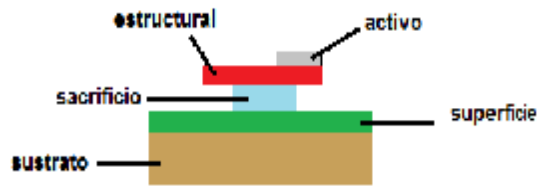


Figura 2 Categorías de materiales micro-mecánicos

El material estructural es la base del dispositivo; por lo tanto, las propiedades de interés son el módulo de Young, la densidad y esfuerzos, así como propiedades eléctricas, conductividad térmica y estabilidad. En tanto que los materiales de sacrificio son aquellos que se utilizan durante el proceso de fabricación. Estos materiales se remueven completa o parcialmente para liberar las estructuras, de tal forma que pueden adquirir movimiento. Por otra parte, los materiales de superficie son aquellos utilizados para proteger el sustrato o el material estructural en procesos de abrasión, y son importantes cuando se requiere aislamiento térmico. Finalmente, los materiales activos se incorporan en las micro-estructuras para explotar sus características especiales de transducción. Se puede nombrar la piezoresistencia del Si para medir esfuerzos, el efecto piezoeléctrico del ZnO, PZT y AlN para sensado y actuación de esfuerzos. Además el coeficiente de temperatura de las propiedades termoeléctricas del Si, Al y otros conductores para medir temperatura. Así como varios materiales magnéticos que permitan acoplar mecánicamente campos magnéticos [5].

Para realizar la micro-fabricación de MEMS se utilizan 3 técnicas [2]:

1. LIGA (Litografía, Electrodeposición y Moldeo).
2. Micro-maquinado superficial.
3. Micro-maquinado volumétrico.

Con el análisis y comparación de las 3 técnicas antes mencionadas, se observa la tendencia a emplear la deposición y remoción de capas delgadas de diferente material. De esta manera,

estructuras mayores de $10[\mu\text{m}]$ de espesor requieren el uso de micro-maquinado volumétrico. Mientras que estructuras de espesores menores de $10[\mu\text{m}]$ normalmente requieren procesos superficiales o bien un procesamiento híbrido volumétrico-superficial [6]. Adicionalmente, el micro-maquinado volumétrico es el más utilizado en la fabricación de la mayoría de dispositivos comerciales como sensores de presión, válvulas de silicio y el 90% de los acelerómetros [7].

Por otra parte, tanto el establecimiento y mantenimiento de líneas de micro-fabricación clásicas pueden ser de alto costo, lo que restringe la tecnología MEMS a entidades que poseen un cuarto limpio. Todas estas limitantes han forzado el desarrollo de micro-estructuras con nuevos procesos de uso más conveniente y de menor costo [8].

Por esta razón, en la actualidad existe la posibilidad de utilizar técnicas convencionales de mecanizado a micro-escala tales como micro-corte, micro-fresado, micro-taladro, micro-torneado, entre otros; de esta manera se flexibiliza y economiza las tecnologías de micro-fabricación [9].

Cabe indicar que la tecnología MEMS involucra diversas disciplinas científicas y tecnológicas. Los MEMS con mayor éxito y posicionamiento son aquellos que representan nuevos paradigmas en relación con las formas existentes en el mundo macroscópico, permitiendo explorar otras áreas de investigación y desarrollo con las ventajas de la miniaturización. [6]. Las aplicaciones potenciales de la tecnología MEMS se han esparcido hacia diversas áreas; tales como la ciencia básica, la instrumentación médica, la industria automotriz, las telecomunicaciones, la petrolera, entre otras.

III. DISEÑO DEL 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 la metodología a seguir para la creación de un dispositivo MEMS:

1. Determinar la aplicación y sus requerimientos: En ella se describe 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 realiza una selección del tipo de dispositivo, su estructura física y los materiales a utilizar.

