

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

**INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y
APLICADAS**

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

**DISEÑO DE ACELERÓMETROS CAPACITIVOS CON
BRAZOS BASADOS EN ARREGLOS FLEXIBLES**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:
LICENCIADO EN TECNOLOGÍA CON ÁREA TERMINAL EN
ELECTRÓNICA**

**PRESENTA:
C. JUAN GERARDO FLORES CASTRO**

**ASESOR:
DRA. MARGARITA TECPOYOTL TORRES**

**SINODALES:
DR. J. JESÚS ESCOBEDO ALATORRE
DR. OMAR PALILLERO SANDOVAL
DR. JOSE ANTONIO MARBÁN SALGADO
DR. PEDRO VARGAS CHABLÉ**

Cuernavaca, Morelos, 2021



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Instituto de
Investigación en
Ciencias
Básicas y
Aplicadas

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS



Control Escolar de Licenciatura

VOTOS DE APROBATORIOS

Secretaria ejecutiva del Instituto de Investigación en Ciencias Básicas Aplicadas de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

P r e s e n t e .

Por medio de la presente le informamos que después de revisar la versión escrita de la tesis que realizó el C. **FLORES CASTRO JUAN GERARDO** con número de matrícula **20154003055** cuyo título es:

"DISEÑO DE ACELERÓMETROS CAPACITIVOS CON BRAZOS BASADOS EN ARREGLOS FLEXIBLES"

Consideramos que **SI** reúne los méritos que son necesarios para continuar los trámites para obtener el título de **Licenciado en Tecnología con Área Terminal en Electrónica**.

Cuernavaca, Mor a 11 de marzo del 2021

Atentamente
Por una universidad culta

Se adiciona página con la e-firma UAEM de los siguientes:

DR. J. JESÚS ESCOBEDO ALATORRE
DR. OMAR PALILLERO SANDOVAL
DRA. MARGARITA TECPOYOTL TORRES
DR. JOSE ANTONIO MARBÁN SALGADO
DR. PEDRO VARGAS CHABLÉ

PRESIDENTE
SECRETARIO
VOCAL
PRIMER SUPLENTE
SEGUNDO SUPLENTE



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

JOSE ANTONIO MARBAN SALGADO | Fecha:2021-03-11 16:34:29 | Firmante

gKpOPkhLXuUhKITS4qwy2ATGDz4EQyVkJZ9wE/Pux6/a5UJH+PAb8+IEmJZLlvh4gFiXiLdf0eCOF0Nv75ruDldEWgpbZInUFJ4tr0wPPpknVfm/zHu/ErcJ4bp3b9b+V/fGhLh5ILN
ZrHGbak+l4yBnoRyuVvXyZnX1EaU0CSzhAcIv2J6IKoq6cwk5ZrbEuxgMuFTNd4DlclaAdNAjCmKfdxiwpmKcMF8gJKaZShuekugd5DSW0IPeg13XC0qHNrAfcMqBk0nHlb4mV
bmweJqGvHwKt7qSP3aU22q24/aCVl/wmIXOWEFnCxYmHp5c5matGFAsUhnORA0BMg==

PEDRO VARGAS CHABLE | Fecha:2021-03-11 17:10:03 | Firmante

DgL3B2fHcsZ6Ut7ZYWO+yVr2dRKaKxFWnLTCX2G1t+9f0ViHNI2KwTuYJAW2iFGQQENIaKUxYFOskEbaR7efYBdyEVKlK+KJXebnNf7xuW2/YwlXFzcEnN553UwOLVkrBNp97
ulBM88ICxVkgR5OIFsCZadSfM3e9De20KlmeDK7m/siZC/YsE5DMFQ5uyFXgLMi9xtnDkd3KL0PeGfR0aSntdrCMBduAlFwKO7oJ0rQ63GYP22oyYlLePwuvb2igz7Gy0Jr5IX7r
GXT8ob9Z9uLcNv+0/bumOcQbwIP4RQGV1eonGqvl8WHnVYVVBDC94yBD0Zq80TT8C3QxWXNw==

MARGARITA TECPOYOTL TORRES | Fecha:2021-03-11 17:27:15 | Firmante

PDYFNNS/0B/vdUESom2ZkL2N4pN/wMEtrvGMypSg6ql2sYK+k6MikcS7P5Svi3fuDG96Cwq8IQ+OHcmSAK+t4/aK5Q5MtKctOZcl/n+kHuy/ONnw6JDI0nSJBHPn5toT8wkYN4x
kWNuJK8bTY0mfxfwhSGCd3BHidA0Osz+Kj0JwB3G18bh1ehbPw6nXv6Jz3FIMisjsymoyrKHu14gkX4DOUwvG/unWs8lgbYByyQOZF8TxEoaHH6wpjMFzZPtes/OjAh1eJbQN
5qVj2PbjFh4PXWLTmJ0IKA3DkX87GDjDRC/ceRwePX99yYZcQzS+vgEK7+52EmgwZQ==

J JESUS ESCOBEDO ALATORRE | Fecha:2021-03-12 17:30:01 | Firmante

Zscir7GWRUubGBr50qs8xEYqsXMirNDdon3MD+hJT0grn1dzQu6ZIIUyqgQ81+fzQmBFwJXoC8ol3OwIjKq/+qLXRITvcb2mCOOC724vCVCCI69PU8vRC3Fg0AIPg5lo+Smt6ZVo
DUYeLe86LzjKbWjAPIH667J+GaBspHUbG08VDqto+cngNUUby7XdwttVJiNr1KCp90ywtUjW83t6ZTOBma31rBNbMXfkfNfqW4RqpQ2ZF6bHHsDV/si+OXXUnMHIMGuU3WJCB
0UYuPBOGui+OdelwgH67ZXpw95QYbn7XRldLlel13bBxRZUDMbexroyrpskEpDQIYOQisYdQ==

OMAR PALILLERO SANDOVAL | Fecha:2021-03-19 11:12:27 | Firmante

hfwxrabt3PkiJmjr1q5R54xcNpnQIEexUjNQXDGFpM00C6IKBtfe4lq+cSojFqvTJfXalEHSvxjn7aqMhp/maoiBcCk4tQO71VYDboTVtPx56+vEsajnl+hC2UtvqcOXR5NkxONZDyOL
nfitLF+eggO6J07xXeeVe2mbrJ1A7ca0Q0qEvqTdLKC24fjvHTmATvQC7uujAes0ujlquzDH7+dO7BY4RAwCxo3ELYt37gxDDM/279HI/ZWDIw3Qf/gz7Af5GUqIMv9GSz/Upbosn
oJWU6fQw/JAWJmXshakSJgatdgXEiWUHuBaZiAvHgsU1hOFQ9rvRHTBExo0EUBIA==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



L2JJB9

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/hg3WPMfV49AOxjOU8RGBHTCddZi2RcZp>



Resumen

Esta tesis se enfoca en el diseño de geometrías de brazos de acelerómetros, con base en segmentos de masa de anchos alternados, con la finalidad de aumentar el desplazamiento de la masa de prueba y, de esa manera incrementar la sensibilidad mecánica del acelerómetro. Se diseñan 3 diferentes diseños de brazos, tomando como referencia a las dimensiones del brazo convencional uniforme. Se realiza el análisis teórico y de simulación para cada brazo, considerando a los sistemas masa-resorte, con $\frac{1}{4}$ de masa de prueba y para el acelerómetro completo, respectivamente. Para validar el análisis, se realiza la impresión 3D, escalando tanto al acelerómetro con brazo uniforme convencional, como con brazo simétrico, en escala milimétrica, utilizando PLA, con la finalidad de comparar su flexibilidad, aplicando la misma variación en la fuerza de entrada.

Además, el desempeño del brazo simétrico se comparó con 2 tipos diferentes de brazo hallados en la bibliografía. Se observó en esta comparación que, con el brazo simétrico aquí propuesto, se obtiene un mayor desplazamiento de la masa de prueba, pero con una reducción en frecuencia natural. Esto último, de acuerdo con la relación con la masa, tanto de la ecuación correspondiente al desplazamiento de la masa de prueba, como a la frecuencia natural, representando un compromiso de diseño.

Finalmente, se realiza un análisis de la anchura de del segmento más delgado que forma parte del brazo, buscando hallar una relación que permita un incremento aceptable de desplazamiento de la masa de prueba, sin afectar seriamente a la frecuencia natural. Esto es importante, ya que generalmente, se logra con un amplificador de desplazamiento adicional, y en este caso, basta con modificar a la geometría del brazo, esto es hallando una solución simple.

Abstract

This thesis focuses on the design of accelerometer arm geometries, based on alternating mass segments of different widths, to increase the displacement of the proof mass and thus, increase the mechanical sensitivity of the accelerometer. Three different arm designs are used, taking as a reference the dimensions of the conventional uniform arm. The theoretical and simulation analysis is performed for each arm, considering the mass-spring systems, with $\frac{1}{4}$ of test mass and for the complete accelerometer, respectively. To validate the designs' analysis, a 3D printing is carried out, scaling both the accelerometer with conventional uniform arms and with symmetric arms, at millimeter scale, using PLA, in order to compare their flexibility. The same variation of input force is applied to both proof masses.

In addition, the performance of symmetrical arm was compared with 2 different types of arms found in the literature. It was observed in this comparison that, with the symmetrical arms proposed here, a greater displacement of the proof mass is obtained, but with a reduction of its natural frequency. In accordance with the relationship to the mass, both mass displacement equation and the natural frequency, represents a design compromise.

In addition, an analysis of the width of the segments that make up the arm, is made seeking to find a relationship that allows an acceptable increase in the displacement of the test mass, without seriously affecting the natural frequency. This is important, since it is generally achieved with an additional displacement amplifier, and in this case, it is enough to modify the arm geometry, that is, finding a simple solution.

Dedicatoria

A mi familia, amigos y a Tixtla de Guerrero.

Agradecimientos

Dra. Margarita Tecpoyotl Torres, quien se encargó de la asesoría de este proyecto de tesis, así como al Dr. Pedro Vargas Chablé por su participación en el desarrollo de este trabajo.

A los integrantes del laboratorio “Electrónica y Dispositivos para Sistemas de Comunicación”, donde se realizó este trabajo.

Al CIICAp por haberme brindado sus instalaciones.

A CONACyT, por el apoyo de beca de tesis de licenciatura, obtenido como parte del proyecto de Ciencia Básica “Diseño, análisis e implementación de novedosos dispositivos MEM inerciales y electro-térmicos”.

"Proyecto Apoyado por el Fondo Sectorial de Investigación para la Educación", con número de referencia A1-S-33433.

Índice General

ÍNDICE DE FIGURAS	III
ÍNDICE DE TABLAS	V
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	2
1.1. INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS MICRO-ELECTROMECÁNICOS	2
1.2. ANTECEDENTES	4
1.3. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN E HIPÓTESIS	5
1.4. OBJETIVOS	6
1.4.1 <i>Objetivo general</i>	6
1.4.2 <i>Objetivos particulares</i>	6
1.5. JUSTIFICACIÓN	7
1.6. LIMITACIONES	7
1.7. ALCANCES	7
1.8. SOFTWARE Y EQUIPO	8
1.8.1 <i>Software</i>	8
1.8.2 <i>Equipo y consumibles</i>	8
1.9. DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO DE LA TESIS	9
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	12
2.1 ACCELERÓMETRO	12
2.2 FUNCIONAMIENTO DE UN ACCELERÓMETRO CAPACITIVO	13
2.3 LEY DE HOOKE Y SEGUNDA LEY DE NEWTON	15
2.4 RESPUESTA DE FRECUENCIA Y SENSIBILIDAD	17
2.5 DIMENSIONES DE LA MASA DE PRUEBA	18
2.6 ELEMENTOS DE RIGIDEZ	18
2.7 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES	20
2.7.1 <i>Módulo de Young</i>	20
2.7.2 <i>Razón de Poisson</i>	21
2.7.3 <i>Fuerza y desplazamiento</i>	22
2.7.4 <i>Constante de rigidez</i>	23
2.7.5 <i>Esfuerzo</i>	25
2.8 DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADORA Y ANÁLISIS POR EL MÉTODO DE ELEMENTO FINITO	26
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	28
3.1 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA	28
3.2 DESCRIPCIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN, FABRICACIÓN Y PRUEBA DEL ACCELERÓMETRO EN PLA	30
CAPÍTULO 4. DISEÑO DE BRAZOS NO UNIFORMES	33
4.1. GEOMETRÍAS DE BRAZO	33
4.1.1 <i>Brazo uniforme o convencional</i>	34
4.1.2 <i>Brazo con proporciones basadas en la razón dorada</i>	34
4.1.3 <i>Brazo simétrico</i>	35
4.1.4 <i>Brazo no simétrico</i>	35
4.2 DISEÑO DEL SISTEMA MASA-RESORTE, CON ¼ DE MASA	36
4.3 DISEÑO DEL ACCELERÓMETRO COMPLETO	37

CAPÍTULO 5. RESULTADOS	40
5.1 RESULTADOS DE LOS BRAZOS	40
5.1.1 <i>Resultados teóricos</i>	40
5.1.2 <i>Resultados de la simulación</i>	42
5.2 RESULTADOS DEL SISTEMA MASA-RESORTE CON ¼ DE MASA	44
5.2.1 <i>Resultados teóricos</i>	44
5.2.2 <i>Resultados de la simulación</i>	45
5.3 RESULTADOS DEL ACELERÓMETRO CAPACITIVO COMPLETO	48
5.3.1 <i>Resultados teóricos</i>	48
5.3.2 <i>Resultados de la simulación</i>	49
5.4 IMPLEMENTACIÓN DE ACELERÓMETROS EN PLA	54
5.4.1 <i>Resultados simulados de acelerómetros en PLA</i>	54
5.4.2 <i>Resultados experimentales de acelerómetros en PLA</i>	55
CAPÍTULO 6. COMPARACIÓN DE DESEMPEÑO	62
6.1 COMPARACIÓN CON ACELERÓMETRO CON BRAZOS EN L.....	62
6.2 COMPARACIÓN CON ACELERÓMETRO CON BRAZOS PLEGADOS	65
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	69
7.1 CONCLUSIONES.....	69
7.2 TRABAJO FUTURO.....	70
BIBLIOGRAFÍA	72
ANEXO A. DISEÑO DE BRAZOS USANDO HERRAMIENTA GEOMETRY DE ANSYS	76
ANEXO B. PRODUCTOS GENERADOS	86
B.1 COLABORACIÓN EN LA IMPARTICIÓN DE TALLERES	86
B.2 REGISTRO DE PATENTE	91
B.3 MEMORIA EN EXTENSO PUBLICADA.....	93

Índice de Figuras

FIGURA 1.1. EJEMPLO DE UN MEMS. (REYES CORTÉS, 2013).	3
FIGURA 2.1 FORMAS DE DETECCIÓN DE CAPACITANCIA (BADRI, 2011),	14
FIGURA 2.2 ESQUEMA DEL FUNCIONAMIENTO DE UN ACELERÓMETRO.	14
FIGURA 2.3 GRÁFICA DE CURVATURA DE ESFUERZO-DEFORMACIÓN PARA CUALQUIER MATERIAL. ADAPTADA DE (SALAZAR TRUJILLO, 2007).....	16
FIGURA 2.4 ESQUEMA DE UNA VIGA DE LONGITUD L SUJETADA DE UN EXTREMO Y DEL OTRO EXTREMO, SOMETIDA A UNA FUERZA F.....	19
FIGURA 2.5 DIFERENTES TIPOS DE VIGAS EN ACELERÓMETROS A) VIGA FIJA, B) VIGA PATA DE CANGREJO, C) VIGA PLEGADA Y D) VIGA SERPENTINA (GARY KEITH , 1994).	19
FIGURA 2.6 DIAGRAMA DE RESORTE A) RESORTE SIMPLE, B) RESORTES EN PARALELO Y C) RESORTES EN SERIE.	24
FIGURA 3.1 METODOLOGÍA.....	30
FIGURA 3.2 IMPLEMENTACIÓN DE ACELERÓMETROS CONVENCIONAL Y UNIFORME UTILIZANDO PLA... 31	31
FIGURA 4.1 BRAZO CONVENCIONAL CON LONGITUD L Y ALTURA B.	34
FIGURA 4.2 BRAZO CON ARREGLO DE RAZÓN DORADA	35
FIGURA 4.3 DISEÑO DE BRAZO SIMÉTRICO CON UN ARREGLO DE SEIS SECCIONES DIFERENTES.	35
FIGURA 4.4 DISEÑO DE BRAZO NO SIMÉTRICO CON UN ARREGLO DE SEIS SECCIONES DIFERENTES.	36
FIGURA 4.5 MASA SUSPENDIDA POR UN BRAZO NO SIMÉTRICO, FIJO EN SU EXTREMO MEDIANTE UN ANCLA. DISEÑO EN ANSYS.	37
FIGURA 4.6 MASA SUSPENDIDA POR 4 BRAZOS NO SIMÉTRICOS, FIJOS EN SUS EXTREMOS MEDIANTE ANCLAS. DISEÑO EN ANSYS.	38
FIGURA 5.1 GRÁFICA DEL CAMBIO DE LA DEFORMACIÓN EN EL EXTREMO GUIADO, ANALÍTICO Y SIMULADO CON RESPECTO AL CAMBIO DE LA ACELERACIÓN EN EL SISTEMA MASA-RESORTE CON BRAZO SIMÉTRICO.	47
FIGURA 5.2 GRÁFICA DEL CAMBIO DEL ESFUERZO ANALÍTICO Y SIMULADO CON RESPECTO AL CAMBIO DE LA ACELERACIÓN EN EL SISTEMA MASA-RESORTE CON BRAZO SIMÉTRICO.	47
FIGURA 5.3 GRÁFICA DEL CAMBIO DE LA FUERZA OBTENIDA DE FORMA ANALÍTICA Y SIMULADA CON RESPECTO AL CAMBIO DE LA ACELERACIÓN EN EL SISTEMA MASA-RESORTE CON BRAZO SIMÉTRICO.	48
FIGURA 5.4 GRÁFICA DEL CAMBIO DE LA DEFORMACIÓN EN BRAZO CONVENCIONAL, RAZÓN DORADA, SIMÉTRICO Y NO SIMÉTRICO, CONSIDERANDO EL ACELERÓMETRO COMPLETO, CON RESPECTO AL CAMBIO DE LA ACELERACIÓN DE 1 G HASTA 30 G.....	50
FIGURA 5.5 GRÁFICA DEL CAMBIO DE LA FUERZA OBTENIDA DE FORMA ANALÍTICA Y SIMULADA CON RESPECTO AL CAMBIO DE LA ACELERACIÓN EN EL SISTEMA MASA-RESORTE CON BRAZO SIMÉTRICO.	51
FIGURA 5.6 DESPLAZAMIENTO MÁXIMO DE 83.66 NM EN LA MASA DE PRUEBA DEL ACELERÓMETRO CON BRAZOS SIMÉTRICOS CON 1G APLICADA.	52
FIGURA 5.7 ESFUERZO MÁXIMO IGUAL A 7.11×10^5 N/m ² CERCA DEL EXTREMO GUIADO, EN ACELERÓMETRO CON BRAZOS SIMÉTRICOS A 1 G.	52
FIGURA 5.8 ESFUERZO MÁXIMO DE 2.13×10^7 N/m ² CERCA DEL EXTREMO GUIADO, EN ACELERÓMETRO CON BRAZOS SIMÉTRICOS A 30 G.	52
FIGURA 5.9 GRÁFICA DEL CAMBIO DE LA FUERZA OBTENIDA DE FORMA ANALÍTICA Y SIMULADA CON RESPECTO AL CAMBIO DE LA ACELERACIÓN EN EL SISTEMA MASA-RESORTE CON BRAZO SIMÉTRICO.	53
FIGURA 5.10 FORMA MODAL CON FRECUENCIA NATURAL DE 1725.8 HZ DEL ACELERÓMETRO CON BRAZOS SIMÉTRICOS.	53

FIGURA 5.11 GRAFICA DEL DESPLAZAMIENTO EN FUNCIÓN DE LA FUERZA APLICADA EN ACELERÓMETROS CONVENCIONAL Y SIMÉTRICO, OBTENIDA DE FORMA SIMULADA.....	55
FIGURA 5.12 MEDICIÓN DE DESPLAZAMIENTO DE ACELERÓMETRO EN PLA.....	56
FIGURA 5.13 POSICIÓN INICIAL DE LAS AGUJAS DE ACELERÓMETROS A) CONVENCIONAL, B) SIMÉTRICO $B_2=(1/2)B_1$ Y C) SIMÉTRICO $B_2=(1/3)B_1$ SIN APLICAR FUERZA EN LA ENTRADA.....	57
FIGURA 5.14 AGUJA UBICADA EN LA REGLA SIN APLICAR NINGUNA FUERZA EN LA MASA DE PRUEBA...	58
FIGURA 5.15 DESPLAZAMIENTO DE AGUJA DE 148 μ M EN ACELERÓMETRO CONVENCIONAL, AL APLICAR UNA FUERZA DE 0.27 N.....	58
FIGURA 5.16 DESPLAZAMIENTO DE AGUJA DE 298 μ M EN ACELERÓMETRO SIMÉTRICO, AL APLICAR UNA FUERZA DE 0.23 N.....	59
FIGURA 5.17 GRÁFICA DEL DESPLAZAMIENTO EN FUNCIÓN DE LA FUERZA APLICADA EN ACELERÓMETROS CONVENCIONAL Y SIMÉTRICO.....	59
FIGURA 6.1 ACELERÓMETRO CON BRAZOS EN FORMA DE L, CONSIDERADO PARA LA COMPARACIÓN DEL DESEMPEÑO (MAJID, Y OTROS, 2019).....	62
FIGURA 6.2 ACELERÓMETRO DE REFERENCIA CON BRAZOS PLEGADOS. ADAPTADA DE (AVINASH & SIDDHESHWAR, 2015).....	65

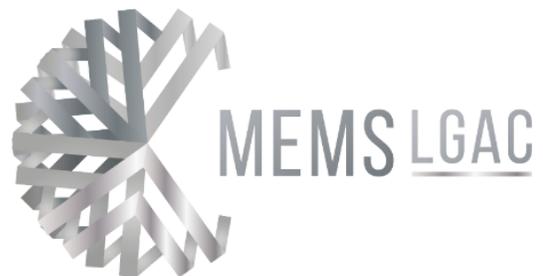
Índice de Tablas

TABLA 2.1 FÓRMULAS PARA DETERMINAR EL MÓDULO DE YOUNG, E.....	21
TABLA 2.2 PROPIEDADES ELÁSTICAS DEL SILICIO, POLISILICIO Y SU8.....	22
TABLA 4.1 DIMENSIONES DE LOS SEGMENTOS DE CADA BRAZO.....	36
TABLA 5.1 MOMENTOS DE INERCIA I Y CONSTANTES DE RIGIDEZ K DE CADA SECCIÓN DE LOS BRAZOS Y TOTAL.....	41
TABLA 5.2 RESULTADOS TEÓRICOS DE MASA, DESPLAZAMIENTO, ESFUERZO Y FUERZA DE LOS BRAZOS.....	42
TABLA 5.3 RESULTADOS DE MASA, DESPLAZAMIENTO MÁXIMO, ESFUERZO Y FUERZA TOTAL DE LOS BRAZOS OBTENIDOS DE LA SIMULACIÓN.....	43
TABLA 5.4 COMPARACIÓN ENTRE RESULTADOS TEÓRICO Y SIMULADOS DE LOS BRAZOS.....	44
TABLA 5.5 RESULTADOS TEÓRICOS DEL SISTEMA MASA-RESORTE, CON ¼ DE MASA.....	45
TABLA 5.6 RESULTADOS DEL SISTEMA MASA-RESORTE, CON ¼ DE MASA, OBTENIDOS DE LA SIMULACIÓN.....	45
TABLA 5.7 PORCENTAJES DE ERROR ENTRE RESULTADOS ANALÍTICOS Y RESULTADOS SIMULADOS DE CADA SISTEMA MASA-RESORTE APLICANDO 1 G.....	46
TABLA 5.8 RESULTADOS TEÓRICOS DEL ACELERÓMETRO CON BRAZOS SIMÉTRICOS APLICANDO 1G.....	49
TABLA 5.9 RESULTADOS DEL ACELERÓMETRO, CON DIFERENTES GEOMETRÍAS DE BRAZO, OBTENIDOS DE LA SIMULACIÓN.....	50
TABLA 6.1 DIMENSIONES DEL ACELERÓMETRO CON BRAZOS EN FORMA DE L.....	63
TABLA 6.2 CARACTERÍSTICAS DE SU8 (MAJID, Y OTROS, 2019).....	63
TABLA 6.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE ACELERÓMETROS CON BRAZOS EN L Y ACELERÓMETRO CON BRAZOS SIMÉTRICOS CON $B_2=(1/3)B_1$ Y $B_2=(1/2)B_1$ Y UNA MASA DE PRUEBA DE $3920\mu\text{M} \times 2960\mu\text{M}$ PARA TODOS.....	64
TABLA 6.4 COMPARACIÓN CON DE ACELERÓMETRO SIMÉTRICO DE DIFERENTES PROPORCIONES EN B_2 CON ACELERÓMETRO CON BRAZOS EN L.....	65
TABLA 6.5 COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE ACELERÓMETROS CON BRAZOS PLEGADOS Y ACELERÓMETRO CON BRAZOS SIMÉTRICOS DE $B_2=(1/3)B_1$ Y $B_2=(1/2)B_1$ Y UNA MASA DE PRUEBA DE $540\mu\text{M} \times 400\mu\text{M}$ PARA TODOS.....	66
TABLA 6.6 COMPARACIÓN DE ACELERÓMETRO SIMÉTRICO DE DIFERENTES PROPORCIONES EN B_2 CON ACELERÓMETRO CON BRAZOS PLEGADOS.....	67

CAPÍTULO 1

Introducción

En este capítulo, se presentan la justificación, la hipótesis y los objetivos. Se describe, de manera general, el panorama de desarrollo, identificando las limitaciones y alcances de este trabajo. Se presentan, además, a las secciones que conforman la estructura de esta tesis.



