

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
INSTITUTO DE INGENIERÍA



Programa de maestría y doctorado en ciencias e ingeniería

**Diseño y simulación de nanoestructuras basadas en silicio
para aplicaciones en MEMS**

TESIS

Para obtener el grado de maestría en ingeniería

Presenta: Luis Humberto Magaña Cabanillas

Director de tesis: Dr. Oscar Manuel Pérez Landeros

Codirector de tesis: Dr. Nicola Radnev Nedev

Mexicali B. C. a enero 2023

Resumen.

La presente tesis se enfoca en el estudio del diseño y simulación de sistemas microelectromecánicos MEMS (“Micro Electro Mechanical Systems” por sus siglas en inglés) y dispositivos de microfluidos utilizando diferentes softwares de la familia Ansys. Estas herramientas son muy útiles para la optimización de los sistemas estudiados y los procesos de fabricación. De hecho, poder simular un dispositivo electrónico permite resolver problemas antes de que surjan y sirve para ahorrar recursos y tiempo durante los procesos de fabricación. A lo largo de este proyecto se realizaron modelos y simulaciones de micro/nanoestructuras basadas en silicio para aplicaciones en MEMS como son cantilévers simples, cantilévers con películas metálicas, y cantilévers reforzadas con nanofibras (NF) de carbono, acero y cobre con el propósito de comparar resultados y modular sus frecuencias naturales. También se realizaron modelos y simulaciones de dispositivos de microfluídica como separadores de partículas, mezcladores de flujos, disipadores de calor, generadores de gotas, con el propósito de estudiar el comportamiento de fluidos de una o más fases.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	7
1.1. ESTADO DEL ARTE	8
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	10
1.3. JUSTIFICACIÓN	10
1.4. OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN	11
1.4.1.OBJETIVO GENERAL	11
1.4.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
2. MARCO TEÓRICO	12
2.1. DISPOSITIVOS MEMS	13
2.1.1.MATERIALES PRINCIPALES UTILIZADOS EN MEMS Y MICROFLUÍDICA	18
2.2. DISEÑO DE MEMS ASISTIDO POR COMPUTADORA	23
2.3. FABRICACIÓN DE MEMS	30
2.3.1.PROCESOS ADITIVOS	30
2.3.2.PROCESOS SUSTRATIVOS	31
2.4. MICROFLUÍDICA	32
3. DETALLES DEL PROCESO DE MODELADO, DISEÑO Y SIMULACIÓN	34
3.1. MATERIALES Y MÉTODOS	35
3.2. CANTILEVERS	36
3.3. MECANISMOS FLEXIBLES	40
3.4. DISPOSITIVOS DE MICROFLUIDOS	42
4. RESULTADOS Y DISCUSIONES	52
4.1. RESULTADOS CANTILEVERS	53
4.2. RESULTADOS MECANISMOS FLEXIBLES	60
4.3. RESULTADOS MICROFLUÍDICA	62
5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	65
5.1. CONCLUSIONES	66
5.2. TRABAJO FUTURO	67
6. REFERENCIAS	68