3. Modelamiento matemático: Se realiza el modelamiento analítico del sistema.
4. Simulación del dispositivo: Se utiliza una herramienta de software para comprobar el funcionamiento del dispositivo.
5. Pruebas y comparación de resultados: Si los parámetros obtenidos cumplen con los requerimientos del dispositivo se puede concluir que el proceso y las consideraciones de diseño son correctas, sino se debe regresar al paso 2.

El diseño del dispositivo MEMS básico demuestra la importancia de haber realizado un estudio previo del estado del arte de esta tecnología.

A continuación se describe cada paso realizado:

1. Determinar la aplicación y sus requerimientos

Para realizar el diseño específico se ha seleccionado un sensor para el Sistema Airbag de un Automóvil, el cual debe tener las características mencionadas en la Tabla 1:

CARACTERÍSTICA	DESCRIPCIÓN
Tipo de sensor	Acelerómetro piezo-eléctrico MEMS
Número de ejes	1
Sensibilidad de voltaje	≥ 10 y < 100 [mV/g] en la dirección vertical.
Rango de medición	1-1000 [Hz]

Tabla 1 Características del dispositivo MEMS a diseñar

2. Analizar los requerimientos del dispositivo

A fin de modelar y caracterizar el sensor a utilizar en la aplicación se ha decidido emplear la configuración general de un desplazamiento sísmico unidireccional de movimiento traslativo, esto se observa en la Figura 3 donde:

- m = Masa
- K = Resorte
- B = Amortiguador
- Zo = Transductor

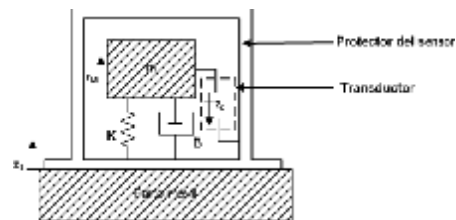


Figura 3 Modelo de un acelerómetro típico

Un sistema vibratorio tiene una estructura masa – resorte con 4 características básicas:

- Una masa, la cual experimenta un movimiento donde una fuerza excitadora a llamada también fuerza perturbadora mantiene o propaga la vibración.
- El resorte experimenta una fuerza restauradora que tiende a regresar la masa a una posición de equilibrio.
- Una fuerza amortiguadora que siempre se opone al movimiento de la masa.
- Un transductor para convertir el desplazamiento en una señal eléctrica.

El acelerómetro piezoelectrico va a tener 4 elementos equivalentes a las características antes mencionadas de la estructura masa - resorte:

- Una masa sísmica suspendida.
- Cuatro vigas en suspensión situados en el centro de cada lado de la estructura de soporte de manera simétrica.
- Un soporte rígido
- Ocho electrodos o transductores distribuidos de manera simétrica en cada viga

La estructura del acelerómetro a diseñar se puede observar en la Figura 4

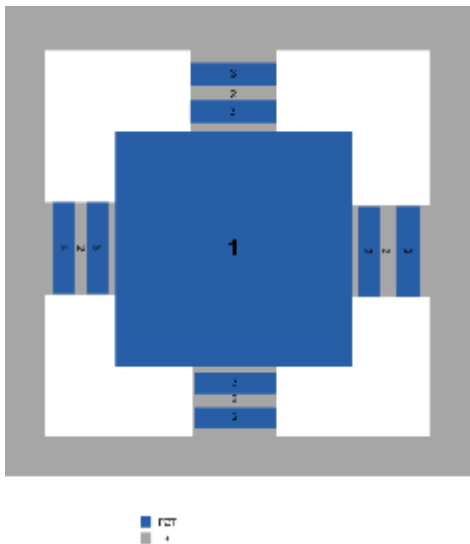


Figura 4 Estructura del acelerómetro piezoelectrico

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 5 se muestra la curva de respuesta del acelerómetro piezoelectrico.

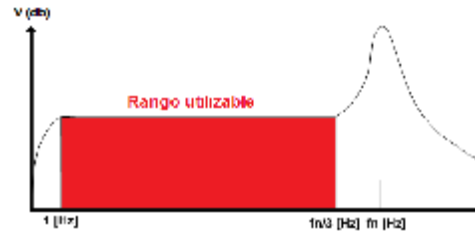


Figura 5 Respuesta típica del acelerómetro piezoelectrico

Para el diseño se utiliza el silicio como 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, el silicio tiene excelentes propiedades mecánicas, tales como: alto rendimiento y buena resistencia al desgaste.