Capítulo 1. Introducción

Este proyecto de tesis se enfoca en el diseño de nuevas geometrías de brazos para acelerómetros, los cuales son sensores inerciales que detectan la aceleración aplicada. Estos dispositivos son ampliamente utilizados en diversas áreas de aplicación, entre las cuales, se encuentra la industria automotriz. En este capítulo, se presentan algunos antecedentes sobre los MEMS y los acelerómetros, se plantean la pregunta de investigación e hipótesis, los objetivos del proyecto, así como su justificación, limitaciones y alcances.

1.1. Introducción a los Sistemas Micro-Electromecánicos

Los Sistemas Micro-Electromecánicos, MEMS, son sistemas de escala micrométrica que interactúan con fenómenos físicos o químicos que, mediante la transducción de señales eléctricas, relacionan el comportamiento del dispositivo con los fenómenos a los que es expuesto (Álvarez, 2016). Son definidos típicamente como dispositivos de pequeñas dimensiones compuestos por elementos activos y pasivos microfabricados y que realizan diferentes funciones como percepción, procesamiento de datos, comunicación y actuación sobre el entorno (Torrejón Yuste, 2011). En la Figura 1.1, se presenta a un ejemplo representativo.

Los MEMS en general varían en tamaño desde un micrómetro (una millonésima parte de un metro), a un milímetro (una milésima parte de un metro). En este nivel de escala de tamaño, las construcciones de la física clásica no son siempre ciertas. Debido a la gran superficie con relación al volumen de los MEMS, los efectos de superficie como electrostática y viscosidad dominan a los efectos de volumen tales como la inercia o la masa térmica.

La naturaleza del microsistema puede ser eléctrica, magnética, óptica, térmica, mecánica o fluídica. La arquitectura del MEMS puede englobar circuitos electrónicos

Introducción

y/u ópticos, generadores de señal y receptores, microsensores, microactuadores y microgeneradores.

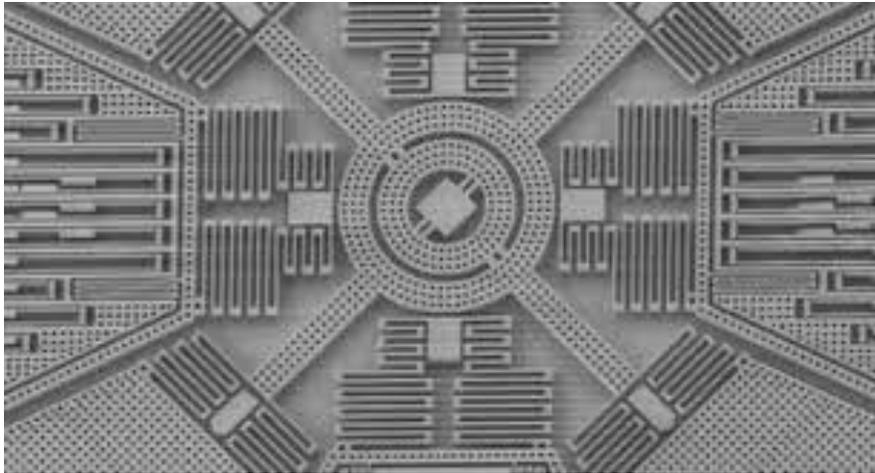


Figura 1.1. Ejemplo de un MEMS. (Reyes Cortés, 2013).

Los microsistemas se pueden clasificar en seis distintos tipos:

- **Sensores:** son dispositivos MEMS diseñados para medir cambios en el ambiente. Estos microsistemas incluyen sensores químicos, de movimiento, inerciales, térmicos y ópticos.
- **Actuadores:** son un grupo de dispositivos diseñados para proporcionar un estímulo a otros componentes o dispositivos MEMS. En los microsistemas los actuadores son operados electrostática o térmicamente.
- **MEMS RF:** son una clase de dispositivos usados para transmitir señales de radio frecuencia. Los dispositivos típicos incluyen: interruptores, capacitores, antenas, etc.
- **MOEMS (Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems):** son dispositivos diseñados para dirigir, reflejar, filtrar, y/o amplificar la luz. Estos componentes incluyen interruptores ópticos y reflectores.

Introducción

- Dispositivos MEMS para microfluidos: son diseñados para interactuar y trabajar con fluidos. Dispositivos como microbombas y microválvulas son creados para manipular pequeños volúmenes de fluido.
- Bio MEMS: son dispositivos que como muchos MEMS para microfluidos, son diseñados para interactuar específicamente con muestras biológicas. Estos dispositivos pueden ser fabricados para interactuar con proteínas, células biológicas, reactivos médicos, etc., y pueden usarse para suministrar medicamentos u otros análisis médicos.

Los MEMS son una tecnología que permite nuevos descubrimientos en varios ámbitos, incluida la detección de inercia, la biomedicina y las pantallas electrónicas. Esta tecnología ha permitido miniaturizar dispositivos y comercializarlos a gran escala. En el campo de la tecnología portátil, hubo un impacto revolucionario con las aplicaciones generalizadas de los dispositivos MEMS flexibles (Mahmood, Butler, & Celik-Butler, 2017).

1.2. Antecedentes

Las técnicas convencionales para detectar y medir la aceleración se fundamentan en el primer principio descubierto por Newton y descritos en su Principio de Newton en 1687 (Gonzalo Arribas, 2004). Tiempo después, la primera idea sobre los microsistemas fue presentada por Richard Feynman en su famosa conferencia "Hay mucho espacio en la parte inferior" en 1959, motivó a la investigación de la física sin importar el tamaño (micro/nanómetros, e incluso en escalas atómicas). Probablemente el primer intento que se considera una integración MEMS, se realizó en 1967 cuando se fabricó el transistor de compuerta resonante (RGT), el cual utiliza una viga suspendida sobre la compuerta de un transistor de efecto de campo (Álvarez, 2016).

El primer acelerómetro micro maquinado fue diseñado en 1979 en la Universidad de Stanford, pero pasaron más de 15 años, antes de que tales dispositivos se convirtieran

Introducción

en productos aceptados para aplicaciones de gran volumen. En la década de 1990, los acelerómetros MEMS revolucionaron la industria del sistema de bolsas de aire automotrices. Desde entonces, han habilitado funciones y aplicaciones únicas que van desde la protección del disco duro en las computadoras portátiles, hasta los controladores de juegos. Más recientemente, la misma tecnología de núcleo de sensor está disponible en dispositivos totalmente integrados y con todas las funciones adecuadas para aplicaciones industriales (Matej, 2008).

Hoy en día, los acelerómetros MEMS tienen el segundo mayor volumen de ventas después de los sensores de presión y se utilizan en una variedad de aplicaciones, incluyendo automotriz, industrial, electrónica de consumo y dispositivos médicos (Adel Merdassi, 2015). Todos los automóviles emplean al menos sensores de choque de alta G para el despliegue de bolsas de aire. Además, los sensores de baja G se utilizan para suspensiones activas y controles de estabilización de vehículos. La última generación de consolas de juegos contiene acelerómetros para medir el movimiento del controlador del juego para permitir la interfaz de usuario basada en el movimiento. Recientemente, los teléfonos celulares mejorados con una interfaz de usuario basada en movimiento también están disponibles. Los corredores también usan acelerómetros para determinar la velocidad de carrera y en las cámaras digitales para determinar la orientación de la imagen. Algunos discos duros portátiles utilizan la detección de "caída libre" basada en acelerómetro para proteger el disco duro de los impactos. Con el precio decreciente. Se prevé que, el número de aplicaciones de los acelerómetros va a aumentar en los próximos años (Kaajakari, 2009).

1.3. Pregunta de investigación e hipótesis

Anteriormente, se han llevado a cabo mejoras en el diseño de los acelerómetros, en cada uno de sus elementos, sin embargo, con relación a los brazos de suspensión, surge la pregunta:

Introducción

P1: ¿Es posible mejorar la flexibilidad de los brazos de un acelerómetro?

La flexibilidad de una estructura involucra muchas variables como, por ejemplo, el tipo de material, sus propiedades físicas y mecánicas, el tipo de geometría, tamaño, volumen y forma, así como las condiciones de operación a las que se somete. Por lo que:

H1: Si reducimos el volumen de los brazos de un acelerómetro, bajo una distribución adecuada de masa, es posible incrementar su flexibilidad.

1.4. Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Diseñar una geometría de brazo de suspensión para acelerómetros capacitivos, formada por un arreglo de segmentos de diferentes anchuras, más flexible que el brazo de suspensión convencional uniforme.

1.4.2 Objetivos particulares

1. Diseñar 4 acelerómetros con diferentes geometrías de brazos de suspensión. Se considera al brazo de ancho uniforme y tres diferentes arreglos de segmentos con anchura diferente.
2. Para realizar el análisis de desempeño del brazo de suspensión, considerar dos casos. En el primero, a uno de los brazos y un cuarto de masa de prueba y el segundo caso, a la totalidad de la estructura del acelerómetro.
3. Realizar el análisis por elemento finito y análisis teórico del acelerómetro señalado, para comparar su desempeño.

1.5. Justificación

La creciente demanda de sistemas electrónicos portátiles y el avance rápido en la robótica asistida creó una necesidad urgente para el desarrollo de sensores ubicuos donde la flexibilidad, la conformidad e incluso la capacidad de estiramiento de los dispositivos de detección son necesarios (P. Butler, Md. Sohel, & Celik-Butler, 2017).

En las últimas tres décadas, los acelerómetros son ampliamente utilizados en tecnologías del campo biomédico, microelectrónico, en la domótica, en el sector automotriz, en sensores sísmicos, en actividades deportivas de alto rendimiento y en la aeronáutica, entre otros. Por ello, el interés de estudiar a estos dispositivos para realizar mejoras tanto estructurales, como en sus parámetros de operación, con la finalidad de mejorar su desempeño.

1.6. Limitaciones

A pesar de que se cuenta con proyecto vigente de Ciencia Básica, no ha sido posible llevar a cabo varias actividades aún, debido a que se presentó la contingencia sanitaria, suspendiéndose las actividades presenciales. Lo que hace poco probable que en el lapso planeado pueda llevarse a cabo la micro-fabricación.

El uso de software especializado también es una limitante, ya que, por cuestiones ajenas al manejo del proyecto, no se ha podido adquirir.

1.7. Alcances

Se espera tener un claro análisis en la simulación de los acelerómetros diseñados, utilizando el software ANSYS. Se implementa la impresión 3D de los dispositivos escalados, e implementados en PLA, con la finalidad de analizar su funcionamiento en escala milimétrica.

1.8. Software y equipo

1.8.1 Software

Para realizar el diseño y la simulación de los dispositivos se utilizó el software ANSYSTM, que es un software de simulación basado en el análisis de elemento finito para predecir el comportamiento de un objeto. Dicho software cuenta con distintas herramientas, de las cuales, se utilizaron las siguientes:

- Geometry: se utiliza para realizar el diseño de algún objeto o cuerpo sólido.
- Static Structural: en esta herramienta es donde las cargas aplicadas y las condiciones fijas del cuerpo sólido no cambian con el tiempo.
- Modal: En esta herramienta se desarrolla el cálculo de frecuencias naturales y formas modales.

Para la impresión 3D de los prototipos a escala milimétrica se utilizó el programa Ultimaker CURA.

1.8.2 Equipo y consumibles

La simulación del desempeño de los dispositivos se llevó a cabo en una computadora Workstation, con las siguientes especificaciones:

- Procesador Intel Xeon E5-2603, 1.8 GHz.
- Memoria RAM DDR3, 8 GB.

Para la implementación en 3D se utilizó lo siguiente:

Introducción

- Los consumibles fueron adquiridos mediante el proyecto de Ciencia Básica apoyado de CONACyT.
- Impresora 3D modelo Anet A8.
 - Se agradece el apoyo de los compañeros del laboratorio, Josué Osvaldo Sandoval reyes y Andrés Ferrara Bello, quienes permitieron el uso de sus impresoras 3D.
- Plataforma de desplazamiento milimétrico.
- Microscopio óptico USB genérico.

1.9. Descripción del contenido de la tesis

Este proyecto de tesis consta de 7 capítulos.

Capítulo 1: Se presenta una introducción acerca de los MEMS, así como el planteamiento de objetivos, justificación, limitaciones y alcances. Se mencionan también, el software y el equipo que se utilizan para el desarrollo de esta tesis.

Capítulo 2: Presenta el marco teórico que sustenta el desarrollo de este proyecto de tesis.

Capítulo 3: Se describe de manera general a la metodología llevada a cabo en el desarrollo del proyecto.

Capítulo 4: Se presentan los diseños de los brazos con segmentos de masa con anchura alternada.

Capítulo 5: Se muestran los resultados de los brazos diseñados, así como los resultados del sistema masa-resorte, considerando $\frac{1}{4}$ de masa de

prueba, y un acelerómetro capacitivo completo. Se presenta también a los resultados de los acelerómetros implementados en PLA.

Capítulo 6: Se realiza una comparación con dos acelerómetros, encontrados en la bibliografía, los cuales, tienen diferentes geometrías de brazo, dimensiones y masa de prueba, además, emplean, como material estructural a SU8 y Polisilicio.

Se realiza, además, el análisis de diferentes anchuras del segmento delgado, con la finalidad de determinar al arreglo simétrico que reduzca en menor medida a la frecuencia natural, manteniendo un incremento útil en el desplazamiento de la masa de prueba.

Capítulo 7: Se presentan las conclusiones obtenidas en esta tesis.

Referencias: Se presentan las referencias bibliográficas utilizadas para la elaboración de esta tesis.

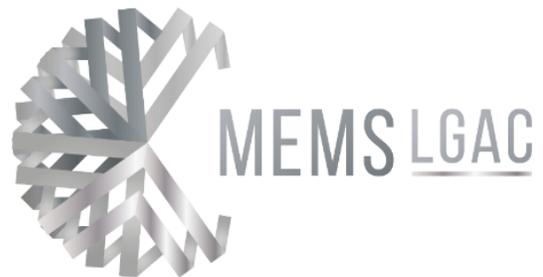
Anexo A. Diseño en ANSYS: Se describe de manera general el diseño de los brazos de suspensión en ANSYS, utilizando la herramienta *geometry*.

Anexo B. Productos generados: Se presentan evidencias de los productos y las actividades realizadas durante el desarrollo de este proyecto.

CAPÍTULO 2

Marco teórico

En este capítulo se presenta el marco teórico, que sustenta el desarrollo de esta tesis, y se detecta un área de oportunidad para generar una geometría diferente a las encontradas.



Capítulo 2. Marco teórico

2.1 Acelerómetro

Un acelerómetro es un dispositivo electromecánico que mide las fuerzas de aceleración, éstos se encuentran a escalas de décimas de micrómetros con niveles de sensibilidad y error muy pequeños, la unidad de medida de la aceleración son múltiplos de gravedad (Rincon-Jara & Mireles, 2010). Por otro lado, (Gonzalo Arribas, 2004) define a los acelerómetros como sensores inerciales que miden la segunda derivada de la posición. Un acelerómetro mide la fuerza de aceleración, ya sea estática o dinámica. Las fuerzas estáticas incluyen la gravedad, mientras que las fuerzas dinámicas pueden incluir vibraciones y movimiento.

Existen diferentes tipos de acelerómetros esto depende del tipo de aplicación en la que serán utilizados: Entre los más utilizados se encuentran:

- Mecánicos: Utilizan una masa inerte unida a un brazo, con su eje situado en la dirección que se quiere medir la aceleración.
- Capacitivos: Miden el desplazamiento producido entre las placas de un microcapacitor cuando es sometido a una aceleración, el cual puede ser longitudinal o en la distancia entre ellas.
- Piezoeléctricos: Su funcionamiento está basado en el efecto piezoeléctrico, fenómeno que aparece en algunos cristales cuando son sometidos a tensiones mecánicas.
- Piezorresistivos: Utilizan la propiedad de cambio de resistencia eléctrica que poseen algunos materiales, cuando son sometidos a tensiones mecánicas. (Morán, 2015).

En este trabajo, el enfoque es sobre los acelerómetros capacitivos.

2.2 Funcionamiento de un acelerómetro capacitivo

Un capacitor consiste en dos placas metálicas paralelas separadas por un material dieléctrico o aislante como se muestra en la Figura 2.1. La capacitancia de estas placas paralelas se calcula mediante:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon A}{d} \quad (2.1)$$

Donde, ϵ_0 es la permitividad del espacio libre (vacío) de magnitud 8.85×10^{-14} F/cm, ϵ es la permitividad relativa o constante dieléctrica del material aislante, A (m^2) es el área de superposición de las placas, y d (m) es su separación. Por lo tanto, cualquier cambio en la permitividad, área o distancia entre las placas causará un cambio en la capacitancia C (Badri, 2011).

En general, son cuatro los elementos que conforman a un acelerómetro:

- 1) masa de prueba, para generar una fuerza debida a una aceleración o desaceleración;
- 2) elementos de rigidez, o una suspensión, en forma de uno o varios resortes elásticos, para proveer a la masa un soporte mecánico y regresarla a su posición de equilibrio;
- 3) elementos de disipación, o amortiguamiento, para controlar el movimiento de la masa de prueba y poder obtener una respuesta en frecuencia favorable; y
- 4) un método para medir el desplazamiento de la masa, el cual convierte el desplazamiento mecánico a una salida eléctrica.

Marco teórico

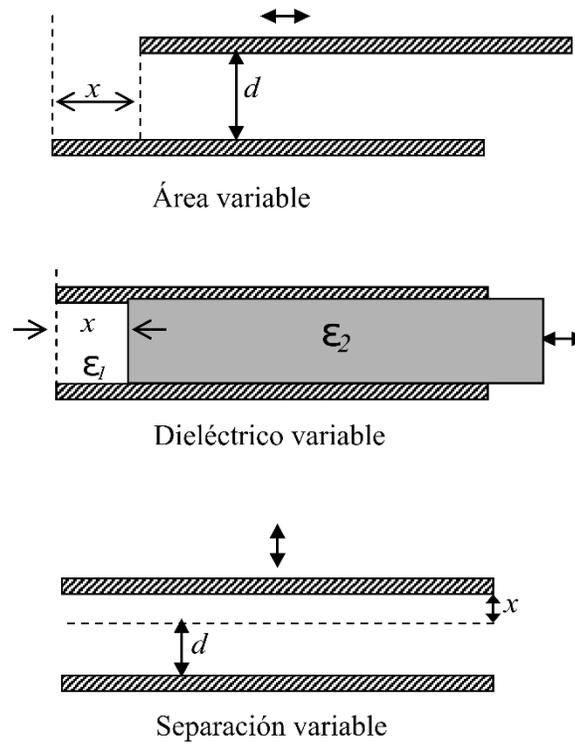


Figura 2.1 Formas de detección de capacitancia (Badri, 2011),

La estructura del acelerómetro se ilustra en la Figura 2.1. Una masa de prueba m está conectada al marco por un resorte flexible, con constante de rigidez k . El valor de la capacitancia puede cambiar de acuerdo con la ilustración.

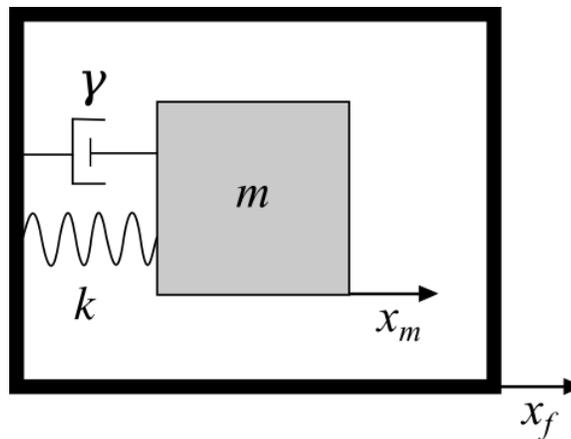


Figura 2.2 Esquema del funcionamiento de un acelerómetro.

Marco teórico

Cuando la masa de prueba m se conecta al marco por un resorte flexible k , debido a la inercia de la masa, el movimiento de la masa de prueba retrasará el movimiento del marco (Figura 2.2). Las vibraciones se amortiguan al introducir gas o líquido (como aceite) γ , en sensores macroscópicos dentro del marco (Kaajakari, 2009).

Debido a la inercia de la masa de prueba, el movimiento de la masa no sigue el movimiento del marco y la diferencia en el desplazamiento $x = x_f - x_m$ puede usarse para medir la aceleración. El desplazamiento de la masa es causado por las fuerzas inerciales, debe medirse para calcular la aceleración aplicada (Liu, y otros, 2016).

2.3 Ley de Hooke y segunda ley de Newton

Un acelerómetro capacitivo consiste en una masa de prueba suspendida usando una flexión compatible anclada al sustrato (Avinash & Siddheshwar, 2015), la deformación o elongación que sufre el resorte depende de la cantidad de masa que está unida al extremo guiado del resorte. Es decir, masas con diferentes pesos deforman el resorte en cantidades diferentes (Cornejo Serrano, Villalobos Oliver, Molina Reséndiz, & Arreola Galván, 2016). La Ley de Hooke describe fenómenos elásticos como los que exhiben los resortes. Esta ley afirma que la deformación elástica que sufre un material es proporcional a la fuerza que produce tal deformación, siempre y cuando no se sobrepase su límite de elasticidad (Sanger, 2005), describe la relación entre la fuerza

aplicada a un resorte no estirado y la cantidad que el resorte se estira cuando se aplica la fuerza. La expresión matemática de la ley de Hooke se presenta en la ecuación 2.2.

$$F = -kx \quad (2.2)$$

Donde F es la fuerza aplicada, x es el desplazamiento y k es la constante de rigidez que indica la cantidad de fuerza que se necesita para que el resorte se deforme una cierta cantidad (Cornejo Serrano, Villalobos Oliver, Molina Reséndiz, & Arreola Galván, 2016).

Sin embargo, la ley de Hooke es solo aplicable a deformaciones unitarias pequeñas, hasta que se alcanza el límite elástico lineal.

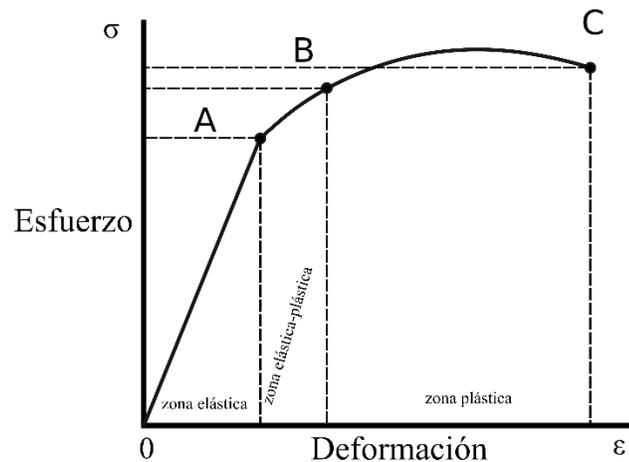


Figura 2.3 Gráfica de curvatura de esfuerzo-deformación para cualquier material. Adaptada de (Salazar Trujillo, 2007).

En la gráfica de curvatura esfuerzo-deformación para cualquier material mostrada en la Figura 2.3, se muestra el esfuerzo que un material tiene cuando sufre una deformación. Al aplicarle una fuerza al material, se tendrá un comportamiento elástico lineal, desde el origen hasta llegar al punto A, en ese rango, el material regresa a su forma original si se le deja de aplicar esa fuerza. Pasando del punto A al punto B, se sigue teniendo un comportamiento elástico, pero no lineal, y este puede o no regresar a su forma original. El punto B se define como el límite elástico, y cuando la fuerza aplicada pasa de este punto, el material no puede regresar a su forma original si se le

deja de aplicar esa fuerza. El punto C es el punto de fractura, es cuando el material tiende a romperse.

La segunda ley de Newton, escrita en la ecuación 2.3, establece que el balance de fuerzas F en un sistema es igual a la masa m por la aceleración a .

$$F = ma \quad (2.3)$$

2.4 Respuesta de frecuencia y sensibilidad

La mayoría de los sensores MEMS funcionan con frecuencias naturales típicas en el rango de 10 Hz a 10 kHz. De la ecuación 2.4, obtenemos el desplazamiento x , en baja frecuencia, cuando se aplica una aceleración a , de acuerdo con la relación:

$$x \approx \frac{ma}{k} = \frac{a}{\omega_0^2} \quad (2.4)$$

Siendo m la masa de prueba del sistema, ω_0 la frecuencia natural del sistema y k la constante de rigidez.

La ecuación 2.4 se denomina sensibilidad estática, a partir de la cual, es posible obtener la frecuencia natural del dispositivo

$$\omega_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.5)$$

Siendo k la constante de rigidez y m la masa del sistema. Como puede observarse, hay una relación diferente con relación a la masa en las ecuaciones 2.4 y 2.5, ya que, en el primer caso, se tiene una relación directamente proporcional con ella, mientras que, en el caso de la frecuencia de resonancia, es una relación inversamente proporcional. La masa del resorte afecta poco a la frecuencia natural del sistema cuando la masa del resorte es mucho menor que la masa de prueba, sin embargo, cuando se tienen masas pequeñas, es importante considerarla (Matar, Padori, Repetto, & Roatta, 2018).

2.5 Dimensiones de la masa de prueba

Cuando se trabaja a bajas frecuencias $\omega \ll \omega_0$, la fuerza inercial $F = ma$ es balanceada por la fuerza de la barra $F = kx$, o Ley de Hooke. De esta manera, la masa del acelerómetro puede ser calculada por la siguiente ecuación:

$$m = \frac{k}{\omega_0^2} \quad (2.6)$$

La masa también puede obtenerse a partir de su volumen V , definido como el espacio que ocupa un cuerpo que se obtiene por la multiplicación de sus tres dimensiones, es decir, altura, ancho y longitud, y la densidad ρ de su material, a partir de:

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (2.7)$$

De esta manera se pueden obtener las dimensiones de un objeto a partir del volumen y viceversa.

