



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E
INGENIERÍA

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA
Y CIENCIAS APLICADAS (CIICAp)

**“DISEÑO DE UN AMPLIFICADOR DE DESPLAZAMIENTO BASADO
EN UN ARREGLO FLEXIBLE, PARA ACELERÓMETROS CAPACITIVOS”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO

PRESENTA

MARTÍNEZ GARCÍA FRANCISCO ANDRÉS

ASESOR

DRA. MARGARITA TECPOYOTL TORRES



Facultad de Ciencias
Químicas e Ingeniería

FORMA T-4
NOMBRAMIENTO COMITÉ REVISOR

Cuernavaca, Mor., a 21 de septiembre de 2021

Dr. Luis Cisneros Villalobos
Dr. Outmane Oubram
Dra. Margarita Tecpoyotl Torres
Dr. José Gerardo Vera
Dr. Ramon Cabello Ruiz
PRESENTE

Me permito comunicarles que han sido designados integrantes del **COMITÉ REVISOR** del trabajo de:
TESIS

Titulado:

**“DISEÑO DE UN AMPLIFICADOR DE DESPLAZAMIENTO BASADO EN UN
ARREGLO FLEXIBLE, PARA ACELERÓMETROS CAPACITIVOS”**

Que presenta (el) o (la) **C. MARTÍNEZ GARCÍA FRANCISCO ANDRÉS**, del programa educativo
de **INGENIERÍA ELÉCTRICA-ELECTRÓNICA**.

ATENTAMENTE
Por una humanidad culta

DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ
DIRECTORA

Se anexa firma electrónica

DICTAMEN

DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ
DIRECTORA DE LA FCQeI
PRESENTE

En respuesta a su amable solicitud para emitir DICTÁMEN sobre el trabajo que se menciona, me permito
informarle que nuestro voto es:

VOTO	NOMBRE	FIRMA
	Dr. Luis Cisneros Villalobos.	
	Dr. Outmane Oubram	
	Dra. Margarita Tecpoyotl Torres	
	Dr. José Gerardo Vera	
	Dr. Ramon Cabello Ruiz	

El voto del comité es aprobatorio, se anexan firmas electrónicas
VALH/fmg

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

VIRIDIANA AYDEE LEON HERNANDEZ | Fecha:2021-09-21 13:17:51 | Firmante
dFrlLD Ruc9Gu2EVljkxNfDxTZ3bbwGo3JY4FoRG DpjUFaf4tbtEN+ eFMmqg YDE3qaqbpYcR3YqubFGLjU1 qOOYTJAUXYig QLeFbptzH4LFbKK5QEZZ1p6uv0ubTAGX8AN47JU
HdLQ03lat+sb8BwqloTOAuzT2J2/pWPWmZVXhAUQ/2ZxCVuRyNpHBIPsbrT4AU THinkP3j3fzX3CSdtr8f7rxjYo8Ubkqm1HVegklunK3GMyhvmQ1KMFTTfwsFYYYUpbbul3Yi
AqYvQ7TK4RNfhlMI7i+6botgFxGdzderSICM5c2WhDm6+iv1EizXrDPCFtxaElnbl1bYGV1w==

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



[QhxDbT](#)

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/gCEH40KHNRtwk8sKrEiUu1Pjoy83NFcE>

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

LUIS CISNEROS VILLALOBOS | Fecha:2021-09-28 14:08:20 | Firmante

VCiLnsqRrAMKysmJHMqKFePK/skepU4G7daYIkn4XgCP3CHNuHoFK7P86uJx80oSbq5xeCYKDO0rv1NDbTtYgAKq8gl3m+pD5BMUILWp54+XdWG8+v12PwXnX4k9PQ+miZ3HKlybfAx80miSjJf3H2M8SA0cAGS3R5bW9LqkdkIbB7Z45WRcPqP RkvEPWJToVPZyL5uMjvQX2ITVgYKsVggM94a0W4e8CG+JmMLgp+J6IH/aoBesoJSyBtBGDdv8BAxyVBTBPsW/+ahEp03kbOddUjTektNodlunGT8eSPLJ7GucQdqn390sKBX4yBtQq8K6MYzKooG2ULhi7qvNw==

MARGARITA TECPOYOTL TORRES | Fecha:2021-09-28 14:21:11 | Firmante

Z3EYYUWGWbxLK2e3zMX2n4+9t5ubt/Mu2NuFZ/bxMJinausLHgh6bQWAZVTGgroRzpi3Buzxzf/kvAxxwLW1vW7D971HdQK8PjgykrCB9F+6fOboJW0uDPWOx5cjWBGDLncjUv9uswdYPeYTY0nghN1Dlz7e9B77v3cxzL0c405Bum1LZnsDaL4z6KyU3v0YYaol+KNrzfG9+AAOFwqMpXezPBmVstYBCKsqnmHzifpSy9dEINEf7ScVg4rpdM2r2i8qKjE6sRr1y3IKCnoH7siHRXisgCAvFCHua0uYQjw/IDTeb8a+CELQ6MLQskLqMDUnC9xEavIZKgg==

JOSE GERARDO VERA DIMAS | Fecha:2021-09-28 14:24:45 | Firmante

qYSxL17CJHo8+qjFw3v6X12BJMFoP1b+NyWDEKJUrY+1RK5bZrHpFuYQ/XN+VNAmlKLio9sbA+/sU1qiEOIV0i2hsCnJ1nz4GI3aHi4J3+wP sawGJHK16aHP02cgQ9ovuquL KzFz4wIFebQc2C6JBUi4gM2O5GNyxLTboYX16AMEpAg4YGZfMiDusrJ2ynCH08Nrf8KfnZullu/lsVZDIz859Bx/pJxj56395fHE3c2sqFZ8gpMFR8jyL6oG0Ehdyg0AVJVNfsgL8qJLTqpl1rNwNo+qXG2pjVbbJhso+kOeobwJREGC1J01TKkhL2HesUX2RGLNIW3WhR6gg==

OUTMANE OUBRAM | Fecha:2021-09-28 14:44:41 | Firmante

quvTwEuc3FQTAQ8A9uamLnH6MKhkb cXFteA9aAlZxw67Tzmq/YzaGq4tibSHJxs779K/6vcggy2DPG BvsQKyRLAcf31uXFllozVHLWp2IKb+F8hQiZ2pLbiHoOFiWwU5S7VKNFuvFRDNs/HFinjVawz75XsdyXqnvf/sGf660YK/1u9K4gGIXi6+vh3FGBaEw4sVRBIE9fow6Fgn3/Vj3pvQdcbAPbF3eY1pn136zhXPFsFR/09sCrVozltpN2jls0D1K8FvOTyzcQ2EXUCVHYjLNBwHe9RwL G7fxZaTzfo9lsW+4+bk0VMMTbbImrsE6I3IV4jR1oiywg==

RAMON CABELLO RUIZ | Fecha:2021-09-28 18:01:53 | Firmante

kc3rIMDZx694tLde4E90vl0BRz+wkcV1od95btowuXWUjAPYc316Mp3RFmY4S2x6cSmUVYJcc42wLTJOVD5QHUK7WJYyVWo/spCXcw7ZA8nOiKZ6VWuCNK3UeKKdFlaffWa4pINaNAZkpSrBbZnVME7BzNC6LBT/sTmDblQhzeAbT9Yd7Qtoe1Y1R29j+ymDOOMdhC9deKlhiK3WCAdjm9Xf0k3RX9oaYUSpAcjFAkLtyRIGod2ZK5wwmbmAaec7pIus3h3R/MjHBBcc4Ri68tbgjIwmyQMkp0vOxp2GqHawXITuN5JB+ATAEAVkDFKwg74aPDOYeYgYdVTw==

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



bAgv4L

<https://efirma.uaem.mx/hoRepudio/aWX3Uy17JmmExm5fWZ7mCvHYx8iNkib>

Resumen

En este trabajo se diseñó un amplificador de desplazamiento, bajo una configuración de elementos flexibles, tomando como base el sistema Capacitive Accelerometer Extended Beams-Displacement amplifying Compliant Mechanisms (CAEB-DaCM) (Cabello-Ruiz, y otros, 2017), incorporando una estructura similar al pantógrafo.

Se mejoró la respuesta del acelerómetro, CAEB, al incorporar brazos simétricos, seccionando el largo total del brazo en 6 segmentos y cambiando el ancho de 4 de éstos, en una proporción de 8/10 del ancho total. Esto proporcionó una variante del CAEB, teniendo ahora el CAEB de brazos uniformes y uno de brazos simétricos. En ambos se implementó un mecanismo de amplificación de desplazamiento, DaCMP.

Al incorporar el DaCMP se logró una mayor amplificación en el desplazamiento y un incremento en la frecuencia del sistema, permitiendo reducir la masa total del acelerómetro completo, con lo que se logró una mejora y una reducción de masa, manteniéndose las áreas totales equivalentes entre el sistema y el acelerómetro completo (sin reducción de masa). El nuevo sistema es capaz de incrementar hasta 56.2488% al desplazamiento en su entrada, comparado con el CAEB en su tamaño original, mientras que la frecuencia mostró un incremento de 49.7368 %.

Ambas variaciones del sistema CAEB-DaCMP presentan mejoras en los parámetros de frecuencia y desplazamiento ante el sistema CAEB-DaCM. Sin embargo, es recomendable el uso del sistema CAEB-DaCMP de brazos simétricos, debido a que necesita una menor aceleración para generar el mismo desplazamiento que el sistema CAEB-DaCMP de brazos uniformes.

Abstract

In this work, a displacement amplifier was designed, under a configuration of flexible elements, based on the CAEB-DaCM system, Capacitive Accelerometer Extended Beams-Displacement amplifying Compliant Mechanisms (Cabello-Ruiz, et al., 2017), incorporating a structure like the pantograph.

The response of the accelerometer, CAEB, was improved by incorporating symmetrical beams, sectioning the total length of the beam into 6 segments, and changing the width of 4 of these, in a proportion of 8/10 of the total width. This provided a variant of the CAEB, the CAEB now having uniform beams and one with symmetrical beams. In both, a displacement amplification mechanism, DaCMP, was implemented.

By incorporating the DaCMP, a greater amplification in the displacement and an increase in the frequency of the system was achieved, allowing the total proof mass of the complete accelerometer to be reduced, thereby achieving an improvement and a reduction in mass, keeping the total equivalent areas between the system and the full accelerometer (without mass reduction). The new system can increase its input displacement up to 56.2488%, compared to the CAEB in its original size, while the frequency showed an increase of 49.7368%.

Both CAEB-DaCMP system present improvements in the frequency and displacement parameters compared to the CAEB-DaCM system. However, the use of the CAEB-DaCMP system with symmetrical beams is recommended since it requires less acceleration to generate the same displacement as the CAEB-DaCMP system with uniform beams.

Key words

Accelerometer, Mechanical Displacement Amplification, MEMS

Dedicatoria

Gracias a Dios, por su infinita bondad y por permitirme cumplir con esta etapa de mi vida, por darme la capacidad de lograr sacar adelante este proyecto y por estar conmigo en las demás etapas de mi vida.

A mis padres, Elizabeth García y Andrés Martínez, por su gran amor y apoyo incondicional. Me inspiran a ser la mejor versión de mí, sin ellos no habría logrado llegar a donde estoy. Gracias por ayudarme a cumplir mis sueños.

A mis hermanos, Andrea, Manuel y Alondra, por compartir una vida con ellos. Con ellos he aprendido a reír, a llorar y a disfrutar las mejores cosas de vida. Gracias a ustedes me considero una persona afortunada.

A Fernando y a Elizabeth Paulina, por formar parte de mi vida y por las cosas que hemos compartido.

GRACIAS, por hacer de mi vida una buena vida.

Agradecimientos

A la Dra. Margarita Tecpoyotl Torres, quien se encargó de la asesoría de este proyecto de tesis. Le agradezco por su continuo apoyo, su tiempo, su paciencia, sus invaluable consejos y sus grandes aportaciones a esta tesis.

Al Dr. Ramón Cabello Ruiz, por su colaboración en este trabajo. Le agradezco por su tiempo y sus grandes aportaciones a esta tesis.

A la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM) y a la Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería (FCQeI) por la formación académica que recibí.

Al Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp) por haberme recibido en este proyecto.

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.

Tabla de contenido

Resumen.....	I
Palabras clave.....	I
Abstract	II
Dedicatoria	III
Agradecimientos	IV
Índice de tablas.....	VIII
Índice de Figuras.....	XI
Capítulo 1 Introducción.....	1
1.1 Planteamiento del problema	5
1.2 Justificación.....	5
1.3 Hipótesis.....	5
1.4 Objetivo general	6
1.5 Objetivos específicos.....	6
1.6 Alcance	7
1.7 Limitaciones	7
1.8 Organización de la tesis.....	8
1.9 Metodología.....	9
Capítulo 2 Marco teórico	11
2.1 Acelerómetros MEMS.....	12
2.1.1 Aplicaciones.....	12
2.1.2 Tipos de acelerómetros	14
2.2 Principios físicos del sensor	17

2.2.1	Segunda Ley de Newton	18
2.2.2	Ley de la elasticidad de Hooke	18
2.2.3	Modelo del sistema amortiguado masa-resorte.....	19
2.2.4	Constante de rigidez.....	21
2.2.5	Frecuencia natural	22
2.2.6	Esfuerzo.....	23
2.3	Acelerómetro capacitivo.....	24
2.4	Amplificadores de desplazamiento DaCM.....	25
2.4.1	Ganancia geométrica.....	25
2.5	Mecanismos flexibles	26
2.6	Estado del arte de los amplificadores de desplazamiento	29
Capítulo 3	Diseño del Sistema Acelerómetro-DaCM y simulaciones.....	38
3.1	CAEB-DaCM	39
3.2	Acelerómetro Capacitivo Convencional de masa reducida, CAEB, (de brazos uniformes)	44
3.3	Acelerómetro capacitivo con brazos modificados, ACBM	45
3.3.1	Dimensiones de los elementos del sistema	46
3.1	Propuesta de amplificador de desplazamiento implementando el CAEB de brazos uniformes y brazos simétricos.....	49
3.1.1	Sistema CAEB-DaCMP	50
Capítulo 4	Resultados	53
4.1	Simulación en ANSYS	54
4.1.1	Resultados de los CAEB de brazos uniformes y brazos simétricos.	54

4.2	Comparación del sistema CAEB-DaCM de brazos simétricos con el sistema CAEB-DaCMP de brazos simétricos.	57
4.3	Esfuerzo del sistema.	60
4.3.1	Esfuerzo último del sistema.	61
Capítulo 5 Conclusiones y trabajos futuros.		68
5.1	Conclusiones técnicas.....	69
5.2	Algunas consideraciones.	70
5.3	Comentarios personales.....	71
5.4	Trabajo futuro.....	72
Bibliografía		73
Anexo A	Método para hacer parametrización en ANSYS.....	79
Anexo B	Actividad relacionada con el proyecto.....	85

Índice de tablas

Tabla 2.1 Aplicaciones de los acelerómetros.....	12
Tabla 2.2 Acelerómetros clasificados según su mecanismo de transducción.	15
Tabla 2.3 Fabricación y caracterización de un amplificador mecánico flexible (Kennedy-Cabrera, Hernandez-Torres, L., Mireles Jr. García, & Saucedo-Carvajal, 2014).	29
Tabla 2.4 A Micromachined Wide-Band In-Plane Single-Axis Capacitive Accelerometer with a Displacement-Amplifying Compliant Mechanism (Khan & Ananthasuresh, 2014).....	30
Tabla 2.5 A Novel Displacement-amplifying Compliant Mechanism Implemented on a Modified Capacitive Accelerometer (Cabello-Ruiz, y otros, 2017).	31
Tabla 2.6 An Objective Evaluation of Displacement-Amplifying Compliant Mechanisms For Sensor Applications (Krishnan & Ananthasuresh, 2006).	32
Tabla 2.7 Improving the Sensitivity and Bandwidth of In-Plane Capacitive Microaccelerometers Using Compliant Mechanical Amplifiers (Khan & Ananthasuresh, 2014).....	33
Tabla 2.8 Displacement Amplification Structure and Device (Hetrick & Kota, 2003).	34
Tabla 2.9 Evaluation and Design of Displacement-Amplifying Compliant Mechanisms for Sensor Applications (Krishnan & Ananthasuresh, 2008).	35
Tabla 2.10 Optimal Design of a Compliant Microgripper for Assemble System of Cell Phone Vibration Motor Using a Hybrid Approach of ANFIS and Jaya (Ho, Dao, Le, & Chau, 2018).....	36
Tabla 3.1 Resultados del CAEB con brazos uniformes, con DaCM aplicando 1g.41	
Tabla 3.2 Resultados del CAEB con brazos simétricos, aplicando 1g.	42

Tabla 3.3 Comparación del CAEB con brazos simétricos, aplicando 1g.	43
Tabla 3.4 Dimensiones del Brazo simétrico	44
Tabla 3.5 Dimensiones de la masa de prueba y anclas	44
Tabla 3.6 Dimensiones del Brazo simétrico	47
Tabla 3.7 Dimensiones de la masa de prueba y anclas	47
Tabla 3.8 Propiedades del Silicio (Zhang, 2010).....	48
Tabla 3.9 Resultados teóricos del acelerómetro con brazos simétricos y acelerómetro con brazos convencionales aplicando 1g.	49
Tabla 3.10 Propiedades del DaCMP y del Sistema.....	52
Tabla 4.1 Desplazamiento y frecuencia de los CAEB con brazos simétricos y brazos convencionales aplicando 1g.	55
Tabla 4.2 Incremento en los parámetros desplazamiento y frecuencia al aplicar un DaCMP a cada uno de los CAEB, aplicando 1g.....	56
Tabla 4.3. Incremento en los parámetros desplazamiento y frecuencia, al aplicar un DaCMP a cada uno de los acelerómetros. La comparación se realiza tomando al sistema CAEB-DaCMP de brazos uniformes como referencia.	57
Tabla 4.4. Recopilación de los valores obtenidos por los sistemas CAEB, CAEB- DaCM y CAEB-DaCMP y sus variantes.	58
Tabla 4.5. Comparación de desempeño entre sistemas CAEB-DaCM y sistemas propuestos.	59
Tabla 4.6. Esfuerzo y desplazamiento de los sistemas cuando son sometidos a 1g, con distintos grosores.....	60
Tabla 4.7. Esfuerzo y desplazamiento del sistema cuando es sometido a fuerzas de 1g hasta 76g.	62

Tabla 4.8. Esfuerzo y desplazamiento del sistema cuando es sometido a fuerzas de
1g hasta 55g. 64

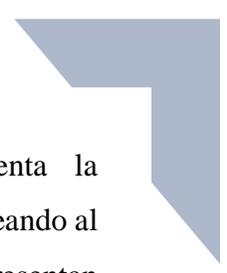
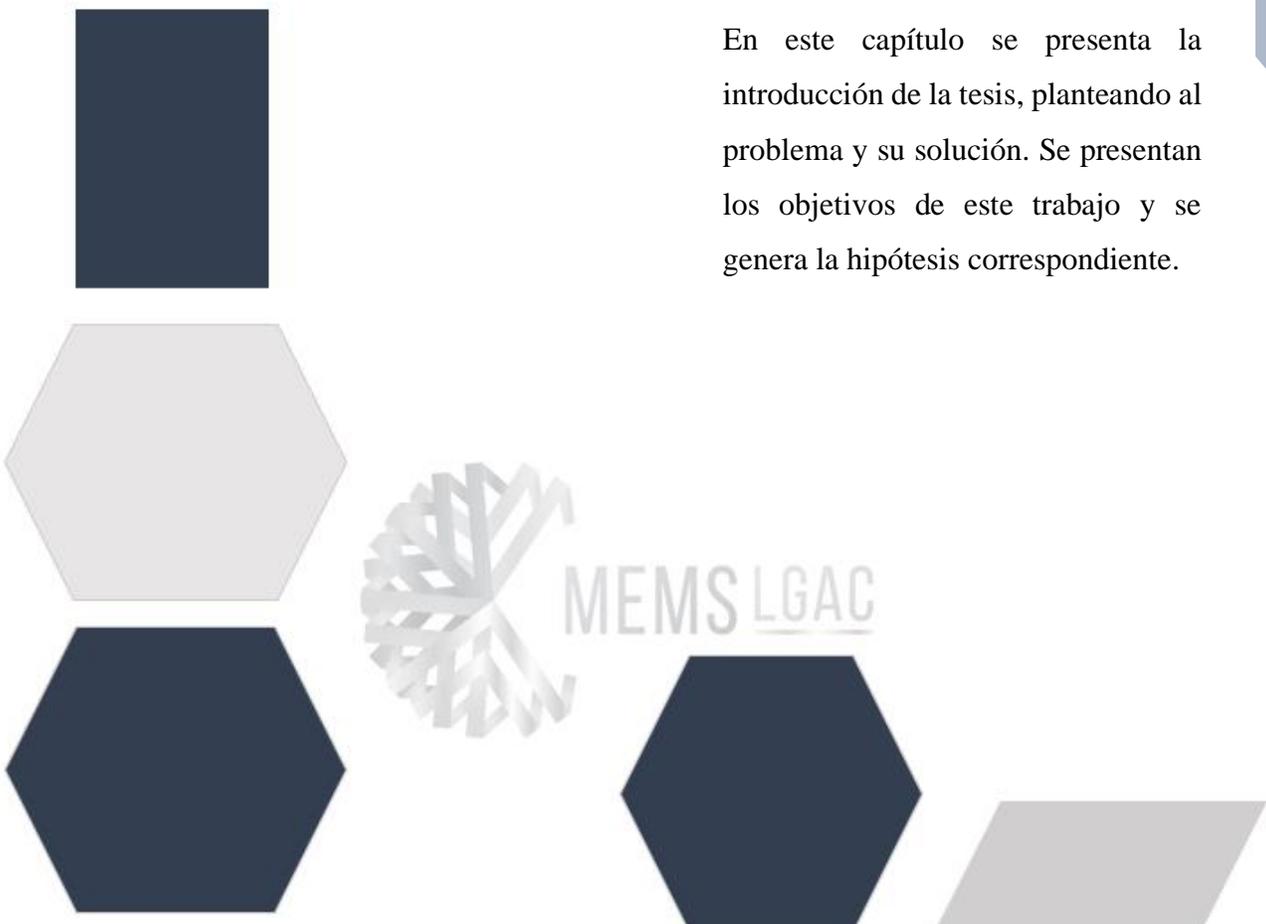
Índice de Figuras

Figura 1.1 Metodología.....	9
Figura 2.1 Bien-conocido Modelo del sistema amortiguado masa-resorte. Elaboración propia.	20
Figura 2.2 Diagrama de resorte individual (a), resortes en paralelo (b) y resortes en serie (c).....	22
Figura 2.3 Ejemplo de un mecanismo flexible tipo pinza (Ramírez Gil, Sepúlveda Orozco, & Montealegre Rubio, 2017).....	26
Figura 2.4 Mecanismo de pantógrafo (Patil, Anerao, & Chinchankar, 2017)	27
Figura 2.5 Pantógrafo compatible (Deshmukh & Paradeshi, 2012).	28
Figura 3.1 CAEB con eje X máximo de 11200 μm y eje máximo en Y de 5690 μm	40
Figura 3.2 CAEB con DaCM (Cabello-Ruiz, y otros, 2017).....	40
Figura 3.3 Desplazamiento y frecuencia del CAEB con brazos simétricos.....	42
Figura 3.4 Acelerómetro de masa reducida con brazos convencionales.....	45
Figura 3.5 Brazo simétrico. Y las dimensiones de las proporciones se presentan en la Tabla 3.6.....	46
Figura 3.6 Acelerómetro de masa reducida, con brazos simétrico, de acuerdo con las proporciones mencionadas en las Tablas 3.6 y 3.7.....	48
Figura 3.7 Sistema CAEB-DaCMP, con brazos simétricos, de acuerdo con la Tabla 3.6.....	51
Figura 4.1 Gráfica del esfuerzo del sistema CAEB-DaCMP de brazo uniforme, cuando es sometido a aceleraciones de 1 g hasta 76 g	63

Figura 4.2 Gráfica del esfuerzo del sistema CAEB-DaCMP de brazo simétrico cuando es sometido a aceleraciones de $1g$ hasta $76g$	65
Figura 4.3 Gráfica del desplazamiento de los sistemas cuando son sometidos a distintas metido a aceleraciones.....	66

Capítulo 1

Introducción



En este capítulo se presenta la introducción de la tesis, planteando al problema y su solución. Se presentan los objetivos de este trabajo y se genera la hipótesis correspondiente.