En la mayoría de los acelerómetros piezoelectricos se utiliza el cuarzo o el PZT como el elemento de detección. Al comparar estos dos materiales se escogió utilizar el PZT pues trabaja a frecuencias bajas (Hz-KHz) y el dispositivo a diseñar trabajará en estos rangos. Adicionalmente, el PZT tiene una constante de carga mayor al cuarzo, esto permite tener un voltaje de respuesta mayor frente al desplazamiento producido por la aceleración. Además posee un módulo de elasticidad mayor al del cuarzo [10]. Entre las varias clases de PZT se escogió el PZT-5A por ser utilizado especialmente en acelerómetros.

3. Modelamiento del dispositivo MEMS

Luego de establecer las características del dispositivo se iniciará con el modelamiento matemático analítico para lo cual se tienen 3 pasos principales:

- Selección del nivel de modelamiento: Nivel de geometría
- Parámetros y variables: Dimensiones de la estructura y propiedades de los materiales.
- Selección del método de modelamiento: Para este punto se escogió el método de Bernulli-Euler, pues este sirve para realizar el estudio de las vigas.

Dado que la masa sísmica está sujeta a una aceleración, 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 se observa en la Figura 6

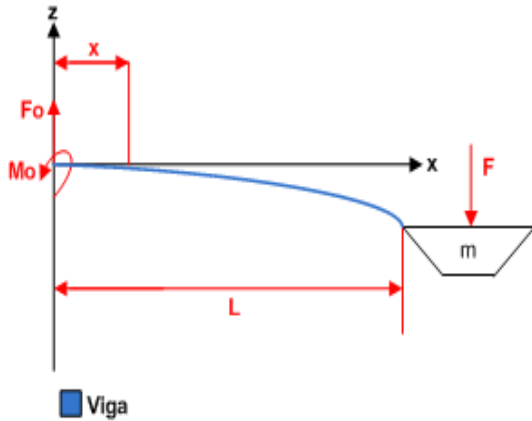


Figura 6 Diagrama de cuerpo libre de la viga

Considerando las condiciones de borde, la simetría de la estructura de acuerdo a la Teoría de la Viga de Bernoulli-Euler y, el diagrama de cuerpo libre, se puede obtener las ecuaciones descritas en la Tabla 2:

DESCRIPCIÓN	ECUACIÓN
Fuerza de reacción en el momento Mo	$F_o = \frac{1}{4} m \ddot{z}$ Donde: \ddot{z} = aceleración m= masa sísmica
Momento de flexión en la viga	$M(x) = R_o * L$ $M(x) = \frac{1}{4} m \ddot{z} \left(\frac{L}{2} - x \right) = [N * m]$ Donde: L= longitud de la viga
Deformación de la viga	$e = \frac{1}{r} \vec{k}$ Donde: ρ = Radio de la superficie curva.
Esfuerzo sobre la capa de material	$s = E * e$ Donde: E= Módulo de Young del material utilizado

Tabla 2 Parámetros de una viga formada por un solo material

Dentro del diseño del acelerómetro es importante hallar la deformación y esfuerzos correspondientes. Este análisis es fácil realizarlo cuando se trata de un solo material. Dado que el dispositivo requiere un material estructural y un material activo, es necesario obtener un material equivalente para luego plantear las nuevas ecuaciones con ayuda de la Figura 7.