2.6 Elementos de rigidez

Los elementos de rigidez son la parte flexible de un acelerómetro, también conocidos como vigas o brazos, que hacen que exista un desplazamiento en la masa de prueba del acelerómetro, son requeridos para brindar un desplazamiento en el eje de mayor sensibilidad y deben ser lo suficientemente rígidos en los demás ejes, para eliminar cualquier sensibilidad de movimiento en dichos ejes. Al aplicarle una fuerza, la relación entre F y x puede ser lineal o no lineal.

A medida que el elemento de rigidez se deforma, la energía se almacena en él, y conforme regresa a su configuración inicial, se libera la energía. Si se aplica una fuerza F a un resorte lineal, ya sea de traslación o rotación, ésta obedece a la Ley de Hooke.

Marco teórico

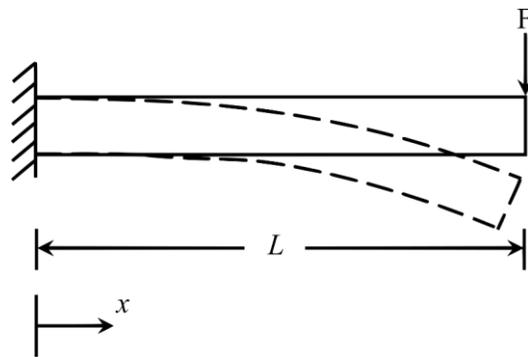


Figura 2.4 Esquema de una viga de longitud L sujeta de un extremo y del otro extremo, sometida a una fuerza F .

Existen muchos tipos de resortes o vigas que se pueden utilizar en el diseño de un acelerómetro capacitivo. Se usan comúnmente cuatro tipos en diseños micromecánicos: viga fija-fija, viga de pata de cangrejo (o de forma L), viga plegada y viga serpentina (Karbari Sudha, Kumari, Pasha Roshan, & Gowda Vikas, 2018). El resorte o viga en voladizo con una fuerza o momento en el extremo libre se puede modelar utilizando el modelo de cuerpo seudo rígido, que se aproxima al elemento flexible como un enlace rígido con un resorte torsional (L. Howell, P. Magleby, & M. Olsen, 2013).

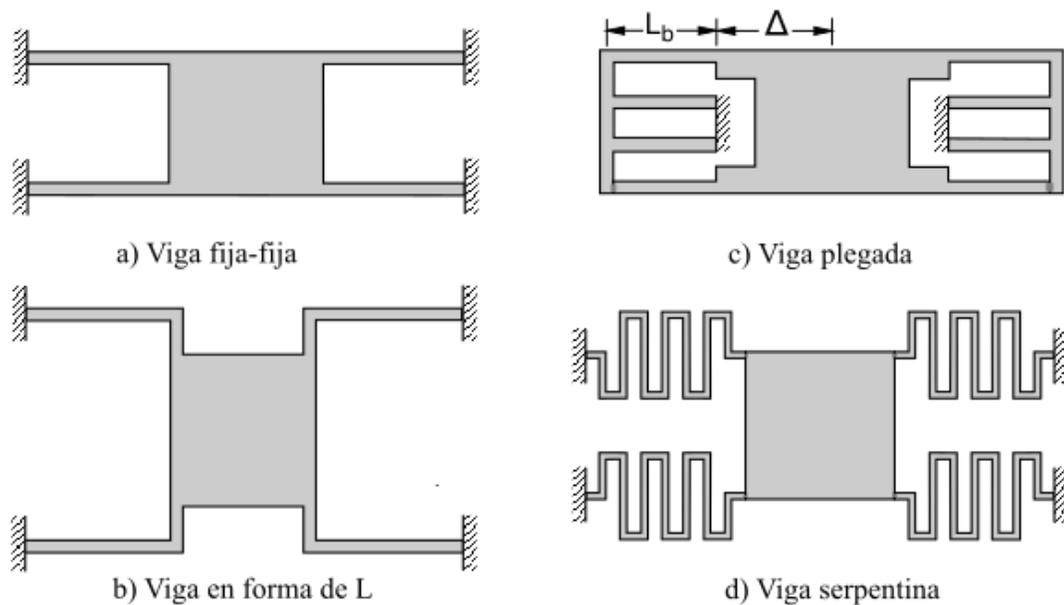


Figura 2.5 Diferentes tipos de vigas en acelerómetros a) viga fija, b) viga pata de cangrejo, c) viga plegada y d) viga serpentina (Gary Keith, 1994).

La viga fija-fija se muestra en la Figura 2.5a, tiene una constante de resorte lineal muy rígida. Una variación de la viga fija-fija es la viga en forma de L como se indica en la Figura 2.5b, para reducir el esfuerzo axial. La viga plegada que se muestra en la Figura 2.5c, también reduce el esfuerzo axial en las vigas, cada extremo de la flexión es libre de expandir el esfuerzo en todas las direcciones. El esfuerzo residual original en una pequeña sección de la viga se promedia en toda la longitud de la viga, dando un esfuerzo efectivo reducido. La viga serpentina como en la Figura 2.5d tiene menor rigidez, en comparación con las vigas anteriores y también tiene un esfuerzo reducido (Gary Keith , 1994).

2.7 Propiedades mecánicas de los materiales

Las nuevas tecnologías tienden a originarse con nuevos materiales y procesos de fabricación que se utilizan para la creación de MEMS. Las propiedades mecánicas de interés se dividen en tres categorías generales: elástica, inelástica y resistente. Es necesario conocer las propiedades elásticas de un dispositivo para predecir la cantidad de desviación de una fuerza aplicada, o viceversa. Si el material es dúctil y la estructura deformada no necesita volver a su estado inicial, entonces se debe conocer el comportamiento inelástico del dispositivo. También, se debe conocer la resistencia del material para que se puedan establecer los límites operativos permitidos. Para el diseño de un dispositivo MEMS, se necesita comprender la relación entre el procesamiento y las propiedades del material (Mohamed, 2001).

2.7.1 Módulo de Young

El módulo de Young es la pendiente de la parte lineal de la curva de esfuerzo-deformación de un material (Mohamed, 2001). Para obtener el módulo de Young, se aplica una tensión uniforme: se calcula a partir de mediciones directas de la fuerza aplicada y las dimensiones de la muestra. Aplicamos una fuerza a una barra, el material

se deforma y se alarga longitudinalmente (Navarro Bernal, 2012). Sin embargo, calcular esto no siempre es posible para los materiales MEMS; de hecho, a menudo no es posible ni práctico. Entonces, es necesario recurrir a métodos inversos utilizando un modelo (simple o complejo) de la estructura de prueba. La fuerza se aplica a la estructura de prueba y el desplazamiento se mide con las propiedades elásticas, inelásticas o de resistencia extraídas del modelo, si es lo suficientemente largo y delgado, entonces solo el módulo de Young se considera como propiedad del material en la fórmula que relaciona la fuerza y el desplazamiento.

Tabla 2.1 Fórmulas para determinar el módulo de Young, E .

Viga estática	Viga resonante	Prueba de abultamiento	Prueba de tracción
$\frac{4PL^3}{\delta bh^3}$	$\frac{ML^3\omega^2}{2bh^3}$	$\frac{p(1-\nu)a^4}{\delta^3 hc(\nu)}$	$\frac{p}{bh\varepsilon}$

donde h , b , y L son el grosor, el ancho y la longitud de la muestra; P y p son la fuerza y la presión aplicadas; m es la masa efectiva; ω es la frecuencia natural; a es la dimensión de una membrana cuadrada; δ y ε son la desviación y la tensión medidas, respectivamente (Mohamed, 2001).

2.7.2 Razón de Poisson

La relación de Poisson se utiliza en casi todas las áreas de análisis de esfuerzo y dinámica estructural, es una propiedad importante de los materiales cuando el estado de tensión es biaxial, cuando un material se estira, además del alargamiento se produce una contracción en el área transversal. La relación de Poisson se puede determinar midiendo modos de flexión y torsión de una viga libre.

Debido a que todavía no existen métodos estándar de prueba y existe una amplia variedad de valores obtenidos para materiales supuestamente idénticos, los lectores con un gran interés en el comportamiento mecánico de un material en particular pueden usar tablas para identificar las referencias pertinentes (Mohamed, 2001). La mayoría

de los materiales utilizados en MEMS son cerámicas y muestran un comportamiento lineal y quebradizo, en cuyo caso solo se enumera la resistencia a la fractura. El material MEMS más común, el polisilicio, ha sido estudiado ampliamente debido a que se utilizan películas delgadas de silicio como material estructural y, a que es difícil construir dichas películas de un solo cristal de silicio. El silicio monocristalino también se ha estudiado ampliamente. Los coeficientes de rigidez del silicio monocristalino están bien establecidos, y el módulo en diferentes direcciones puede variar de 125 a 180 GPa. Una estimación de cuál debería ser la resistencia a la fractura es más difícil ya que depende de los defectos en el material. La aplicación principal del polímero SU-8 es como material de máscara para MEMS. Su uso como componente estructural es posible, pero los valores de rigidez y resistencia son muy bajos. En la tabla 2.2 se presentan las propiedades de algunos materiales (Mohamed, 2001).

Tabla 2.2 Propiedades elásticas del Silicio, Polisilicio y SU8.

Material	Módulo de Young (GPa)	Resistencia de fractura (GPa)	Razón de Poisson	Densidad (kg/m ³)
Silicio	177±18	2.0-4.3	.36	2330
Polisilicio	160 ±6	2.0-2.7	.22	2329
SU8	~3	0.03-0.05	.22	1200

2.7.3 Fuerza y desplazamiento

Las pruebas de esfuerzo requieren la medición de fuerzas grandes y desplazamientos generalmente pequeños, mientras que para las pruebas de deformación se requiere lo contrario, es decir, fuerzas pequeñas y grandes desplazamientos. La resistencia de un material nos permite determinar cuánta fuerza se puede aplicar a un componente o estructura, si la fuerza aplicada es excesiva, el objeto podría deformarse o romperse. Por lo tanto, es necesario que sepamos calcular las fuerzas internas que se producen en los elementos estructurales y que son las que

producirán las deformaciones y la rotura. Para romper una viga de polisilicio $2\ \mu\text{m} \times 2\ \mu\text{m}$ cuadrado con una resistencia a la fractura de 2 GPa se requiere una fuerza de 8 mN. Si esa misma viga tiene 50 μm de largo, fijado en un extremo y con una carga de punto transversal en el otro extremo, romperla requiere una fuerza de solo 0.05 mN, sin embargo, si ese material tiene un módulo de 160 GPa, el alargamiento bajo una prueba de esfuerzo es de 0.62 μm (Mohamed, 2001).

2.7.4 Constante de rigidez

La constante de rigidez es otro parámetro para la determinación de la frecuencia natural y la sensibilidad. Se determina a partir de una combinación de parámetros geométricos físicos y propiedades del material, puede calcularse a partir de la ecuación 2.8.

$$k_c = \frac{l_c^3}{3EI} \quad (2.8)$$

Donde E es el módulo de Young e I el momento de inercia de la viga. La rigidez de un material queda caracterizada por la relación entre el esfuerzo y la deformación:

$$I = \frac{ab^3}{12} \quad (2.9)$$

El momento de inercia refleja la distribución de masa de un cuerpo o de un sistema de partículas en rotación, respecto a un eje de giro. De acuerdo con (Kaajakari, 2009), a es la dimensión transversal de la viga, y b es el grosor en la dirección de deflexión de la viga.

Cuando se tienen 2 o más resortes en paralelo, como se muestra en la Figura 2.6 b, y la barra sobre la cual actúa la fuerza F permanece paralela a su posición original, los desplazamientos de ambos resortes son iguales, por tanto:

$$F = F_1 + F_2 = k_1x + k_2x = (k_1 + k_2)x = k_e x \quad (2.10)$$

Marco teórico

por lo que

$$k_e = k_1 + k_2 \quad (2.11)$$

Cuando hay 2 o más resortes en serie como se muestra en la Figura 2.6c, la fuerza sobre cada resorte es la misma y el desplazamiento total es:

$$x = x_1 + x_2 = \frac{F}{k_1} + \frac{F}{k_2} = \left(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}\right) F = \frac{f}{k_e} \quad (2.12)$$

entonces k_e equivale a

$$k_e = \left(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}\right) \quad (2.13)$$

Esto es muy útil para determinar la constante de resorte de numerosos elementos estructurales elásticos, se pueden usar las relaciones conocidas entre fuerza y desplazamiento.

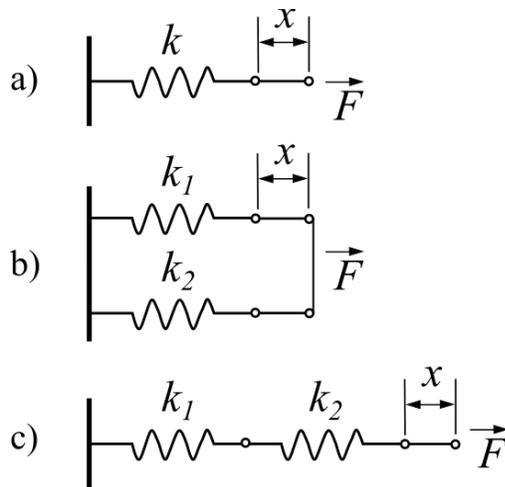


Figura 2.6 Diagrama de resorte a) Resorte simple, b) resortes en paralelo y c) resortes en serie.

2.7.5 Esfuerzo

El esfuerzo o esfuerzo de un material es una medida de la fuerza por unidad de área (en la que se aplica) que causa la deformación. Los objetos que utilizamos a diario son sometidos a diferentes esfuerzos, dependiendo de su diseño, colocación y del conjunto de fuerzas que actúan sobre él. Es preferible medir el esfuerzo directamente, ya sea que la disposición de la prueba sea flexión o tensión; sin embargo, esto es difícil de hacer en muestras tan pequeñas.

Para conocer el esfuerzo en materiales MEMS, se suelen utilizar 3 tipos de pruebas: muestra en un marco de soporte, muestra fijada a una matriz en un extremo; y muestras separado.

- Muestra en un marco de soporte: el dispositivo de tracción se modela sobre la superficie de una oblea, y luego se graba una ventana en la parte posterior de la oblea para exponer la sección del medidor.
- Muestra fijada a una matriz en un extremo: Se utiliza un agarre de fuerza electrostática para evaluar la resistencia a la tracción y la estabilidad de los materiales de película delgada. Consiste en una muestra de tracción fijada en un extremo y el otro extremo de agarre libre (Cheng, Read, McColskey, & Wright, 2005).
- Muestra separada: consiste en recoger un dispositivo de tracción de unas pocas micras de grosor y colocarlo en una máquina de prueba.

Las unidades de los esfuerzos son las que corresponden a fuerza dividida por área [N/m^2], pero el esfuerzo no es un vector sino un tensor. El esfuerzo máximo en el extremo fijo de una viga está dado por la ecuación 2.14.

$$T_{max} = \frac{FLb}{2I} \quad (2.14)$$

Donde F es la fuerza aplicada, I el momento de inercia, L la longitud de la viga y b el ancho de la viga.

2.8 Diseño asistido por computadora y Análisis por el Método de Elemento Finito

La simulación por computadora del comportamiento de los distintos elementos que constituyen un MEMS, o del sistema completo, es parte importante del proceso del proceso de desarrollo. El uso de simulaciones por computadora permite reducir significativamente los tiempos y costos de desarrollo y contribuye a evitar la creación de prototipos fallidos. La fabricación de un MEMS suele ser costosa, por lo tanto, suele llevarse a cabo simulaciones por elemento finito, que es un método numérico para la solución de problemas de ingeniería que involucran un alto grado de complejidad de matemáticas aplicadas y fisicomatemáticas (Jiménez Pérez, 2004), con la finalidad de evitar fabricar dispositivos que no sean funcionales.

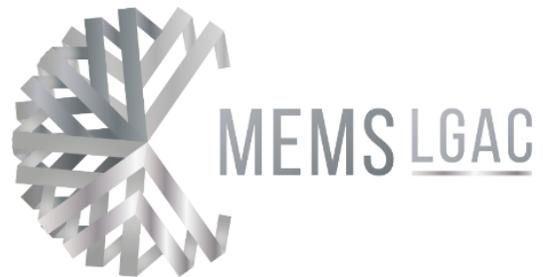
El método se basa en dividir el cuerpo, sobre el que están definidas ciertas ecuaciones integrales que, caracterizan el comportamiento físico del problema, denominados elementos finitos. Dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos llamados nodos. El conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia se conoce como malla.

En este capítulo, se presentaron los conceptos básicos para el desarrollo de esta tesis. Puede observarse que, son necesarios conceptos de diversas áreas debido a la naturaleza de los dispositivos a desarrollar. Se encontraron diferentes formas de brazos de suspensión para acelerómetros capacitivos, y concluimos que es posible diseñar otras geometrías de brazos flexibles con menor volumen que las analizadas.

CAPÍTULO 3

Metodología

En este capítulo se explica la metodología que se llevó a cabo, para lograr los objetivos de esta tesis.



Capítulo 3. Metodología

En este capítulo se explica la metodología que se llevó a cabo para el desarrollo de esta tesis, con la finalidad de lograr el objetivo principal que es: diseñar una geometría de brazo flexible, basada en un arreglo de segmentos de diferente anchura, para acelerómetros capacitivos, el cual sea más flexible que el brazo convencional de ancho uniforme.

Como parte de la metodología se consideró la fabricación y prueba del acelerómetro con mejor desempeño, utilizando PLA. Se fabricó también a un acelerómetro convencional para comparar su desempeño.

3.1 Descripción de la metodología

Para llevar a cabo este proyecto, se siguió la secuencia de pasos que se describe a continuación.

1. Se realizó una revisión en el estado del arte sobre las diferentes geometrías que se han considerado en el diseño de acelerómetros, particularmente en la forma de los brazos que se han utilizado. La intención fue obtener una recopilación crítica de fuentes representativas que nos dieran la pauta para proponer a una geometría diferente, y así poder continuar con el desarrollo del proyecto.
2. Con base en la recopilación obtenida al realizar el análisis del estado del arte, se eligió a un acelerómetro con brazos no uniformes para validar a la forma de brazos que se propone en esta tesis, para comparar su desempeño.
3. Una vez obtenido el acelerómetro de referencia, se procedió a realizar el diseño del brazo no uniforme. Cabe señalar que, para determinar la distribución de masa en el brazo es necesario considerar diferentes proporciones, con la finalidad de seleccionar a la que proporcione el mayor desplazamiento, sin incrementos considerables de tensión o disminución de fuerza.

Metodología

4. El análisis de desempeño del brazo de suspensión se realizó antes de considerar al acelerómetro completo, en una sola sección, que consta solamente de un brazo y un cuarto de la masa suspendida, esto es de un cuarto del acelerómetro.
5. Posteriormente, se analiza el acelerómetro completo, que consta de 4 brazos y una masa suspendida.
6. Se realiza una comparación entre los resultados de la simulación, de cada uno de los acelerómetros (con brazos uniformes simétricos, no simétricos y razón dorada), para seleccionar al de mejor desempeño.
7. Con base en la comparación de desempeño de los tipos de brazos con masas distribuidas diseñados, se selecciona al más adecuado. Se lleva a cabo también, el modelado de este brazo, y los resultados obtenidos de manera analítica se comparan con los de la simulación correspondiente.
8. Con el acelerómetro seleccionado en el punto número 7, se compara su desempeño con el acelerómetro de referencia, que se obtuvo en el paso número 2. Ambos acelerómetros son implementados con material polisilicio.
9. Desafortunadamente no es posible la fabricación a microescala, en el tiempo determinado para el desarrollo de esta tesis, debido al retraso generado, básicamente por la contingencia sanitaria. Con la finalidad de ilustrar el funcionamiento del acelerómetro seleccionado en el paso número 7, para fines ilustrativos, se escalará (escala milimétrica), para su fabricación preliminar en impresión 3D. En este caso, su operación es puramente mecánica.
10. Se realizan las pruebas necesarias para comparar el desempeño de los acelerómetros fabricados en PLA, de acuerdo con el paso número 9.
11. Finalmente, se tienen las conclusiones de acuerdo con los resultados obtenidos.

Este procedimiento se ilustra en la Figura 3.1.

Metodología



Figura 3.1 Metodología.

3.2 Descripción de la implementación, fabricación y prueba del acelerómetro en PLA

Se realiza la implementación de acelerómetro completo en PLA, para comparar al desplazamiento entre el brazo convencional y el simétrico, ante la misma fuerza aplicada en su entrada. Para ello, se realiza lo siguiente:

1. Se escalan los dispositivos a un tamaño milimétrico.
2. Se realiza la impresión en 3D utilizando PLA (ácido poliláctico), material especial para impresión en 3D.

Metodología

3. Se realiza la medición de los desplazamientos en los acelerómetros con ayuda de una plataforma de desplazamiento y un microscopio.
4. Finalmente, los datos obtenidos en la medición son comparados con los resultados de la simulación. Cabe mencionar que, los dispositivos de la simulación también son escalados.

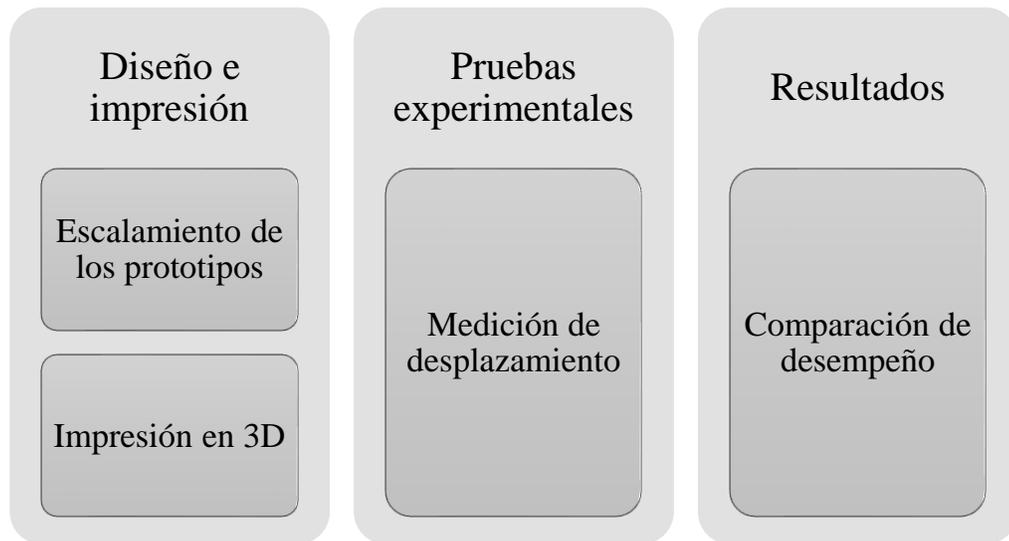


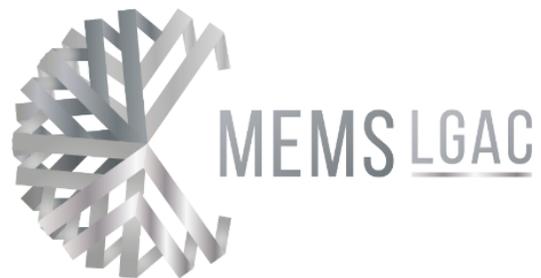
Figura 3.2 Implementación de acelerómetros convencional y uniforme utilizando PLA.

La metodología planteada permitirá observar el desempeño del diseño realizado de forma simulada e implementada en PLA.

CAPÍTULO 4

Diseño de brazos no uniformes

En este capítulo se muestran 3 nuevas geometrías de brazos no uniformes, y características geométricas del sistema masa resorte.



Capítulo 4. Diseño de brazos no uniformes

En este capítulo se muestran 3 geometrías que se caracterizan por un arreglo de segmentos de anchura diferente, con distribución angular similar. Para el posterior análisis del desempeño de los brazos diseñados, se usa al brazo uniforme convencional como referencia. Se presentan, además, las características geométricas del sistema masa-resorte, con un cuarto de masa de prueba, y del acelerómetro completo, los que se implementarán con cada una de las geometrías de brazos diseñados.

4.1. Geometrías de brazo

Después de realizar una investigación en la literatura y encontrar un dispositivo de referencia, se realiza el diseño de los brazos. (Chen, 2010) menciona que, para lograr una alta sensibilidad para el acelerómetro, debe diseñarse un resorte compatible con baja rigidez. En (L. Howell, P. Magleby, & M. Olsen, 2013) Los elementos como las vigas flexibles, se pueden usar como elementos para sustituir a los elementos de cuerpo rígido. Por lo tanto, se realizó el diseño de distintos tipos de brazos con diferentes arreglos de segmentos, obteniendo resortes en serie con diferentes constantes de rigidez. Llamamos a estos diseños:

- A) *Razón Dorada*: parte del número irracional $\varphi = 1.6180339887 \dots$, que describe la proporción de dos segmentos en una recta. En este caso longitud total es dividida en dos partes teniendo como resultado de $525.21 \mu\text{m}$ y $849.789 \mu\text{m}$, cada una de las cuales está sustituida por tres segmentos, dos delgados y uno de grosor igual al de brazo uniforme, que se usa como central.
- B) *Simétrico*: la longitud total del brazo se divide en dos partes iguales, cada una de las cuales está sustituida por tres segmentos, dos delgados y uno de grosor igual al de brazo uniforme, que se usa como central.

C) *No Simétrico*: se divide a la longitud total en tercios y se distribuye a la masa en el primer tercio, y en los dos restantes, como si fuera una sola parte.

Todos los brazos tienen $L=1375 \mu\text{m}$ y $a=70 \mu\text{m}$, la distribución de los segmentos de cada una de las geometrías de brazos se resume en la Tabla 3.2. Para su posterior comparación de desempeño, se presenta también al brazo uniforme.

El diseño de los brazos se apoya en el uso de la herramienta *Geometry* del software ANSYS Workbench.

4.1.1 Brazo uniforme o convencional

Consiste en un brazo rectangular completamente uniforme, con una longitud $L=1375 \mu\text{m}$ y dimensión $b=60 \mu\text{m}$ fijado a un ancla de $100 \times 100 \mu\text{m}^2$. El diseño se muestra en la Figura 3.3.