MEMS LGAC

Introducción

Para hablar de los amplificadores de desplazamiento, es deseable partir de lo general a lo particular, por lo que, se comienza con una pequeña introducción sobre los dispositivos microelectromecánicos, MEMS, seguido de los acelerómetros y su funcionamiento, llegando así a los amplificadores de desplazamiento, DACM por sus siglas en inglés (Displacement-Amplifying Compliant Mechanisms). Esto debido a que los DACM son dispositivos que se emplean en los acelerómetros MEMS.

Por otro lado, se plantea el problema a resolver, así como los temas y recursos para su solución, lo cual constituye el desarrollo de esta tesis.

La línea del tiempo de los dispositivos MEMS, tiene su origen a través de una serie de innovaciones en el campo de la microtecnología, comienza en 1947 con William Shockley en los laboratorios Bell, donde lograron construir el primer transistor de punto de contacto, utilizando germanio un elemento químico semiconductor. Es una tecnología muy joven que todavía se encuentra en desarrollo (SCME, 2017).

Los MEMS constituyen a una de las tecnologías más revolucionarias de la actualidad, conformada por dispositivos que combinan componentes eléctricos y mecánicos (basados en silicio), a escalas que varían de unos pocos micrómetros hasta milímetros. Su fabricación se basa en las técnicas de fabricación por volumen de los circuitos integrados (CI). Tienen la capacidad de registrar y actuar en escala micrométrica y generar un cambio en la escala macro. Gracias a eso, tienen una amplia gama de mercados y aplicaciones actuales y potenciales en diversas áreas, tales como electrónica, automotriz, robótica, medicina, comunicación y hasta defensa (Loughborough University, 2002).

Los MEMS pueden ser clasificados en dos rubros: sensores y actuadores. Los sensores son los dispositivos capaces de detectar magnitudes físicas del ambiente y convertirla

a un impulso eléctrico. Por otro lado, los actuadores son dispositivos que interactúan, por ejemplo, transformando un impulso eléctrico en una respuesta mecánica. Estas respuestas son traducidas en la transformación de un tipo de energía a otra, basadas en el conocimiento del desempeño del actuador, realizado previamente. Los sensores pueden obtener señales de diversas fuentes, tales como: acústicas, biológicas, químicas, magnéticas ópticas, térmicas, entre otras, y transformarlas en señales eléctricas (Alanís Navarro, 2008).

Se han desarrollado una gran cantidad de componentes MEMS utilizando varios principios de transducción, sensado y actuación de las variables físicas, concentrándose en una amplia aplicación de sensores de temperatura, presión y diversas variables físicas, como el movimiento, inerciales (acelerómetros y giroscopios) y algunas aplicaciones más (Aróztegui Walter, Osio Jorge, Rapallini José, Ocampo Jesús, & Quijano Antonio, 2011).

En 1993, los acelerómetros MEMS micromaquinados de superficie comenzaron a producirse en gran volumen por la empresa Analog Devices, con lo que lograron reducir los costes en las bolsas de aire un 75% aproximadamente, lo que ocasionó que fueran ampliamente usados por la industria automotriz. Eran fiables, económicos y pequeños. Actualmente los acelerómetros se encuentran en una amplia variedad de productos de consumo (SCME, 2017).

Los acelerómetros son sensores inerciales que, pueden clasificarse en siete grupos de acuerdo con sus mecanismos de transducción: piezoresistivos, capacitivos, corriente de efecto túnel, piezoeléctricos, ópticos, térmicos y resonantes. Los primeros seis tipos de acelerómetros mantienen su masa de prueba en reposo, cuando éstos no experimentan alguna perturbación externa, como la aceleración. La transducción mecánica a eléctrica se realiza por medio del movimiento de su masa sísmica. Por otro lado, se tienen a los acelerómetros resonantes, que como su nombre lo indica, tienen elementos

continuamente en resonancia para detectar fuerzas externas (Herrera May, Cortés Pérez, & Aguilera Cortés, 2008).

Ahora bien, un acelerómetro capacitivo basa su funcionamiento en la detección de las pequeñas variaciones de la capacitancia en función del desplazamiento relativo, producido en la masa de prueba. Son muy populares entre otros tipos de acelerómetros MEMS debido a su alta sensibilidad, bajo nivel de ruido y buena relación de estabilidad en Corriente Continua, CC, su bajo consumo de energía y menor dependencia de la temperatura. Gracias al proceso de fabricación simple de los acelerómetros capacitivos, es bastante fácil su integración con circuitos CMOS, por lo que, este tipo de dispositivos se han vuelto más dominantes al fabricar acelerómetros MEMS (Chen, 2010).

Los mecanismos compatibles con amplificadores de desplazamiento, DaCM, por sus siglas en inglés, son dispositivos que se usan para aumentar el desplazamiento en la salida de un actuador comparado con el valor de entrada. Gracias a ellos se puede aumentar la sensibilidad de los mecanismos tradicionales de dispositivos MEMS, en este caso de los acelerómetros capacitivos (Krishnan & Ananthasuresh, 2008).

Los primeros DaCM se desarrollaron para ser incorporados en los actuadores piezoeléctricos, amplificando su desplazamiento, estos utilizaban varillajes de cuatro barras y eran compatibles al reemplazar sus juntas con bisagras de flexión (Krishnan & Ananthasuresh, 2006).

El interés de esta tesis se enfoca en los acelerómetros capacitivos, buscando mejorar su sensibilidad de desplazamiento mediante un amplificador de arreglos flexibles.

Por lo que, se genera el siguiente planteamiento del problema.

1.1 Planteamiento del problema

Debido a que, en un acelerómetro, la determinación de la aceleración puede obtenerse a partir del desplazamiento que presenta su masa de prueba, es recomendable incorporar un amplificador de desplazamiento mecánico (DaCM) a esta masa, con la finalidad de que el desplazamiento bajo análisis corresponda al sistema acelerómetro-DaCM. Además, al reducir la masa total del sistema, es posible, no solo incrementar el desplazamiento, sino también mejorar su respuesta en frecuencia.

1.2 Justificación

La sensibilidad de desplazamiento es una de las metas que se persiguen en diversos MEMS, en particular en los acelerómetros, ya que esto facilita su medición a partir del dispositivo de sensado, sin incrementar significativamente a las dimensiones totales del sistema.

Se han implementado algunas aproximaciones, mediante arreglos de elementos flexibles. En este trabajo buscamos mejorar la respuesta a partir de un arreglo previamente implementado.

1.3 Hipótesis

Los acelerómetros capacitivos basan su funcionamiento en la detección de pequeños cambios en la capacitancia entre dos o más conductores en respuesta a la variación de la aceleración. La capacitancia varía en función del desplazamiento paralelo producido en una de las placas de un micro capacitor, mientras que la otra permanece estacionaria. Entonces un circuito electrónico puede medir esta variación de capacitancia.

De manera que se busca un incremento en el desplazamiento de la masa de prueba mediante el amplificador de desplazamiento sin que se penalice demasiado la frecuencia de operación.

Por lo anterior mencionado, se da origen a la siguiente hipótesis:

“Es posible diseñar un acelerómetro con mayor sensibilidad si se aumenta su desplazamiento mediante la implementación de un amplificador de desplazamiento basado en elementos flexibles bajo una configuración basada en pantógrafo”

1.4 Objetivo general

Diseñar, con ayuda del software de elemento finito ANSYS Workbench, un mecanismo de amplificación de desplazamiento, DaCM, e implementarlo en un acelerómetro capacitivo, que permita amplificar el desplazamiento y la frecuencia que presenta el acelerómetro a su salida.

1.5 Objetivos específicos

1. Diseñar al acelerómetro MEM usando la tecnología de fabricación de UACJ.
2. Seleccionar el acelerómetro que será utilizado como elemento base del sistema.
3. Diseño del amplificador de desplazamiento basado en arreglos flexibles (Displacement Amplifying Compliant Mechanism, DaCM) para su inclusión en acelerómetros.
4. Simulación del sistema acelerómetro-DaCM
5. Comparación con otro amplificador similar

1.6 Alcance

En este trabajo de tesis se realizarán dos diseños de acelerómetros, así como un amplificador de desplazamiento que ayude a reducir la utilización de material, así como las mejoras en los parámetros de interés (desplazamiento, frecuencia). Se utilizará a la herramienta Ansys-Workbench para llevar a cabo las simulaciones respectivas.

1.7 Limitaciones

El entorno de pandemia ha generado la suspensión de actividades presenciales, por lo que este trabajo ha iniciado en un entorno virtual.

El tiempo de desarrollo debe ser de acuerdo con el planteamiento del cronograma.

Es un tiempo relativamente corto, por lo que nos enfocamos en el diseño del nuevo DaCM.

Los procesos de fabricación a escala micrométrica se encuentran operando de manera escalonada, por lo que, no es posible establecer este compromiso.

La medición y prueba de desempeño son obtenidas mediante las simulaciones realizadas con el software ANSYS Workbench. Las mediciones experimentales sobre los parámetros de desempeño del sistema, por lo mencionado en el punto anterior también está fuera de los alcances de este trabajo.

1.8 Organización de la tesis

Esta tesis propone un amplificador de desplazamiento de un acelerómetro capacitivo, está compuesta de 5 capítulos, ordenados de la siguiente manera:

Capítulo 1: Se presenta la introducción de la tesis: se plantea el problema y la solución al mismo.

Capítulo 2: El marco teórico donde se describe antecedentes e información básica sobre los acelerómetros MEMS, así como información sobre las amplificaciones de desplazamiento (DACM).

Capítulo 3: Se describe el acelerómetro seleccionado, se detalla el diseño del sistema de desplazamiento, seleccionando la geometría, el material y se realizan las simulaciones.

Capítulo 4: Se obtienen los resultados de las simulaciones del sistema en el software ANSYSTM, se analiza la información y se contrasta con modelos anteriores para crear un margen de mejora.

Capítulo 5: Concluye este trabajo con el resumen de los aspectos del diseño y se expone de manera sintética los descubrimientos más importantes de la investigación y simulación realizada. En base a lo anterior se plantea un trabajo futuro y posibles mejoras.

1.9 Metodología

En la Figura 1.1 se puede observar un diagrama con la metodología llevada a cabo para la solución del problema planteado en el apartado 1.1 de este capítulo, de acuerdo con la organización de esta tesis observada en el apartado 1.8.

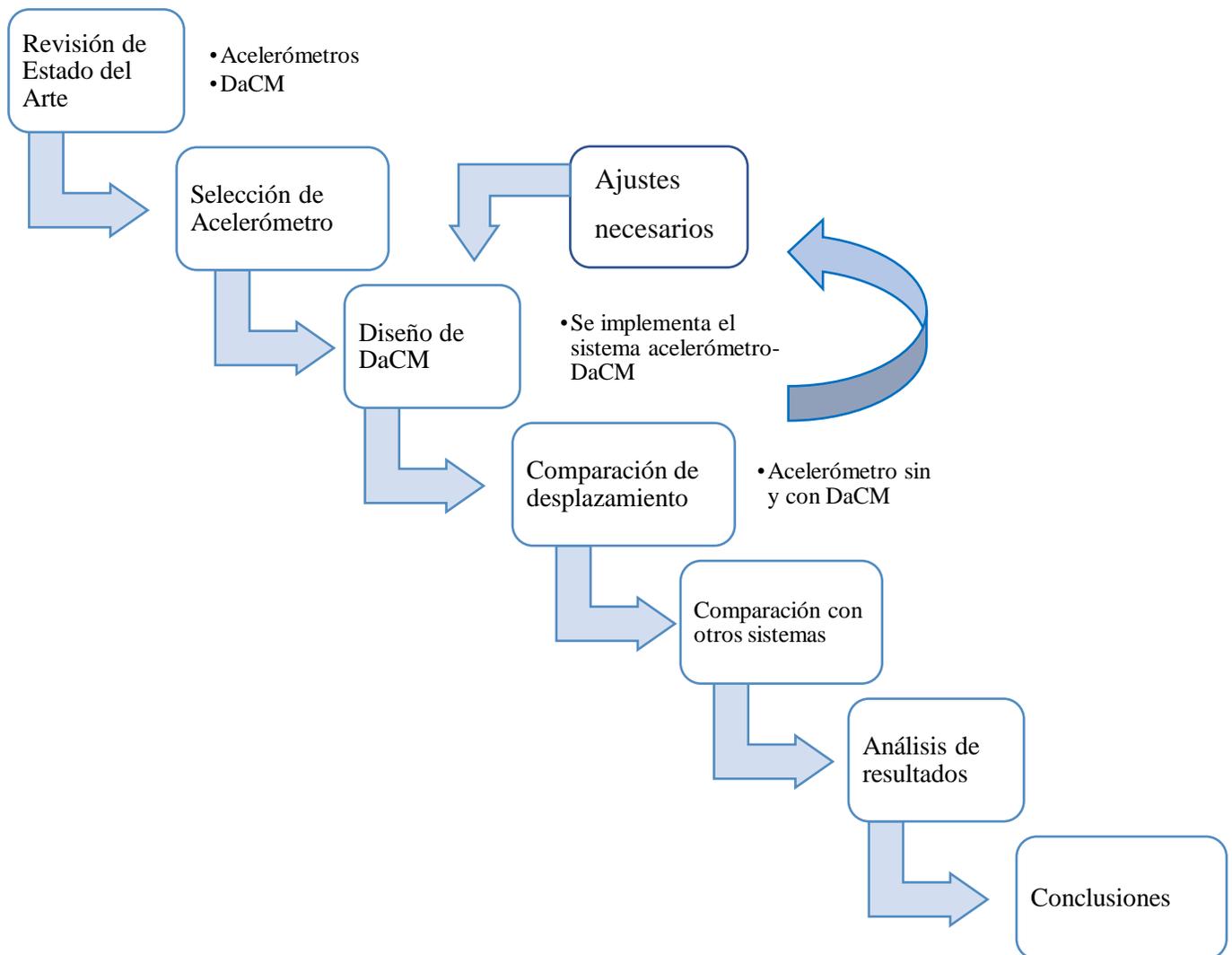
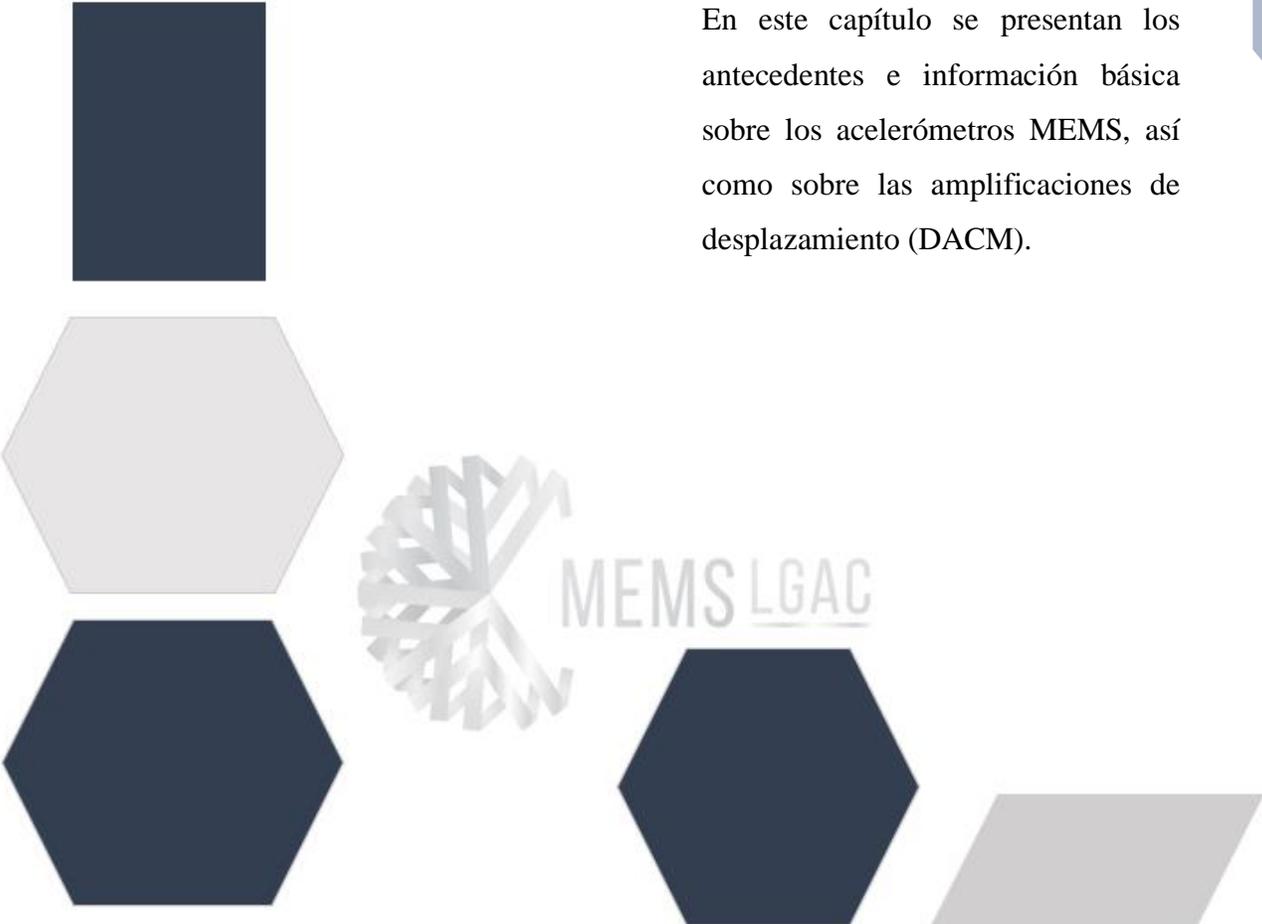


Figura 1.1 Metodología

En este capítulo se brindó una introducción sobre los MEMS, con relación a los acelerómetros, se identificó la necesidad de incrementar la sensibilidad de desplazamiento de los acelerómetros, sin sacrificar en gran medida a la frecuencia. Algunos amplificadores de desplazamiento se han utilizado en la bibliografía para este fin. Cabe señalar que, por tratarse de dispositivos recientes, no se cuenta, en la mayoría de los casos con el modelado completo, sino que se presentan análisis basados en los resultados de simulaciones. Con base en la composición del sistema acelerómetro-DaCM, se planteó la hipótesis, se determinó además el objetivo general y a los objetivos particulares. Se planteó la metodología a seguir para el desarrollo de este trabajo. Con el análisis de los recursos con los que se cuenta, se determinó el alcance de esta investigación y se determinó las limitantes que enfrenta el proyecto.

Capítulo 2

Marco teórico



En este capítulo se presentan los antecedentes e información básica sobre los acelerómetros MEMS, así como sobre las amplificaciones de desplazamiento (DACM).

Marco teórico

2.1 Acelerómetros MEMS

2.1.1 Aplicaciones

Los acelerómetros tienen una amplia aplicación en la industria, son útiles en el monitoreo de vibraciones y se pueden encontrar desde grandes maquinarias complejas hasta en dispositivos más pequeños que caben en una mano. Algunos de los usos más comunes se describen en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Aplicaciones de los acelerómetros.