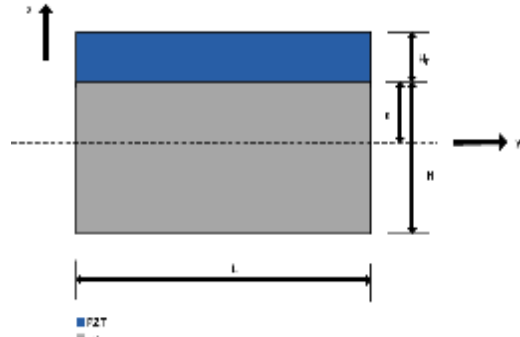


Figura 7 Área de la sección transversal de la viga de suspensión de PZT/Si en el dispositivo

Las nuevas ecuaciones planteadas se presentan en la Tabla 3:

DESCRIPCIÓN	ECUACIÓN
Distancia a	$a = \frac{1}{2} \frac{E_{Si} H^2 - E_{PZT} H_{PZT}^2}{E_{Si} H + E_{PZT} H_{PZT}}$
Esfuerzo sobre la capa de PZT	$S_1 = \frac{E_{PZT}}{r} \left(\frac{H_p}{2} + a \right) = \frac{E_{PZT}}{EI_{eq}} \left(\frac{H_p}{2} + a \right) * M(x)$
Contribución a la carga eléctrica	$D_3 = d_{33} S_1$
Carga de salida de las capas piezoeléctricas	$Q = \int_{0.05L}^{0.40L} D_3 W dx - \int_{0.05L}^{0.95L} D_3 W dx$ $= \frac{(0.05W) * \left(a + \frac{H_p}{2} \right) * \left(L^2 * m * d_{33} E_{PZT} * \ddot{z} \right)}{EI_{eq}}$
Capacitancia de la capa PZT	$C = \frac{0.45 * \epsilon_{33} * L * W}{2H_p}$ Donde: ϵ_{33} = Permitividad dieléctrica de la capa PZT ($\epsilon_{33} = \epsilon_r * \epsilon_0$) ϵ_0 = Permitividad del vacío
Sensibilidad de voltaje	$S_v = \frac{V}{z} = \frac{Q}{zC}$ $= \frac{(0.05W) * \left(a + \frac{H_p}{2} \right) * \left(L^2 * m * d_{33} E_{PZT} \right)}{\frac{EI_{eq}}{C}} = \left[\frac{mV}{g} \right]$

DESCRIPCIÓN	ECUACIÓN
Sensibilidad de carga	$S_c = C * S_v = \left[\frac{pC}{g} \right]$
Constante de rigidez	$K = \frac{48 * EI_{eq}}{L^3} = \left[\frac{N}{m} \right]$
Frecuencia de resonancia	$fn = \frac{1}{2p} \sqrt{\frac{K}{(m + mev)}} = [Hz]$ Donde: mev = Masa efectiva de las vigas [kg]
Rango de frecuencias	1 [Hz] - fn/3

Tabla 3 Parámetros de una viga formada por una capa de Si y otra de PZT

A continuación en la Tabla 4 se encuentran los parámetros de fabricación del dispositivo:

PARÁMETROS DE FABRICACIÓN		
Parámetro	Unidad	Dato
Material	-	Si PZT-5A

Tabla 4 Parámetros de fabricación

Mediante pruebas recursivas utilizando un programa en Matlab se obtuvieron las dimensiones mencionadas en la Tabla 5 por cumplir con los requerimientos de diseño del dispositivo.

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 5 Variables de geometría del dispositivo

La Tabla 6 indica las variables de funcionamiento del dispositivo encontradas mediante las fórmulas de la Tabla 3 y las constantes utilizadas. Los cálculos se realizaron en un programa elaborado en MATLAB:

VARIABLES DE FUNCIONAMIENTO		
Parámetro	Unidad	Dato
Rango de frecuencia	Hz	1-923
Frecuencia de resonancia natural (fn)	KHz	2.77
Sensibilidad de carga (S_Q)	pC/g	0.15
Sensibilidad de voltaje (S_V)	mV/g	32,41

Tabla 6 Variables de funcionamiento del acelerómetro piezoeléctrico MEMS

4. Simulación del dispositivo MEMS

La simulación del acelerómetro diseñado en la sección 3 se realizó en un Software de Evaluación llamado COMSOL Multiphysics, el cual implementa el Método de Análisis Finitos (FEM), para determinar las capacidades y funcionamiento del dispositivo en base a los requerimientos de diseño. La interfaz gráfica del software se muestra en la Figura 8.