TABLA DE FIGURAS

Figura 1	Partes generales de un MEMS (Fujita 1998).	8
Figura 2	Dispositivo MEMS en equipo móvil para definir orientación y la aceleración. Actualmente todos los dispositivos móviles utilizan un giroscopio de este tipo.	9
Figura 3	Giroscopio sensor de velocidad angular.	13
Figura 4	Materiales utilizados para la fabricación de MEMS: silicio (a), óxido de silicio (b), oro (c), plata (d), cobre (e); como ores, y PDMS (f).	13
Figura 5	Escala comparativa de macro a nanoescala.[13]	15
Figura 6	Proceso básico de fabricación de cantiléver. Puente de polisilicio después de una deposición y un grabado químico (a), puente después de remover el óxido de sacrificio (b), cantiléver se puede fabricar quitando uno de los soportes del puente (c).	15
Figura 7	Dispositivo de microfluidos tipo Lab-on-a-chip.	16
Figura 8	Mecanismo flexible biestable. [22]	17
Figura 9	Diagrama de flujo del proceso de diseño general.[49]	24
Figura 10	Sistema de deposición química de vapor (PVD) [68].	30
Figura 11	Diagrama de un sistema de sputtering para metalización.	31
Figura 12	Ataque químico húmedo sobre una película de silicio	32
Figura 13	Ataque químico seco, erosión de plasma reactivo.	32
Figura 14	Proceso para el diseño y simulación de una estructura.	35
Figura 15	Cantiléver tipo viga de mallado simétrico de 250µm.	36
Figura 16	Microcantilever de mallado simétrico de 15 µm.	37
Figura 17	Cantiléver rectangular delgado (a), cantiléver rectangular (b), cantiléver triangular(c).	37
Figura 18	Estructura a base de silicio con cavidades para embeber NF de distintos materiales.	38
Figura 19	Estructura a base de silicio con cavidades por las cuales pasan los nanotubos de carbono.	39
Figura 20	Peineta de 5 dedos de distintas longitudes reforzados individualmente con NF.	39
Figura 21	Mecanismo flexible biestable, las membranas de tiene un grosor de 50 µm.	40
Figura 22	MF de comportamiento biestable: posición de equilibrio 1 (a); posición de equilibrio 2 (b).	40
Figura 23	Medidas del Mecanismo flexible con movimiento en 2 ejes.	41
Figura 24	Comparación de un mallado fino (a) y uno medianamente fino (b).	42
Figura 25	Microcanales de convergencia o divergencia de flujos.	42
Figura 26	Simulación de fracción volumétrica en serpentín mezclador de flujos.	43
Figura 27	Simulación de fracción volumétrica en serpentín mejorado con estructuras internas para promover la mezcla.	44
Figura 28	(a) Microcanal en forma de espiral Fibonacci, (b) dirección y velocidad de flujo.	44
Figura 29	Vista isométrica de espiral para separar microfluidos	45
Figura 30	Micro Válvula Tesla.Modelo 3D (a) y simulación de un flujo en dirección de bloqueo.	45
Figura 31	Simulación de líneas de corriente en la válvula de Tesla. El flujo disminuye en modo bloqueo (a), el flujo es constante en modo libre (b).	46
Figura 32	Válvula de espiral Tesla. Funciones de válvula unidireccional y separador de partículas.	46
Figura 33	Simulación del funcionamiento de un generador de microgotas de aceite de ~300 µm de diámetro, representación de fracción volumétrica.	47
Figura 34	Vista lateral del microamortiguador.	47
Figura 35	Vista isométrica del microamortiguador con corte transversal.	48
Figura 36	Vista isométrica del microamortiguador con mallado.	48
Figura 37	Corte transversal del microamortiguador donde se observa la dirección del flujo viscoso.	49
Figura 38	Componentes del actuador electrostático.	49
Figura 39	Análisis de desplazamiento y estrés en cantiléver electrostático de PDMS	50

Figura 40	Acelerómetro MEMS, simulación de desplazamiento y deformación.	50
Figura 41	Giroscopio de cuatro grados de libertad y sus componentes.	51
Figura 42	Simulación de viga tipo cantiléver.	53
Figura 43	Simulación del funcionamiento de los distintos cantiléver en su modo natural de vibración. Cantiléver rectangular delgado (a), Cantiléver rectangular (b), Cantiléver triangular (c).	54
Figura 44	Cantiléver tipo viga adicionado con película delgada metálica de 100 nm.	55
Figura 45	Graficas de frecuencia natural (a) y desplazamiento (b), en cantiléver de silicio con películas delgadas metálicas de Au, Ag, Cu, y Al.	55
Figura 46	Simulación del desplazamiento del cantiléver derivado de la compresión resultante transmitida por las NF de refuerzo.	56
Figura 47	Corte transversal de la estructura para apreciar la deformación interna de las NF.	57
Figura 48	Grafica de la frecuencia natural de los distintos materiales utilizados como fibras de refuerzo para la microestructura.	57
Figura 49	Simulación de la frecuencia natural de cada uno de los voladizos de la estructura con fibras de carbono.	58
Figura 50	Grafica de la frecuencia natural de los distintos materiales utilizados para las fibras para el pretensado de la microestructura en cada uno de los cantilévers.	59
Figura 51	Vista inferior, partes de la estructura donde se genera su máximo estrés marcadas con un círculo punteado color rojo.	60
Figura 52	Simulación del desplazamiento en la estructura interna derivado de la presión sobre estructura interna en el eje X (a), deformación de la estructura en las extremidades de las membranas flexibles (b).	61
Figura 53	Simulación del desplazamiento de la estructura externa. Posición de equilibrio 1 (a) posición de equilibrio 2 (b).	62
Figura 54	Grafica de Máximo estrés (a), gráfica de frecuencia natural (b), y gráfica de máximo desplazamiento (c) en estructura MF base silicio y base PDMS.	62
Figura 55	Simulación de flujo en serpentín mezclador donde es posible apreciar la ruta de la corriente y su velocidad en escala colorimétrica.	63
Figura 56	Disipador de calor Fibonacci, y colorimetría de temperatura.	63
Figura 57	Simulación de flujo en microbombas piezoeléctricas de aspas (izquierda) y de película flexible.	64