Aplicaciones de los acelerómetros en el mundo real.	
Dispositivos digitales	Utilizan acelerómetros para rotar la pantalla de los teléfonos inteligentes y las cámaras digitales en función de la orientación en la que son sostenidos (Omega Engineering Inc, 2018).
Vehículos	Utilizan los acelerómetros para las bolsas de aire, cuando el sensor experimenta una descarga repentina envía una señal que activa las bolsas de aire. La invención de estas bolsas ha salvado millones de vidas desde su creación (Omega Engineering Inc, 2018).
Maquinaria	Utilizan los acelerómetros como instrumentos de medición que comprueban de manera rápida y segura las piezas que vibran en maquinarias e instalaciones. Los acelerómetros detectan las

	<p>revoluciones, el desplazamiento y la velocidad de vibración de las piezas que vibran (PCE Instruments™, 2021).</p>
Plataformas industriales	<p>Utilizan acelerómetros para medir la estabilidad o medir la inclinación de la plataforma (Omega Engineering Inc, 2018).</p>
Drones	<p>Utilizan los acelerómetros para la estabilización de los drones cuando estos están en pleno vuelo, hallando la orientación y dirección del dispositivo (Omega Engineering Inc, 2018).</p>
Pruebas estructurales	<p>Los acelerómetros son los instrumentos más empleados en estructuras civiles porque pueden ser adheridos directamente a la estructura sin requerir un marco independiente de referencia. Cuando existe un defecto estructural, tal como una grieta, mala soldadura, o la corrosión puede cambiar la firma de la vibración de la estructura, generando un patrón que puede ser registrado por un acelerómetro, posteriormente es analizado y comparado con una firma de referencia. El monitoreo de salud estructural permite la identificación y caracterización del daño en las estructuras con el objetivo de realizar intervenciones anticipadas a bajo costo (Franco, Gómez, Hernán Murcia, & Thomson, 2011).</p>
Acelerometría (clínico)	<p>En el ámbito clínico se utilizan los acelerómetros como una herramienta para la monitorización de movimientos humanos de una manera que resulta objetiva y confiable, arrojando un amplio abanico de mediciones que pueden ser clasificadas en distintos movimientos, esto gracias a que es posible utilizarla en el día con día del paciente debido a que no implica grandes costes (Izquierdo, Martínez-Ramírez, Larrión, Irujo-espínosa, & Gómez, 2008).</p>

GPS	El sistema de posicionamiento global permite posicionar cualquier objeto sobre la superficie terrestre. La colaboración de los acelerómetros, giroscopios y GPS realizan estimaciones más precisas con respecto a la posición de un objeto, reduciendo un error de 5 ó 10 metros a simplemente un error menor a 2 metros (Ávila & Federico, 2018).
------------	--

2.1.2 Tipos de acelerómetros

Actualmente los acelerómetros MEMS consisten en un sistema de suspensión y de una masa de prueba cuya deflexión genera una medición de la aceleración. Los acelerómetros se pueden clasificar según su fabricación, según su método de transducción del movimiento mecánico al eléctrico o por el tipo de control que usa el sistema. En el diseño de los acelerómetros predominan dos procesos de fabricación, los cuales son el micromaquinado en bulto y el micromaquinado en superficie, este último es utilizado cuando se desea integrar la estructura mecánica y el circuito integrado en el mismo chip. (Rincon-Jara, Ambrosio, & Mireles, 2010)

En la Tabla 2.2 se muestran algunos tipos de acelerómetros clasificados según su mecanismo de transducción:

Tabla 2.2 Acelerómetros clasificados según su mecanismo de transducción.

Micro acelerómetro	Descripción
Piezo-resistivo	<p>El efecto piezo-resistivo básicamente puede resumirse como el cambio que ocurre en una resistencia al sufrir una deformación. Consiste en una masa sísmica, una viga y un elemento de soporte, el material piezo-resistor se coloca en el inicio de la viga donde la concentración de esfuerzos mecánicos es mayor, cuando el dispositivo se sujeta a una aceleración, la masa experimenta un desplazamiento, provocando deformaciones en la viga que generan un cambio en la resistencia eléctrica del piezo-resistivo (Herrera May, Cortés Pérez, & Aguilera Cortés, 2008).</p>
Capacitivo	<p>Los acelerómetros capacitivos basan su funcionamiento en la detección de pequeños cambios en la capacitancia entre dos o más conductores en respuesta a la variación de la aceleración. La capacitancia varía en función del desplazamiento paralelo producido en una de las placas de un micro capacitor, mientras que la otra permanece estacionaria. Entonces un circuito electrónico puede medir esta variación de capacitancia.</p> <p>Tienen una baja dependencia a la temperatura, poseen una buena respuesta ante la corriente directa, tienen una alta sensibilidad, se basan en una estructura simple y tienen baja dispersión de potencia (Herrera May, Cortés Pérez, & Aguilera Cortés, 2008).</p>
Corriente de efecto túnel	<p>El acelerómetro de tunelización utiliza un principio general de funcionamiento que se utiliza comúnmente para la microscopía de tunelización de barrido, en donde se aplica un voltaje de</p>

polarización entre una punta de metal afilada y una muestra conductora. Cuando la punta y la muestra se acercan a unos cuantos Angstroms (\AA) entre sí puede fluir una corriente de efecto túnel debido a los efectos de efecto túnel de la mecánica cuántica (Boyden, El-Rifai, Hubert, & Karpman, 1999).

Piezoeléctrico Basan su funcionamiento en el efecto piezoeléctrico. Cuando son sometidos a alguna fuerza producen una corriente eléctrica, a causa de la variación de su estructura cristalina. Se componen colocando un cristal piezoeléctrico entre la carcasa y una masa inercial, produciendo una corriente cuando se aplica una aceleración, esto debido a que la masa ejerce una fuerza sobre el cristal. Midiendo esta corriente se puede calcular la aceleración (Arena Mas, 2008).

Mecánico Emplean una masa inerte y resortes elásticos. Los cambios se miden con galgas extensiométricos, incluyendo sistemas de amortiguación que evitan la propia oscilación. En este tipo de acelerómetro, una o más galgas extensiométricas hacen de puente entre la carcasa del instrumento y la masa inercial, la aceleración produce una deformación que se traduce en variación de corriente detectada por un puente de Wheatstone (Arena Mas, 2008).

Óptico Detecta la aceleración en base al principio de modulación de la intensidad luminosa. Este tipo de sensor se fabrica utilizando fibras, rejillas ópticas y otros elementos ópticos separados. Pueden leerse de forma remota mediante fibras ópticas, se pueden colocar en entornos electromagnéticos, agresivos u explosivos sin afectar sus propiedades de detección y no producen atajos o picos en la zona de medición. A pesar de tener mejor estabilidad la inserción de luz sigue siendo un problema importante, debido a sus limitaciones de espesor, principalmente causadas por su alto estrés

	intrínseco (Llobera, Seidemann, Plaza, Cadarso, & Buttgenbach, 2005).
Térmico	El principio de funcionamiento de los acelerómetros térmicos se basa en el efecto de la convección de fluido o gas en cavidades cerradas bajo la influencia de fuerzas externas de inercia. El dispositivo incluye un elemento calefactor H que crea alrededor de sí mismo un campo térmico simétrico. En ausencia de una perturbación externa a lo largo del eje sensible X, el sistema está en equilibrio y los sensores térmicos leen la misma señal. Cuando existe una aceleración externa, el perfil de temperatura cambia, lo que da como resultado la diferencia de temperatura entre los sensores, dependiendo de la amplitud de la aceleración (Basarab, Giani, & Combette, 2020).
Resonante	Consiste en medir la variación de la frecuencia de una estructura en oscilación. La característica básica de estos acelerómetros es su señal de salida digital, que tiene las ventajas de una detección fácil, una buena capacidad de anti-interferencia y errores más pequeños en la transmisión y el procesamiento. Realizan mediciones de alta precisión con relativa facilidad (Huang, Chen, Ni, Gao, & Zhao, 2012).

2.2 Principios físicos del sensor

De manera general el sensor del acelerómetro funciona cuando la aplicación de una carga inercial ejerce una fuerza sobre la masa de prueba, esto se traslada a un desplazamiento en el resorte elástico. Para analizar la operación del acelerómetro será necesario citar dos principios físicos que describen su comportamiento, la Segunda Ley de Newton y la Ley de la elasticidad de Hooke.

2.2.1 Segunda Ley de Newton

La llamada ley o principio fundamentales de la dinámica, plantea que las aceleraciones que experimenta un cuerpo son proporcionales a las fuerzas que recibe. Se describe en la ecuación matemática (2.1), que implica tres magnitudes como son la fuerza neta expresada en Newton (N), la masa del cuerpo que se expresa en kilogramos (kg) y la aceleración que adquiere el cuerpo expresado en metros sobre segundo al cuadrado (ms^{-2}).

$$F = ma = \frac{d^2x}{dt^2} \quad (2.1)$$

2.2.2 Ley de la elasticidad de Hooke

Para muchos materiales la curva de esfuerzo contra la deformación tiene una región lineal. Dentro de ciertos límites la fuerza requerida para estirar un objeto elástico, como un resorte de metal, es directamente proporcional a la extensión del resorte. A esto se le conoce como ley de Hooke y se puede describir de acuerdo con la ecuación (2.2):

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

Donde F es la fuerza en Newton (N), x la longitud de la extensión o compresión, en metros (m), según sea el caso y k es la constante de proporcionalidad, dada en Newton por metro (N/m), conocida como constante de resorte que define la sensibilidad del sistema a las cargas inerciales. Se puede hacer una aproximación inicial para una dimensión usando la ecuación estándar de la deflexión de una viga en voladizo anclada,

bajo una fuerza puntual que se aplica en el extremo opuesto. El valor de k esta descrito por la ecuación (2.3) (Kreith & Mahajan, 2006).

$$k = \frac{Ehw^3}{4l^3} \quad (2.3)$$

Donde: E es el módulo de elasticidad para el material del resorte (Pa).

h es el espesor de la viga (m).

w es el ancho de la viga (m).

l es el largo de la viga (m).

El desplazamiento puede ser obtenido de la ecuación 2.2, resultando la ecuación 2.4.

$$x = \frac{F}{k} \quad (2.4)$$

2.2.3 Modelo del sistema amortiguado masa-resorte.

El modelo mecánico básico del sistema amortiguado masa-resorte de un acelerómetro capacitivo se describe en la Figura 2.1

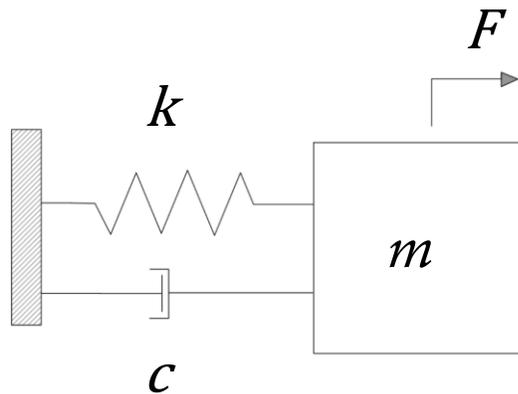


Figura 2.1 Bien-conocido Modelo del sistema amortiguado masa-resorte. Elaboración propia.

El diseño del amortiguador debe proporcionar un coeficiente de amortiguamiento dinámico óptimo a través de la amortiguación de película comprimida mediante la elección de una geometría adecuada del sensor y de las presiones del empaque. El efecto describe la relación de aspecto del espacio entre las placas y la presión ambiental. Estos dispositivos inerciales operan en un entorno aislado lleno de algún gas que funge como fluido de trabajo que disipa la energía. Estas películas de gas generan una fuerza, debido a la compresión y fricción interna, que se opone al movimiento de las placas, dicha amortiguación recibe el nombre de amortiguación de película comprimida. Bajo el supuesto movimiento pequeño de un eje, la fuerza inducida por el flujo es linealmente proporcional al desplazamiento y la velocidad de las placas en movimiento (Kreith & Mahajan, 2006).

La ecuación 2.5 describe un modelo dinámico de un solo eje de un acelerómetro:

$$m \frac{d^2 \Delta x}{dt^2} + C \frac{d \Delta x}{dt} + k_x \Delta x = -m a_x \quad (2.5)$$

De manera general, los sensores inerciales tienen múltiples modos resonantes dentro y fuera del eje para ser controlados, pero la resonancia en el eje de sensibilidad es el efecto principal con mayor impacto en el funcionamiento del dispositivo.

2.2.4 Constante de rigidez

La constante de rigidez es otro parámetro para determinar la frecuencia natural y la sensibilidad. Cuando se tienen 2 o más resortes en paralelo, tal como se muestra en la Figura 2.2b, 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:

$$F = F_1 + F_2 = K_1x + K_2x = (K_1 + K_2)x = K_e x \quad (2.6)$$

Por lo que:

$$K_e = K_1 + K_2 \quad (2.7)$$

Cuando se tienen 2 o más resortes en serie, tal como se muestra en la Figura 2.2c, la fuerza ejercida sobre cada resorte es la misma y el desplazamiento total esta dado por:

$$x = x_1 + x_2 = \frac{F}{k_1} + \frac{F}{k_2} = \left(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}\right)F = \frac{F}{k_e} \quad (2.8)$$

Por lo que k_e equivale a

$$k_e = \left(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}\right)^{-1} \quad (2.9)$$

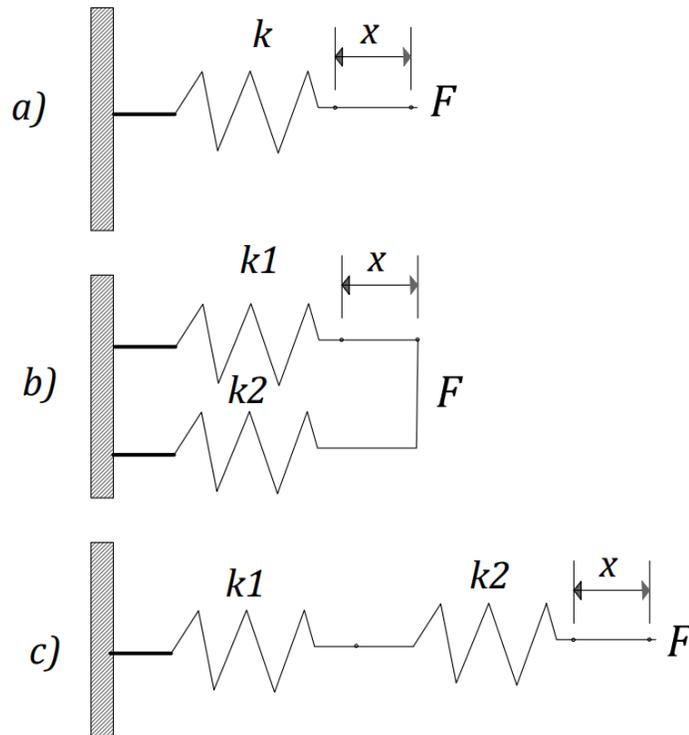


Figura 2.2 Diagrama de resorte individual (a), resortes en paralelo (b) y resortes en serie (c).

2.2.5 Frecuencia natural

La vibración se puede definir fácilmente como una oscilación que es análoga al movimiento de las partículas de una masa de aire o similar, cuyo estado de equilibrio se ha alterado. Exponiendo un movimiento primero en una dirección y luego nuevamente en la dirección opuesta. El número de veces que se produce un movimiento completo durante el período de un segundo se denomina frecuencia, que se mide en hercios (Hz). La frecuencia natural de vibración de una estructura corresponde a la frecuencia de resonancia de esa estructura. Los desplazamientos máximos se producen si una estructura se somete a vibraciones en su frecuencia natural (Chandradeep, Anjani, Nitesh, & Ajit, 2014).

La frecuencia de resonancia del sensor está dada por la ecuación 2.5, (Xie, Song, & Yuan, 2013).

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.10)$$

Donde: k es la constante de rigidez.
 m es la masa del sistema.

2.2.6 Esfuerzo

El esfuerzo o estrés de un material es una medida de la fuerza por unidad de área (en la que se aplica) que causa la deformación, sus unidades son $[\text{N}/\text{m}^2]$.

El esfuerzo último determina el rango de la fuerza soportada por el sensor. En otras palabras, el esfuerzo máximo experimentado por el mecanismo sobre el rango previsto del sensor determina su factor de seguridad contra fallas, esto después de que es seleccionado el material para implementarlo en el mecanismo (Krishnan & Ananthasuresh, 2008). El esfuerzo máximo en el extremo fijo de una viga está dado por la ecuación 2.11.

$$T_{\text{máx}} = \frac{FLb}{2I} \quad (2.11)$$

Donde: F es la fuerza aplicada.

$I = \frac{tw^3}{12}$ es el momento de inercia [m^4], donde w es el grosor en la dirección de doblamiento del brazo y t es la dimensión transversal.

L es la longitud de la viga.

b es el ancho de la viga.

2.3 Acelerómetro capacitivo

Dado que el estudio de esta tesis se enfoca en crear un amplificador de desplazamiento mediante arreglos flexibles para acelerómetros capacitivos, se describe el sensor capacitivo.

Los acelerómetros capacitivos son uno de los mecanismos de detección de precisión más relevantes además de ser ampliamente utilizados, están formados de una o más placas conductoras estacionarias con una o más placas conductoras paralelas móviles. Como la capacitancia es inversamente proporcional a la distancia entre las placas, la detección de pequeños desplazamientos es altamente precisa (Loughborough University, 2002).

La medición de la capacitancia se basa en la bien conocida ecuación básica del capacitor de placas plano-paralelas:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \quad (2.12)$$

Donde: ϵ_0 es la permitividad del espacio libre= 8.854×10^{-12} Fm^{-1} .

ϵ_r es la permitividad relativa del material entre placas.

A es el área de placa superpuesta (m).

d es la separación de placas (m).

2.4 Amplificadores de desplazamiento DaCM

Bajo un enfoque teórico del sistema, un amplificador mecánico consiste en un dispositivo capaz de transformar un desplazamiento aplicado en su entrada y magnificarlo en la salida de este mecanismo. Tienen una gran sencillez y su utilidad depende de la obtención de la magnitud de la ganancia o amplificación de la señal mecánica que se genere. Se constituyen de partes sencillas como vigas rígidas unidas mediante goznes o pernos de ensamble. Los amplificadores mecánicos pueden ser clasificados en dos grupos principales: los amplificadores mecánicos con uniones y los amplificadores mecánicos monolíticos o sin uniones. Los amplificadores monolíticos presentan mayor precisión, debido a que, los amplificadores con uniones presentan en cada unión una “zona muerta” o backlash, en inglés, por lo que el desplazamiento de entrada no se ve reflejado en su totalidad en la salida (Kennedy-Cabrera y otros, 2014).

2.4.1 Ganancia geométrica

La ganancia geométrica se refiere a la ganancia en deflexión o desplazamiento y está dada por la siguiente expresión (Kennedy-Cabrera y otros, 2014):

$$\text{máx } G A = \frac{\delta_0}{\delta_i}$$

donde δ_o representa el desplazamiento de salida, δ_i es el desplazamiento de entrada y $máx GA$ es la ganancia geométrica máxima.

2.5 Mecanismos flexibles

Los mecanismos flexibles, o MFs, son estructuras monolíticas donde su desplazamiento se da gracias a la flexibilidad de sus miembros estructurales, cuando están bajo la acción de una fuerza, como se observa en la figura 2.2. Los MFs pueden integrar diferentes funciones en una o en un número reducido de partes. Tienen grandes ventajas, ya que ofrecen un mayor rendimiento gracias a su compactibilidad y precisión, son de bajo peso y generan poca fricción, lo que elimina la lubricación del mecanismo, traduciendo todo esto en una fabricación simple. Por su versatilidad, se ha incrementado su uso en los últimos años, teniendo una amplia gama de aplicaciones en la industria a escalas micro y nanométricas (MEMS y NEMS) (Ramírez Gil, Sepúlveda Orozco, & Montealegre Rubio, 2017).

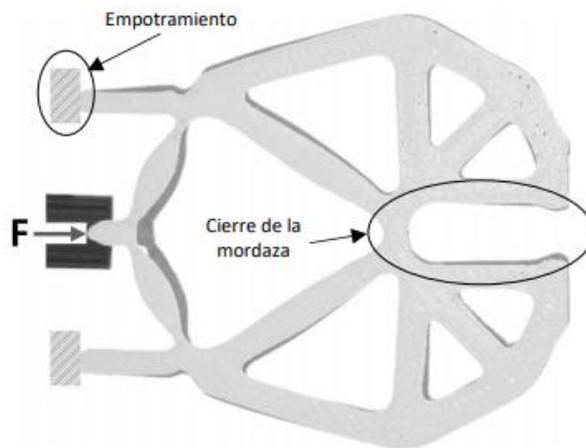


Figura 2.3 Ejemplo de un mecanismo flexible tipo pinza (Ramírez Gil, Sepúlveda Orozco, & Montealegre Rubio, 2017)

Para el desarrollo del dispositivo, la estructura del DaCM, se basa en el mecanismo de pantógrafo de forma compatible, para aplicaciones en desplazamiento lineal.

Los mecanismos compatibles se utilizan para mejorar o reducir el desplazamiento de las relaciones de aumento. Un pantógrafo es considerado un mecanismo bien establecido para replicar y mejorar o disminuir el desplazamiento. Por lo que un pantógrafo es un enlace mecánico conectado de una forma, basado en un paralelogramo (Patil, Anerao, & Chinchankar, 2017). Un ejemplo del pantógrafo se muestra en la Figura 2.3, el segmento $AB \parallel CD$ y el segmento $AD \parallel BC$, a su vez el segmento AB se extiende hasta el soporte fijo O . De modo que, en estas circunstancias, el punto E reproducirá el movimiento del punto D a una escala ampliada, o en caso inverso, el punto D reproducirá el movimiento del punto E a una escala reducida.