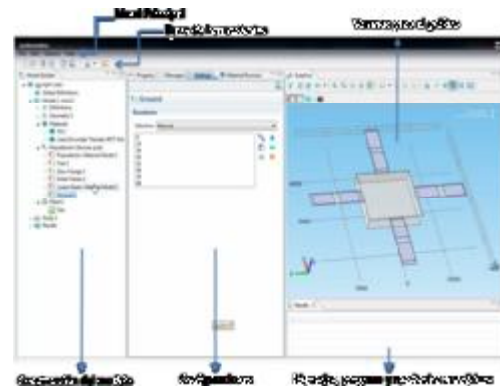


Figura 8 Interfaz gráfica de COMSOL

El proceso de generación de la solución mediante FEM se da en 5 pasos:

4.1. Definición de la Estructura

Se utiliza la herramienta CAD en 3D para determinar la geometría del acelerómetro piezoeléctrico, la Figura 9 muestra la estructura final del dispositivo.

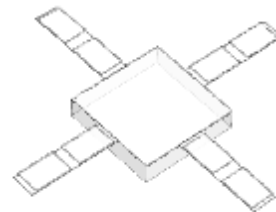


Figura 9 Geometría del Acelerómetro

4.2. Definir el modelo matemático a resolver.

Previo la realización del modelo se requiere definir algunos parámetros

4.2.1. 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.

4.2.2. Asignación de las propiedades físicas de los materiales

Los materiales que se utilizan para la estructura son: 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 10 se indican los elementos de color plomo formados de Si como son las vigas y la parte inferior de la masa sísmica y los elementos de color azul de la Figura 10 son los electrodos colocados sobre las vigas y la capa superior de la masa sísmica formados de PZT-5A.

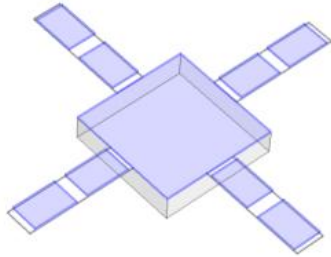


Figura 10 Elementos formados de Si y PZT-5A

4.3. Asignación de las condiciones de contorno

Se definen 2 modelos descritos en la Tabla 7:

MODELO	CARACTERISTICAS
Materiales Piezoeléctricos	Determina las propiedades constitutivas del PZT-5A y el tipo de deformación del material debido a la fuerza aplicada.
Materiales linealmente elásticos	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 7 Modelos utilizados en los materiales del dispositivo

4.4. 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 se puede identificar a los mismos con rombos de color azul.

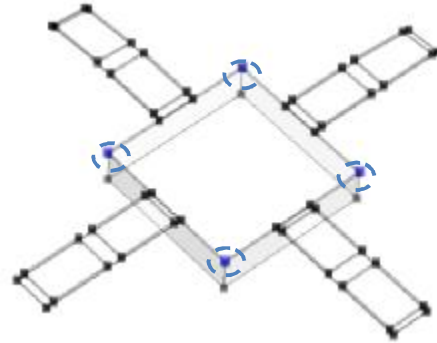


Figura 11 Puntos de carga en la geometría del acelerómetro

4.5. Mallado de la geometría

El mallado aplicado en COMSOL es del tipo Tetraedro como se muestra en la Figura 12 permitiendo de esta manera dividir el dispositivo en elementos muy pequeños para realizar el análisis.

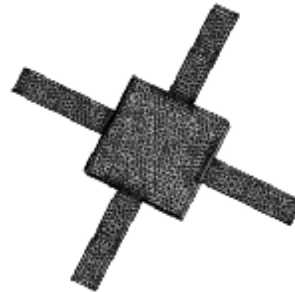


Figura 12 Mallado de la geometría

5. 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.

Por esta razón, se representa gráficamente la distribución y los parámetros correspondientes al voltaje de salida y el desplazamiento de la masa sísmica.