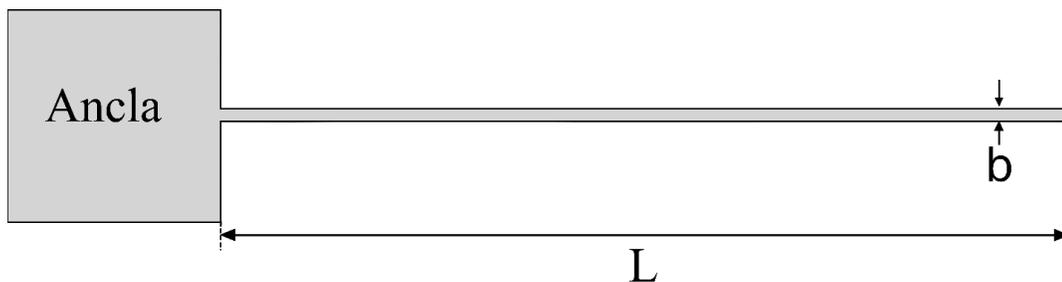


Figura 4.1 Brazo convencional con longitud L y altura b .

4.1.2 Brazo con proporciones basadas en la razón dorada

Consiste en la implementación de un brazo con longitud $L=1375 \mu\text{m}$, se tiene el arreglo geométrico de la razón dorada, la longitud es seccionada en 6 partes. Los segmentos L_1 , L_2 , L_3 y L_4 tienen una dimensión de $b_1=20 \mu\text{m}$, L_2 y L_5 tienen una dimensión de $b_2=60 \mu\text{m}$. El diseño del arreglo se muestra en la Figura 3.4 (donde $\theta_1=1^\circ$ y $\theta_2=178^\circ$).

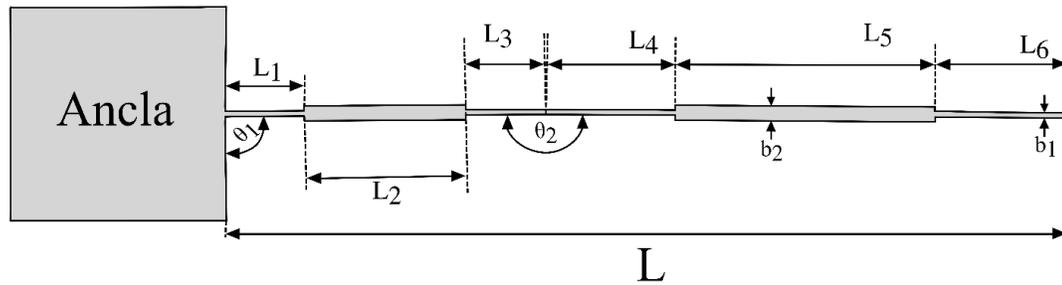


Figura 4.2 Brazo con arreglo de Razón dorada

4.1.3 Brazo simétrico

Este arreglo de brazo, de manera similar al caso de la razón dorada, está seccionado en 6 partes, $L_1 = L_3 = L_4 = L_6 = L/12$, mientras que $L_2 = L_5 = L/3$. Los segmentos L_1, L_2, L_3 y L_4 tienen una dimensión de $b_1 = 20 \mu\text{m}$ y L_2 y L_5 tienen una dimensión de $b_2 = 60 \mu\text{m}$. En la Figura 4.3 se muestra el arreglo obtenido, donde nuevamente $\theta_1 = 1^\circ$ y $\theta_2 = 178^\circ$.

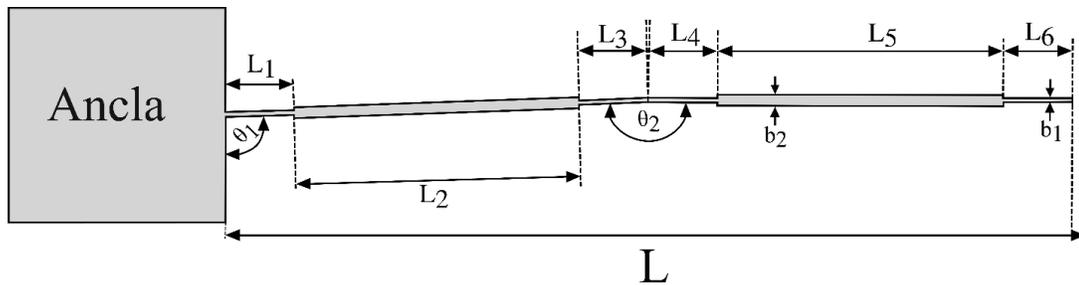


Figura 4.3 Diseño de brazo simétrico con un arreglo de seis secciones diferentes.

4.1.4 Brazo no simétrico

De manera similar a los diseños anteriormente mencionados, el brazo simétrico cuenta con 6 segmentos, $L_1 = L_3 = L_4 = L_6 = L/12$, $L_2 = L/6$ y $L_5 = L/2$. Los segmentos L_1, L_2, L_3 y L_4 tienen una dimensión de $b_1 = 20 \mu\text{m}$ y L_2 y L_5 tienen una dimensión de $b_2 = 60 \mu\text{m}$. En la Figura 4.4 se muestra el arreglo obtenido, donde nuevamente $\theta_1 = 1^\circ$ y $\theta_2 = 178^\circ$.

Diseño de brazos no uniformes

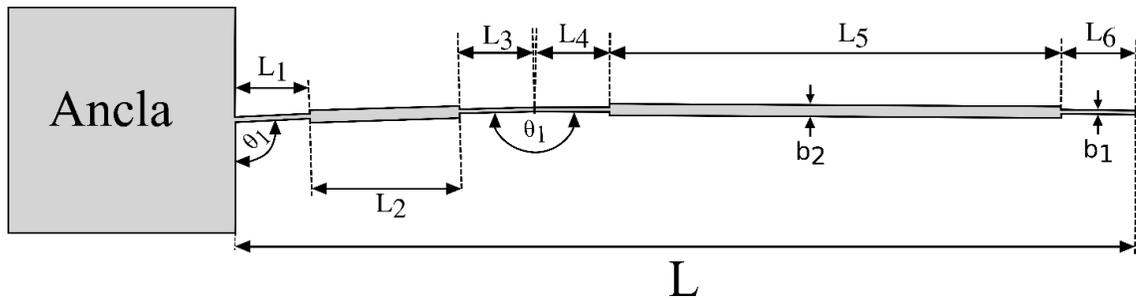


Figura 4.4 Diseño de brazo no simétrico con un arreglo de seis secciones diferentes.

Tabla 4.1 Dimensiones de los segmentos de cada brazo.

Brazo	Convencional		Razón dorada		Simétrico		No simétrico	
Segmento	L (μm)	b (μm)	L (μm)	b (μm)	L (μm)	b (μm)	L (μm)	b (μm)
L1	0	0	131.29	20	171.86	20	171.86	20
L2	0	0	262.59	60	343.73	60	229.17	60
L3	0	0	131.47	20	171.86	20	171.86	20
L4	0	0	212.46	20	171.86	20	171.86	20
L5	0	0	424.92	60	343.73	60	687.50	60
L6	0	0	212.46	20	171.86	20	171.86	20
L total (μm)		1375		1375		1375		1375
a (μm)		70		70		70		70

La implementación del diseño general de los brazos en *Geometry*, ANSYS se muestra en el anexo A.

4.2 Diseño del sistema masa-resorte, con $\frac{1}{4}$ de masa

Para el diseño del sistema masa-resorte se utilizaron las geometrías de brazo mencionadas anteriormente, con las mismas dimensiones. Para realizar el análisis individual de cada uno de los brazos, antes de hacer el análisis del acelerómetro completo, se consideró solamente al brazo y a un cuarto de la masa de prueba. Se

Diseño de brazos no uniformes

agregó el cuarto de masa de prueba al extremo guiado del brazo. Las dimensiones del cuarto de masa de prueba son 1960 μm de longitud, 1480 μm de ancho y 70 μm de grosor (en dirección Z), para fines de comparación con (Majid, y otros, 2019). El sistema masa-resorte con brazo no simétrico se muestra en la Figura 4.5.

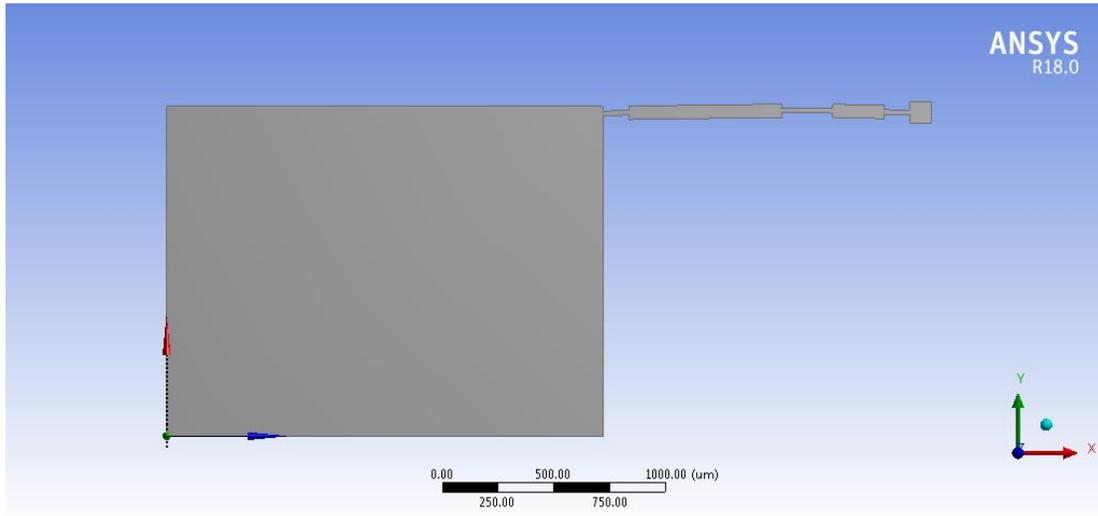


Figura 4.5 Masa suspendida por un brazo no simétrico, fijo en su extremo mediante un ancla. Diseño en ANSYS.

4.3 Diseño del acelerómetro completo

Un acelerómetro capacitivo convencional está formado de una masa de prueba o masa suspendida, por 4 brazos de suspensión, los cuales están anclados en sus extremos. En la Figura 4.6, se consideraron brazos con geometría no simétrica. Las dimensiones de la masa de prueba son 3920 μm de largo, 2960 μm de ancho y 70 μm de grosor. Las anclas son de 100 x 100 μm^2 con el mismo grosor de 70 μm .

Diseño de brazos no uniformes

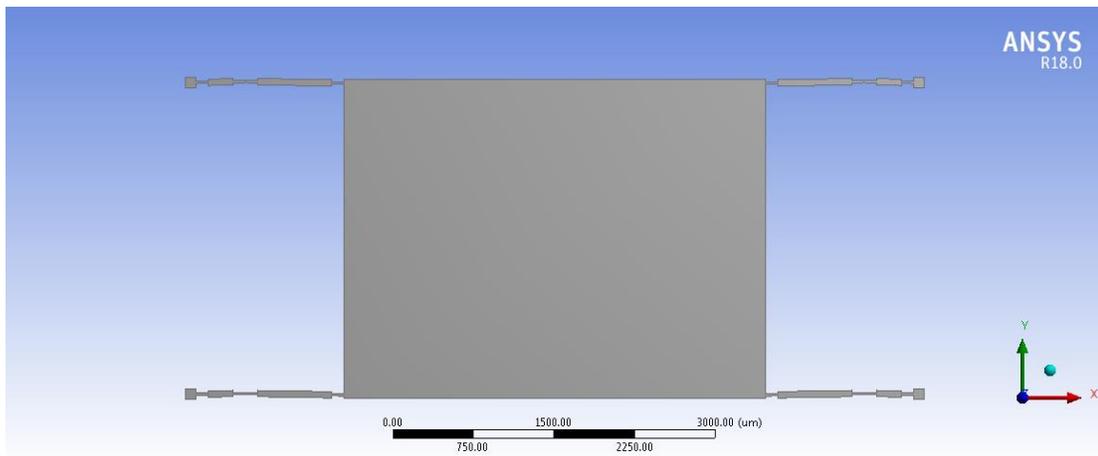


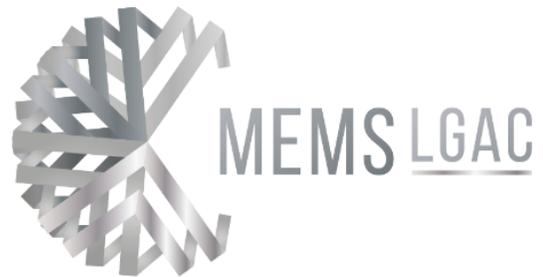
Figura 4.6 Masa suspendida por 4 brazos no simétricos, fijos en sus extremos mediante anclas. Diseño en ANSYS.

En este capítulo, se presentaron a cada una de las nuevas geometrías de brazo a analizar. Además, se presentaron los sistemas en los que se implementan para su posterior análisis de desempeño, un sistema masa-resorte, con $\frac{1}{4}$ de masa de prueba, así como un acelerómetro completo, el cual, también es un sistema masa-resorte.

CAPÍTULO 5

Resultados

En este capítulo se muestran los resultados de los cálculos teóricos y los obtenidos de la simulación. Se presentan también los resultados obtenidos de la implementación de los diseños escalados e impresos en PLA.



Capítulo 5. Resultados

En este capítulo se muestran los resultados de los cálculos teóricos y los obtenidos de la simulación, utilizando ANSYS, para cada una de las geometrías de brazo diseñadas utilizando como material estructural a polisilicio.

También se muestran los resultados del sistema masa-resorte, considerando $\frac{1}{4}$ de masa de prueba, y un acelerómetro capacitivo completo. Se utilizan las propiedades del polisilicio para la comparación de los brazos diseñados.

Debido a que no es posible llevar a cabo la microfabricación, se escala la geometría seleccionada utilizando PLA, para la comparación de desempeño comparando con un acelerómetro similar de brazos uniformes.

5.1 Resultados de los brazos

5.1.1 Resultados teóricos

Para calcular los momentos de inercia y las constantes de rigidez de cada uno de los segmentos de los brazos, se emplean las ecuaciones 5.1 y 5.2. El cálculo de la constante de rigidez total de cada brazo, considerando elementos (resortes) en serie, se calculó a partir de la ecuación 5.3.

$$I = \frac{ab^3}{12} \quad (5.1)$$

$$k_c = \frac{l_c^3}{3EI} \quad (5.2)$$

$$k_e = \left(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} \right) \quad (5.3)$$

Los momentos de inercia I y constantes de rigidez k calculados para cada brazo se muestran en la Tabla 4.1. El momento de inercia del brazo convencional fue de 1.26×10^{-14} kg m, y su constante de rigidez total de 4.89×10^5 N/m. Las constantes de rigidez para

Resultados

el brazo con geometría basada en la razón dorada y arreglo simétrico fueron menores al convencional y muy cercanos, alcanzando valores de 2.4432×10^5 N/m y 2.4438×10^5 N/m, respectivamente. El brazo no simétrico tuvo una constante de rigidez total de 2.26×10^5 .

Tabla 5.1 Momentos de inercia I y constantes de rigidez k de cada sección de los brazos y total.

Brazo	Convencional		Razón dorada		Simétrico		No simétrico	
	M. inercia (kg m)	C. de rigidez (N/m)	M. inercia (kg m)	C. de rigidez (N/m)	M. inercia (kg m)	C. de rigidez (N/m)	M. inercia (kg m)	C. de rigidez (N/m)
L ₁	-	-	4.6×10^{-20}	1.70×10^6	4.6×10^{-20}	1.30×10^6	4.6×10^{-20}	1.3×10^6
L ₂	-	-	1.2×10^{-18}	2.55×10^6	1.2×10^{-18}	1.95×10^6	1.2×10^{-18}	2.9×10^6
L ₃	-	-	4.6×10^{-20}	1.70×10^6	4.6×10^{-20}	1.30×10^6	4.6×10^{-20}	1.3×10^6
L ₄	-	-	4.6×10^{-20}	1.05×10^6	4.6×10^{-20}	1.30×10^6	4.6×10^{-20}	1.3×10^6
L ₅	-	-	1.2×10^{-18}	1.58×10^6	1.2×10^{-18}	1.95×10^6	1.2×10^{-18}	9.7×10^5
L ₆	-	-	4.6×10^{-20}	1.05×10^6	4.6×10^{-20}	1.30×10^6	4.6×10^{-20}	1.3×10^6
L total	1.26×10^{-18}	4.89×10^5	2.71×10^{-18}	2.44×10^5	2.71×10^{-18}	2.44×10^5	2.71×10^{-18}	2.2×10^5

Para calcular la masa, el desplazamiento máximo, el esfuerzo máximo y la fuerza se utilizan las ecuaciones 5.4-5.7. Los resultados se presentan en la Tabla 5.2. La masa de cada brazo es diferente siendo mayor la del brazo convencional, el mayor desplazamiento analítico se da en el brazo simétrico con 4.6840×10^{-9} m. Sin embargo, su esfuerzo es también el mayor, siendo éste de 2.34×10^4 N/m² y una fuerza igual a 8.80×10^{-8} N.

$$m = V\rho \quad (5.4)$$

$$x \approx \frac{ma}{k} = \frac{a}{\omega_0^2} \quad (5.5)$$

$$F = ma \quad (5.6)$$

$$T_{max} = \frac{Flb}{2I} \quad (5.7)$$

Resultados

Tabla 5.2 Resultados teóricos de masa, desplazamiento, esfuerzo y fuerza de los brazos.

Parámetro	Convencional	Razón dorada	Simétrico	No simétrico
Masa (kg)	13.4×10^{-9}	8.97×10^{-9}	8.97×10^{-9}	11.2×10^{-9}
Desplazamiento máximo (nm)	0.56	2.47	4.68	3.10
Esfuerzo (N/m ²)	4.30×10^3	18×10^3	23.4×10^3	23.2×10^3
Fuerza total (nN)	132	88	88	110

5.1.2 Resultados de la simulación

Se realizó la simulación en ANSYS para observar los diferentes comportamientos de cada brazo. Para realizar la simulación de los brazos, se llevó a cabo lo siguiente:

1. Se creó una librería con las propiedades del polisilicio en ANSYS Workbench,
2. Después, en la herramienta *static structural*, se establecieron el material del brazo y las condiciones de frontera tales como: extremo fijo del brazo y la aceleración aplicada, de $-9.81 \text{ m/s}^2 = 1 \text{ G}$, en la dirección Y.
3. Posteriormente, se le aplicó un refinamiento de malla para obtener la deformación del brazo, equivalente al desplazamiento máximo en su extremo guiado. Además, se obtiene el esfuerzo presente en el brazo y la fuerza de reacción en el brazo.

El desplazamiento máximo se dio en el extremo libre (guiado) de cada brazo, mientras que el esfuerzo máximo se encontró muy cerca del extremo donde se encuentra el ancla. El brazo convencional es el cuerpo más rígido, ya que el desplazamiento fue el menor, y este provocó un esfuerzo de 2226.8 N/m^2 . Los brazos con arreglo razón dorada y simétrico tuvieron desplazamientos casi iguales, sin embargo, en la razón dorada se obtuvo un esfuerzo de 12518 N/m^2 y en el simétrico fue de 12633 N/m^2 . Esto quiere decir que, la razón dorada tiene un mejor desempeño que el simétrico al tener aproximadamente la misma flexibilidad, pero menor esfuerzo. El brazo con mayor

Resultados

desplazamiento fue el no simétrico con un total de 2.47 nm y su esfuerzo máximo fue de 15374 N/m².

En cuanto a la fuerza, el brazo con geometría convencional es el que obtuvo mayor fuerza de reacción con un total de 131 nN. En el brazo de la razón dorada y simétrico también se encontraron las fuerzas de reacción muy parecidas siendo estas de 85.4 nN y 84.8 nN respectivamente. El brazo no simétrico tuvo una fuerza de reacción de 100 nN.

Los valores obtenidos de la simulación de cada brazo se presentan en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3 Resultados de masa, desplazamiento máximo, esfuerzo y fuerza total de los brazos obtenidos de la simulación.

Parámetro	Convencional	Razón dorada	Simétrico	No simétrico
Masa (kg)	15x10 ⁻⁹	10.6x10 ⁻⁹	10.6x10 ⁻⁹	12.8x10 ⁻⁹
Desplazamiento máximo (nm)	0.21	2.16	2.16	2.47
Esfuerzo (N/m ²)	2226.80	12518	12518	15374
Fuerza total (nN)	131	85.4	84.8	100

Comparando los resultados analíticos con los resultados obtenidos en la simulación se tiene que la masa es un poco mayor en todos los brazos, esto es debido a que en la forma analítica solo se consideró la masa de brazo y en la simulación se considera la masa de los brazos y del ancla, siendo esta última 1.63x10⁻⁹ kg. En cuanto al desplazamiento, se tenía previsto que el brazo simétrico tendría mayor deformación en la forma analítica, pero en la simulación se tuvo menor de lo esperado, esto sucedió para todos los brazos. En cuanto a la fuerza, el error máximo fue de 9.09% en el brazo No Simétrico. La Tabla 5.4 muestra la comparación mencionada.

Resultados

Tabla 5.4 Comparación entre resultados teórico y simulados de los brazos.

Parámetro	Convencional	Razón dorada	Simétrico	No simétrico
Masa (%)	11.94	18.17	18.17	14.29
Desplazamiento máximo (%)	62.50	12.55	53.85	20.32
Esfuerzo (%)	48.21	30.46	46.50	33.73
Fuerza total (%)	0.76	2.95	3.64	9.09

5.2 Resultados del sistema masa-resorte con 1/4 de masa

5.2.1 Resultados teóricos

Considerando a este sistema, se aplica una aceleración de 1 G, con lo cual, se calcula la masa, la fuerza, la deformación del brazo en el extremo guiado y el esfuerzo en el extremo fijo. Las ecuaciones que se utilizaron son 5.8-5.11. La masa solo corresponde a la masa de prueba del sistema.

$$m = V\rho \quad (5.8)$$

$$F = ma \quad (5.9)$$

$$x(L_{b_total}) = [x(L_1) + x(L_2)]\Delta \quad (5.10)$$

$$x(L_1) = \left(\frac{F}{E I b_1}\right) \left\{ \frac{(nL_1^2) \left(nL_1 + \frac{L_m}{2}\right)}{2} - \frac{nL_1^3}{6} \right\}$$

$$x(L_2) = \left(\frac{F}{E I b_2}\right) \left\{ \frac{(nL_2^2) \left(nL_2 + \frac{L_m}{2}\right)}{2} - \frac{nL_2^3}{6} \right\}$$

$$T_{\max,\tau} = (T_{L1} + T_{L2})(1.\tau), T_{L1} = \frac{nb_1L_1F}{2Ib_1} \text{ y } T_{L2} = \frac{nb_2L_2F}{2Ib_2} \quad (5.11)$$

Considerando L_m la longitud de la masa, $L_1=L_3=L_4=L_6$ y $L_2=L_5$ es la longitud de cada segmento del brazo, b_1 y b_2 son los anchos de los brazos, n es el número de segmentos

Resultados

de misma proporción, Δ es un factor de corrección de 10, $\tau=.25$ que equivale a $\frac{1}{4}$ del acelerómetro a analizar. Las ecuaciones anteriores fueron generalizadas a partir de la metodología presentada en (Kaajakari, 2009).

Los resultados de los cálculos en el sistema masa-resorte para cada brazo se presentan en la Tabla 5.5. En el brazo simétrico se obtiene un mayor desplazamiento con un total de 633.37 nm, también se tiene un mayor esfuerzo en el extremo fijo con 1.23×10^6 N/m².

Tabla 5.5 Resultados teóricos del sistema masa-resorte, con $\frac{1}{4}$ de masa.

Parámetro	Convencional	Razón dorada	Simétrico	No simétrico
Masa (kg)	4.7292×10^{-7}	4.7292×10^{-7}	4.7292×10^{-7}	4.7292×10^{-7}
Desplazamiento máximo (nm)	41.26	537.95	633.37	549.89
Esfuerzo (N/m ²)	1.52×10^5	9.49×10^5	1.23×10^6	9.81×10^5
Fuerza total (μ N)	4.63	4.63	4.63	4.63

5.2.2 Resultados de la simulación

En esta subsección, se siguió el mismo procedimiento descrito para la simulación de los brazos. Se aplicó una aceleración de 1 g, al sistema masa-resorte, con lo cual, se calculó el desplazamiento del extremo de brazo guiado, el esfuerzo máximo y la fuerza. Los resultados obtenidos en la simulación de los brazos con $\frac{1}{4}$ de la masa de prueba se muestran en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6 Resultados del sistema masa-resorte, con $\frac{1}{4}$ de masa, obtenidos de la simulación.

Parámetro	Convencional	Razón dorada	Simétrico	No simétrico
Masa (kg)	488×10^{-9}	4.84×10^{-9}	4.84×10^{-9}	4.86×10^{-9}
Desplazamiento máximo (nm)	41.6	598	603	505
Esfuerzo (N/m ²)	1.47×10^5	1.30×10^6	1.21×10^6	1.16×10^6
Fuerza total (μ N)	4.75	4.68	4.68	4.69

Resultados

La Tabla 5.7 permite ver el porcentaje de error entre el análisis teórico y simulado de los brazos con $\frac{1}{4}$ de masa. El brazo con mejor desempeño fue el simétrico, tuvo una mayor deformación en el extremo guiado igual a 603 nm y un esfuerzo de 1.21×10^{-6} N/m en el extremo fijo del brazo. Así mismo, comparando los resultados calculados con los resultados de la simulación de este brazo, se tiene un error de 5.04 % en el desplazamiento y 5.26 % en el esfuerzo.

Tabla 5.7 porcentajes de error entre resultados analíticos y resultados simulados de cada sistema masa-resorte aplicando 1 G.