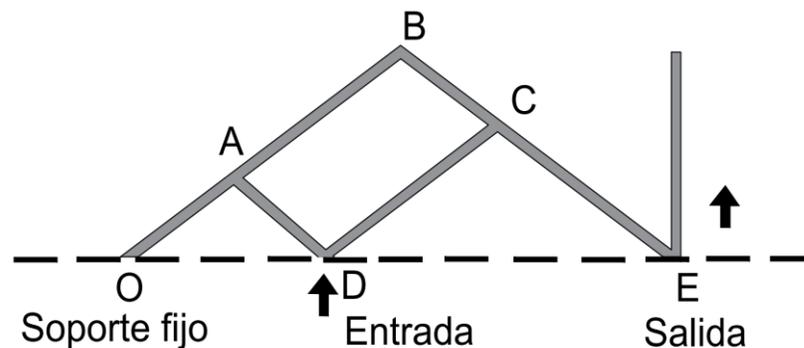


Figura 2.4 Mecanismo de pantógrafo (Patil, Anerao, & Chinchankar, 2017)

Para el pantógrafo:

$$\frac{OA}{OB} = \frac{AD}{BE} \quad (2.13)$$

Tomando $2OA=OB=60$ unidades, y $2AD=BE=45$ unidades,

$$\frac{OA}{OB} = \frac{AD}{BE} = \frac{30}{60} = \frac{22.5}{45} = \frac{1}{2} \quad (2.14)$$

Teniendo en cuenta las dimensiones de la ecuación 2.14, se presenta un pantógrafo compatible como se muestra en la Figura 2.5.

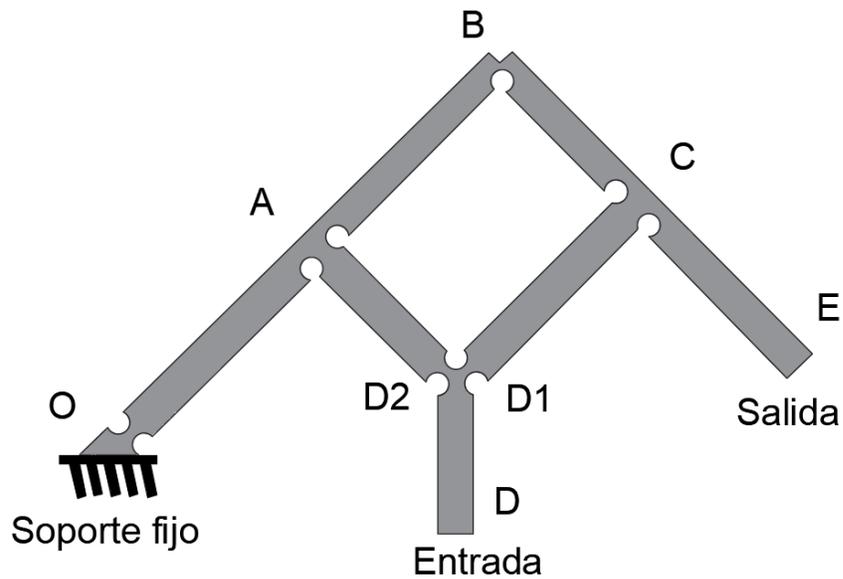


Figura 2.5 Pantógrafo compatible (Deshmukh & Paradeshi, 2012).

Se espera que la amplificación geométrica del mecanismo sea casi el doble en el punto de salida E cuando se proporcione una entrada lineal en el punto D. Con este mecanismo se transmite el movimiento y la fuerza linealmente replicando el movimiento de entrada. Los mecanismos compatibles ofrecen una alternativa menos articulada a diferencia de los mecanismos convencionales de estructura rígida (Deshmukh & Paradeshi, 2012).

2.6 Estado del arte de los amplificadores de desplazamiento

Los DaCM, en este caso, se enfocan en aumentar la sensibilidad de los acelerómetros capacitivos, incorporando la amplificación mecánica en el elemento sensor. En el estado del arte se han encontrado algunos modelos de amplificación de desplazamiento, los cuales se muestran en las Tablas 2.3-2.10.

Tabla 2.3 Fabricación y caracterización de un amplificador mecánico flexible (Kennedy-Cabrera, Hernandez-Torres, L., Mireles Jr. García, & Saucedo-Carvajal, 2014).

Descripción general	Amplificador mecánico flexible
Material	Cobre
Medidas	Alto: 52.810 mm Ancho: 36.76mm Espesor: .2290mm Ancho de la viga: .1mm
Tensión máxima	6.028 MPa
Frecuencia de operación	206.37 Hz
Ganancia	22.9 veces el desplazamiento de entrada.
Esquema	

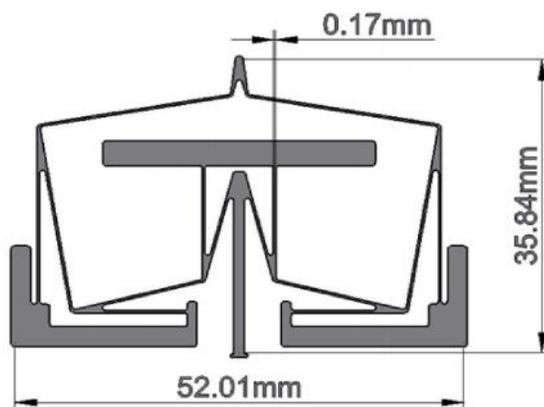


Tabla 2.4 A Micromachined Wide-Band In-Plane Single-Axis Capacitive Accelerometer with a Displacement-Amplifying Compliant Mechanism (Khan & Ananthasuresh, 2014).

Descripción general	DaCM en Acelerómetro de banda ancha
Material	Obleas de Silicio sobre aislante
Medidas	Ancho de viga: 300 μm Largo de viga: 12 μm Espesor 25 μm
Tensión máxima	0.11 MPa
Frecuencia de operación	6.27 kHz
Ganancia	6.35 veces el desplazamiento de entrada.
Esquema	

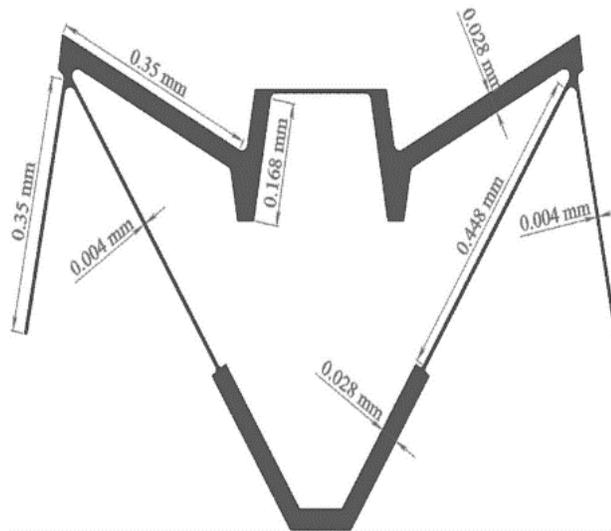


Tabla 2.5 A Novel Displacement-amplifying Compliant Mechanism Implemented on a Modified Capacitive Accelerometer (Cabello-Ruiz, y otros, 2017).

Descripción general	Nuevo DaCM implementado en un acelerómetro capacitivo. Se considera el CAEB con DaCM sobre el CCA con DaCM debido a que se obtiene un mayor desplazamiento a pesar de penalizar la frecuencia de operación.
Material	Silicio
Ganancia	Sensibilidad al desplazamiento: 13.18 $\mu\text{m/g}$ (22.4% con respecto al CAEB sin DaCM)
Frecuencia de operación	de 245.38 Hz (61.4% con respecto al CAEB sin DaCM)
Tensión máxima	----
Esquema	

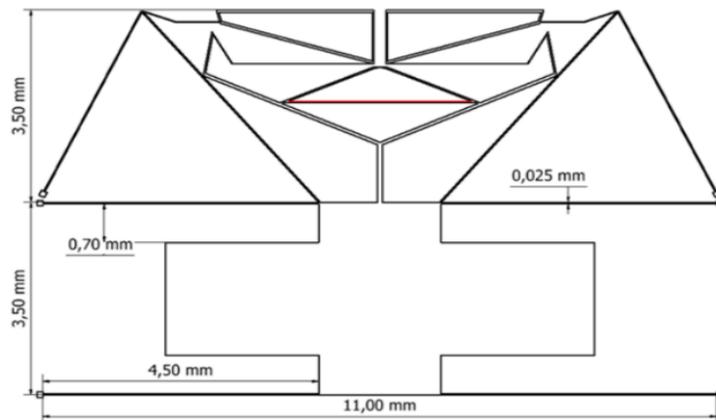


Tabla 2.6 An Objective Evaluation of Displacement-Amplifying Compliant Mechanisms For Sensor Applications (Krishnan & Ananthasuresh, 2006).

Descripción general	Magnificador de desplazamiento
Material	Silicio
Medidas	Masa: 2000 μm largo, 1000 μm ancho, 450 μm espesor. Brazos: 700 μm largo, 40 μm ancho, 3 μm espesor.
Ganancia	1.85 veces el desplazamiento de entrada.
Frecuencia de operación	255 Hz
Sensibilidad	7.25 g $\Delta C/C_0$
Esquema	

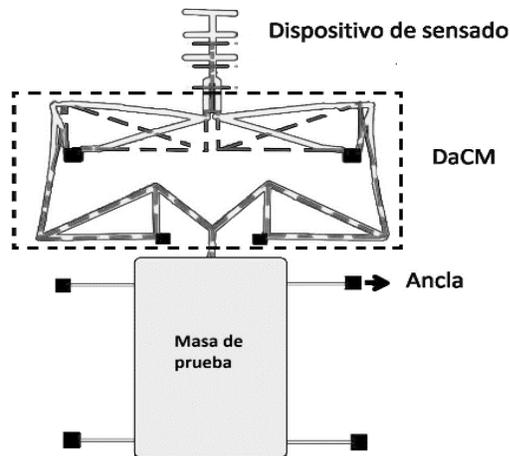


Tabla 2.7 Improving the Sensitivity and Bandwidth of In-Plane Capacitive Microaccelerometers Using Compliant Mechanical Amplifiers (Khan & Ananthasuresh, 2014).

Descripción general	Acelerómetro modificado usando DaCM.
Material	Silicio
Ganancia	Sensibilidad de desplazamiento estático 0.127 $\mu\text{m/g}$ (mejora del 25% con respecto al dispositivo sin DaCM)
Rigidez efectiva	320.6 N
Frecuencia de operación	1947 Hz (mejora del 25% con respecto al dispositivo sin DaCM)
Observación del autor	La sensibilidad de cualquier acelerómetro capacitivo puede mejorarse utilizando un DaCM en lugar de aumentar el tamaño de la masa de prueba.

Esquema

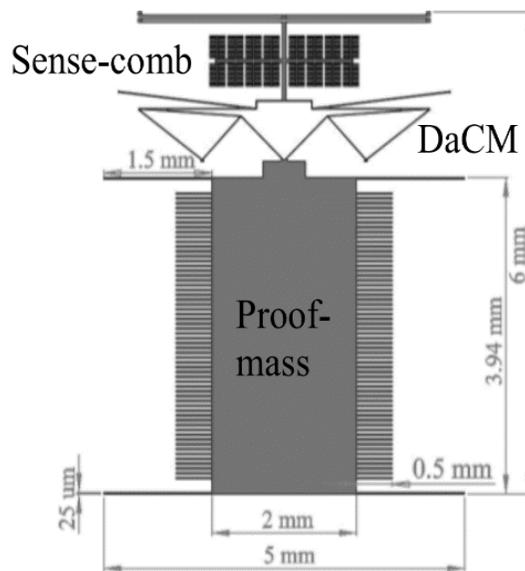


Tabla 2.8 Displacement Amplification Structure and Device (Hetrick & Kota, 2003).

Descripción general Dispositivo de amplificación de desplazamiento.

El desplazamiento X de entrada única se puede aplicar a la serie de estructuras que forman el dispositivo, con la topología de la serie de estructuras configuradas de tal forma que el dispositivo está conformado por dos mitades espejadas. Dicha configuración puede ser utilizada para proporcionar el desplazamiento de salida Y de los miembros de salida generalmente a lo largo del eje del desplazamiento de entrada X.

Esquema

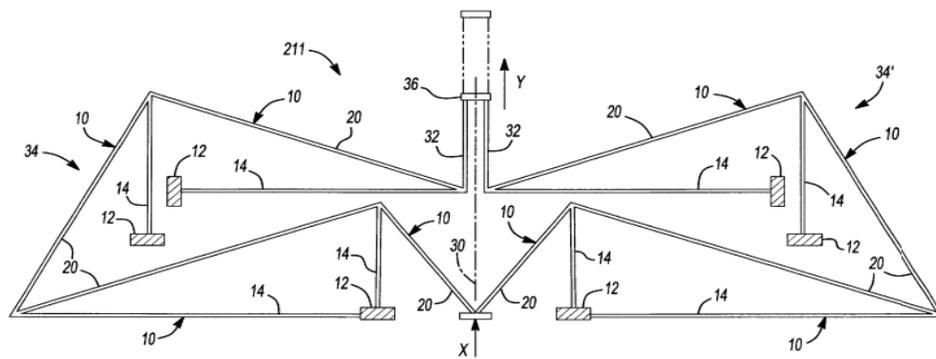


Tabla 2.9 Evaluation and Design of Displacement-Amplifying Compliant Mechanisms for Sensor Applications (Krishnan & Ananthasuresh, 2008).

Descripción general DaCM unido a una masa de prueba y una suspensión.
Tiene una sensibilidad de eje transversal de 0.02% y una rigidez baja.

Esquema

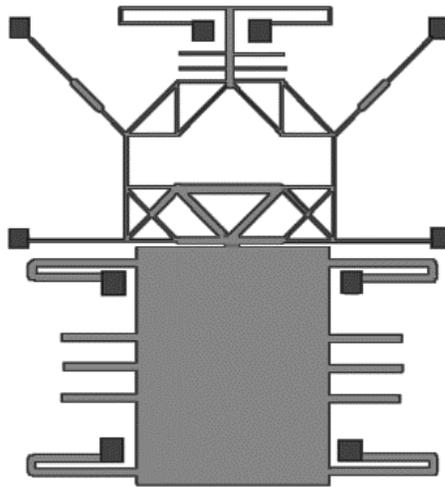
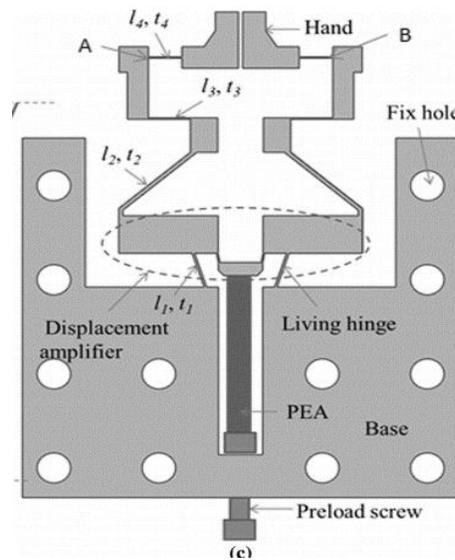


Tabla 2.10 Optimal Design of a Compliant Microgripper for Assemble System of Cell Phone Vibration Motor Using a Hybrid Approach of ANFIS and Jaya (Ho, Dao, Le, & Chau, 2018)

Descripción general	Amplificador de desplazamiento en una micropinza compatible.
Dimensiones	Sistema: 129 mm de largo, 104 mm de ancho y 10 mm de grosor. Amplificador de desplazamiento: $l_1 = 10.0$ mm, $l_2 = 20.6$ mm, $l_3 = 11.2$ mm, $l_4 = 6.0$ mm, $t_1 = 0.5$ mm, $t_2 = 0.8$ mm, $t_3 = 0.4$ mm y $t_4 = 0.9$ mm.
Ganancia	Tiene una relación de amplificación de desplazamiento de 12 veces el desplazamiento de entrada.
Frecuencia de operación	61.9 Hz

Esquema

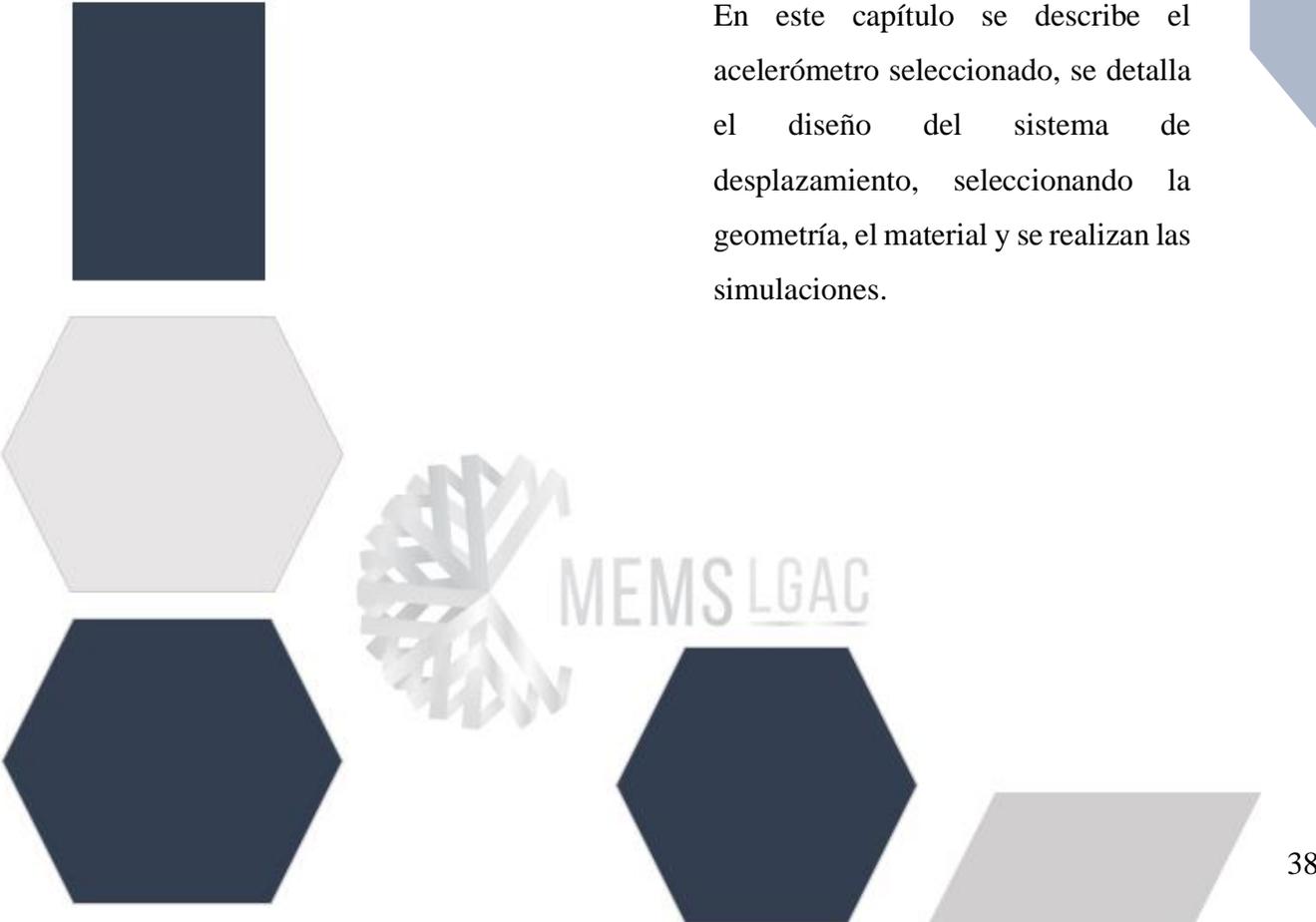


En este capítulo se realizó una investigación sobre los acelerómetros MEMS; los tipos de acelerómetros más comunes utilizados en la industria y sus aplicaciones en diversas áreas. Para conocer su funcionamiento, se investigaron los principios físicos del sensor y las leyes que los rigen. Para la realización del DaCM se hizo una revisión de la literatura del estado del arte, encontrando algunos amplificadores de desplazamiento, lo que permitió conocer la investigación y los avances realizados por otros autores. Se analizó la información obtenida, lo que ayudó a evitar redundar esfuerzos al diseñar al amplificador de desplazamiento y permitió obtener una perspectiva más clara sobre este dispositivo. Este capítulo es de utilidad para el capítulo 3, el diseño del Sistema Acelerómetro-DaCM, y para el capítulo 4, Análisis de Resultados, ya que, al contar con información sobre el estado del arte, podremos realizar las comparaciones necesarias entre nuestro sistema y algunos sistemas reportados en la literatura.

Capítulo 3

Diseño del Sistema

Acelerómetro- DaCM y simulaciones



En este capítulo se describe el acelerómetro seleccionado, se detalla el diseño del sistema de desplazamiento, seleccionando la geometría, el material y se realizan las simulaciones.

Diseño del Sistema Acelerómetro-DaCM y simulaciones.

En este capítulo, para el desarrollo de este Sistema A-DaCM se utiliza como base el sistema acelerómetro capacitivo de brazos extendidos, CAEB, por sus siglas en inglés (Capacitive Accelerometer with Extended Beams), con un mecanismo compatible con amplificación de desplazamiento implementado, DaCM, por sus siglas en inglés (Displacement-amplifying Compliant Mechanism), que se presenta en el artículo:

A Novel Displacement-amplifying Compliant Mechanism Implemented on a Modified Capacitive Accelerometer (Cabello-Ruiz, y otros, 2017).

Posteriormente en el CAEB se realizan modificaciones en la estructura de los brazos, seccionando el largo total del brazo en 6 segmentos y cambiando la masa de algunos de ellos, mediante modificaciones en el ancho, de acuerdo con (Flores Castro, 2020) mientras en el DaCM se realizan modificaciones en el arreglo de vigas de soporte, tomando como base una estructura similar al pantógrafo.

3.1 CAEB-DaCM

En la Figura 3.1, se muestra el CAEB con masa de prueba completa. En la Figura 3.2 se muestra el sistema CAEB-DaCM (Cabello-Ruiz, y otros, 2017), con un CAEB que se ajusta a la mitad de las dimensiones totales externas del CAEB completo. En la Tabla 3.1 se muestran los resultados de ambos dispositivos y el porcentaje de ganancia que se obtiene al implementar el amplificador.