El rango de frecuencia donde el dispositivo funcionará de acuerdo a las especificaciones de diseño se observa en la Figura 13. Se toma como frecuencia mínima 1[Hz] y como frecuencia máxima $f_n/3$ como se muestra en la Tabla 8.

FRECUENCIAS	VALOR
Frecuencia de resonancia	2.25[KHz]
Frecuencia mínima	1 [Hz]
Frecuencia máxima	750 [Hz]

Tabla 8. Frecuencias de trabajo

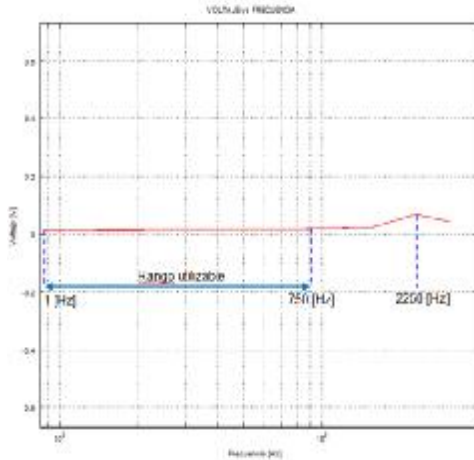


Figura 13 Rango de frecuencias de trabajo

Se realizó la simulación para 3 fuerzas diferentes de: $-0.01[N]$, $-0.04[N]$, $-0.08[N]$. A continuación, se analizan los resultados obtenidos luego de la simulación del acelerómetro para la aplicación de una fuerza de $-0.04[N]$. Se produce un desplazamiento en la masa sísmica. 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 salidas y el error de medición como se puede observar en la Tabla 9.

FRECUENCIA [Hz]	VOLTAJE TOTAL ELECTRODOS INTERNOS [mV]	VOLTAJE TOTAL ELECTRODOS EXTERNOS [mV]	VOLTAJE FINAL [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 9. Voltajes de salida para una fuerza aplicada de $-0.04N$

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.

También, en la Figura 14 se observa la curva característica, la cual describe el funcionamiento del sensor dentro del rango de trabajo siendo su voltaje de salida $14,5 [mV]$.

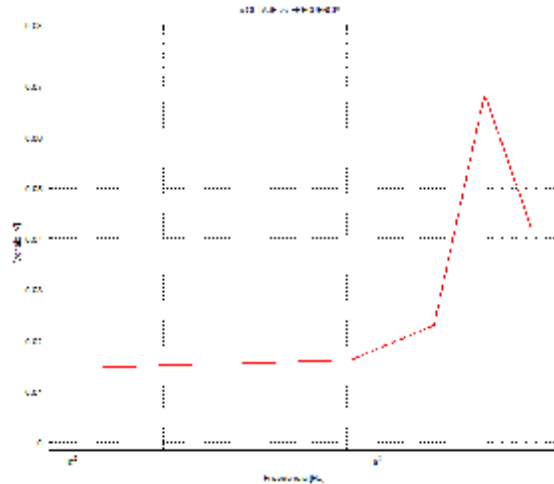


Figura 14 Curva característica aplicando una $F=-0.04[N]$

Cada resultado de la simulación debida al desplazamiento de la masa ante el cambio de frecuencia se representa en la Tabla 10. Para la representación se utiliza 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. La gama de colores celeste y amarillo indica un desplazamiento insignificante como se puede observar en la porción intermedia de la viga.