Parámetro	Convencional	Razón dorada	Simétrico	No simétrico
Masa (%)	3.09	2.29	2.29	2.69
Desplazamiento máximo (%)	0.82	10.04	5.04	8.89
Esfuerzo (%)	2.94	27.15	5.26	18.28
Fuerza total (%)	2.53	1.07	1.07	1.28

Al tener los resultados de cada brazo, se seleccionó el sistema masa-resorte con brazo simétrico para aplicarle una parametrización de 1 g hasta 30 g de forma analítica y simulada, lo que permitirá ver el incremento de la deformación del brazo, el esfuerzo en el extremo fijo y la fuerza de reacción. Las gráficas en las Figuras 5.1, 5.2 y 5.3 muestran el comportamiento del sistema de masa-resorte con brazo simétrico, con una aceleración aplicada de 1 G hasta 30 G de forma analítica y simulada, y con porcentajes de error. En la Figura 5.1 se tiene la deformación en el extremo guiado del brazo. La Figura 5.2 muestra el esfuerzo y la Figura 5.3 muestra la fuerza.

Resultados

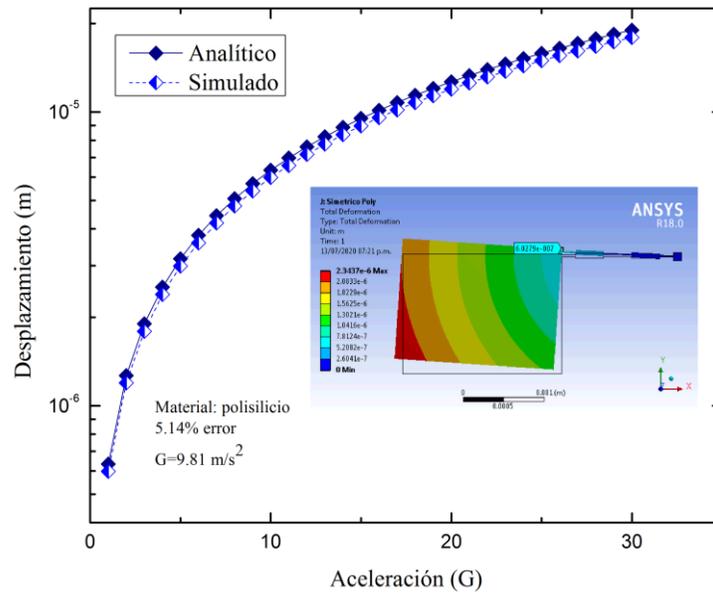


Figura 5.1 Gráfica del cambio de la deformación en el extremo guiado, analítico y simulado con respecto al cambio de la aceleración en el sistema masa-resorte con brazo simétrico.

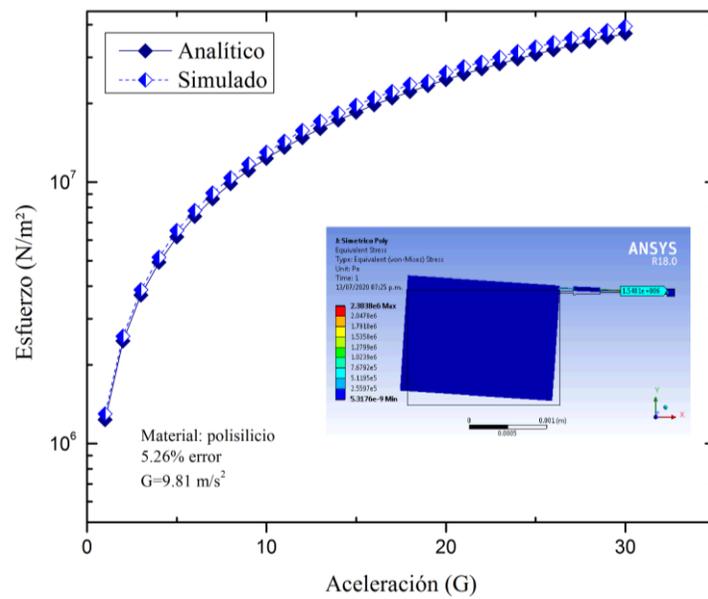


Figura 5.2 Gráfica del cambio del esfuerzo analítico y simulado con respecto al cambio de la aceleración en el sistema masa-resorte con brazo simétrico.

Resultados

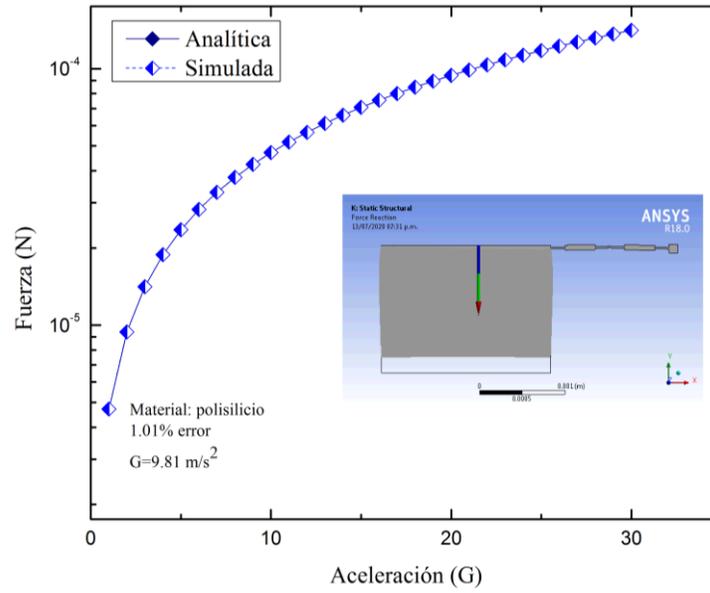


Figura 5.3 Gráfica del cambio de la fuerza obtenida de forma analítica y simulada con respecto al cambio de la aceleración en el sistema masa-resorte con brazo simétrico.

5.3 Resultados del acelerómetro capacitivo completo

5.3.1 Resultados teóricos

Considerando a este sistema completo, se aplica 1 G, con lo cual, se calcula la fuerza, el esfuerzo máximo en el extremo fijo y la deformación del brazo en el extremo guiado del dispositivo, en este caso, el acelerómetro capacitivo con brazos simétricos. Los resultados de los cálculos se presentan en la Tabla 5.8.

Cabe mencionar que, el análisis teórico solo se realizó para el acelerómetro con brazos simétricos debido a que las ecuaciones ya han sido implementadas en (Tecpoyotl-Torres, Vargas-Chable, Sandoval-Reyes, Rodríguez-Fuentes, & Cabello-Ruiz, 2020) para ese arreglo de brazo.

$$F = ma = mg = (2L_m)(2W_m)a_l\rho = 4a_l(L_mW_m\rho)g \quad (5.11)$$

$$T_{max} = N \left[\left(\frac{EW_b}{2L_b^2} \right) x \right] \quad (5.12)$$

Resultados

$$k = N \left(\frac{E}{11} \right) \left(\frac{I_1 I_2}{2L_1^3 I_2 + L_2^3 I_1} \right), \quad I_1 = \frac{a_l b_1^3}{12} \quad \text{y} \quad I_2 = \frac{a_l b_2^3}{12} \quad (5.13)$$

donde a_l es la longitud transversal y b es el grosor en la dirección de la deflexión del brazo, L_m y W_m son la longitud y el ancho de la masa de prueba, N el número de brazos que sostienen a la masa de prueba del acelerómetro y g es la gravedad. Una vez calculada la fuerza F y la rigidez total k puede calcularse el desplazamiento en el brazo bajo análisis, así como el esfuerzo máximo en su extremo fijo T_{max} .

Tabla 5.8 Resultados teóricos del acelerómetro con brazos simétricos aplicando 1g.

Parámetro	Simétrico
Masa (kg)	1.89×10^{-6}
Desplazamiento máximo (nm)	79.6
Esfuerzo (N/m ²)	2.70×10^5
Fuerza total (μN)	18.6

5.3.2 Resultados de la simulación

En esta subsección, se siguió el mismo procedimiento descrito para la simulación del sistema masa-resorte. Se aplicó una aceleración de 1 G al dispositivo, con lo cual, se calculó la fuerza, el esfuerzo máximo, y el desplazamiento del extremo guiado del brazo. En la Tabla 5.9, se muestran los diferentes resultados obtenidos en la simulación para todos acelerómetros diseñados. El acelerómetro con mayor desplazamiento fue el simétrico, teniendo una deformación en el brazo de 83.7 nm en el extremo guiado, el esfuerzo en su extremo fijo fue de 2.90×10^5 N/m².

Resultados

Tabla 5.9 Resultados del acelerómetro, con diferentes geometrías de brazo, obtenidos de la simulación.

Parámetro	Convencional	Razón dorada	Simétrico	No simétrico
Masa (kg)	1.944×10^{-6}	1.9266×10^{-6}	1.9266×10^{-6}	1.9325×10^{-6}
Desplazamiento máximo (nm)	5.40	79.9	83.7	59.4
Esfuerzo (N/m ²)	4.55×10^4	4.47×10^5	2.90×10^5	3.97×10^5
Fuerza total (μN)	18.9	18.7	18.7	18.7

Al parametrizar la aceleración para ver el cambio de la deformación en el extremo guiado de cualquier brazo del acelerómetro, considerando como referencia la deformación del acelerómetro con brazos convencionales, y comparando el incremento de los acelerómetros con brazos razón dorada, simétrico y no simétrico, se tiene un incremento de: 1379.63 % en la Razón Dorada, 1450 % en el Simétrico, 1000% en el No simétrico. El resultado de la parametrización se muestra en la gráfica de la Figura 5.4.

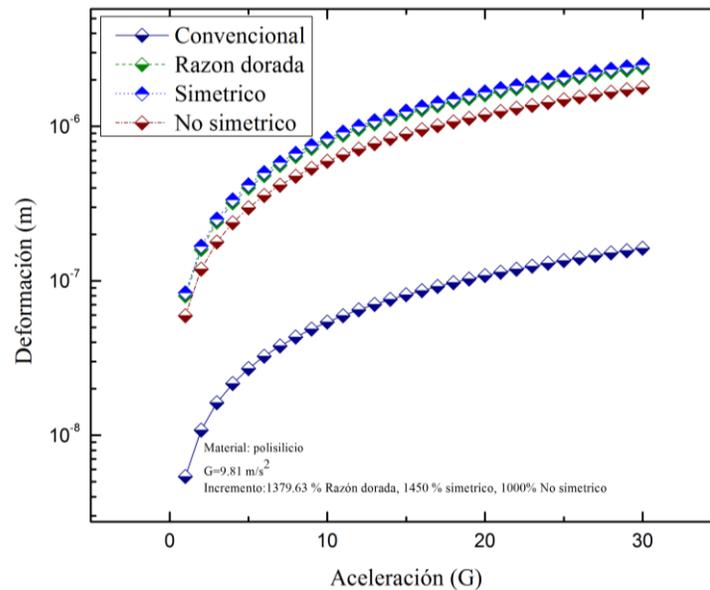


Figura 5.4 Gráfica del cambio de la deformación en brazo Convencional, Razón Dorada, Simétrico y No Simétrico, considerando el acelerómetro completo, con respecto al cambio de la aceleración de 1 G hasta 30 G.

Resultados

En la gráfica de la Figura 5.5 se muestra el esfuerzo en el acelerómetro simétrico con la misma parametrización de 1 G a 30 G. El desplazamiento que se obtuvo en la masa de prueba a 1 G fue de 83.661 nm como se muestra en la Figura 5.6. el máximo esfuerzo en el acelerómetro se dio muy cerca de los extremos guiados del brazo, teniendo $7.11 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ con 1 G aplicada, mostrado en la Figura 5.7. Se obtuvo un esfuerzo de $2.13 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ al aplicar 30 G, como se muestra en la Figura 5.8, lo cual indica que no está cerca del límite de ruptura (Sharpe, Turner, & Edwards, 1999).

Se aplicó la misma parametrización, para visualizar como cambia la fuerza calculada de manera analítica y simulada, con respecto al cambio en la aceleración. Los resultados se presentan en la Figura 5.9, mostrando un error de 0.53 % entre ambas aproximaciones.

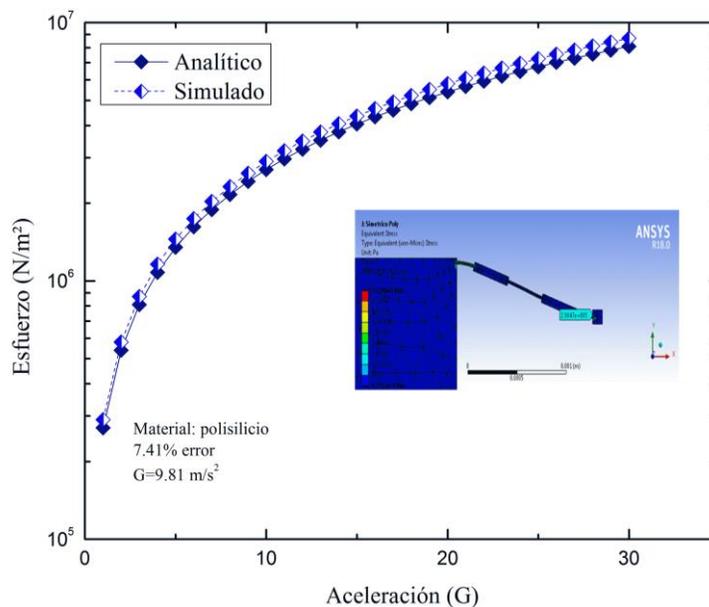


Figura 5.5 Gráfica del cambio de la fuerza obtenida de forma analítica y simulada con respecto al cambio de la aceleración en el sistema masa-resorte con brazo simétrico.

Resultados

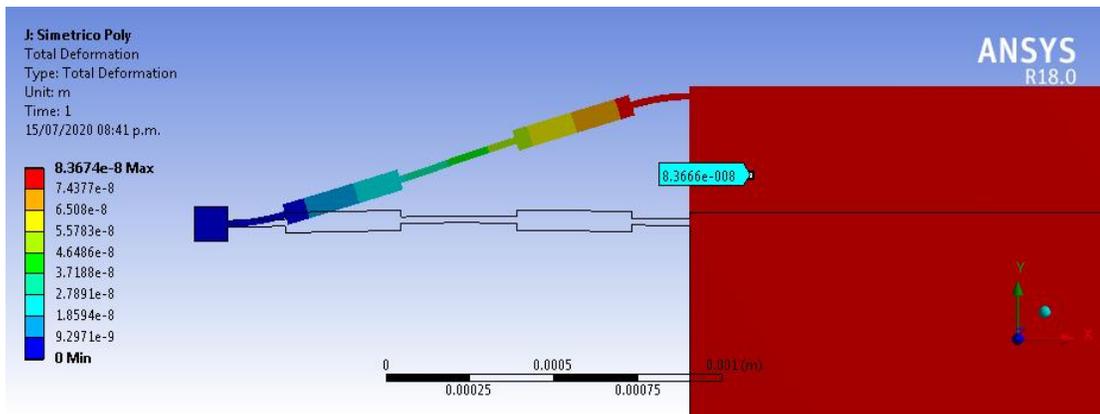


Figura 5.6 Desplazamiento máximo de 83.66 nm en la masa de prueba del acelerómetro con brazos simétricos con 1G aplicada.

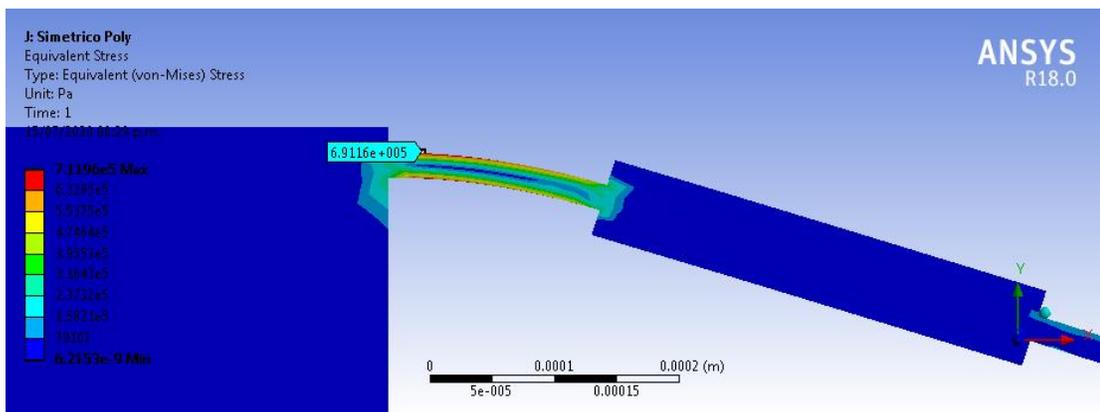


Figura 5.7 Esfuerzo máximo igual a 7.11×10^5 N/m² cerca del extremo guiado, en acelerómetro con brazos simétricos a 1 G.

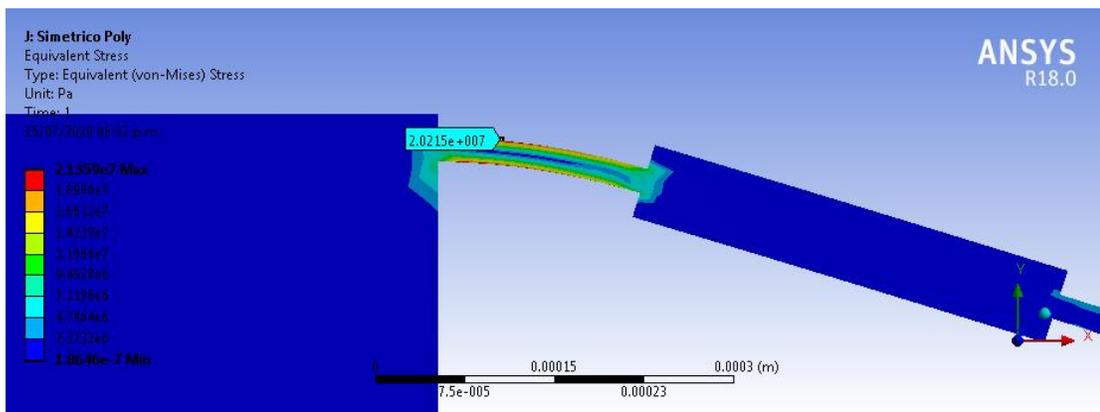


Figura 5.8 Esfuerzo máximo de 2.13×10^7 N/m² cerca del extremo guiado, en acelerómetro con brazos simétricos a 30 G.

Resultados

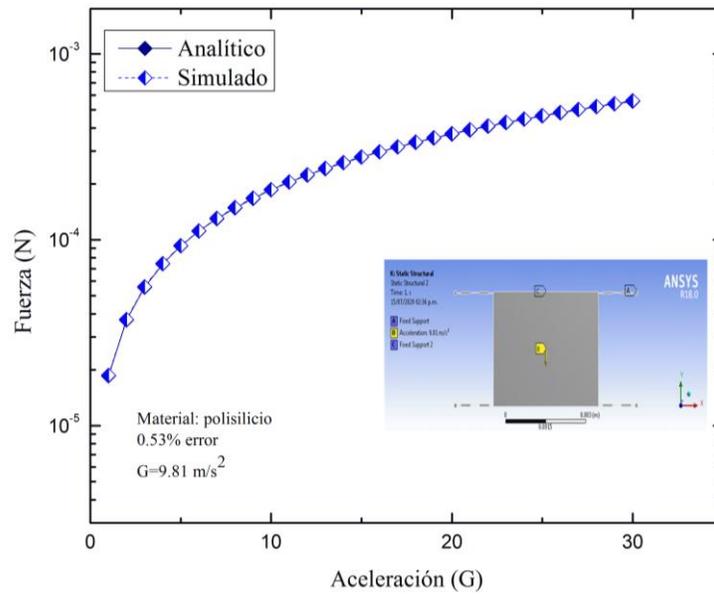


Figura 5.9 Gráfica del cambio de la fuerza obtenida de forma analítica y simulada con respecto al cambio de la aceleración en el sistema masa-resorte con brazo simétrico.

Para conocer la frecuencia natural del acelerómetro con brazo simétrico, en la herramienta *modal* de ANSYS, se aplicaron las mismas condiciones al brazo, con excepción de la aceleración aplicada, para obtener la frecuencia natural en cada uno de los modos analizados. Se selecciona al modo de operación de acuerdo con su desempeño para la aplicación seleccionada, en este caso el primer modo satisface los requerimientos con una frecuencia natural de 1725.8 Hz, como se muestra en la Figura 5.10.

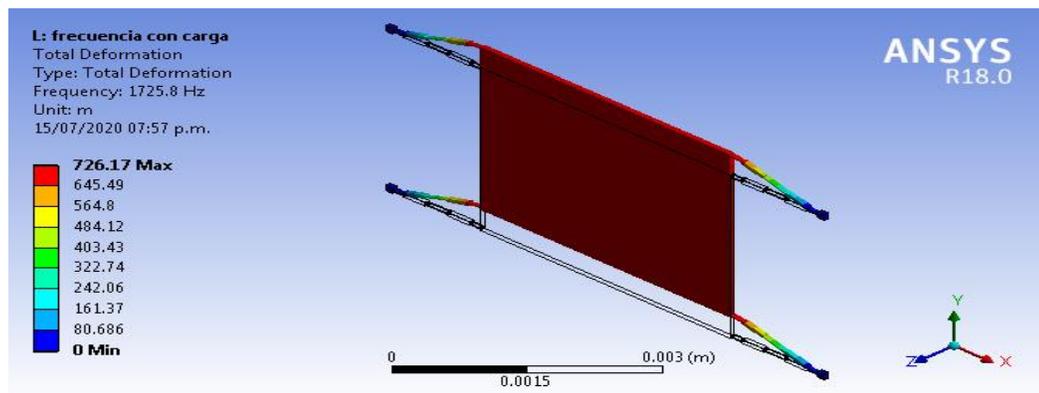


Figura 5.10 Forma modal con frecuencia natural de 1725.8 Hz del acelerómetro con brazos simétricos.

5.4 Implementación de acelerómetros en PLA

Se realizó la implementación de acelerómetro completo en PLA, para comparar la mejora en el desplazamiento entre el brazo convencional y el simétrico, para ello, fue necesario escalar a los acelerómetros implementados anteriormente en silicio, 25 veces, e implementar, y usar una librería en ANSYS con las propiedades del PLA.

Este escalamiento fue necesario ya que la impresora para impresión 3D tiene limitantes en cuanto a la dimensión transversal de las líneas a imprimir, y los brazos simétricos son delgados. Las pruebas se realizaron mediante simulación y experimentación. Se agregaron modificaciones en los brazos simétricos, utilizando en la proporción delgada denominada b_2 , como sigue: $b_2 = (1/2)b_1$, $b_2 = (1/3)b_1$.

5.4.1 Resultados simulados de acelerómetros en PLA.

Para obtener los resultados simulados de los acelerómetros, se agregó una nueva librería con las propiedades del PLA, con módulo de Young de 3600 MPa, razón de Poisson de 0.4 y densidad de 1.25 g/cm^3 obtenidas de (Molina Gutierrez, Crespí Adrover, Valero Pardo, & Ibáñez Felip, 2018). Se fijaron las anclas y se aplicó un barrido en los valores de fuerza de carga (parametrización con 10 valores) a los dispositivos escalados. La fuerza aplicada en la masa de prueba fue de 0.39 N a 3.67 N, y fue calculada con la ley de Hooke $F = k * x$, teniendo k un valor de 934.1143701 N*m y $x = (\text{Desplazamiento inicial} - \text{desplazamiento de la aguja})$, con incrementos de $500 \mu\text{m}$. Se considera que, la separación entre cada línea de la regla es de 0.141 mm, se obtienen los resultados de desplazamiento de la aguja.

Aplicando una fuerza igual a 0.39 N a los acelerómetros, el desplazamiento en la masa de prueba del acelerómetro convencional fue de 0.158 mm, mientras que en el acelerómetro simétrico con brazos con $b_2=(1/2)b_1$ se obtuvo 0.98 mm, que es un incremento de 520.33%. Para el acelerómetro con $b_2=(1/3)b_1$ se obtuvo un

Resultados

desplazamiento de 3.02 mm, con un incremento de 1805% con respecto al convencional. En la gráfica de la Figura 5.11 se muestran los resultados que se tienen en el desplazamiento de la masa al aplicar la parametrización de la fuerza de 0.39 N a 3.67 N.

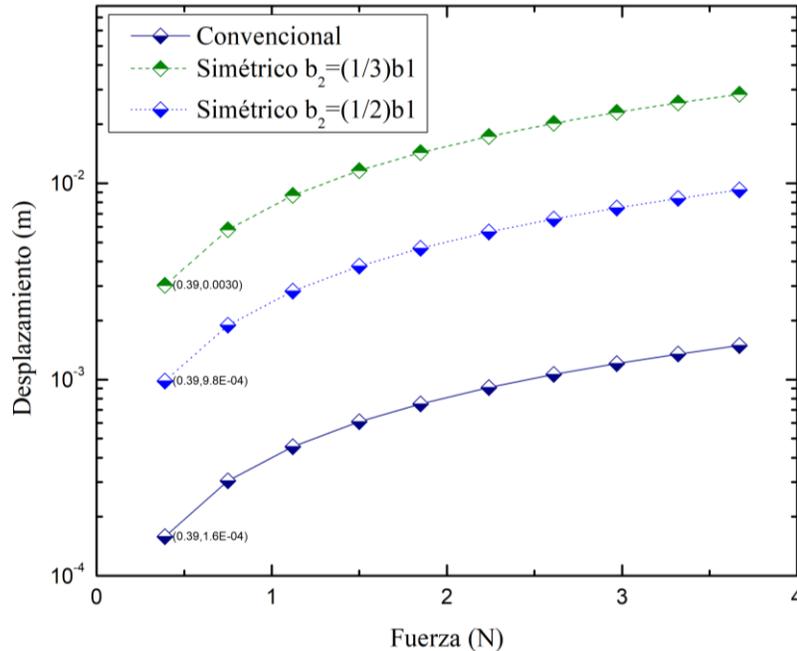


Figura 5.11 Gráfica del desplazamiento en función de la fuerza aplicada en acelerómetros convencional y simétrico, obtenida de forma simulada.