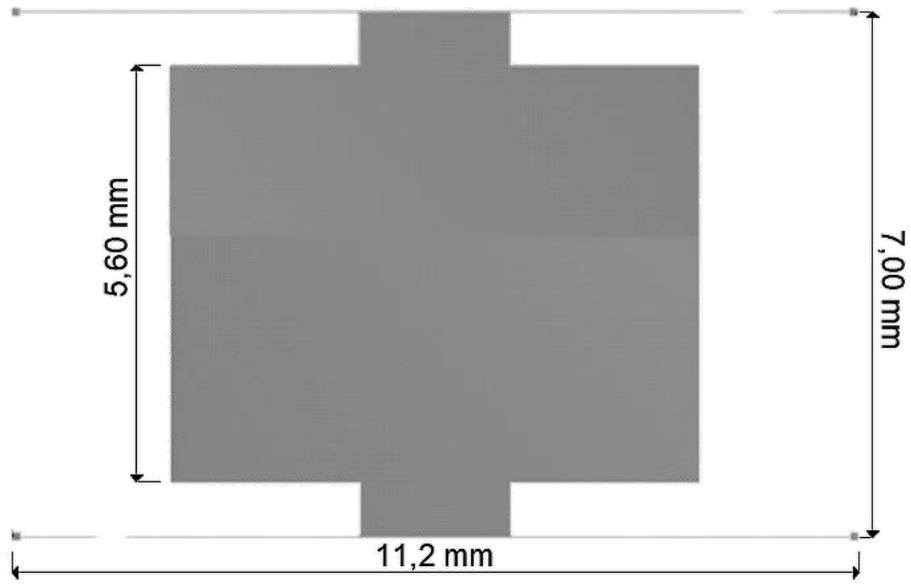


Figura 3.1 CAEB con eje X máximo de 11200 μm y eje máximo en Y de 5690 μm .

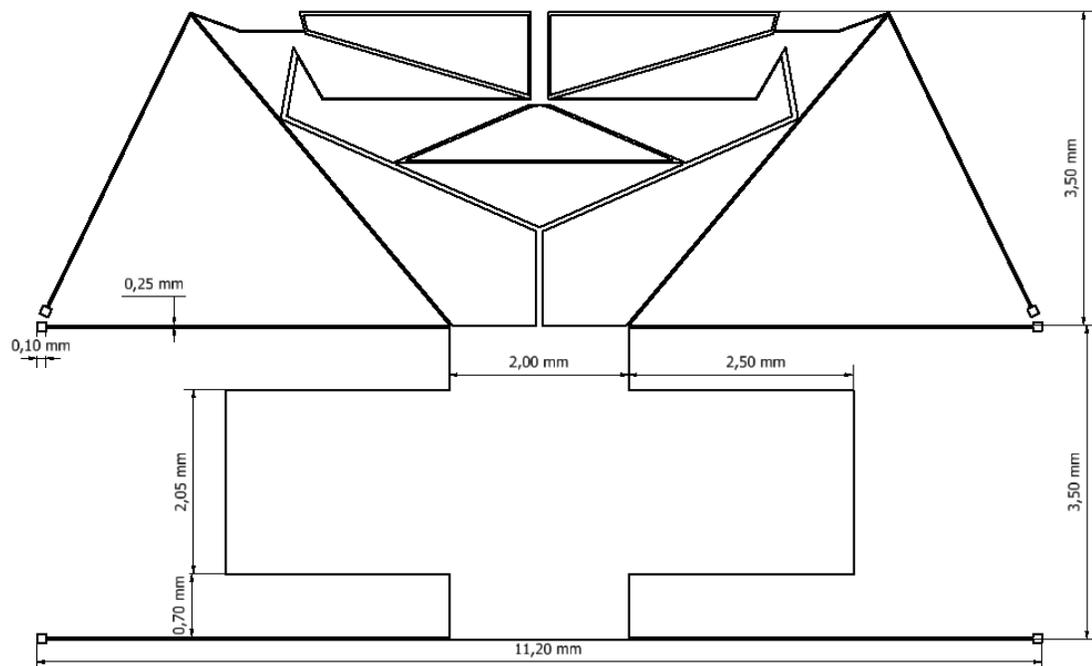


Figura 3.2 CAEB con DaCM (Cabello-Ruiz, y otros, 2017).

Tabla 3.1 Resultados del CAEB con brazos uniformes, con DaCM aplicando 1g.

Comparación entre el desplazamiento				
	Desplazamiento, (μm)	Incremento, %	Frecuencia, (Hz)	Incremento, %
CAEB	10.77	REF	152	REF
CAEB-DaCM	13.18	22.3770	245.38	61.4342

Nota: Datos obtenidos del artículo (*Cabello-Ruiz, y otros, 2017*).

Con la finalidad de incrementar el desplazamiento del CAEB como una estructura individual, se realizó la propuesta de sustituir los brazos uniformes del CAEB reportado en la Figura 3.1, por brazos simétricos, ya que esto ha sido útil para incrementar el desplazamiento, aunque se presente una reducción en la frecuencia. Para que la reducción en frecuencia no sea drástica se elige una proporción adecuada de grosores. Las modificaciones se realizan utilizando las proporciones establecidas en Tabla 3.6, que muestra dimensiones del brazo simétrico.

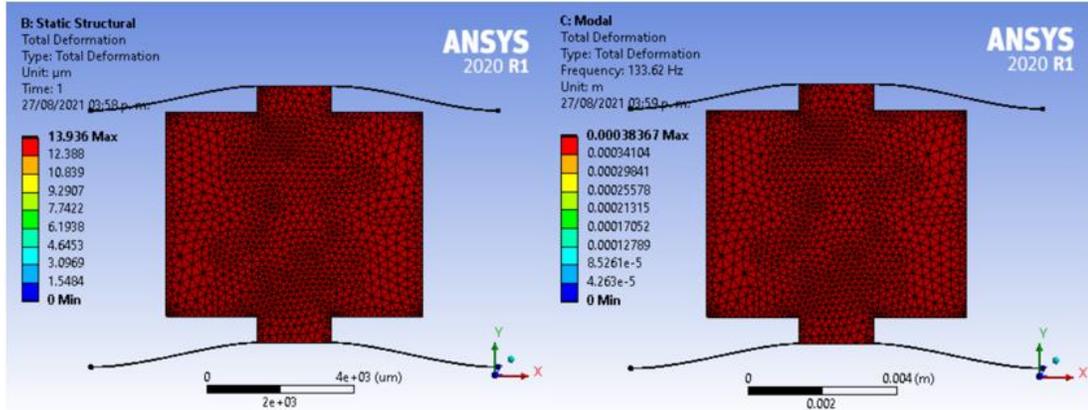


Figura 3.3 Desplazamiento y frecuencia del CAEB con brazos simétricos.

Como era de esperarse, al observar la Figura 3.3, es notario que la respuesta en los parámetros de desplazamiento y frecuencia se vieron afectados por las modificaciones propuestas. Los datos obtenidos de las simulaciones de este CAEM de brazos simétricos quedan plasmados en la Tabla 3.2. Esta información será de utilidad para el Capítulo 4.

Tabla 3.2 Resultados del CAEB con brazos simétricos, aplicando 1g.

Respuesta del CAEB completo de brazos simétricos		
	Desplazamiento, (μm)	Frecuencia, (Hz)
CAEB con brazos simétricos	13.936	133.62

Se realiza la comparación de los datos obtenidos en la Tabla 3.2 con los datos obtenidos del 3.1 para conocer el margen de mejora ante las modificaciones propuestas.

Tabla 3.3 Comparación del CAEB con brazos simétricos, aplicando 1g.

Comparación entre el CAEB completo, CAEB-DaCM y CAEB completo de brazos simétricos.				
Sistema	Desplazamiento, (μm)	Incremento, %	Frecuencia, (Hz)	Incremento, %
CAEB completo de brazos uniformes*	10.77	REF	152	REF
CAEB completo de brazos simétricos	13.936	29.3965	133.62	-12.0921
CAEB-DaCM de brazos uniformes*	13.18	REF	245.38	REF
CAEB completo de brazos simétricos	13.936	5.7360	133.62	-45.5457

* (Cabello-Ruiz, y otros, 2017)

Tal como se observa en la Tabla 3.3, el CAEB completo de brazos simétricos obtiene un mayor desplazamiento en ambos casos, incrementa en un 29.3965% con respecto al CAEB completo y obtiene un incremento del 5.730% con respecto al CAEB-DaCM de brazos uniformes. A la vez obtiene un decaimiento en la frecuencia, en ambos casos, obteniendo un 12.0921% menos para el primer caso y una reducción del 45.5457% para el segundo caso.

3.2 Acelerómetro Capacitivo Convencional de masa reducida, CAEB, (de brazos uniformes)

En el acelerómetro de masa reducida, se busca mantener los beneficios que brinda un acelerómetro convencional de grandes dimensiones, generando un cambio en su geometría mediante una reducción de su masa de prueba. Estas modificaciones permiten extender la longitud de los brazos de suspensión, logrando obtener un desplazamiento similar o incluso mayor, sin sacrificar significativamente la frecuencia.

Tabla 3.4 Dimensiones del Brazo simétrico

Brazo simétrico			
Elemento	Longitud, (μm)	Ancho, (μm)	Grosor, (μm)
LT	4498	25	70

Tabla 3.5 Dimensiones de la masa de prueba y anclas

Elemento	Longitud, (μm)	Ancho, (μm)	Grosor, (μm)
Masa de prueba	7000	3500	70
Reducción de masa	2500	700	70
Ancla	100	100	70
	Área resultante, (μm^2)		
Masa reducida	2.275×10^{-05}		

Acorde a las dimensiones establecidas en las Tablas 3.4 y 3.5 el CAEB queda representado en la Figura 3.4.



Figura 3.4 Acelerómetro de masa reducida con brazos convencionales.

3.3 Acelerómetro capacitivo con brazos modificados, ACBM

El acelerómetro capacitivo seleccionado es el compuesto por los brazos simétricos con proporción de $8/10 b$, donde b corresponde al ancho del brazo uniforme, debido a que su geometría permite tener una buena relación entre el desplazamiento y la frecuencia de operación (Flores Castro, 2020).

En este arreglo de brazo, la longitud total del brazo se divide en dos partes iguales, cada una de las cuales, está constituida por tres segmentos, dos delgados y uno del grosor igual al brazo uniforme, que se usa como central, quedando de la siguiente manera; $L1 = L3 = L4 = L6=L/8$, mientras que $L2 = L5=L/4$. Los segmentos $L1, L2, L3$ y $L4$ tienen un ancho $b1=20 \mu\text{m}$ $L2$ y $L5$ tienen un ancho $b2=25 \mu\text{m}$, como se muestra en la Figura 3.5.

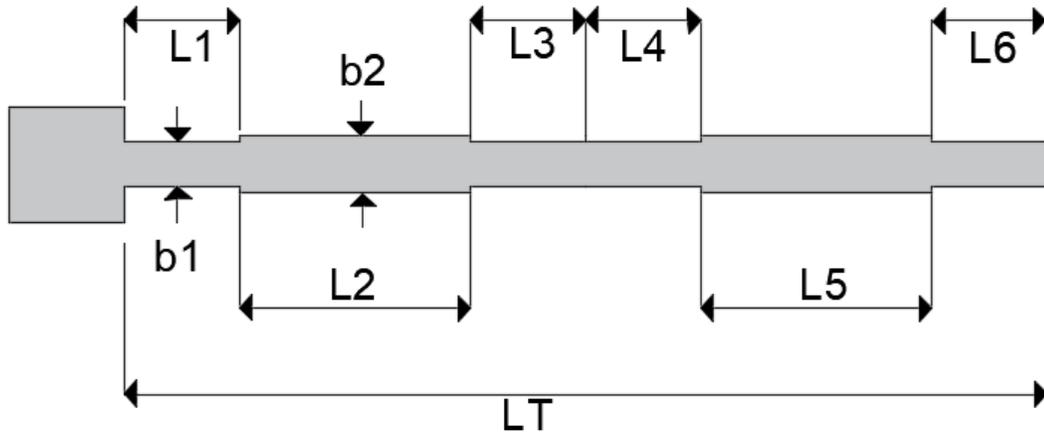


Figura 3.5 Brazo simétrico. Y las dimensiones de las proporciones se presentan en la Tabla 3.6.

3.3.1 Dimensiones de los elementos del sistema

El sistema se compone por dos partes, el acelerómetro capacitivo de brazos simétricos y el amplificador de desplazamiento que, está compuesto por una geometría basada en pantógrafo. El amplificador amplifica que el desplazamiento que se produce en la salida del acelerómetro.

Las longitudes de cada segmento de los brazos simétricos se indican en la Tabla 3.6, las dimensiones de la masa de prueba se indican en la Tabla 3.7. El acelerómetro con las dimensiones indicadas se presenta en la Figura 3.6.

Tabla 3.6 Dimensiones del Brazo simétrico

Brazo simétrico		
Segmento	Longitud, (μm)	Ancho, (μm)
L1	562.25	20
L2	1124.5	25
L3	562.25	20
L4	562.25	20
L5	1124.5	25
L6	562.25	20
Longitud total (μm)		4498
Grosor (μm)		70

Tabla 3.7 Dimensiones de la masa de prueba y anclas

Elemento	Longitud, (μm)	Ancho, (μm)	Grosor, (μm)
Masa de prueba	7000	3500	70
Reducción de masa	2500	700	70
Ancla	100	100	70
Área resultante, (μm^2)			
Masa reducida			2.275×10^{-05}

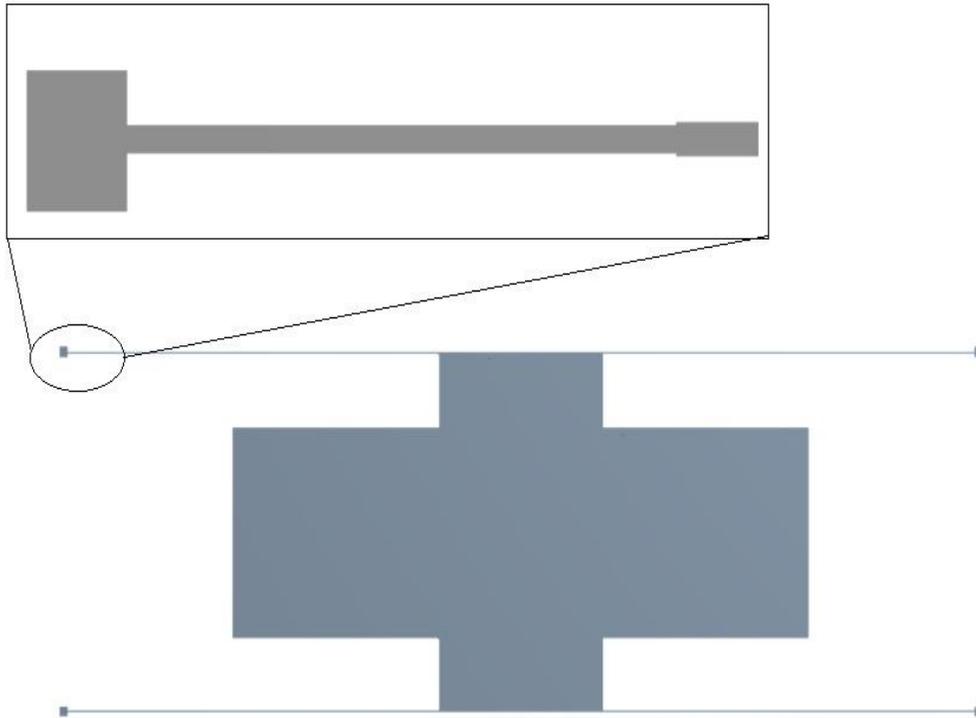


Figura 3.6 Acelerómetro de masa reducida, con brazos simétrico, de acuerdo con las proporciones mencionadas en las Tablas 3.6 y 3.7.

El material estructural seleccionado para la implementación del sistema es el Silicio. Sus propiedades físicas y mecánicas se presentan en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8 Propiedades del Silicio (Zhang, 2010)

Silicio		
Parámetros	Descripción	Valor
E, (GPa)	Módulo de Young	130.1
ρ , (kg/m ³)	Densidad	2329
ν , adimensional	Relación de Poisson	0.33
α , (1/K)	Coefficiente de expansión térmica	2.568×10^{-6}

ρ , ($\Omega \cdot m$)	Resistividad	1.5×10^{-4}
k , (W/m \cdot k)	Conductividad térmica	148
($^{\circ}C$)	Punto de fusión	1414
(MPa)	Esfuerzo último	250

Los resultados teóricos obtenidos quedan plasmados en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9 Resultados teóricos del acelerómetro con brazos simétricos y acelerómetro con brazos convencionales aplicando 1g.

Parámetro	CAEB de brazos uniformes	CAEB de brazos simétricos
Masa, (kg)	2.85×10^{-06}	2.85×10^{-06}
Desplazamiento, (μm)	17.9	13.7
Frecuencia, (Hz)	1160	1330
Esfuerzo, (Pa)	6.91×10^{11}	3.53×10^{06}
Fuerza total, (N)	2.80×10^{-05}	2.80×10^{-05}

3.1 Propuesta de amplificador de desplazamiento implementando el CAEB de brazos uniformes y brazos simétricos.

Debido a que la mayoría de los actuadores presentan una rigidez inherente, se restringe su desplazamiento o movilidad por su capacidad de fuerza en la salida. Por lo tanto, se necesita un DaCM rígido, que, por el contrario, sea compatible para generar un gran

desplazamiento. La compleja geometría que implica un DaCM no se puede evaluar fácilmente, ante todos los criterios que se requieren para su funcionamiento (Krishnan & Ananthasuresh, 2006).

Para el diseño de DaCM debe considerar algunas características. Una de ellas es que las vigas que lo constituyen deben tener un mayor espesor que ancho, de este modo el momento de flexión se incrementará en la dirección necesaria. Es una configuración que permite que exista una menor rigidez cuando el movimiento es aplicado de forma perpendicular al espesor. El conjunto de vigas formaría una estructura simple que es altamente flexible en dirección perpendicular al espesor (Kennedy-Cabrera, Hernandez-Torres, L., Mireles Jr. García, & Saucedo-Carvajal, 2014).

Al no contar con un modelo matemático definido para calcular el desplazamiento que generaría la geometría, debido a la complejidad del arreglo de vigas, queda fuera del alcance de esta tesis. Para la realización del diseño de este sistema, se utilizó al software especializado en elemento finito, ANSYS™.

3.1.1 Sistema CAEB-DaCMP

En este capítulo se realizó el diseño del nuevo Sistema CAEB-DaCMP; al CAEB original se modificaron los brazos de suspensión mientras que, en el DaCM se modificaron las barras de la base, generando un arreglo de pantógrafo modificado.

En el acelerómetro se implementaron brazos simétricos y para el amplificador de desplazamiento, después de diversos diseños fallidos de estructuras, se logró implementar una geometría capaz de aumentar en un 178.4525 % el desplazamiento obtenido en la salida del acelerómetro. Se detallaron las dimensiones de ambos dispositivos. El material seleccionado para la fabricación es el Silicio.

Tabla 3.10 Propiedades del DaCMP y del Sistema

Dimensión general del DaCMP		
Longitud, (μm)	Ancho, (μm)	Grosor, (μm)
7935	3498	70
Dimensión general del sistema CAEB-DaCMP		
11200	7032	70
Masa, (kg)		3.171×10^{-06}
Volumen, (μm^3)		1.3615×10^{09}

En este capítulo se realizó una descripción de la geometría CAEB, tanto la que tiene brazos uniformes, como modificados (de brazos simétricos), proporcionando las dimensiones de cada una de las geometrías. Usando como base al sistema CAEB-DaCM (*Cabello-Ruiz, y otros, 2017*), se diseñó una alternativa de amplificador de desplazamiento. En este diseño se buscó integrar una estructura similar al pantógrafo, esto por su incremento en la amplificación de desplazamiento, dando como resultado un sistema capaz de incrementar hasta 56.2488% al desplazamiento en su entrada, comparado con el CAEB en su tamaño original, mientras que la frecuencia mostró un incremento de 49.7368 %. Hacemos hincapié en que las áreas del DACM original y el sistema CAEB-DaCMP de brazos simétricos requieren la misma área para su fabricación.

Para el diseño se determinó al Silicio como material Estructural. De manera general, en este capítulo se modificaron los brazos del acelerómetro de masa reducida, dando como resultado dos CAEB, uno de brazos uniformes y otro de brazos simétricos. Se modificó el amplificador de desplazamiento, DaCM, y se integró a ambos CAEB.

Los resultados obtenidos de ambos sistemas lograron ser satisfactorios de acuerdo con lo que se estaba buscando, que es una mejora en los parámetros de desplazamiento y aceleración.

Capítulo 4

Resultados



En este capítulo se obtienen los resultados de las simulaciones del sistema en el software ANSYS™, se analiza la información y se contrasta con modelos anteriores para crear un margen de mejora.

MEMS LGAC

Resultados

4.1 Simulación en ANSYS

Para conocer el comportamiento del sistema diseñado en el capítulo 3, se utiliza el software ANSYS™ Workbench. Se inicia con la simulación de dos acelerómetros sin DaCMP. El primero de ellos es el de brazos uniformes, el siguiente es el de brazos simétricos, con proporciones de acuerdo con la Tabla 3.3, con la misma masa de prueba y largo de brazos que el primero. Con los resultados obtenidos, pueden compararse el desempeño de los acelerómetros para determinar cuál es el más adecuado para nuestro sistema.

Posteriormente, se incorpora el mismo DaCMP a cada acelerómetro y se realiza la simulación del sistema, para obtener el desplazamiento generado en ambos casos, y así poder comparar los factores de amplificación y seleccionar al sistema más apropiado.

4.1.1 Resultados de los CAEB de brazos uniformes y brazos simétricos.

En la Tabla 4.1, se presenta a geometrías de ambos CAEB, donde se toma como referencia para la comparación a la respuesta del CAEB con brazos uniformes.