FRECUENCIA [Hz]	DESPLAZAMIENTO MASA SÍSMICA [µm]	GRÁFICA
100	376,47	
325	376,53	
750	378,10	
825	418,76	
1550	1700,00	

FRECUENCIA [Hz]	DESPLAZAMIENTO MASA SÍSMICA [µm]	GRÁFICA
2275	1100,00	
3000	376,47	

Tabla 10. Desplazamiento de la masa sísmica ante el cambio de frecuencia

En la Tabla 11 se determina la aceleración a medirse por el sensor de acuerdo al voltaje de salida cuando se aplican diferentes valores de fuerzas:

FUERZA APLICADA [N]	VOLTAJE [mV]	ACELERACION [g]
-0.01	3,6	117,15
-0.04	15,0	468,62
-0.08	30,0	937,23

Tabla 11. Determinación de la aceleración de acuerdo a la fuerza aplicada

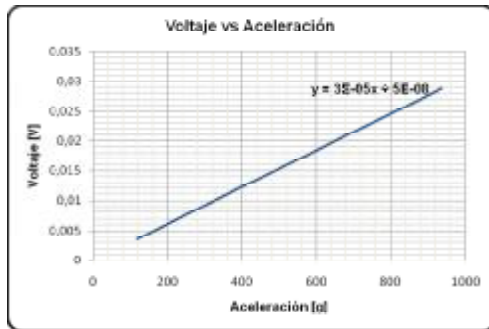


Figura 15 Curva de voltaje vs aceleración

De acuerdo a la Figura 15, 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.

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 12:

	REQUERIMIENTOS	RESULTADOS
Tipo de sensor	Acelerómetro piezo-eléctrico MEMS	
Número de ejes	1	1

	REQUERIMIENTOS	RESULTADOS
Sensibilidad de voltaje	≥ 10 y < 100 [mV/g]	30,72 [mV/g]
Rango de medición	1-1000 [Hz]	1-750 [Hz]

Tabla 12 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 del 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 (rango útil de detección) del dispositivo es menor al establecido como requerimiento, no representa un problema ya que el sistema airbag trabaja con frecuencias menores a 750[Hz].

VI. 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 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:

Ú 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

Ú 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.
- 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.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] "Chapter 6. Scaling Laws in Miniaturization J. Rodriguez", Lectures on MEMS and Microsystems Design and Manufacture, [Online]. Disponible: http://www.engr.sjsu.edu/trhsu/ME189_Chapter.pdf . [Accesado: Septiembre 19, 2010]
- [2] M. Gad-el-Hak, "MEMS: Applications", Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2005.
- [3] C. Liu, "Recent Developments in Polymer MEMS", Advanced Materials, 2010.
- [4] Varios autores, "Global MEMS/Microsystems Markets and Opportunities". [Online]. Disponible: <http://www.gersteltec.ch/userfiles/1199612044.pdf>. [Accesado: Mayo, 2011]

[5] G. Fedder, "MEMS Fabrication", IEEE ITC International Test Conference, 2010.

[6] Instituto de Investigaciones en Materiales UNAM, "Tecnología MEMS: un pequeño mundo con grandes posibilidades", Agosto 2010. [Online]. Disponible: <http://www.iim.unam.mx/revista/pdf/numero15.pdf> [Accesado: Mayo, 2011.]

[7] M. Esashi, K. Minami, T. Ono, "Silicon bulk micromachining and nanomachining", Condensed Matter News 6:31-44, Tohoku University, Japan, 1998.

[8] M. Hautefeuille, "Miniaturised Multi-MEMS Sensor Development", Microelectronics Reliability, 2009.

[9] I. Gallego, "Microfacturing: Microtecnologías: Pasado, Presente y Futuro," Portal del proyecto MicroManufacturing cofinanciado por el Ministerio de Ciencia e Innovación y el FEDER, 2010. [Online].

[10] S. Kasap, "Principles of Electronic Materials and Devices", McGraw-Hill Companies, 2005

VIII. REFERENCIAS BIOGRÁFICAS



Control.

Andrea Santana, nace en la ciudad de Ambato en el año 1987. En el año 2005, obtiene el título de Bachiller en Ciencias en el Centro Educativo Particular Atenas. Egresada de la ESPE en el año 2010 de Ingeniería Electrónica Automatización y



Automatización y Control.

Gabriela Verdezoto, nace en la ciudad de Ibarra en el año 1987. En el año 2005, obtiene el título de Bachiller en Físico Matemático en la Unidad Educativa Experimental Teodoro Gómez de la Torre. Egresada de la ESPE en el año 2010 de Ingeniería Electrónica