5.4.2 Resultados experimentales de acelerómetros en PLA.

Para realizar la medición de desplazamiento, el dispositivo fue sujetado de las anclas. En uno de los extremos se colocó la plataforma de desplazamiento milimétrico, se aplicó una fuerza a la masa de prueba del acelerómetro y ésta fue desplazada. En el otro extremo de la masa de prueba se fijó una aguja que apunta a una regla, al momento de tener el desplazamiento, la punta de la aguja se desplazó junto con la masa de prueba. Con ayuda del microscopio se observó el desplazamiento de la aguja. Lo anterior descrito se muestra en la Figura 5.12.

Resultados

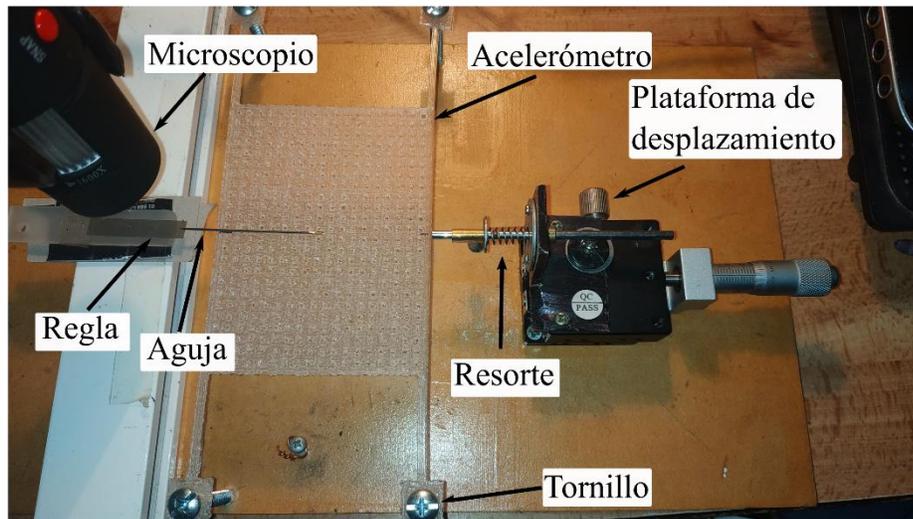


Figura 5.12 Medición de desplazamiento de acelerómetro en PLA.

La fuerza aplicada fue calculada con la Ley de Hooke $F = k * x$, teniendo k un valor de 934.1143701 N*m y $x = (\text{Desplazamiento inicial} - \text{desplazamiento de la aguja})$ con incrementos de $500 \mu\text{m}$ en el desplazamiento inicial. Se considera que, la separación entre cada línea de la regla es de 0.141 mm , se obtienen los resultados de desplazamiento de la aguja.

Para realizar una comparación entre el acelerómetro convencional y los acelerómetros simétricos con $b_2=(1/2)b_1$ y $b_2=(1/3)b_1$, es necesario considerar fuerzas diferentes. Esto se debe a que la fuerza a la que mueve a la masa de prueba es diferente.

En la Figura 5.13 se muestran las agujas de los acelerómetros a) convencional, b) simétrico con $b_2=(1/2)b_1$ y c) simétrico con $b_2=(1/3)b_1$, sin fuerza inicial en la masa de prueba. La Figura 5.14 muestra la aguja sujeta al acelerómetro convencional aplicando fuerza de 0.39 N y obteniendo un desplazamiento de $83.6 \mu\text{m}$. En la Figura 5.15, se muestra la aguja sujeta al acelerómetro simétrico con $b_2=(1/2)b_1$ al aplicar una fuerza de 0.24 N y teniendo un desplazamiento igual a $246 \mu\text{m}$. La Figura 5.16 muestra la aguja sujeta al acelerómetro simétrico con $b_2=(1/3)b_1$ aplicando una fuerza de 0.21 N y teniendo un desplazamiento igual a $276 \mu\text{m}$.

Resultados

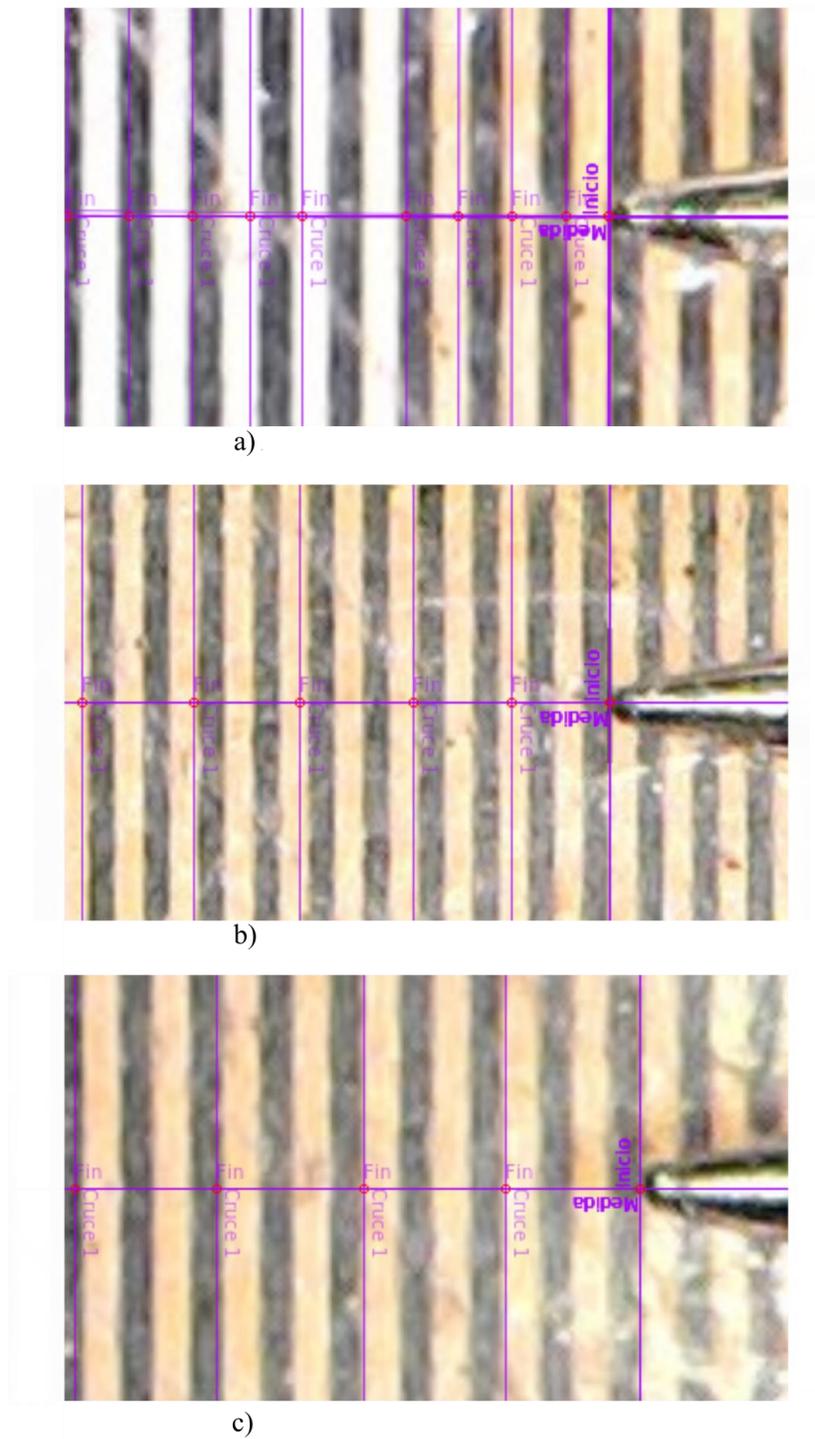


Figura 5.13 Posición inicial de las agujas de acelerómetros a) convencional, b) simétrico $b_2=(1/2)b_1$ y c) simétrico $b_2=(1/3)b_1$ sin aplicar fuerza en la entrada.

Resultados

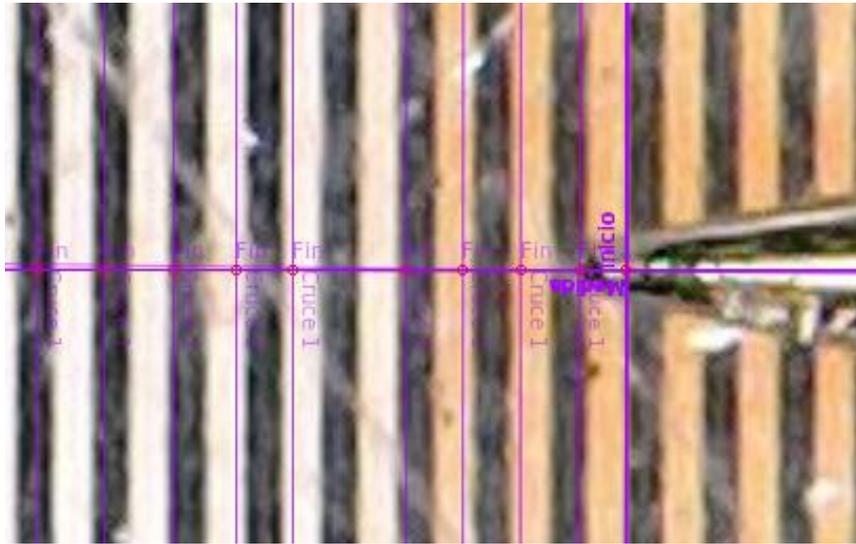


Figura 5.14 Aguja ubicada en la regla sin aplicar ninguna fuerza en la masa de prueba.

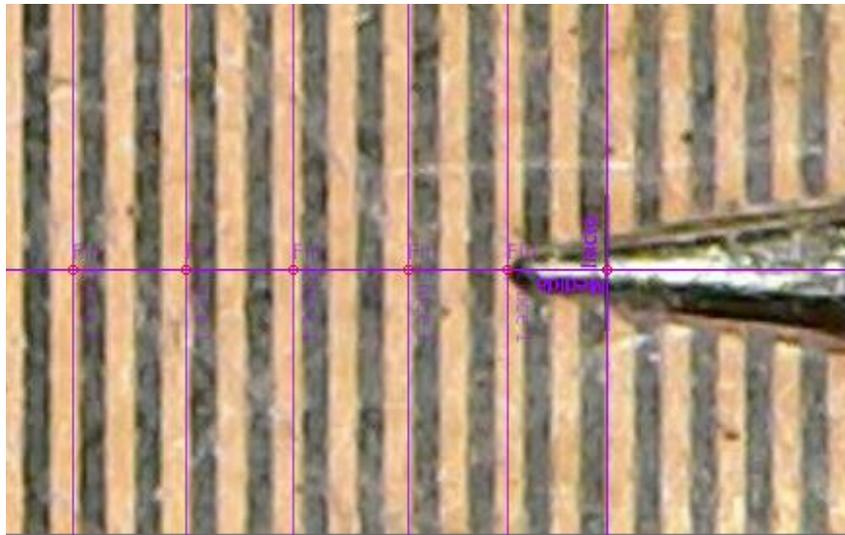


Figura 5.15 Desplazamiento de aguja de 148 μm en acelerómetro convencional, al aplicar una fuerza de 0.27 N.

Resultados

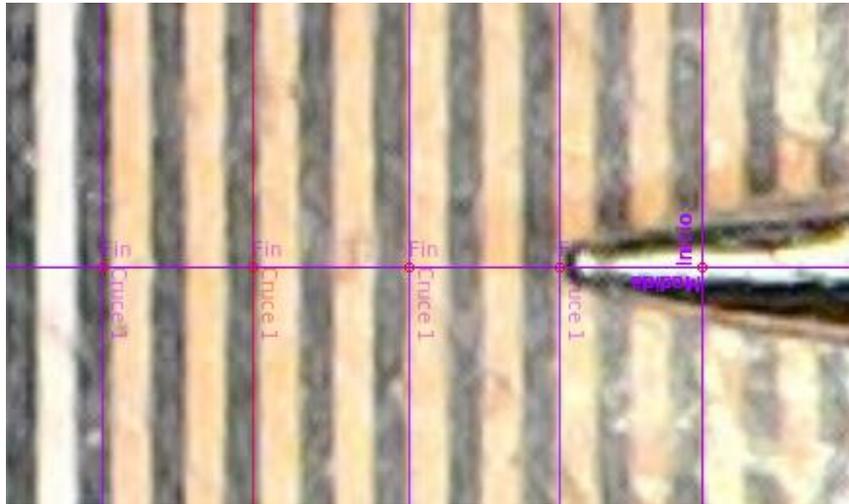


Figura 5.16 Desplazamiento de aguja de $298 \mu\text{m}$ en acelerómetro simétrico, al aplicar una fuerza de 0.23 N .

En grafica mostrada en la Figura 5.17, se muestra la comparación de desplazamiento al aplicar las diferentes fuerzas en el acelerómetro convencional, simétrico con $b_2=(1/2)b_1$ y acelerómetro con $b_2=(1/3)b_1$. Como puede observarse, se requiere menor fuerza para hacer un mayor desplazamiento en el acelerómetro simétrico con $b_2=(1/3)b_1$ que en el acelerómetro convencional.

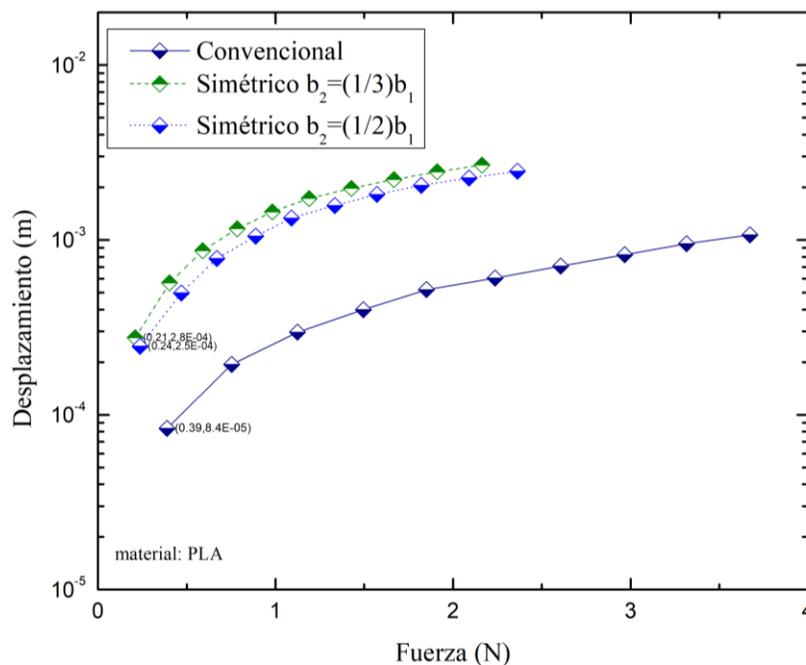


Figura 5.17 Gráfica del desplazamiento en función de la fuerza aplicada en acelerómetros convencional y simétrico.

Resultados

Al realizar una comparación entre los resultados teóricos y los resultados obtenidos en la simulación, se obtienen errores máximos de 89.55% en el acelerómetro convencional y, 145.64% para acelerómetro simétrico $b_2=(1/2)b_1$ y 87.9% para acelerómetro $b_2=(1/3)b_1$. Sin embargo, en ambos resultados, el mayor desplazamiento fue en la masa de prueba del acelerómetro simétrico.

En este capítulo ha podido observarse que mientras que en el caso de considerar a un solo brazo con un extremo fijo y su otro extremo libre, la geometría con la que se obtuvo un mayor desplazamiento fue la no simétrica, mientras que, cuando se tiene un sistema masa-resorte, tanto en el caso de $1/4$ de masa, como en el acelerómetro completo, es la geometría de brazo simétrico con la que se ha logrado un mayor desplazamiento.

El esfuerzo máximo se dio en la porción delgada de los brazos, cercana a la masa de prueba. A 30 G el esfuerzo no es lo suficientemente grande como para que el acelerómetro deje de funcionar.

La fuerza de reacción fue muy parecida para todos los acelerómetros analizados, las pequeñas diferencias se deben a la proporción de masa en los brazos de cada acelerómetro.

En cuanto a los resultados obtenidos mediante la aproximación teórica y las simulaciones realizadas, existen pequeños porcentajes de error para todos los casos, lo cual indica que las ecuaciones aplicadas son adecuadas para cada sistema.

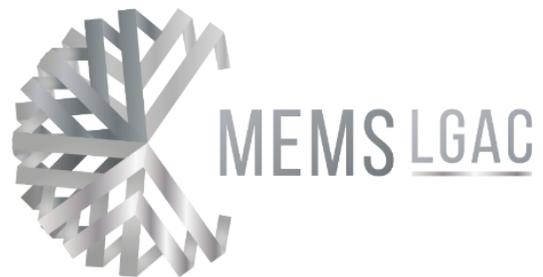
La implementación en 3D es una alternativa para realizar pruebas de flexibilidad de un sistema MEM, en este caso, al acelerómetro, con un bajo costo asociado.

El arreglo experimental puede mejorarse.

CAPÍTULO 6

Comparación de desempeño

En este capítulo se hace la comparación de desempeño con dos acelerómetros, tomados de la literatura. Los materiales utilizados son SU8 y polisilicio



Capítulo 6. Comparación de desempeño

En este capítulo se hace la comparación de desempeño de dos acelerómetros, tomados de la literatura, con el acelerómetro con brazos simétricos. Los acelerómetros seleccionados tienen diferentes dimensiones de masa y diferentes tipos de brazo.

6.1 Comparación con acelerómetro con brazos en L

Después de realizar una revisión del estado del arte, se eligió a uno de los artículos en los que se presenta una geometría de brazos no uniformes. (Majid, y otros, 2019) proponen un acelerómetro con cuatro brazos en forma de L, los cuales sirven de soporte a la masa de prueba. Los elementos del dispositivo se muestran en la Figura 6.1. Sus dimensiones se presentan en la Tabla 6.1.

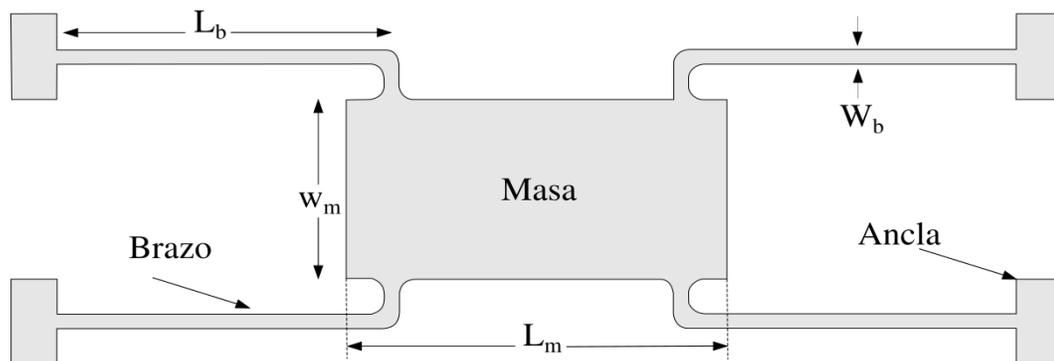


Figura 6.1 Acelerómetro con brazos en forma de L, considerado para la comparación del desempeño (Majid, y otros, 2019).

El material que se utilizó en (Majid, y otros, 2019) fue SU8, por lo tanto, en la Tabla 6.2 se muestran el módulo de Young, la Razón de Poisson y su densidad.

Comparación de desempeño

Tabla 6.1 Dimensiones del acelerómetro con brazos en forma de L

<i>Símbolo</i>	Descripción	Valor
l_b	Longitud del brazo	1375 μm
W_b	Ancho del brazo	60 μm
L_m	Longitud de la masa	3920 μm
W_m	Ancho de la masa	2960 μm
T	Grosor del sensor	70 μm

Tabla 6.2 Características de SU8 (Majid, y otros, 2019).

<i>Símbolo</i>	Descripción	Valor
E	Módulo de Young	4.5 GPa
N	Relación de Poisson	0.22
P	Densidad de SU8	1200 kg/m^3

Se aplicaron las mismas propiedades en el acelerómetro mencionado y se sustituyeron los tipos de brazos en L por los brazos simétricos.

El acelerómetro con brazos en L se comparó con el brazo simétrico de dos maneras. En una, la distribución de masa más delgada del brazo fue considerada como $b_2=(1/3)b_1$. En la otra, la distribución de masa más delgada del brazo fue considerada como $b_2=(1/2)b_1$ (ver Figura 4.2).

La Tabla 6.3 muestra los resultados del desplazamiento de la masa de prueba, de la frecuencia natural y la sensibilidad del acelerómetro con brazos en L, así como los acelerómetros con brazos simétricos. Se obtiene el desplazamiento total de la masa de prueba en los ejes X, Y y Z. Se obtiene como mayor desplazamiento en el eje Y con 380.34 nm para el brazo con $b_2=(1/2)b_1$, lo que indica que hay un incremento de 436.62%. Sin embargo, debido a que la constante de rigidez bajó, la frecuencia natural disminuyó de 1872.7 Hz a 809.98 Hz.

Comparación de desempeño

Tabla 6.3 Comparación de resultados entre acelerómetros con brazos en L y acelerómetro con brazos simétricos con $b_2=(1/3)b_1$ y $b_2=(1/2)b_1$ y una masa de prueba de $3920\mu\text{m} \times 2960\mu\text{m}$ para todos.

Parámetro	Brazos ref.	Brazos simétricos con $b_2=(1/3)b_1$	Incremento %	Brazos simétricos con $b_2=(1/2)b_1$	Incremento %
Constante de rigidez en el eje X (N/m)	3.04×10^4	191.83	15747.3	589.39	5057.84
Constante de rigidez en el eje Y (N/m)	102.7	6.18	1562.33	19.14	436.62
Constante de rigidez en el eje Z (N/m)	110.7	11969.51	-99.08	27745.45	-99.60
Frecuencia natural en el eje Y (Hz)	1872.7	460.12	-75.43	809.98	-56.75
Sensibilidad en el eje Y (nm/g)	71.16	1178.2	1555.71	380.34	434.49

Como se observa en esta comparación, existe un incremento en el desplazamiento en la masa de prueba al utilizar al acelerómetro con brazos simétricos, para el brazo simétrico con $b_2=(1/3)b_1$, el desplazamiento es considerablemente mayor con un incremento de 1555.71 %, sin embargo, la frecuencia natural se reduce notablemente un 75.43 %. Por lo que, en este caso, una propuesta aceptable es el brazo simétrico con $b_2=(1/2)b_1$. Esto, debido a que el incremento en el desplazamiento supera en más de 4 veces el desplazamiento original, aunque la frecuencia natural se reduce un poco más de la mitad (-56.75%).

En la Tabla 6.4 se muestran los resultados obtenidos al realizar cambios de proporciones del segmento más delgado y las comparaciones de incremento en el desplazamiento de masa de prueba y frecuencia natural con respecto al acelerómetro con brazos en L. Se tiene con mejor desempeño al acelerómetro simétrico con $b_2=(8/10)b_1$, dando un desplazamiento en la masa de prueba de 119.3 nm, mostrando así un incremento del 67.65%, y su frecuencia natural es de 1446.7 Hz, mostrando un decaimiento del 22.74%.

Comparación de desempeño

Tabla 6.4 Comparación con de acelerómetro Simétrico de diferentes proporciones en b_2 con acelerómetro con brazos en L.

Acelerómetro	Desplazamiento (nm)	% Incremento	Frecuencia (Hz)	% Decaimiento
Acelerómetro con brazos en L	71.16	-	1872.7	-
Simétrico $b_2=(1/3)b_1$	1178.20	1555.70	460.12	75.43
Simétrico $b_2=(1/2)b_1$	380.34	434.48	809.98	56.74
Simétrico $b_2=(2/3)b_1$	181.87	155.57	1171.5	37.44
Simétrico $b_2=(5/7)b_1$	154.28	116.80	1272	32.07
Simétrico $b_2=(8/10)b_1$	119.30	67.650	1446.7	22.74

6.2 Comparación con acelerómetro con brazos plegados

Otra comparación realizada fue con (Avinash & Siddheshwar, 2015), se propone un acelerómetro con brazos plegados y se aplica una aceleración de 14 G. El acelerómetro se realiza con polisilicio, material que tiene las siguientes características: densidad 2300 kg/m^3 y módulo de Young con un valor de 169 GPa. De manera similar, se realizó el análisis utilizando la masa de prueba establecida en (Avinash & Siddheshwar, 2015) y reemplazando los brazos plegados utilizados, por los brazos simétricos.

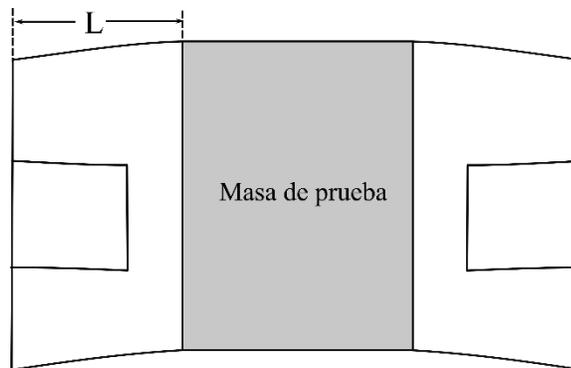


Figura 6.2 Acelerómetro de referencia con brazos plegados. Adaptada de (Avinash & Siddheshwar, 2015).

El acelerómetro con brazos plegados se comparó con el brazo simétrico de dos maneras. En una la distribución de masa más delgada del brazo fue considerada como

Comparación de desempeño

$b_2=(1/3)b_1$. En la otra, la distribución de masa más delgada del brazo fue considerada como $b_2=(1/2)b_1$ (ver Figura 4.2).

Puede observarse que existe un incremento de desplazamiento en la masa de 335.47 %, sin embargo, la frecuencia natural también baja un 35.65 %, como se muestra en la tabla 6.5.