Tabla 4.1 Desplazamiento y frecuencia de los CAEB con brazos simétricos y brazos convencionales aplicando 1g.

Comparación entre el desplazamiento				
Geometría	Desplazamiento, (μm)	Incremento, %	Frecuencia, (Hz)	Incremento, %
CAEB de brazos uniformes	4.6363	REF	231.89	REF
CAEB de brazos simétricos	6.0434	30.3496	203.09	-12.4197

En el segundo caso, al modificar la forma de los brazos de suspensión, se observa un incremento en el desplazamiento del 30.3496%, pero un ligero decremento en la frecuencia del 12.4197%, debido a que se retiraron pequeños trozos de masa, obteniendo, de acuerdo con la ecuación de la fuerza aplicada al sistema masa- resorte (ecuación 2.5), se tiene un mayor desplazamiento y de acuerdo con la definición de la frecuencia (ecuación 2.10), una disminución en su valor.

Tabla 4.2 Incremento en los parámetros desplazamiento y frecuencia al aplicar un DaCMP a cada uno de los CAEB, aplicando 1g.

Incorporación del DaCMP a cada Acelerómetro							
Geometría	Desplazamiento, (μm)	Frecuencia, (Hz)	Sistema	Desplazamiento, (μm)	Incremento, %	Frecuencia, (Hz)	Incremento, %
CAEB de brazos uniformes	4.6363	231.89	Con DaCMP	13.184	184.3647	260.94	12.5275
CAEB de brazos simétricos	6.0434	203.09	Con DaCMP	16.828	178.4525	227.6	12.0685

Al implementar un DaCMP en cada uno de los acelerómetros se obtienen resultados favorables, en ambos parámetros, tanto frecuencia y desplazamiento.

En el primer caso, se obtiene un incremento en el desplazamiento del 184.36%, a la vez que se incrementa la frecuencia de operación en un 12.52%. En el segundo caso, se obtiene un incremento en el desplazamiento del 178.45%, y un incremento en la frecuencia del 12.06%. El sistema CAEB-DaCMP de brazos uniformes logra una mayor amplificación de desplazamiento y un ligero incremento en la frecuencia con respecto al sistema CAEB-DaCMP de brazos simétricos. Por otro lado, el sistema CAEB-DaCMP de brazos simétricos logra un mayor desplazamiento con respecto al sistema CAEB-DaCMP de brazos uniformes, como se puede observar en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Incremento en los parámetros desplazamiento y frecuencia, al aplicar un DaCMP a cada uno de los acelerómetros. La comparación se realiza tomando al sistema CAEB-DaCMP de brazos uniformes como referencia.

Sistema	Desplazamiento, (μm)	Incremento, %	Frecuencia, (Hz)	Decremento, %
CAEB de brazos uniformes con DaCMP	13.184	REF	260.94	REF
CAEB de brazos simétricos con DaCMP	16.828	27.6396	227.6	12.7769

En el caso del sistema CAEB-DaCMP de brazos simétricos, se obtiene un incremento en el desplazamiento del 27.63% con respecto al sistema CAEB-DaCMP de brazos uniformes, y un decremento en la frecuencia del 12.77%, como consecuencia directa de la reducción de masa para obtener los brazos simétricos.

4.2 Comparación del sistema CAEB-DaCM de brazos simétricos con el sistema CAEB-DaCMP de brazos simétricos.

Para seleccionar al sistema que tenga un mejor desempeño es necesario retomar los valores obtenidos de cada uno de ellos y compararlos, de ese modo se podrían identificar en que factores se tenga una respuesta favorable y se determine cuál de ellos tenga un mejor desarrollo. Esta información está disponible en la Tabla 4.4, con el porcentaje de variación correspondiente.

Tabla 4.4. Recopilación de los valores obtenidos por los sistemas CAEB, CAEB-DaCM y CAEB-DaCMP y sus variantes.

Comparación entre CAEBs y sistemas CAEB de brazos simétricos y uniformes con DaCMP				
Sistema	Desplazamiento, (μm)	Incremento, %	Frecuencia, (Hz)	Incremento, %
CAEB completo de brazos uniformes *	10.77	REF	152	REF
CAEB completo de brazos simétricos	13.936	29.3965	133.62	-12.0921
CAEB-DaCM de brazos uniformes *	13.18	22.3770	245.38	61.4342
CAEB brazos uniformes con DaCMP	13.184	22.4141	260.94	71.6711
CAEB brazos simétricos con DaCMP	16.828	56.2488	227.6	49.7368

* (Cabello-Ruiz, y otros, 2017).

De acuerdo con la Tabla 4.4, al considerar la respuesta del CAEB completo de brazos uniformes como referencia, se tiene que el sistema CAEB brazo simétrico con DaCMP es el que proporciona una mayor amplificación de desplazamiento, obteniendo un incremento del 56.2488%, al mismo tiempo que se tiene un incremento en la frecuencia del 49.73368% con respecto a la referencia.

Del mismo modo, el CAEB brazos uniformes con DaCMP, presenta una ganancia en el desplazamiento del 22.4141%, destacando que este sistema es el que presenta una mayor frecuencia de operación, logrando alcanzar una frecuencia 71.6711%, mayor que el CAEB completo de brazos uniformes.

Como se observa anteriormente, estos dos últimos sistemas presentan mejoras significativas. Para elegir el sistema más adecuado para nuestros fines, recurrimos a la Tabla 4.3, donde se aprecia que la diferencia en la frecuencia de ambos dispositivos es tan solo del 12.7769%, teniendo que el sistema CAEB brazo simétrico con DaCMP, presenta una menor frecuencia, pero genera un mayor desplazamiento.

Considerando esas características podemos permitirnos penalizar ligeramente la frecuencia para obtener una mayor amplificación, recomendando el uso del sistema CAEB-DaCMP, de brazos simétricos.

Finalmente se presenta una comparación en la Tabla 4.5 donde se observa que el sistema propuesto mejora la respuesta en desplazamiento en un 27.6783% a la obtenida con el sistema de referencia, aunque con un ligero decaimiento en la frecuencia del 7.2459%.

Tabla 4.5. Comparación de desempeño entre sistemas CAEB-DaCM y sistemas propuestos.

Comparación entre sistemas CAEB-DaCM* y el sistema propuesto (brazos simétricos y DaCMP)				
Sistema	Desplazamiento, (μm)	Incremento, %	Frecuencia, (Hz)	Incremento, %
CAEB-DaCM de brazos uniformes *	13.18	REF	245.38	REF
CAEB brazos uniformes con DaCMP	13.184	0.0289	260.94	6.3411
CAEB brazos simétricos con DaCMP	16.828	27.6783	227.6	-7.2459

* (Cabello-Ruiz, y otros, 2017).

4.3 Esfuerzo del sistema.

Se utilizó la herramienta Static Structural /Parameter Set, que proporciona una serie de variaciones, sin necesidad de remodelar el análisis de elementos finitos, esto debido a que, las propiedades geométricas de la malla y su efecto sobre el análisis del esfuerzo, deformación, térmica o vibración se pueden optimizar individualmente con un conjunto de parámetros. Además, se realizó un barrido con grosores de 5 μ m a 70 μ m, en los sistemas CAEB-DaCMP, de brazos uniformes y CAEB-DaCMP, de brazos simétricos para obtener sus variaciones en el desplazamiento y en el esfuerzo realizado.

Tabla 4.6. Esfuerzo y desplazamiento de los sistemas cuando son sometidos a 1g, con distintos grosores.

Grosor, (μ m)	CAEB-DaCMP de brazos uniformes		CAEB-DaCMP de brazos simétricos	
	Desplazamiento, (μ m)	Esfuerzo, (MPa)	Desplazamiento, (μ m)	Esfuerzo, (MPa)
5	13.0850	3.3087	15.7830	4.1231
10	12.8866	3.5533	16.7935	3.9320
15	13.3806	3.1934	16.7816	3.9683
20	13.3712	3.1541	16.8998	4.3936
25	12.9830	3.4002	17.0356	4.4002
30	13.2380	3.1617	16.8694	4.0462
35	12.9324	3.5260	16.5213	4.4390
40	13.3061	3.0487	15.2676	4.0880
45	13.3876	3.0268	16.6754	4.3958
50	13.2510	3.4471	16.8084	4.5146
55	13.2929	3.1916	17.0447	4.5816

60	13.1980	3.3435	16.1488	4.5041
65	13.1369	3.3696	16.7906	4.6048
70	13.1836	3.2661	16.8244	4.6033

En el caso del sistema CAEB-DaCMP de brazos uniformes, en el punto que se obtiene un mayor esfuerzo es con un grosor de 10 μm , mientras que en el sistema CAEBP-DaCMP de brazos simétricos, se realiza un mayor esfuerzo cuando tiene un grosor de 55 μm .

Cabe señalar que, en ambos casos el valor del esfuerzo es bastante alejando al valor del esfuerzo último soportado por el Silicio. Además, las variaciones en fuerza y desplazamiento en términos generales son muy pequeñas, por lo que, el grosor sería determinado, más bien, por el proceso de fabricación y no por una limitante de desempeño.

4.3.1 Esfuerzo último del sistema.

En la Tabla 3.8, se presentan las propiedades del Silicio (Zhang, 2010). Puede observarse que el esfuerzo último del Silicio es de 250 MPa. Para determinar el valor de g en el cual, pudiera superarse el esfuerzo último, se realizó un barrido considerando valores de aceleración desde 1 g hasta 76 g , en cada sistema. Los resultados de la simulación paramétrica se presentan en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7. Esfuerzo y desplazamiento del sistema cuando es sometido a fuerzas de 1g hasta 76g.

CAEB-DaCMP de brazos uniformes			
Aceleración, <i>g</i>	m/s^2	Desplazamiento, (μm)	Esfuerzo, (MPa)
1	-9.81	13.0850	3.3087
5	-49.05	65.4251	16.5433
10	-98.1	130.8503	33.0866
15	-147.15	196.2754	49.6299
20	-196.2	261.7005	66.1732
25	-245.25	327.1257	82.7165
30	-294.3	392.5508	99.2598
35	-343.35	457.9760	115.8031
40	-392.4	523.4011	132.3464
45	-441.45	588.8262	148.8897
50	-490.5	654.2513	165.4330
55	-539.55	719.6765	181.9763
60	-588.6	785.1016	198.5196
65	-637.65	850.5268	215.0629
70	-686.7	915.9519	231.6062
71	-696.51	929.0369	234.9149
72	-706.32	942.1219	238.2235
73	-716.13	955.2069	241.5322
74	-725.94	968.2920	244.8409
75	-735.75	981.3770	248.1495
76	-745.56	994.4620	251.4582

Como puede observarse en la Tabla 4.7, el valor de g en el cual, el sistema supera el esfuerzo ultimo del Silicio, ocurre cuando éste es sometido a una aceleración de $76 g$, -745.56 m/s^2 , alcanzando un esfuerzo de 251.45 MPa . Como se observa en la Figura 4.1, la relación entre la aceleración aplicada al sistema y el que esfuerzo que realiza crece de manera lineal. De manera similar, se tiene un comportamiento lineal en el desplazamiento del sistema, teniéndose incrementos de forma lineal alcanzando un desplazamiento de $981.37 \mu\text{m}$ antes de alcanzar el límite de esfuerzo.

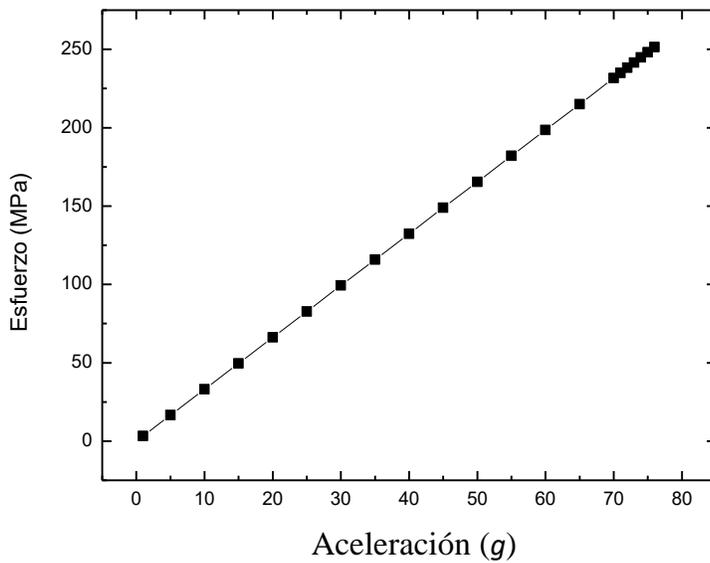


Figura 4.1 Gráfica del esfuerzo del sistema CAEB-DaCMP de brazo uniforme, cuando es sometido a aceleraciones de $1 g$ hasta $76 g$.

Tabla 4.8. Esfuerzo y desplazamiento del sistema cuando es sometido a fuerzas de 1g hasta 55g.

CAEB-DaCMP de brazo simétrico			
Aceleración, <i>g</i>	m/s^2	Desplazamiento, (μm)	Esfuerzo, (MPa)
1	-9.81	16.8244	4.6033
5	-49.05	84.1221	23.0166
10	-98.1	168.2442	46.0331
15	-147.15	252.3662	69.0497
20	-196.2	336.4883	92.0663
25	-245.25	420.6104	115.0829
30	-294.3	504.7325	138.0994
35	-343.35	588.8545	161.1160
40	-392.4	672.9766	184.1326
45	-441.45	757.0987	207.1491
50	-490.5	841.2208	230.1657
51	-500.31	858.0452	234.7690
52	-510.12	874.8696	239.3724
53	-519.93	891.6940	243.9757
54	-529.74	908.5184	248.5790
55	-539.55	925.3428	253.1823

En el caso de la Tabla 4.8, se obtiene que el esfuerzo realizado por el sistema CAEB-DaCMP de brazo simétrico supera el esfuerzo último del Silicio, cuando es sometido a una aceleración de 55 *g*, -539.55 m/s^2 , alcanzado un esfuerzo de 263.18 MPa. Como se observa en la Figura 4.2, las distintas aceleraciones que se aplicaron al sistema

generaron una respuesta proporcional en el esfuerzo que realiza el sistema, mostrando nuevamente una relación lineal existente entre la aceleración y el esfuerzo.

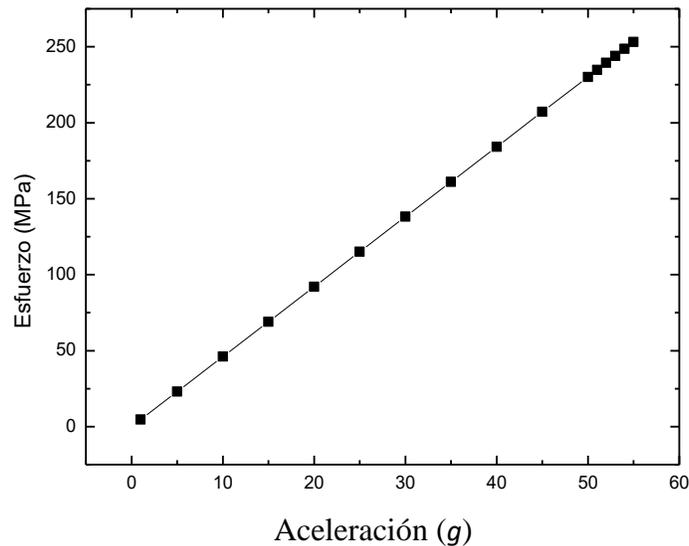


Figura 4.2 Gráfica del esfuerzo del sistema CAEB-DaCMP de brazo simétrico cuando es sometido a aceleraciones de 1g hasta 76 g.

De nueva cuenta se tiene que el desplazamiento del sistema CAEB-DaCMP de brazo simétrico crece de manera lineal, alcanzando un desplazamiento de 908.5184 μm antes de alcanzar el límite de esfuerzo del material.

Cabe señalar que el CAEB-DaCM de brazos uniformes, alcanza un desplazamiento de 915.95 μm hasta cuando se le aplica 70 g, lo que hace evidente que el sistema de brazos simétricos requiere una menor cantidad de aceleración aplicada para producir un desplazamiento similar, como se muestra en la Figura 4.3.

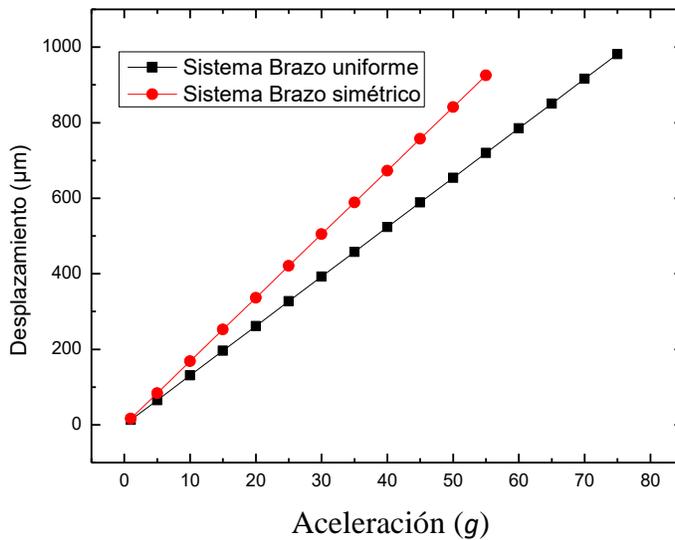


Figura 4.3 Gráfica del desplazamiento de los sistemas cuando son sometidos a distintas metido a aceleraciones.

Al comparar la aceleración aplicada a cada sistema, se tiene que en el sistema CAEB-DaCMP de brazos uniformes, necesita 76 g para alcanzar el esfuerzo último del Silicio, mientras que en el sistema CAEB-DaCMP de brazos simétricos, se necesitan 55 g para lograr superarlo, una diferencia de 21 g. Esta diferencia se debe a la reducción de masa en los brazos, aplicada en el CAEB-DaCMP de brazos simétricos, donde en los segmentos L1, L3, L4 y L6 el ancho del brazo se reduce de 25 µm a 20 µm, lo que genera una menor rigidez en los brazos, la cual provoca un mayor desplazamiento y a su vez que alcance más pronto el esfuerzo último del Silicio.

En este capítulo, se analizó la información obtenida de las simulaciones realizadas con el software de elemento finito ANSYS™. Se comenzó comparando el CAEB original con las modificaciones propuestas, para conocer el porcentaje de mejora en el desplazamiento, siendo de un 30.34% en el caso de los brazos simétricos. Se

implementó un DaCMP a cada CAEB, nuevamente se contrastó con los valores obtenidos anteriormente, para generar porcentaje de mejora y ayudarnos a saber cuál es el que tiene un mejor desempeño.

Se analizaron otros aspectos del sistema, modificando el grosor y obteniendo variaciones en el esfuerzo que realiza, mediante incrementos en la aceleración aplicada al sistema.

Se determinó que el grosor del sistema podría depender directamente del método de fabricación, esto debido a que, al realizar un barrido con distintos grosores, las variaciones obtenidas en los factores de desplazamiento y esfuerzo realizado por el sistema tienden a ser muy pequeñas de modo que pueden ser despreciables.

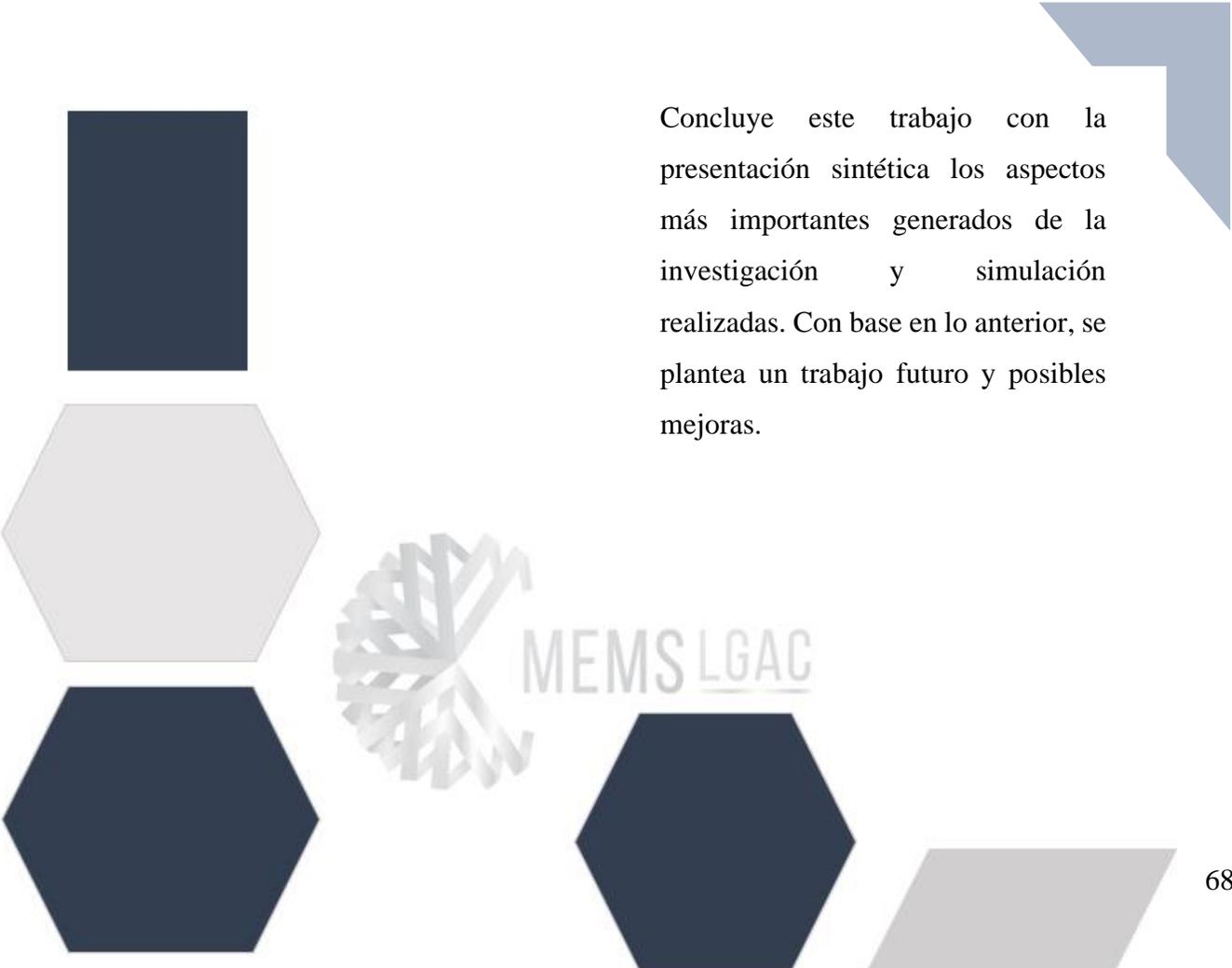
Se realizó un barrido incrementando la aceleración aplicada al sistema. Esto es de gran utilidad, porque de este modo se conoce el límite físico del sistema, determinado por el esfuerzo último que la estructura de este sistema puede soportar, considerando al material en que es implementado. En los resultados se aprecia una relación lineal entre la aceleración aplicada y el esfuerzo que realiza el sistema.

El desplazamiento muestra una tendencia similar, se incrementa de manera lineal a medida que la aceleración aplicada aumenta. Aunado a esto, tenemos que el sistema CAEB-DaCMP de brazos simétricos necesita una aceleración menor para obtener el mismo desplazamiento que el sistema CAEB-DaCMP, y por ende alcanza el esfuerzo último del Silicio más pronto.

Como se menciona anteriormente, ambos sistemas suponen mejoras significativas. Al considerar los puntos previos, se recomienda seleccionar al sistema CAEB de brazos simétricos con DaCMP porque tiene mayor ampliación de desplazamiento y una penalización mínima en la frecuencia.

Capítulo 5

Conclusiones y trabajos futuros.



Concluye este trabajo con la presentación sintética los aspectos más importantes generados de la investigación y simulación realizadas. Con base en lo anterior, se plantea un trabajo futuro y posibles mejoras.



5.1 Conclusiones técnicas

A partir del trabajo desarrollado, podemos afirmar que se logró cumplir con los objetivos propuestos en este trabajo. Los resultados que se obtuvieron fueron favorables y muy satisfactorios. Por lo que, se presentan las siguientes conclusiones:

- 1 Al incorporar un amplificador de desplazamiento se logró una mayor amplificación en el desplazamiento y un incremento en la frecuencia del sistema, reduciendo la masa total del acelerómetro completo, con lo que se logra una mejora y una reducción de masa, manteniéndose las áreas totales equivalentes entre el sistema y el acelerómetro sin ninguna reducción. El nuevo sistema es capaz de incrementar hasta 56.2488% al desplazamiento en su entrada, comparado con el CAEB en su tamaño original, mientras que la frecuencia mostró un incremento de 49.7368 %.
- 2 Se logró diseñar un amplificador, bajo una configuración de elementos flexibles, tomando como base el sistema CAEB-DaCM (Cabello-Ruiz, y otros, 2017), logrando incorporar una estructura similar al pantógrafo. Se logró mejorar la respuesta del acelerómetro, CAEB, al incorporar brazos simétricos, seccionando el largo total del brazo en 6 segmentos y cambiando el ancho de 4 de éstos, en una proporción de 8/10 del ancho total. Esto es, se implementaron dos mecanismos de amplificación de desplazamiento, la utilización de brazos simétricos y la implementación de un DaCMP.
- 3 Como resultado del punto 2, se logró obtener 2 variaciones del sistema CAEB-DaCMP, la primera con brazos uniformes y la segunda con brazos simétricos, ambos sistemas presentan una mejora en los parámetros de frecuencia y desplazamiento ante el sistema CAEB-DaCM. En el primer caso se observa un incremento en el desplazamiento de 0.0289% y en la frecuencia de 6.3411%, en ambos casos los valores son pequeños, mientras que en el segundo caso se obtuvieron incrementos en el desplazamiento del 27.6783%, aunque con una

ligera reducción en la frecuencia de 7.2459%. Por lo que, se recomienda el uso del segundo sistema implementado.

- 4 Se logró un aumento en los factores de desplazamiento y frecuencia al aplicar el mismo DaCM a cada uno de los CAEB, de brazos uniformes y brazos simétricos, obteniendo un incremento en el desplazamiento de 184.3647 % y 178.4525%, respectivamente y un incremento en la frecuencia del 12.5275% y 12.0685%, respectivamente. La comparación se lleva a cabo tomando como referencia la respuesta del CAEB individual.
- 5 Se analizaron otros aspectos del sistema, modificando el grosor y obteniendo variaciones en el esfuerzo que se realiza, mediante incrementos en la aceleración aplicada al sistema. Obteniendo que, al aplicar 1 g a los sistemas, se tienen esfuerzos menores a 5 MPa. Mostrando en ambos casos que el esfuerzo que realiza el sistema se mantiene bastante alejado del esfuerzo último del Silicio, que es 250 MPa.
- 6 Por otro lado, al incrementar de manera gradual la aceleración aplicada al sistema, la respuesta en los parámetros de desplazamiento y esfuerzo se incrementa de manera lineal. Resultando que, el sistema CAEB-DaCM de brazos simétricos necesita una menor aceleración para generar el mismo desplazamiento CAEB-DaCM de brazos uniformes, y por ende alcanza el esfuerzo último del Silicio más pronto.

5.2 Algunas consideraciones.

Al hacer una revisión de la literatura del estado del arte, se identificó la necesidad de incrementar la sensibilidad de desplazamiento de los acelerómetros, sin sacrificar en gran medida a la frecuencia. Lo que dio origen a este proyecto de tesis.

El software de elemento finito, ANSYS™, fue una herramienta de gran utilidad, debido a que las simulaciones permiten conocer el desempeño del sistema, antes de su fabricación, lo que permite tener un ahorro en recursos.

Al realizar un barrido considerando distintos grosores del sistema se observó que las variaciones obtenidas en los factores de desplazamiento y esfuerzo realizado por el sistema tienden a ser muy pequeñas, de modo que pueden ser despreciables. Seleccionamos a 70 μm como grosor, debido a que se cuenta con posibilidades para la fabricación utilizando obleas SOI.

5.3 Comentarios personales

Conocer nuevas ramas de la ingeniería siempre es una cuestión importante al desarrollar un trabajo de tesis, debido a que te enfrentas con nuevos retos, que implican ampliar tu conocimiento en muchos rubros, ampliando tu conocimiento teórico-práctico.

La redacción de la tesis genera también habilidades, y reafirma conocimientos en gramática, ortografía y estructuración de ideas.

Considero que, estar en este proyecto de tesis fue una oportunidad muy favorable, porque implicó conocer nuevos dispositivos, nuevos elementos y el uso de un software que no conocía, ANSYS, debido a que en mi carrera Ingeniería Eléctrica-Electrónica, no se suelen usar estos softwares de elemento finito.

Por otro lado, el redactar esta tesis, mejore mis habilidades de búsqueda e investigación, podría asegurar que, antes de este proyecto tenía muy poco desarrolladas estas habilidades. También he podido mejorar en la redacción de textos, y seguir probando mis competencias en ofimática. Realizar la redacción de una tesis implicó plasmar todos los conocimientos que he adquirido en este proyecto y pude desarrollar mejor

mis habilidades de análisis, para poder determinar la calidad de los resultados y concluir debidamente esta tesis.

5.4 Trabajo futuro

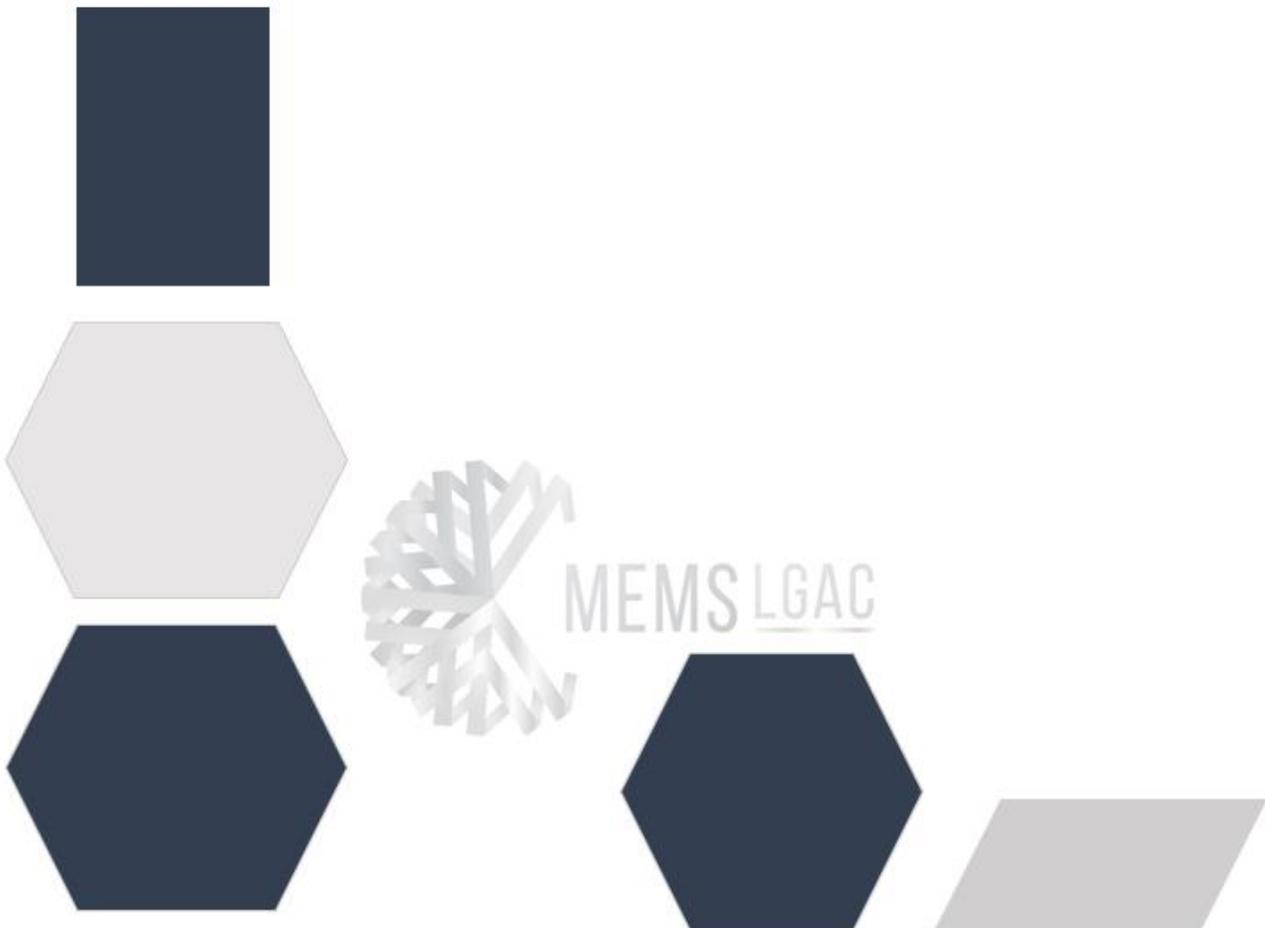
El modelado del amplificador de desplazamiento, DaCM, en la mayoría de los casos, se presenta como un análisis basado en los resultados de simulaciones. Esto debido a que, en la gran mayoría, el diseño de estos dispositivos se obtiene mediante forma empírica y con el apoyo de software de simulación, debido a la complejidad de los arreglos.

Por la gran cantidad de nodos con los que cuenta la geometría del DaCM y por tratarse de dispositivos recientes, es muy complejo encontrar una expresión matemática simple que cubra las necesidades de este sistema, por lo que el modelado se realiza de manera inherente utilizando el software ANSYSTM. Por lo que, generar un método sencillo para obtener los cálculos teóricos sería un gran aporte en un trabajo futuro, dado que sería de gran utilidad en el diseño.

Con el análisis de los recursos con los que se contó y las limitantes que implicó la pandemia de COVID-19, se determinó que el alcance de esta investigación sería el diseño del sistema y las simulaciones mediante el software. El siguiente proceso de este proyecto, sería la fabricación del sistema usando la tecnología de fabricación de UACJ.

A pesar de haber obtenido resultados positivos, en ambos parámetros desplazamiento y frecuencia, este último pudiera ser mejorado para obtener una frecuencia de mayor magnitud.

Bibliografía



Bibliografía

- Alanís Navarro, J. A. (2008). Desarrollo del Proceso de Fabricación PolyMEMS - INAOE. (*Tesis de Maestría*). Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, San Andrés Cholula, Puebla.
- Arena Mas, M. (2008). Diseño Integrado - Sensor medidor de Aceleración. ACELERÓMETRO. En *SISTEMA PARA LA ADQUISICIÓN Y MONITORIZACIÓN DE ACELERACIONES MEDIANTE MICROPROCESADOR* (págs. 41-42). Sevilla - España.
- Aróztegui Walter, J., Osio Jorge, R., Rapallini José, A., Ocampo Jesús, F. M., & Quijano Antonio, A. (2011). RF MEMS: conceptos, evolución y mercado. *I Jornadas de Investigación y Transferencia de la Facultad de Ingeniería (ITE)*, (págs. 2,3). La Plata, Argentina.
- Ávila, C., & Federico, G. (2018). *Uso de GPS y acelerómetro para medir performance en deporte de élite*. Universidad Nacional de La Plata, LINTI - Laboratorio de Investigación en Nuevas Tecnologías Informáticas, La Plata - Argentina.
- Basarab, M., Giani, A., & Combette, P. (25 de Noviembre de 2020). Thermal Accelerometer Simulation by the R-Functions Method. *Applied Sciences MDPI* 10, 8373. doi:10.3390/app10238373
- Boyden, E., El-Rifai, O., Hubert, B., & Karpman, M. R. (1999). A High-Performance Tunneling Accelerometer. 6.777, *Introduction to Microelectromechanical Systems*.
- Cabello-Ruiz, R., Tecpoyotl-Torres, M., Alfonso, T.-J., Grimalsky, V., Vera-Dimas, J. g., & Vargas-Chable, P. (Agosto de 2017). A Novel Displacement-amplifying Compliant Mechanism Implemented on a Modified Capacitive

- Accelerometer. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)* Vol. 7, No. 4, 1858-1866. doi:10.11591/ijece.v7i4.pp1858-1866
- Chandradeep, K., Anjani, K. S., Nitesh, K., & Ajit, K. (2014). Model Analysis and Harmonic Analysis of Cantilever Beam by ANSYS. *Global journal for research analysis*, 3, 51-55.
- Chen, J. Y. (2010). Single- and dual-axis lateral capacitive accelerometers based on CMOS-MEMS technology. (*Tesis de Maestría*). UNIVERSITY OF OSLO, Department of Informatics, Oslo, Noruega.
- Deshmukh, B., & Paradeshi, D. S. (Diciembre de 2012). STUDY OF VARIOUS COMPLIANT MICROMECHANISM AND INTRODUCTION OF A COMPLIANT MICROMOTION REPLICATING MECHANISM. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)* ISSN 0976 – 6359, 3, 574-582.
- Flores Castro, J. G. (2020). Diseño De Acelerómetros Capacitivos Con Brazos Basados En Arreglos Flexibles. (*Tesis de Licenciatura*). UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS - CIICAp, Cuernavaca.
- Franco, J. M., Gómez, D., Hernán Murcia, J., & Thomson, P. M. (Septiembre de 2011). Desarrollo e implementación de un sistema láser para caracterización dinámica y medición de desplazamientos en estructuras civiles. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia* N.º 60, 170-181.
- Herrera May, A. L., Cortés Pérez, Á. R., & Aguilera Cortés, L. A. (9 de Junio de 2008). *Los Microacelerómetros en la Actualidad*. Obtenido de Universidad de Guanajuato: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=41618204>
- Hetrick, J., & Kota, S. (6 de Mayo de 2003). DISPLACEMENT AMPLIFICATION STRUCTURE AND DEVICE. *Patente EE.UU. No 6,557,436 B1*.

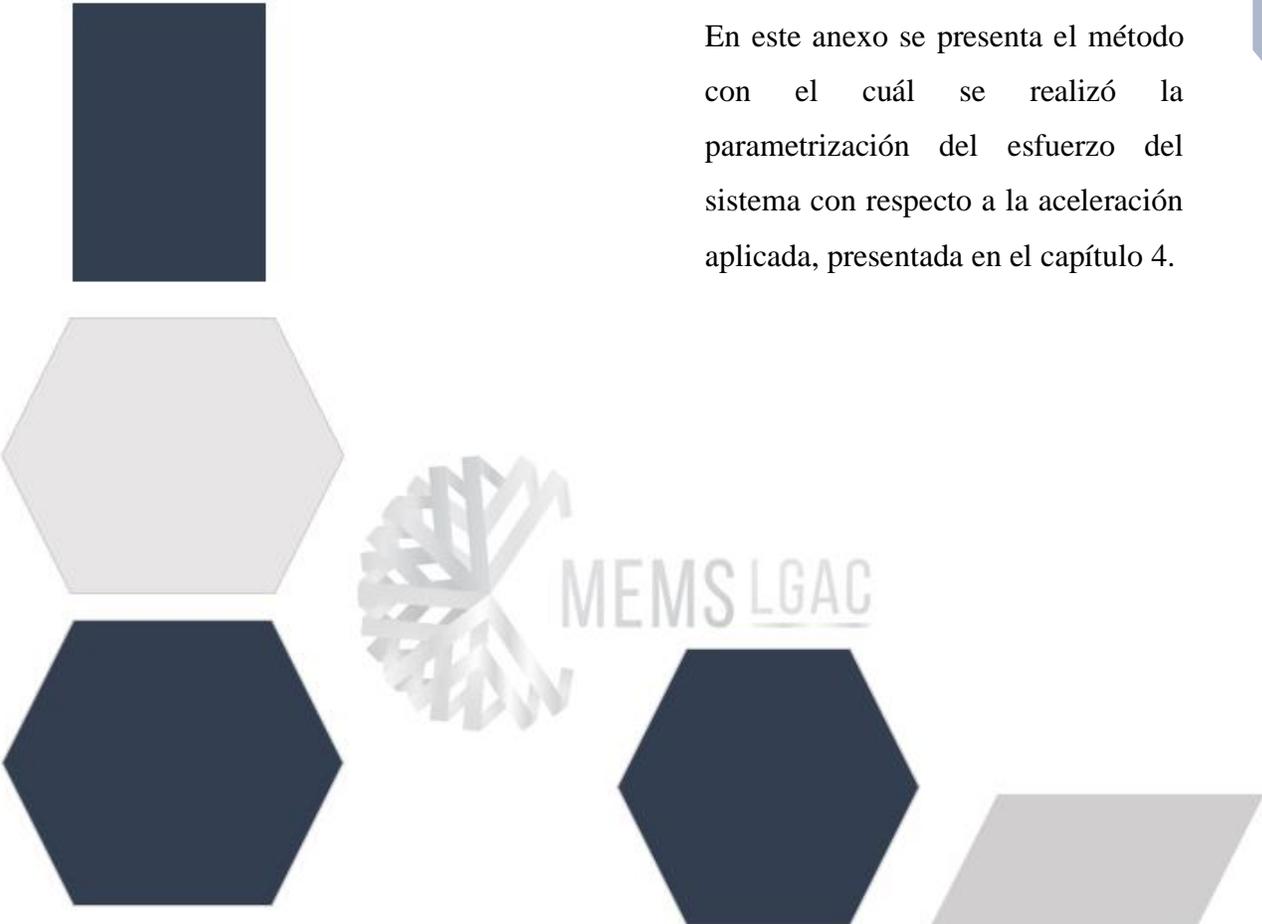
- Ho, N. L., Dao, T.-P., Le, H. G., & Chau, N. L. (2018). Optimal Design of a Compliant Microgripper for Assemble System of Cell Phone Vibration Motor Using a Hybrid Approach of ANFIS and Jaya. (Springer, Ed.) *Arabian Journal for Science and Engineering*. doi:10.1007/s13369-018-3445-2
- Huang, L., Chen, W., Ni, Y., Gao, Y., & Zhao, L. (Diciembre de 2012). Structure Design of Micromechanical Silicon Resonant Accelerometer. *Sensors and Materials, Vol. 25, No. 7 (2013)*, 479–492.
- Izquierdo, M., Martínez-Ramírez, A., Larión, J., Irujo-espínosa, M., & Gómez, M. (2008). Valoración de la capacidad funcional en el ámbito domiciliario y en la clínica. Nuevas posibilidades de aplicación de la acelerometría para la valoración de la marcha, equilibrio y potencia muscular en personas mayores. *An. Sist. Sanit. Navar. 2008; 31 (2)*, 159-70.
- Kennedy-Cabrera, H., Hernandez-Torres, H., L., H.-M. A., Mireles Jr. García, J., & Saucedo-Carvajal, A. (Julio-Agosto de 2014). Fabricación y caracterización de un amplificador mecánico flexible. *REVISTA MEXICANA DE FÍSICA 60 (2014)*, 282–289.
- Khan, S., & Ananthasuresh, G. (2014). A Micromachined Wide-Band In-Plane Single-Axis Capacitive Accelerometer with a Displacement-Amplifying Compliant Mechanism. *Mechanics Based Design of Structures and Machines: An International Journal, 42:3*, 355-370. doi:10.1080/15397734.2014.908299
- Khan, S., & Ananthasuresh, G. K. (2014). Improving the Sensitivity and Bandwidth of In-Plane Capacitive Microaccelerometers Using Compliant Mechanical Amplifiers. *Journal of Microelectromechanical Systems, 23(4)*, 871–887. doi:10.1109/jmems.2014.2300231

- Kreith, F., & Mahajan, R. (2006). *The MEMS Handbook: MEMS Applications - Mechanical Engineering Series* (Segunda ed.). (M. G. Hak, Ed.) Taylor & Francis Group, LLC.
- Krishnan, G., & Ananthasuresh, G. K. (2008). Evaluation and Design of Displacement-Amplifying Compliant Mechanisms for Sensor Applications. *Mechanical Engineering, Journal of Mechanical Design*, 130(10), 102304. doi:10.1115/1.2965599
- Krishnan, G., & Ananthasuresh, K. G. (Septiembre de 2006). An Objective Evaluation Of Displacement-Amplifying Compliant Mechanisms For Sensor Applications. *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. doi:10.1115/detc2006-99345
- Llobera, A., Seidemann, V., Plaza, J. A., Cadarso, V. J., & Buttgenbach, S. (2005). Integrated polymer optical accelerometer. *IEEE Photonics Technology Letters*, 17(6), 1262–1264. doi:10.1109/lpt.2005.846458
- Loughborough University. (2002). *An Introduction to MEMS (Micro-electromechanical Systems)*. Loughborough, Reino Unido: PRIME Faraday Partnership.
- Omega Engineering Inc. (28 de Agosto de 2018). *OMEGA spectris company*. Recuperado el 06 de Junio de 2021, de How to Measure Acceleration? - Key Applications of Accelerometers: <https://www.omega.com/en-us/resources/accelerometers>
- Patil, V. S., Anerao, P. R., & Chinchankar, S. S. (2017). Design and Analysis of Compliant Mechanical Amplifier. *ScienceDirect - Materials Today: Proceedings* 5, 12409–12418.