Tabla 6.5 Comparación de resultados entre acelerómetros con brazos plegados y acelerómetro con brazos simétricos de $b_2=(1/3)b_1$ y $b_2=(1/2)b_1$ y una masa de prueba de $540\mu\text{m} \times 400\mu\text{m}$ para todos.

Parámetro	Brazos plegados	Brazos simétricos con $b_2=(1/3)b_1$	Incremento %	Brazos simétricos con $b_2=(1/2)b_1$	Incremento %
Desplazamiento en el eje X (nm)	16.2	47.3	191.64	4.60	-71.67
desplazamiento en el eje Y (nm)	86.9	4410	4973.38	379	335.47
Desplazamiento en el eje Z (nm)	47.7	0.341	-99.29	5.71	-88.03
Frecuencia natural en el eje Y (Hz)	4539	855.65	-81.15	2921	-35.65

Como se observa en esta comparación existe un incremento en el desplazamiento en la masa de prueba al utilizar al acelerómetro con brazos simétricos, para el brazo simétrico con $b_2=(1/3)b_1$, el desplazamiento es considerablemente mayor, sin embargo, la frecuencia natural se reduce notablemente. Por lo que, en este caso, una propuesta aceptable es el brazo simétrico con $b_2=(1/2)b_1$. Esto, debido a que el incremento en el desplazamiento supera en más de 3 veces el desplazamiento original sin reducir en exceso a la frecuencia natural.

En la tabla 6.6 se muestran los resultados obtenidos al realizar cambios de proporciones en el segmento b y las comparaciones de incremento en el desplazamiento de masa de prueba y frecuencia natural con respecto al acelerómetro con brazos plegados. Se tiene con mejor desempeño al acelerómetro simétrico con $b_2=(10/12)b_1$, dando un desplazamiento en la masa de prueba de 391.81 nm, mostrando así un incremento del 350.66%, y su frecuencia natural es de 2871.3 Hz, mostrando un decaimiento del 36.74%.

Comparación de desempeño

Tabla 6.6 Comparación de acelerómetro Simétrico de diferentes proporciones en b_2 con acelerómetro con brazos plegados.

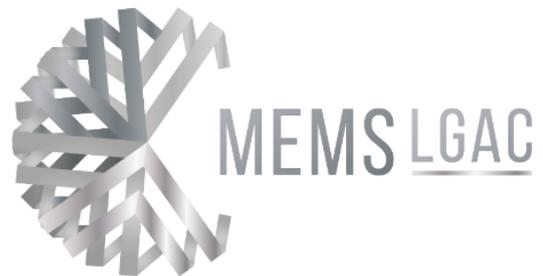
Acelerómetro	Desplazamiento (nm)	% incremento	Frecuencia (Hz)	% decaimiento
Acelerómetro con brazos plegados	86.94		4539	
Simétrico $b_2=(1/3)b_1$	4316.9	4865.37	864.91	80.94
Simétrico $b_2=(1/2)b_1$	1395	1504.55	1521.6	66.47
Simétrico $b_2=(2/3)b_1$	654.33	652.62	2221.8	51.05
Simétrico $b_2=(5/7)b_1$	554.37	537.64	2413.8	46.82
Simétrico $b_2=(8/10)b_1$	427.27	391.45	2749.6	39.42
Simétrico $b_2=(10/12)b_1$	391.81	350.66	2871.3	36.74

Por lo tanto, al modificar la proporción en los segmentos más delgado del brazo, se pueden cambiar el desplazamiento de la masa y la frecuencia natural.

CAPÍTULO 7

Conclusiones y trabajo futuro

En este capítulo se presentarán las conclusiones obtenidas al realizar esta tesis y los trabajos futuros.



Capítulo 7. Conclusiones y trabajo futuro

En este capítulo se presentarán las conclusiones obtenidas al realizar esta tesis y los trabajos futuros.

7.1 Conclusiones

1. La selección del material es determinante en el diseño de un dispositivo, en este caso del acelerómetro, debido a la influencia de sus propiedades eléctricas, mecánicas y térmicas sobre el desempeño del dispositivo diseñado.
2. La simulación del dispositivo permite conocer su desempeño, antes de fabricarlo, evitando gastos innecesarios. Por lo que, hoy día es ampliamente utilizada en diferentes sectores.
3. Si se desea tener un desplazamiento mayor en un acelerómetro, y si se implementan brazos de suspensión basados en arreglos de segmentos de diferente anchura, se tendrá un mayor desplazamiento en la masa de prueba, dando respuesta positiva a la pregunta “P1: ¿Es posible mejorar la flexibilidad de los brazos de un acelerómetro?” realizada en el capítulo 1. Sin embargo, debe señalarse que la frecuencia natural del dispositivo va a reducirse, por lo que, la implementación de ese arreglo es válida, si se desea tener mayor desplazamiento de la masa de prueba, a cambio de una disminución en la frecuencia natural del sistema.
4. Quitando pequeñas cantidades de masa en los brazos, se puede obtener mayor flexibilidad, logrando así mayor desplazamiento en la masa de prueba, lo que da respuesta positiva a la hipótesis “H1: Si reducimos el volumen de los brazos de un acelerómetro, bajo una distribución adecuada de masa, es posible incrementar su flexibilidad”.
5. Implementar MEMS a escala milimétrica mediante la impresión 3D es una alternativa cuando no se tienen los recursos suficientes para implementarlos en una

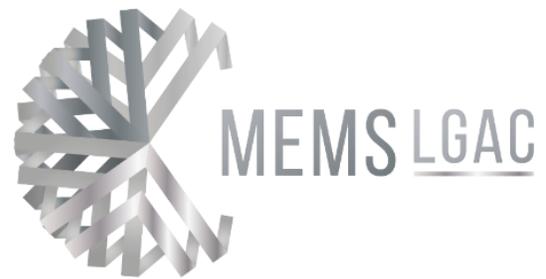
Conclusiones y trabajo futuro

escala más pequeña. En el caso de dispositivos inerciales, es una excelente herramienta, aunque, debe tenerse en cuenta que existen homogeneidades en la fabricación

7.2 Trabajo futuro

- Optimizar el ancho de los segmentos alternados que conforman al brazo con la finalidad de que la disminución de la frecuencia natural no sea drástica.
- Investigar formas alternativas para incrementar la frecuencia natural del dispositivo, al modificar los brazos, manteniendo su alta flexibilidad.
- Llevar a cabo el micromaquinado de un acelerómetro implementando el tipo de brazos aquí propuestos en los materiales que se utilizan en el proceso de fabricación de UACJ, para posteriormente realizar las pruebas que sean posibles.

BIBLIOGRAFÍA



Bibliografía

- Cheng, Y.-W., Read, D. T., McColskey, J. D., & Wright, J. E. (2005). A tensile-testing technique for micrometer-sized free-standing thin films. *Thin Solid Films*, 427-432.
- Cornejo Serrano, M. d., Villalobos Oliver, E. B., Molina Reséndiz, S., & Arreola Galván, W. G. (2016). *Sistema masa resorte con movimiento libreamortiguado, casos: sobreamortiguado, críticamente amortiguado y subamortiguado, su modelado y solución, con el apoyo degeogebra*. Celaya.
- Adel Merdassi, P. Y. (2015). A Wafer Level Vacuum Encapsulated Capacitive Accelerometer Fabricated in an Unmodified Commercial MEMS Process. *Sensors*, 7350.
- Álvarez, C. R. (2016, Junio). *Diseño de un proceso integrado de fabricación de sistemas micro-electromecánicos (MEMS) genérico y modular*. Tonantzintla, Puebla, Puebla, Mexico: INAOE.
- Avinash, K., & Siddheshwar, K. (2015). Comparative Study of Different Flexures of MEMS Accelerometers. *IJEAT*, 22-25.
- Badri, A. E. (2011). *Performance Improvement of MEMS Accelerometers in Vibration Based Diagnosis*. Mánchester, Inglaterra: University of Manchester.
- Chen, J. Y. (2010). *Single- and dual-axis lateral capacitive accelerometers based on CMOS-MEMS technology*. Oslo, Noruega: Universidad de Oslo.
- Gary Keith , F. (1994). *Simulation of Microelectromechanical Systems*. Berkeley: Universidad de California.
- Gonzalo Arribas, M. J. (2004). *ELECTRÓNICA DE POTENCIA Y MEDIDA. ÁREA DE TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA*, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Oviedo.
- Jiménez Pérez, A. (2004). *Análisis y optimización con interacción de Dummy, de la carrocería del automóvil "Tubolare SAND CAR" de Tecnoidea SA de CV, en impacto frontal empleando el método de elementos finitos en ALGOR FEA, mediante la simulación de eventos mecánicos*. Cholula, Puebla: INAOE.
- Kaajakari, V. (2009). *Analysis and design of microsystems, MEMS sensors, electronics, actuators, of MEMS, optical mems, and microfluidic systems*. Small Gear Publishing.

Bibliografía

- Karbari Sudha, R., Kumari, U., Pasha Roshan, C., & Gowda Vikas, K. (2018). Design and analysis of serpentine based MEMS accelerometer. *American Institute of Physics*, 020026-1.
- L. Howell, L., P. Magleby, S., & M. Olsen, B. (2013). *Handbook of Compliant Mechanisms*. Chichester, Inglaterra: John Wiley & Sons Ltd.
- Liu, H., Yu, H., Jiang, W., Li, X., Fan, S., Lei, B., . . . Bangdao, C. (2016). An accelerometer with integrative intensity-modulated optical encoder and patterned leaf spring for low-frequency vibration monitoring. *Sensor and Actuators*, 75-83.
- Mahmood, M. S., Butler, D. P., & Celik-Butler, Z. (2017, Abril). Design and fabrication of self-packaged, flexible mems accelerometer and aluminum nitride tactile sensors. *Sensors and Actuators*, 530-541.
- Majid, T., Hamed, N., Hamid, L., Gholam Mohammad, P., Abolfazl, A., & Mohammad, S. (2019). Simulation, Fabrication and Characterization of a Sensitive SU-8-Based Faby-Pérot MOEMS Accelerometer. *IEEE*, 1893 - 1902.
- Matar, M., Padori, M. A., Repetto, C. E., & Roatta, A. (2018). Modelización lineal de un sistema masa-resorte real. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, e2306-2.
- Matej, A. (2008). MEMS ACCELEROMETERS. *Seminar MEMS ACCELEROMETERS*, (p. 2). Ljubljana.
- Mohamed, G.-e.-H. (2001). *The MEMS Handbook*. New York: CRC PRESS.
- Molina Gutierrez, F., Crespí Adrover, X., Valero Pardo, C., & Ibáñez Felip, I. (2018). *Universidad Jaume I*. Retrieved from Co-Ma Corporation: <https://sites.google.com/view/poliacidolactico-coma/poli%C3%A1cido-1%C3%A1ctico/propiedades-del-pla>
- Navarro Bernal, M. (2012). *Microzonación sísmica: Evaluación de la peligrosidad sísmica a escala urbana*. Retrieved from UNIVERSIDAD DE ALMERÍA: <https://w3.ual.es/~mnavarro/Tema%206%20%20Elasticidad.pdf>
- P. Butler, D., Md. Sohel, S., & Celik-Butler, Z. (2017). Design, fabrication and characterization of flexible MEMS accelerometer using multi-Level UV-LIGA. *Sensor and Actuators A: Physical*, 530-542.
- Reyes Cortés, F. (2013). *Mecatrónica Control y Automatización*. Alfaomega.
- Rincon-Jara, R. I., & Mireles, J. (2010). Análisis y caracterización de un acelerómetro capacitivo fabricado con tecnología polymump's. ©*Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología de Superficies y Materiales*, 26-31.

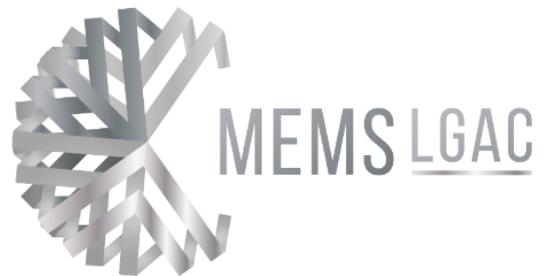
Bibliografía

- Salazar Trujillo, J. E. (2007). *Resistencia de materiales básica para estudiantes de ingeniería*. Manizales, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Sanger, A. (2005). “*Las fuerzas y su medición*”: *LEY DE HOOKE*. Provincia de Santa Fe, Argentina: Malvinas Argentinas.
- Sharpe, W. N., Turner, K. T., & Edwards, R. L. (1999). Tensile Testing of Polysilicon. *Experimental Mechanics vol. 39*, 162-170.
- Tecpoyotl-Torres, M., Vargas-Chable, P., Sandoval-Reyes, J. O., Rodriguez-Fuentes, S. F., & Cabello-Ruiz, R. (2020). Capacitive Accelerometers with Symmetrical Beams based on Distributed Mass. *Actuators 9(4)*, 1-25.
- Torrejón Yuste, Ó. J. (2011, Julio). *Diseño, fabricación y caracterización de un sensor de caudal para aplicaciones PCB-MEMS*. Sevilla, España, Andalucía, España: Universidad de Sevilla.

ANEXO A

Diseño en ANSYS

En este Anexo se muestra el diseño de los brazos en ANSYS.



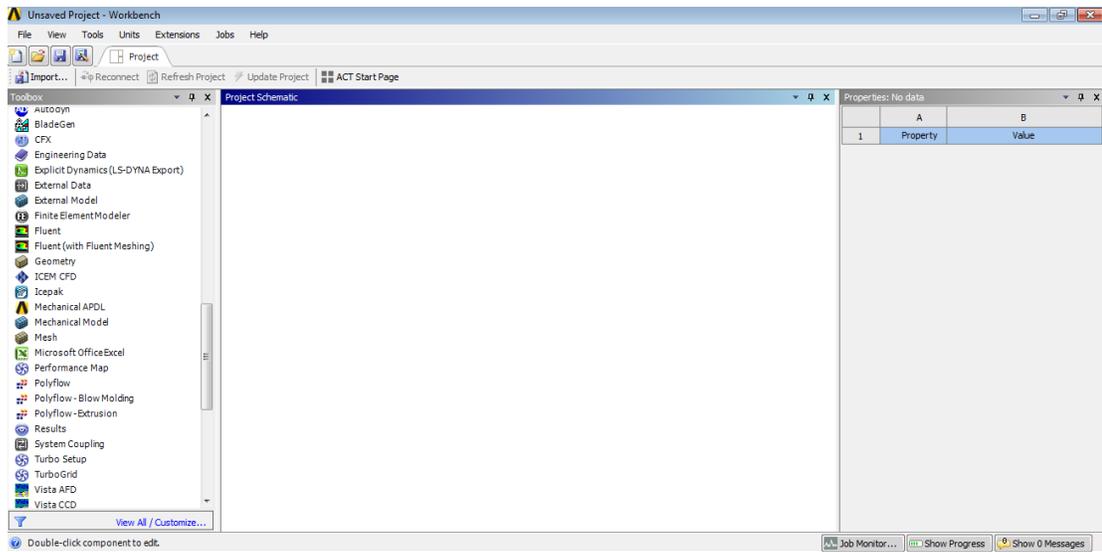
Anexo A. Diseño de brazos usando herramienta *Geometry* de ANSYS

Para realizar el diseño de los brazos en ANSYS, se llevó a cabo una serie de pasos que a continuación se darán a conocer.

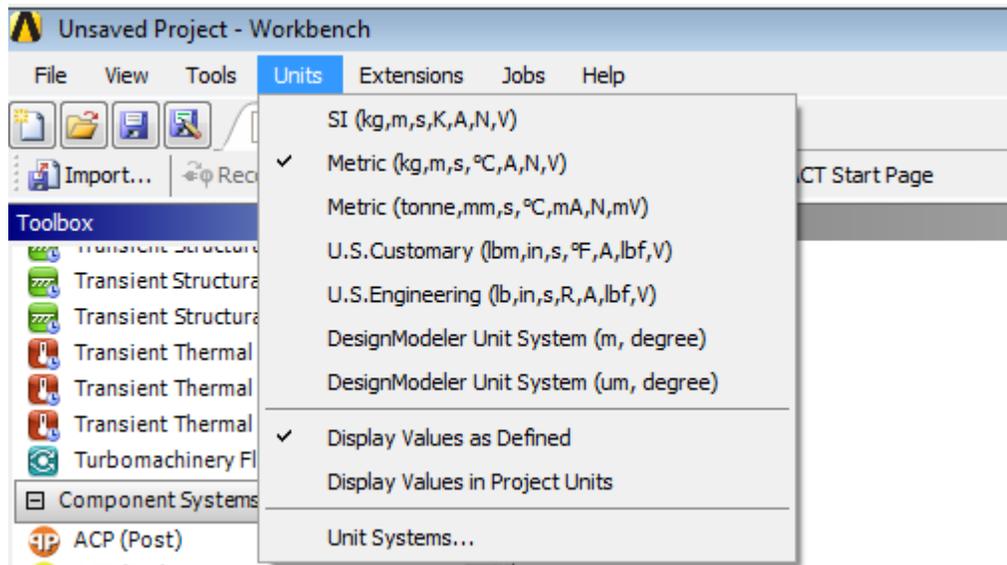
1. Se abre ANSYS Workbench. Se abrirá una interfaz, donde se tiene un área de trabajo, una barra de herramientas en el lado izquierdo de la pantalla, y en la parte superior se encuentran algunas pestañas de opciones.



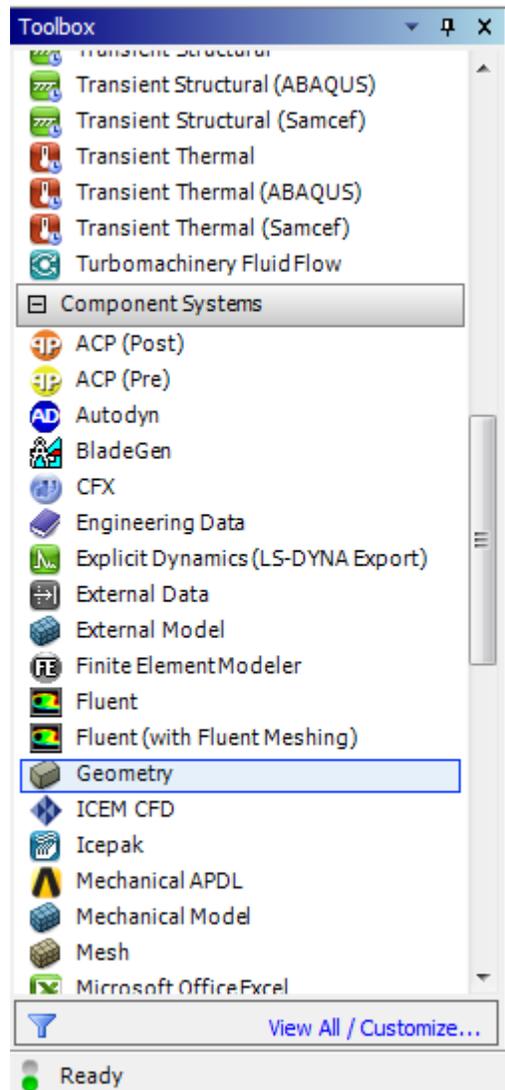
Anexo A. Diseño de brazos usando herramienta Geometry de ANSYS



2. Se seleccionan las unidades en las que se desea trabajar, en la pestaña *Units* en este caso serán las unidades métricas.

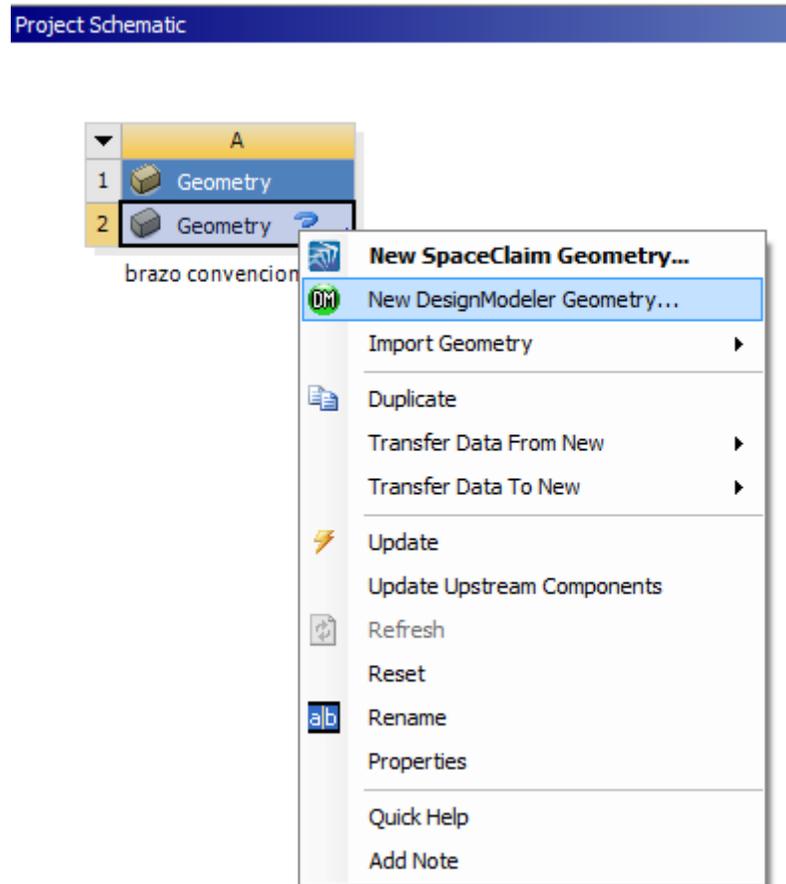


3. En la barra de herramientas (toolbox) ubicada en la parte izquierda de la pantalla, se busca la herramienta *geometry* y se arrastra al área de trabajo.

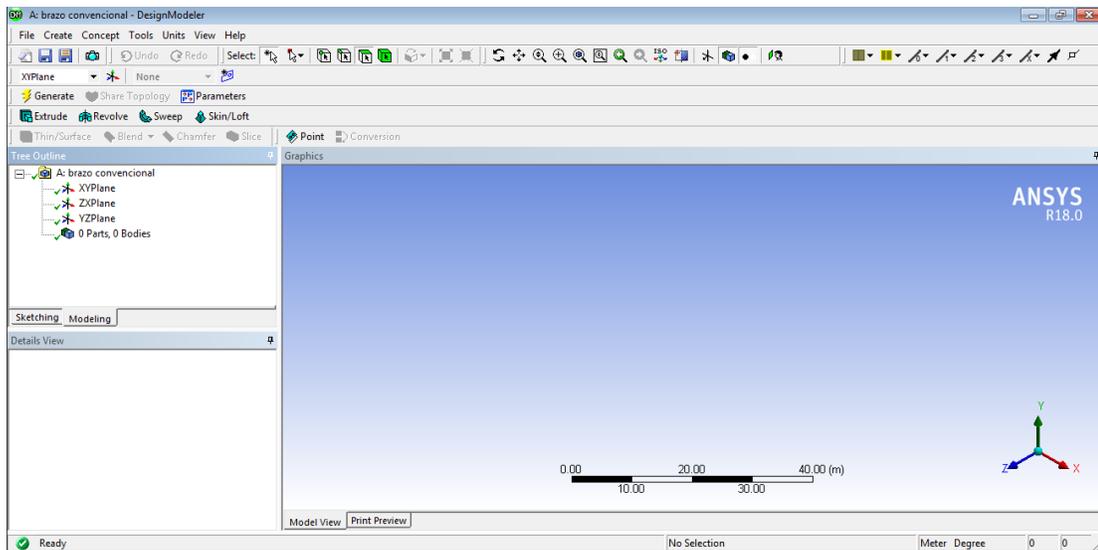


4. Una vez arrastrando la herramienta *geometry*, se da clic derecho, al abrirse un menú se selecciona *New DesignModeler Geometry*. Se abrirá una nueva interfaz gráfica en donde se tiene un espacio de trabajo para poder dibujar.

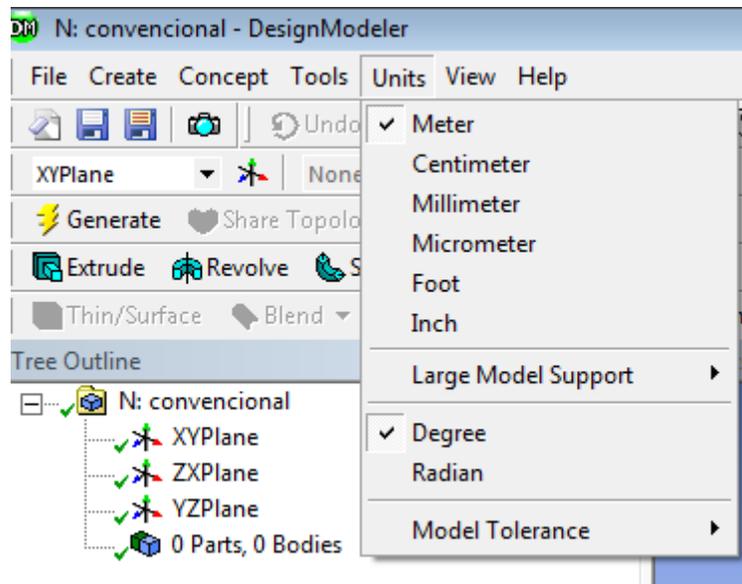
Anexo A. Diseño de brazos usando herramienta Geometry de ANSYS



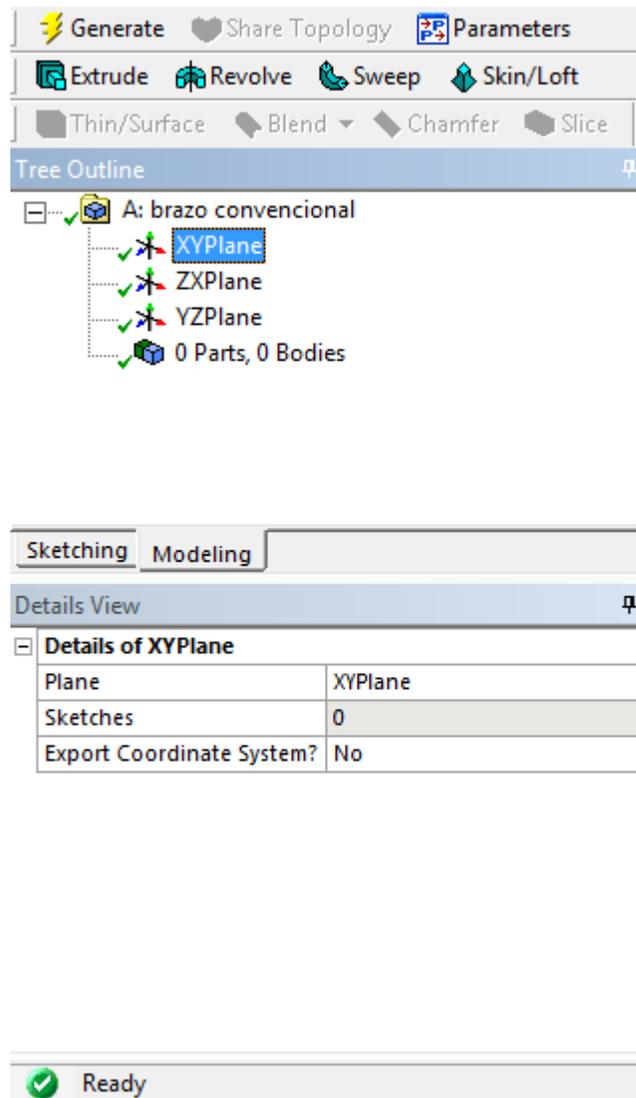
Anexo A. Diseño de brazos usando herramienta Geometry de ANSYS



5. Primeramente, se deben seleccionar las unidades, en este caso se seleccionan las unidades de *millimeter* (milímetro) y *degree* (grado). Es importante elegir la unidad de medida adecuada dependiendo la escala a la que se tendrá el diseño.