- PCE Instruments™. (2021). *PCE instruments - Acelerómetro*. Recuperado el 20 de Junio de 2021, de <https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida/>
- Pérez Porto, J., & Merino, M. (2019). *Definicion De*. Recuperado el Julio de 2020, de Definición de Pantógrafo: <https://definicion.de/pantografo/>
- Ramírez Gil, F. J., Sepúlveda Orozco, E., & Montealegre Rubio, W. (12 de Junio de 2017). MECANISMOS FLEXIBLES: DESDE EL DISEÑO CONCEPTUAL HASTA SU MANUFACTURA. *Revista Politécnica*, vol. 13, no. 24, 65-78.
- Rincon-Jara, R., Ambrosio, R., & Mireles, J. (septiembre de 2010). Análisis y caracterización de un acelerómetro capacitivo fabricado con tecnología polymump's. ©*Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología de Superficies y Materiales - Superficies y Vacío* 23 (3), 26-31.
- SCME, S. C. (2017). *History of MEMS - Primary Knowledge - Participant Guide*. University of New Mexico, New Mexico.
- Vargas-Chable, P., Tecpoyotl-Torres, M., Cabello-Ruiz, R., Colin-Antunez, A. A., & Vargas-Bernal, R. (28 de Junio de 2019). Novel Capacitive Accelerometers with Beams based on Modified Compliant Crank-Slider Amplifiers. *Programación Matemática y Software* (2019) 11 (2), 45-56.
- Xie, J., Song, M., & Yuan, W. (abril de 2013). A high sensitivity micromachined accelerometer with an enhanced inertial mass SOI MEMS process. *The 8th Annual IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*. doi:10.1109/nems.2013.6559745
- Zhang, L. (2010). Anisotropy and crystal orientation of silicon—application to the modeling of a bent. *AIP Conference Proceedings* 1234, 797. doi:10.1063/1.3463333

Anexo A

Método para hacer parametrización en ANSYS



En este anexo se presenta el método con el cual se realizó la parametrización del esfuerzo del sistema con respecto a la aceleración aplicada, presentada en el capítulo 4.

Parametrización del esfuerzo con distintas aceleraciones.

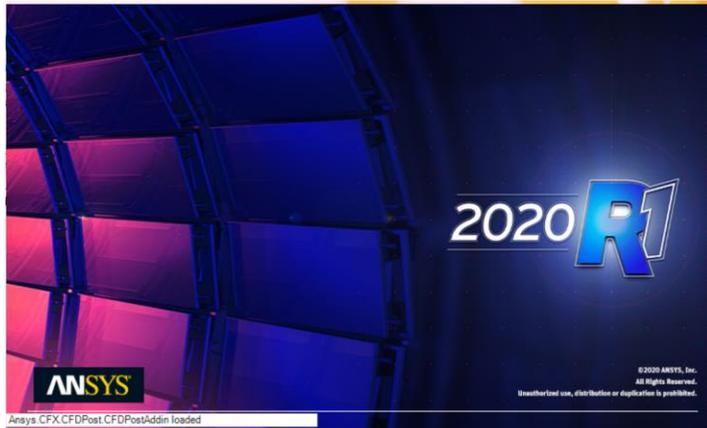
La parametrización es una herramienta muy útil debido a que proporciona una serie de variaciones, sin necesidad de remodelar el análisis de elementos finitos, esto debido a que, las propiedades geométricas de la malla y su efecto sobre el análisis del esfuerzo, deformación, térmica o vibración se pueden optimizar individualmente con un conjunto de parámetros.

En el caso específico de esta tesis, se realizó la parametrización del esfuerzo del que se genera en nuestro sistema CAEB-DaCMP de brazos simétricos, con respecto al incremento de la aceleración aplicada, para determinar el punto en que se llega al esfuerzo último del material estructural, en este caso es el Silicio. Recordando que el esfuerzo último del silicio es de 250 MPa, y suponiendo que la relación aceleración-esfuerzo resultante presenta un comportamiento lineal.

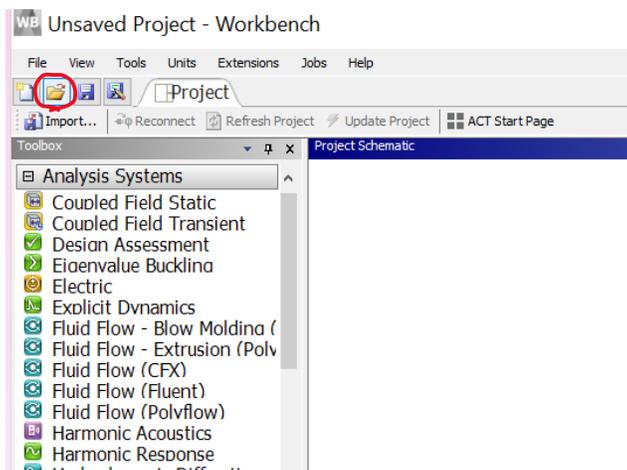
Teniendo en cuenta que al aplicar 1g tenemos 4.6033 MPa, se hace una simple regla de tres para suponer el punto en que se supera y obtener un aproximado, obteniendo 54.30 g. Mismo resultado que será comprobado al realizar la parametrización.

Para realizar la parametrización se utiliza el software ANSYS, en este caso es la versión 2020, se lleva a cabo una serie de pasos que serán descritos a continuación:

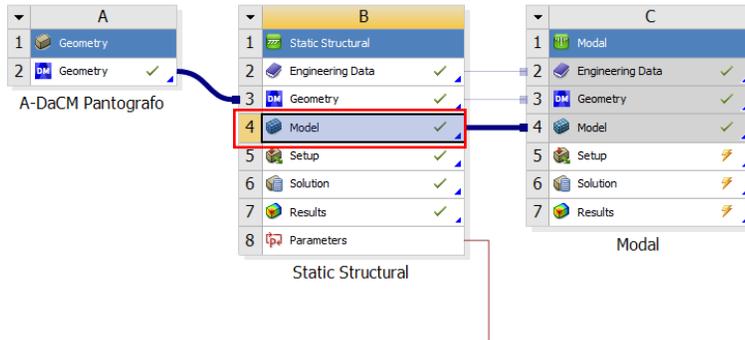
- 1 Se inicia la ANSYS Workbench. Se abrirá la primera ventana del software, donde se tiene un área de trabajo, una barra de herramientas en el lado izquierdo de la pantalla, y en la parte superior se encuentran algunas pestañas de opciones.



- 2 En el recuadro “open Project” cargas el archivo en el que realizarás la parametrización.



- 3 Una vez abierto tu archivo, da doble clic en el recuadro “Model”, para buscar los parámetros requeridos para realizar el barrido.



- 4 Se abrirá la ventana de Multiple Systems – Mechanical, donde seleccionaremos Satic Structural/Acceleration, en la sección de detalles, aparecerán los componentes de la aceleración aplicada, damos clic en el recuadro de “Y Component”, lo que marcará una “P” sobre el recuadro.

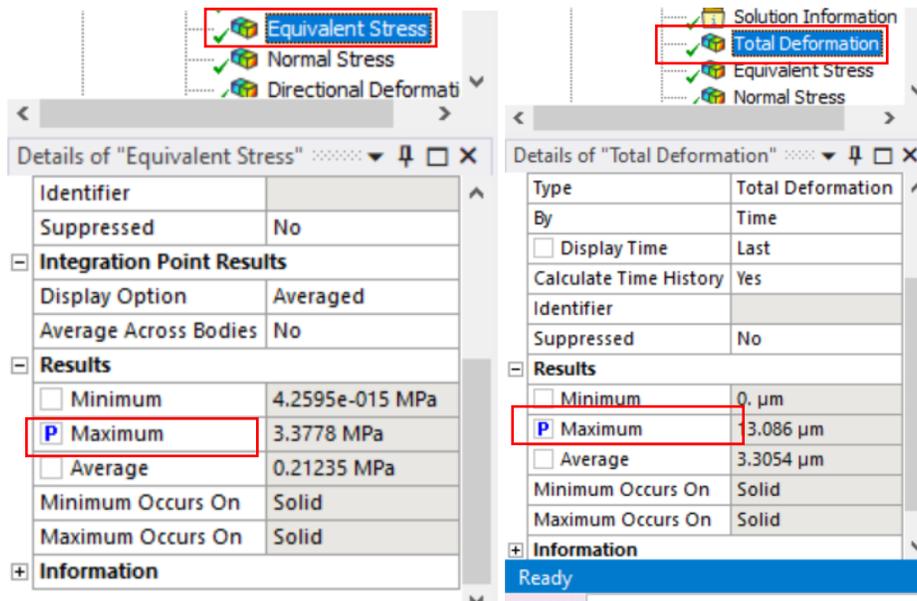
Static Structural (B5)

- Analysis Settings
- Acceleration
- Fixed Support
- Solution (B6)
 - Solution Information
 - Total Deformation

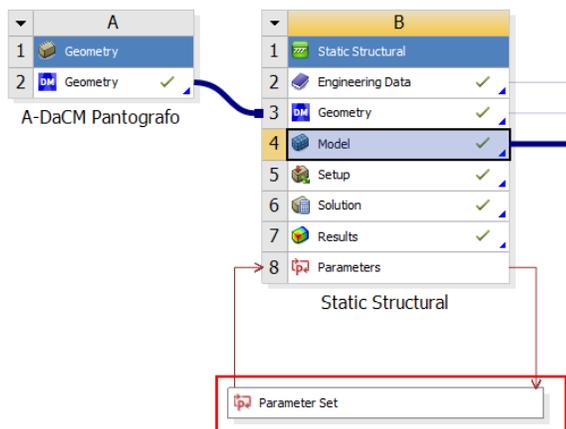
Details of "Acceleration"

Scope	
Geometry	All Bodies
Definition	
Define By	Components
Coordinate System	Global Coordinate System
<input type="checkbox"/> X Component	0. mm/s ² (ramped)
<input checked="" type="checkbox"/> Y Component	-9810. mm/s ² (ramped)
<input type="checkbox"/> Z Component	0. mm/s ² (ramped)
Suppressed	No

- Realizamos el mismo procedimiento para seleccionar los parámetros de Equivalent Stress/Maximum y Total Deformation/Maximum. Y regresamos a nuestra primera ventana Workbench.



- Al realizar estos pasos se genera un recuadro de la herramienta Static Structural /Parameter Set, damos doble clic al recuadro para abrir la siguiente ventana.



- Nos mostrará la tabla de datos con los parámetros previamente seleccionados, debemos agregar la aceleración de manera manual, misma que determinamos en 55 g.

Table of Design Points				
	A	B	C	
1	Name	P1 - Acceleration Y Component	P2 - Equivalent Stress Maximum	P3 - T
2	Units	m s ⁻²	Pa	
3	DP 0 (Current)	-9.81	42211	1.005
*				

- 8 Una vez que se agregue el rango de valores que serán evaluados, procedemos a dar clic en la casilla Update All Design Points ubicada en la parte superior izquierda. El software comenzara a evaluar los puntos, este proceso tomara algunos minutos.

ADACM simetrico - Workbench

File View Tools Units Extensions Jobs Help

Project Parameter Setx

Resume Update All Design Points

Toolbox

Parameter Charts

Parameters Parallel Chart (

Parameters Chart

Outline of All Parameters

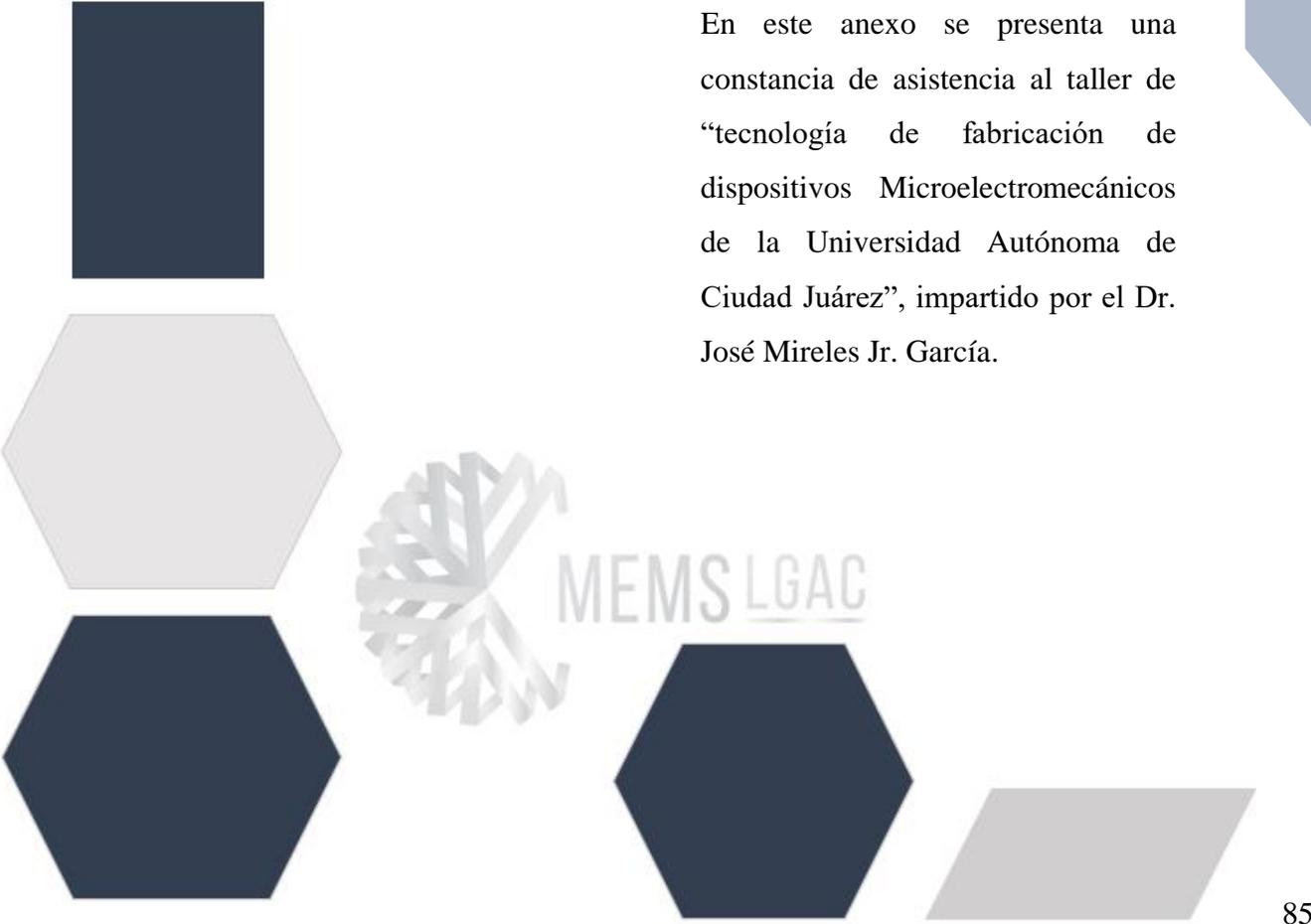
	A	B	C	D
1	ID	Parameter Name	Value	Unit
2	Input Parameters			
3	Static Structural (B1)			
4	P4	Acceleration Y Component	-9.81	m s ⁻²
*	New input parameter	New name	New expression	
6	Output Parameters			
7	Static Structural (B1)			
8	P2	Total Deformation Maximum	16.824	um
9	P3	Equivalent Stress Maximum	4.6033	MPa
*	New output parameter		New expression	
11	Charts			

Finalmente se evaluarán los puntos y el software te dará los resultados de la parametrización.

Table of Design Points					
	A	B	C	D	E
1	Name	P4 - Acceleration Y Component	P2 - Total Deformation Maximum	P3 - Equivalent Stress Maximum	Ret...
2	Units	m s ⁻²	um	MPa	
3	DP 0 (Current)	-9.81	16.824	4.6033	<input checked="" type="checkbox"/>
4	DP 1	-19.62	33.649	9.2066	<input type="checkbox"/>
5	DP 2	-29.43	50.473	13.81	<input type="checkbox"/>
6	DP 3	-39.24	67.298	18.413	<input type="checkbox"/>
7	DP 4	-49.05	84.122	23.017	<input type="checkbox"/>
8	DP 5	-58.81	100.946	27.621	<input type="checkbox"/>
9	DP 6	-68.62	117.770	32.225	<input type="checkbox"/>
10	DP 7	-78.43	134.594	36.829	<input type="checkbox"/>
11	DP 8	-88.24	151.418	41.433	<input type="checkbox"/>
12	DP 9	-98.05	168.242	46.037	<input type="checkbox"/>
13	DP 10	-107.86	185.066	50.641	<input type="checkbox"/>
14	DP 11	-117.67	201.890	55.245	<input type="checkbox"/>
15	DP 12	-127.48	218.714	59.849	<input type="checkbox"/>
16	DP 13	-137.29	235.538	64.453	<input type="checkbox"/>
17	DP 14	-147.10	252.362	69.057	<input type="checkbox"/>
18	DP 15	-156.91	269.186	73.661	<input type="checkbox"/>
19	DP 16	-166.72	286.010	78.265	<input type="checkbox"/>
20	DP 17	-176.53	302.834	82.869	<input type="checkbox"/>
21	DP 18	-186.34	319.658	87.473	<input type="checkbox"/>

Anexo B

Actividad relacionada con el proyecto.



En este anexo se presenta una constancia de asistencia al taller de “tecnología de fabricación de dispositivos Microelectromecánicos de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez”, impartido por el Dr. José Mireles Jr. García.



MEMS LGAC



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS, A TRAVÉS
DEL INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS
Y EL CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

Otorga la presente

CONSTANCIA A

◀ *Martínez García Francisco Andrés* ▶

Por su asistencia al Taller **"Tecnología de Fabricación de Dispositivos Microelectromecánicos de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez"**, impartido por el **Dr. José Mireles Jr. García**, llevado a cabo mediante la plataforma Microsoft Teams, durante los días 12 de abril y 3 de mayo de 2021, con una duración de 4 hrs.

Este taller forma parte de las actividades del Proyecto: Diseño análisis e implementación de novedosos dispositivos MEM inerciales y electro-térmicos. Ref: A1-S-33433. "Proyecto Apoyado por el Fondo Sectorial de Investigación para la Educación".

Dra. Margarita Tecpoyotl Torres
Organizadora
Responsable del Proyecto de Ciencia Básica
Ref: A 1-S-33433 y del UAEMOR-CA-52

Dr. J Jesús Escobedo Alatorre
Director Interino del Centro de Investigación
en Ingeniería y Ciencias Aplicadas CIICAp





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

J JESUS ESCOBEDO ALATORRE | Fecha:2021-08-06 16:32:38 | Firmante
wlaMjcpkc8DX6T5Nme44wZV1PUHOBNvczrUojnanaZVvngs5n7v46Ox59LCo1W5xMQDLqO8!NTGRg1Qp0hWjJtMpZY58DNm8CBKbOei96dTyyq6A.jpBsp7+D9AQHcAG
M3fmcgS2SYMSIQKAEqwaAQWwLx3HP3ZZscq0zBL9uH001J2eUlyORaAgpP7WvpE8ius3q0bRTm5A8PbSGsFJmSYwYKON3H2yVCGPXD9zeFJVQ4KzrSor9WB+HGBx8W
AykTpJwIiHU623kfYp2Ej+wZwHxTObHbifLH9oiN061h5nwaQ1cZ3v3Jx26o71GW3GT2HA==

MARGARITA TECPOYOTL TORRES | Fecha:2021-08-06 17:25:39 | Firmante
YeNcSk8ZyXQZzCXoQxgLn4d8EPoJ54z32n1aBnPS2FUM7kqR3Qa5Zh29YlsculpTMw+Rd2C6MUgh3DvkS039WeCa3mgwvLG3+r15OI8ZT2zonT14TCMhQmWFq/a53Bdol
ZLeTmMLhpqV/srVe758zfaJImJcTx2RmvRVrd1qf8wIHCHR53bDgpc28BWsVjyQHE0TVhFpX0g8uvYnhxe9K4p0oHb1tzUKc26dhh4RACPv8KsAC7nAB6is&Jb/eeQ+uJZ2+f
v+3TwtLxxyIQK02QYmTYzOAGmuWSrF4YphyG1CdwYEyThyEmXv+3TewCrtVbO4dywA==

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



yIGCxT

<https://efirma.uaem.mx/hoRepuo/O8BgXL6MK7GQUT4QPqaCDeeUM7r5qWf>



Una universidad de excelencia

RECTORIA
2017-2023