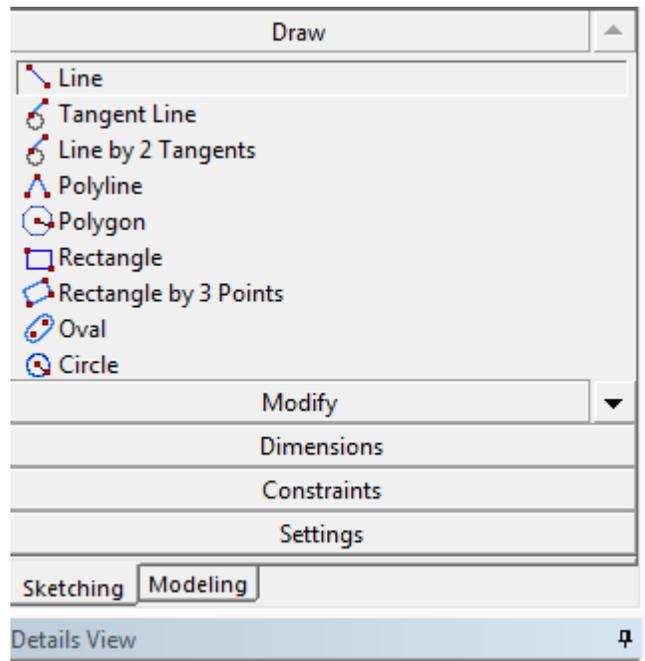


6. En la parte izquierda de la pantalla aparecen dos opciones, *Modeling*, donde se muestran los planos principales en donde se puede trabajar y *sketching*, se realiza el bosquejo del diseño. Se selecciona el plano *XY* y *sketching*.

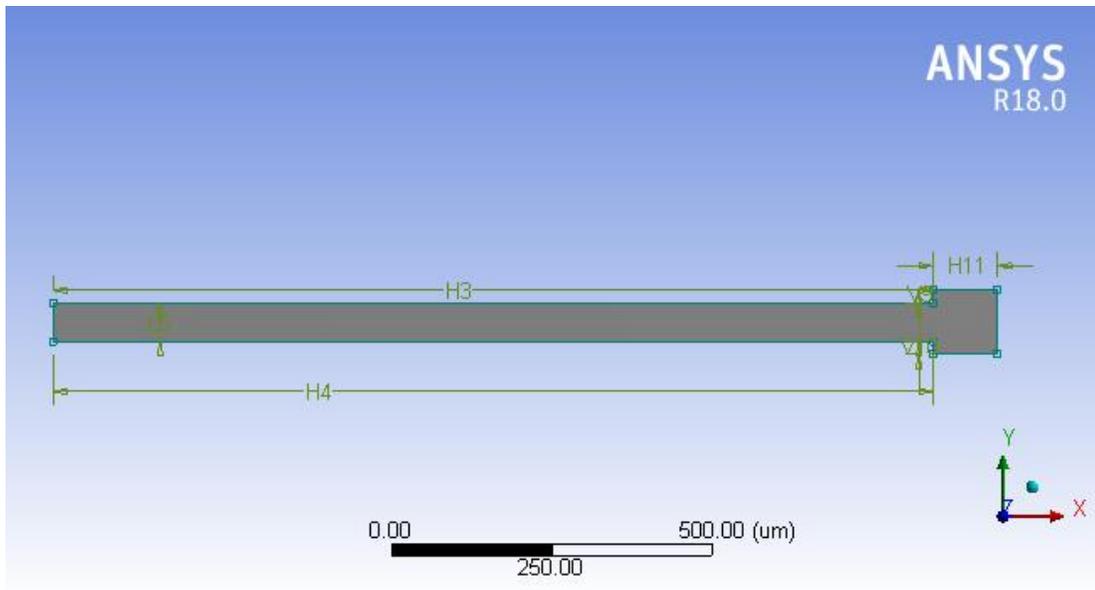


7. El *sketching* muestra varias opciones, sin embargo, las que se ocuparan para realizar el diseño del brazo son *Draw*, para trazar líneas, círculos o polígonos, *Modify* para modificar una o varias líneas, y *dimensions* para acotar.

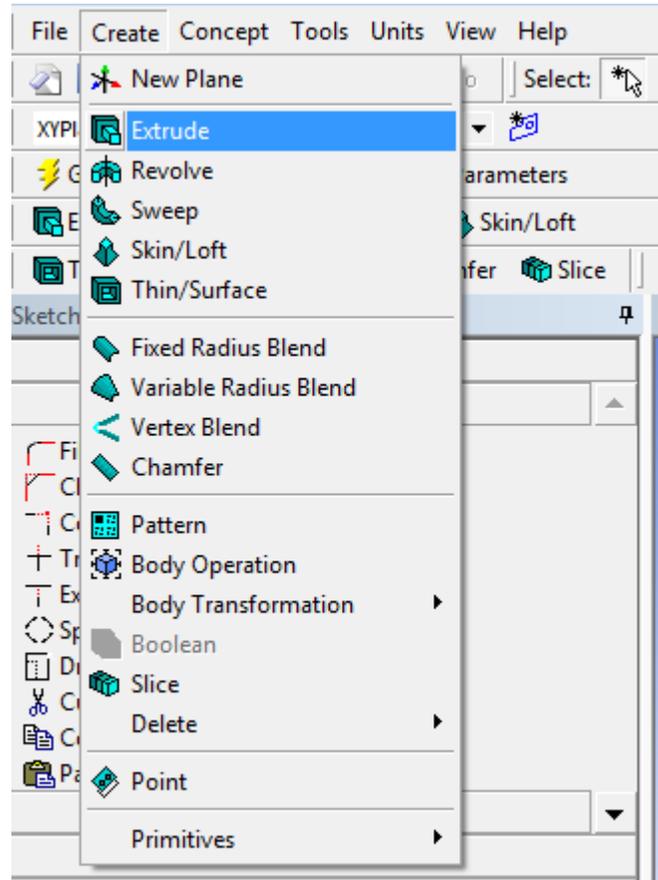
Anexo A. Diseño de brazos usando herramienta Geometry de ANSYS



8. Una vez teniendo el bosquejo del diseño se selecciona el botón  **Generate** que se encuentra en la parte superior.



9. Para darle volumen al bosquejo es necesario extruir el sketch, para eso, se selecciona *Modeling*, se busca la opción *Extrude* en la pestaña *create* ubicada en la parte superior de la pantalla.

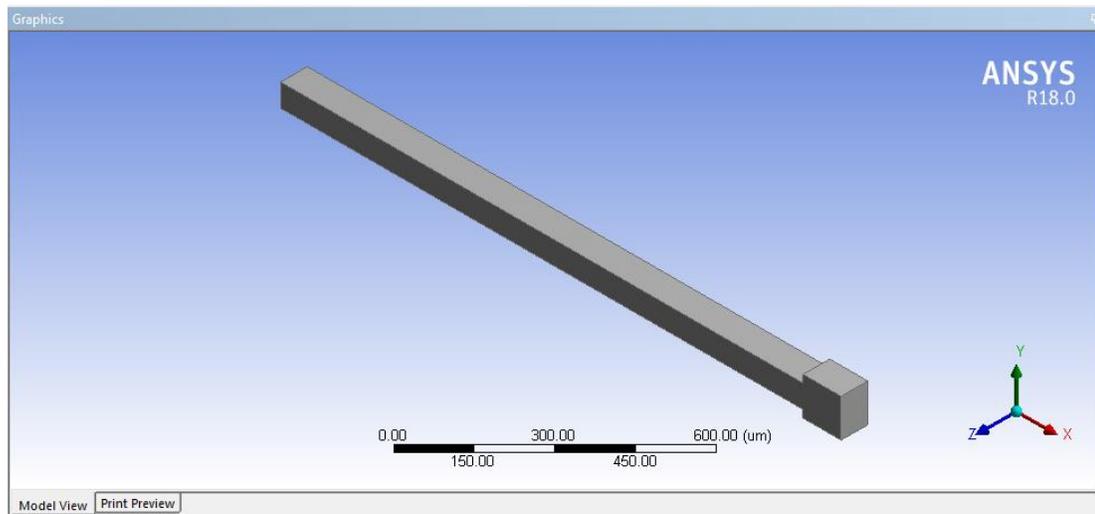


10. Se selecciona el objeto que se extruirá y la dimensión de 30. Automáticamente se pondrá en μm debido a que ya se han asignado las unidades anteriormente. Posteriormente se da clic en el botón *Generate* para generar la extrusión.

Anexo A. Diseño de brazos usando herramienta Geometry de ANSYS

Details View	
Details of Extrude2	
Extrude	Extrude2
Geometry	Sketch1
Operation	Add Material
Direction Vector	None (Normal)
Direction	Normal
Extent Type	Fixed
<input type="checkbox"/> FD1, Depth (>0)	30 μm
As Thin/Surface?	No
Merge Topology?	Yes
Geometry Selection: 1	
Sketch	Sketch1

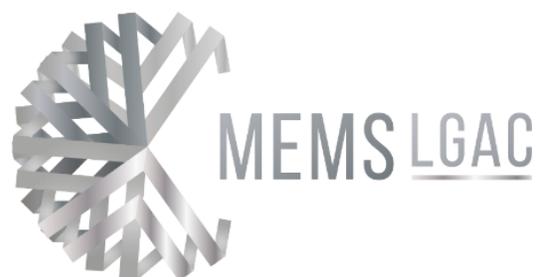
11. El diseño quedará extruido, para ver el diseño extruido se puede seleccionar el botón de vista isométrica  .



ANEXO B

Productos generados

En este Anexo se muestran las evidencias correspondientes



Anexo B. Productos generados

B.1 Colaboración en la impartición de talleres

Durante el desarrollo de esta tesis, se apoyó en la impartición de los talleres:

- Taller “Introducción al Diseño de Sistemas Micro-Electromecánicos (MEMS)”, en la 19 Semana de la Ciencia y Tecnología. Preparatoria Federal por Cooperación Andrés Quintana Roo, con el Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Morelos la Academia de Ciencias de Morelos. 23-25 de octubre de 2019.
- Taller “Introducción al Diseño de Sistemas Micro-Electromecánicos (MEMS)”, Universidad Tecnológica Emiliano Zapata, 13 de noviembre de 2019.
- Actividad de divulgación de las ciencias “Conociendo el micro-mundo con micro-herramientas”, Dirección de Publicaciones y Divulgación, 31 de enero de 2020.
- Curso de Dispositivos MicroElectromecánicos. En el marco del congreso Internacional de Ingeniería Mecatrónica, Electrónica y Automotriz realizado de forma virtual del 16 al 21 de Noviembre de 2020.



LA PREPARATORIA FEDERAL POR COOPERACIÓN ANDRÉS QUINTANA ROO EN COORDINACIÓN CON EL CONSEJO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DEL ESTADO DE MORELOS Y LA ACADEMIA DE CIENCIAS DE MORELOS

En el marco de la Celebración de la 19ª Semana de la Ciencia y Tecnología.
 “Año Internacional de la Tabla Periódica de los Elementos Químicos”



RECONOCIMIENTO

A: Juan Gerardo Flores Castro

Por su valiosa participación como Ponentes en el taller "Introducción al Diseño de Sistemas Micro-Electro-Mecánicos (MEMS)", en la 19ª Semana de la Ciencia y Tecnología. Celebrada en las instalaciones de nuestra Institución, los días 23 al 25 de octubre del 2019.

MTRO. FERNANDO MENDOZA VERGARA
 DIRECTOR DE PREPARATORIA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA
EMILIANO ZAPATA DEL ESTADO DE MORELOS
ORGANISMO PÚBLICO DESCENTRALIZADO DEL GOBIERNO DEL ESTADO DE MORELOS

otorga el presente

RECONOCIMIENTO

Al: C. Juan Gerardo Flores Castro

Por el apoyo brindado en el Taller:
"Introducción al Diseño de Sistemas Micro-Electro-Mecánicos"
llevado a cabo en las instalaciones de esta Universidad Tecnológica,
el día 13 de noviembre del presente año.

Emiliano Zapata, Mor., noviembre de 2019



M. en C. Jaime Vázquez Colín
Director de la División Académica
de Mecánica Industrial





La que suscribe, maestra Ana Silvia Canto Reyes, directora de Publicaciones y Divulgación de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos hace:

CONSTAR

Que el C. **Juan Gerardo Flores Castro** apoyó durante el desarrollo del Club de Ciencias para niños, actividad de divulgación de las ciencias organizada por esta dirección, que se realizó el día 31 de enero de 2020, y cuyo tema fue **"Conociendo el micro-mundo con micro-herramientas"**.

Se extiende la presente constancia para los fines que al interesado convengan, a los treinta y un días del mes de enero de dos mil veinte.

Atentamente
Por una humanidad culta



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Mtra. Ana Silvia Canto Reyes

Directora de Publicaciones y Divulgación

c.i.p. – Expediente.

Av. Universidad 1001 Col. Chamilpa, Cuernavaca Morelos, México, 62209
Tel. (777) 329 70 00, Ext. 3415 y 3416 / divulgacion@uaem.mx

**UA
EM**

Una universidad de excelencia

RECTORÍA
2017-2023



INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHATRONICS, ELECTRONICS AND AUTOMOTIVE ENGINEERING

El Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos y el Instituto de Ingenieros Electrónicos y Eléctricos de Morelos A.C

otorgan el presente

RECONOCIMIENTO

A: **Juan Gerardo Flores Castro**

Por su participación como:

Curso de Dispositivos MicroElectromecánicos

En el marco del Congreso Internacional de Ingeniería Mecatrónica, Electrónica y Automotriz realizado de forma virtual del 16 al 21 de Noviembre de 2020.

M.I. Leoncio Aguilar Negrete
Coordinador General del
ICMEAE

M.C. Jonathan Villanueva Tavira
Coordinador del Programa
Técnico del ICMEAE



B.2 Registro de patente

- Evidencia del registro de patente

HV-4310

gov mx

Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial

Solicitud de Patente de Invención o de Registro de Modelo de Utilidad
o de Registro de Diseño Industrial

<p style="text-align: center;">Homoclave del formato</p> <p style="text-align: center;">IMPI-00-009</p> <p style="text-align: center;">Fecha de publicación del formato en el DOF</p> <p style="text-align: center;">03 / 09 / 2019</p>	<p style="text-align: center;">Folio y Fecha de Recepción:</p> <div style="text-align: center;">  </div>
---	---

<p style="text-align: center;">Datos generales de la solicitud</p> <p>Marcar con una X sólo una opción</p> <p><input checked="" type="radio"/> Solicitud de Patente de Invención <input type="radio"/> PCT</p> <p><input type="radio"/> Solicitud de Registro de Modelo de Utilidad <input type="radio"/> PCT</p> <p><input type="radio"/> Solicitud de Registro de Diseño Industrial, especifique:</p> <p><input type="radio"/> Modelo Industrial <input type="radio"/> Dibujo Industrial</p>
--

Datos generales del o de los solicitante(s)	
<p style="text-align: center;">Personas físicas</p> <p>CURP (opcional):</p> <p>Nombre(s):</p> <p>Primer apellido:</p> <p>Segundo apellido:</p> <p>Nacionalidad:</p> <p>Teléfono (lada, número, extensión):</p> <p>Correo electrónico:</p> <p><input type="radio"/> El solicitante es el inventor <input type="radio"/> Continúa en anexo</p>	<p style="text-align: center;">Personas morales</p> <p>RFC (opcional): UAE671122G49</p> <p>Denominación o razón social:</p> <p>UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS</p> <p>Nacionalidad: MEXICANA</p> <p>Teléfono (lada, número, extensión): 7773297000-2076</p> <p>Correo electrónico: milton.fragoso@uaem.mx</p> <p><input type="radio"/> Continúa en anexo</p>

Domicilio del o de los solicitante(s)	
Código postal: 62209	
Calle: AV UNIVERSIDAD	
<small>(Por ejemplo: Avenida Insurgentes Sur, Boulevard Aduá, Camacho Cazada, Compaq, etc.)</small>	
Número exterior: 1001	Número interior: 5º PISO RECTORI
Colonia: CHAMILPA	
<small>(Por ejemplo: Ampliación Juárez, Residencial Hidalgo, Fraccionamiento Newton, etc.)</small>	
Municipio o demarcación territorial: CUERNAVACA	Localidad:
Entidad Federativa: MORELOS	Entre calles (opcional):
País: MÉXICO	Calle posterior (opcional):

Datos generales del o de los inventor(es) o diseñador(es)	
CURP (opcional):	
Nombre(s): MARGARITA	
Primer apellido: TECPOYOTL	
Segundo apellido: TORRES	
Nacionalidad: MEXICANA	
Teléfono (lada, número, extensión): 777 329 7004 - 2076	
Correo electrónico:	
<input checked="" type="radio"/> Continúa en anexo	





Contacto:

Arenal # 550, Pueblo Santa María Tepehuan, Kochimilco, C.P. 19030, Ciudad de México

Teléfono: 55-53-34-0700 en la Ciudad de México y área metropolitana del interior de la República Mexicana

correo para el usuario: 800-570-59-99, extensiones 10098, 10030 y 10024

Correo electrónico: dp@impi.gob.mx

Creatividad para el Bienestar

Página 1 de 4

Hoja adicional complementaria "Datos generales del o de los solicitantes"/
"Datos generales del o de los inventores o diseñadores o creadores"
(Use esta hoja en caso de que la solicitud sea presentada por dos o más personas físicas o morales)

Datos generales del solicitante o inventor o diseñador o creador

Datos generales del solicitante Datos generales del inventor o diseñador o creador

Personas físicas

CURP (opcional):
Nombre(s): PEDRO
Primer apellido: VARGAS
Segundo apellido: CHABLÉ
Nacionalidad: MEXICANO
Teléfono (lada, número, extensión):
777 3297000 - 2076

Personas morales

RFC (opcional):
Denominación o razón social:

Nacionalidad:
Teléfono (lada, número, extensión):

Domicilio del solicitante o inventor o diseñador o creador

Código postal: 62209
Calle: AV UNIVERSIDAD
(Por ejemplo: Avenida Insurgentes Sur, Boulevard Avila Camacho, Calzada, Corredor, etc.)
Número exterior: 1001 Número interior:
Colonia: CHAMILPA
(Por ejemplo: Ampliación Juárez, Residencial Hidalgo, Fraccionamiento, Sector, etc.)
Municipio o demarcación territorial: CUERNAVACA Localidad: CUERNAVACA
Entidad Federativa: MORELOS Entre calles (opcional):
País: MÉXICO Calle posterior (opcional):

Datos generales del solicitante o inventor o diseñador o creador

Datos generales del solicitante Datos generales del inventor o diseñador o creador

Personas físicas

CURP (opcional):
Nombre(s): JUAN GERARDO
Primer apellido: FLORES
Segundo apellido: CASTRO
Nacionalidad: MEXICANO
Teléfono (lada, número, extensión):
777 3297000 - 2076

Personas morales

RFC (opcional):
Denominación o razón social:

Nacionalidad:
Teléfono (lada, número, extensión):

Domicilio del solicitante o inventor o diseñador o creador

Código postal: 62209
Calle: AV UNIVERSIDAD
(Por ejemplo: Avenida Insurgentes Sur, Boulevard Avila Camacho, Calzada, Corredor, etc.)
Número exterior: 1001 Número interior:
Colonia: CHAMILPA
(Por ejemplo: Ampliación Juárez, Residencial Hidalgo, Fraccionamiento, Sector, etc.)
Municipio o demarcación territorial: CUERNAVACA Localidad: CUERNAVACA
Entidad Federativa: MORELOS Entre calles (opcional):
País: MÉXICO Calle posterior (opcional):



Contacto:
Avenida # 510, Pueblo Santa María Tlalpatzaco, Xochimilco, C.P. 14800, Ciudad de México.
Teléfono: 55-53-34-07-00 en la Ciudad de México y área metropolitana del Interior de la República sin
costo para el usuario; 800-570-59-90, extensiones 10094, 10030 y 10024.
Correo electrónico: dpi@impi.gob.mx

B.3 Memoria en extenso publicada

2020 International Conference on Mechatronics, Electronics and Automotive Engineering (ICMEAE)

Implementation of Accelerometers with Beams Based on Flexible Arrays Using PLA, at millimeter scale

M. Tecpoyotl-Torres, J. G. Flores-Castro,
S. I. Valle-Morales, C. A. Ferrara-Bello

*Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas,
CIICAP-IICBA*

Universidad Autónoma del Estado de Morelos, UAEM
Av. Universidad No. 1001, Morelos, Mexico
tecpoyotl@uaem.mx, jgerar_fc@hotmail.com,
vallemoralesamuel@gmail.com,
carlos.ferrarabll@uaem.edu.mx

L. Cisneros-Villalobos, P. Vargas-Chable

*Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería
FCQel-UAEM*

Universidad Autónoma del Estado de Morelos, UAEM
Av. Universidad No. 1001, Morelos, Mexico
{Luis.cisneros&pedro.vargas}@uaem.mx

Abstract – In this paper, simulated and experimental analysis of an accelerometer with beams based on arrangements of segments of different width is performed. A comparison with an accelerometer of uniform beams is carried out. Micro accelerometers were scaled to obtain millimeter lengths to obtain low cost prototypes and the possibility to test them, also using an experimental set-up of low cost. The simulation tool employed is Ansys. For experimental validation, additive manufacture using PLA, a type of thermoplastic polymer, is considered. The parameter under analysis is the displacement the proof mass of accelerometers. The larger displacement was obtained for the case of symmetrical beams, with a thinner width equals to 1/3 of width the uniform beam, but a decrease in the natural frequency of the system was also obtained.

Index Terms - Capacitive accelerometer, proof mass displacement, low cost prototypes, additive manufacture, Ansys.

I. INTRODUCTION

Micro-Electromechanical Systems, MEMS, are typically defined as small-sized devices composed by microfabricated active and passive elements, which performing different functions, such as perception, data processing, communication, and action on the environment [1]. MEMS is a technology that enables new discoveries in various fields, including inertial sensing, biomedicine, and electronic displays. This technology has made possible to miniaturize devices and commercialize them on a large scale. In the field of wearable technology, there was a revolutionary impact with the widespread applications of flexible MEMS devices [2].

The increasing demand for portable electronic systems and the rapid advancement in assisted robotics created an urgent needing for the development of ubiquitous sensors where flexibility, compliance, and even the expansion properties of sensing devices are necessary [3].

Today, MEMS accelerometers have the second highest sales of volume, after pressure sensors. They are used in a variety of applications, including automotive, industrial, consumer electronics, and medical devices [4]. The number of accelerometer applications is expected to increase for the coming years [5]. Improvements have been made in the design of accelerometers, each of their elements, with a high interest in studying these devices to make structural improvements, as

well as in their operating parameters, to improve their performance.

In this paper, the interest is focused on the proposal of a geometry of beams for accelerometers, constituted by an arrangement of different flexible segments. To perform experimental analysis, microaccelerometers were scaled. They were fabricated in PLA. The idea is to have a proof of concept, using low cost devices and experimental set-up.

II. CAPACITIVE ACCELEROMETERS

A MEMS accelerometer is a microdevice which can measure the force of acceleration, whether it is static or dynamic. Static forces include gravity, while dynamic forces can include vibrations and motion [6]. Capacitive accelerometers show a displacement produced between their plates, when they are subjected to an acceleration, which can be longitudinal, or in the distance between them. The capacitance is calculated by (1):

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon A}{d} \quad (1)$$

where, ϵ_0 is the permittivity of free space (vacuum) of magnitude 8.85×10^{-14} F/cm, ϵ is the relative permittivity or dielectric constant of the insulating material, A is the area of the overlapped plates (m^2), and d correspond to their separation (m). Therefore, any change in the permittivity, area or distance between the plates will cause a change in the capacitance value C [7].

In general, an accelerometer has four elements that are listed below:

- Proof mass, to generate a force due to acceleration or deceleration, in accordance to the Second Law of Newton.
- Rigidity elements, or a suspension beams, in the form of one or more elastic springs, to provide the mechanical support to the proof mass and return it to its equilibrium position.
- Dissipation elements, or damping, to control the movement of the proof mass and being able to obtain a favorable frequency response.