LISTA DE TABLAS

Tabla 1	Propiedades mecánicas del silicio.	18
Tabla 2	Propiedades mecánicas del óxido de silicio.	19
Tabla 3	Propiedades mecánicas del PDMS.	19
Tabla 4	Propiedades mecánicas del oro.	20
Tabla 5	Propiedades mecánicas de la plata.	20
Tabla 6	Propiedades mecánicas del cobre.	21
Tabla 7	Propiedades mecánicas del aluminio.	21
Tabla 8	Propiedades mecánicas del PLA.	22
Tabla 9	Tabla de modos de vibración, frecuencia natural y máximo desplazamiento de una viga tipo cantiléver utilizando Silicio como material principal.	53
Tabla 10	Frecuencia natural y máximo desplazamiento de un cantiléver de voladizo cuadrado	54
Tabla 11	Frecuencia natural y máximo desplazamiento de un cantiléver de voladizo rectangular	54
Tabla 12	Frecuencia natural y máximo desplazamiento de un cantiléver de voladizo triangular	55
Tabla 13	Resultados de frecuencias de los cantilevers con distintos tamaños	59

1.INTRODUCCIÓN

1.1. Estado del arte

La industria electrónica ha evolucionado constantemente en las últimas décadas, debido a este desarrollo se ha visto en la necesidad de reducir el tamaño de las tecnologías y métodos de fabricación. Es decir, evolucionar de micro a nanoescala. Con este avance nuevas tecnologías han sido posibles como por ejemplo las ya conocidas tecnologías de los llamados Sistemas Microelectromecánicos o conocidos por sus siglas en inglés MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) y su paso a la nanoescala (NEMS). [1]

MEMS se refiere a dispositivos que tienen características de dimensiones micrométricas y que combinan componentes eléctricos y mecánicos en un sistema capaz de interactuar con el medio. *Figura 1.* [2] Los MEMS y NEMS ofrecen beneficios y ventajas respecto a sus homólogos de dimensiones mayores como fabricación masiva a menor costo, menor tamaño y menor peso y mejor empaquetamiento, menor consumo de energía, alta precisión y biocompatibilidad, partes mecánicas específicamente diseñadas más rápidas y eficientes, materiales con propiedades que les permiten ser más fuertes y ligeros, componentes electrónicos más rápidos, nuevos dispositivos optoelectrónicos, entre otros. [3]

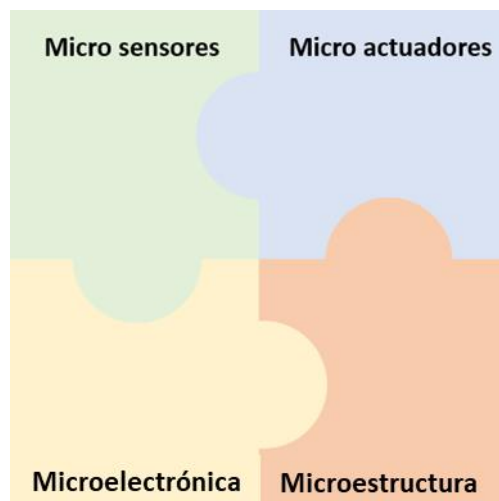


Figura 1 Partes generales de un MEMS (Fujita 1998).

Los MEMS se pueden encontrar en prácticamente en todos los dispositivos que utilizamos en nuestra vida diaria, teléfonos inteligentes computadoras portátiles, tabletas, juegos de consolas, sistemas de navegación, entre otros (*Figura 2*). Se

fabrican habitualmente a partir de obleas de silicio o silicio policristalino y se requiere de una precisión muy alta en cada una de sus etapas de fabricación. [4]



Figura 2 Dispositivo MEMS en equipo móvil para definir orientación y la aceleración. Actualmente todos los dispositivos móviles utilizan un giroscopio de este tipo.

Un buen punto de partida para fijar el origen de los MEMS es la invención del transistor. Así, con la creación en 1947 del primer transistor de punto de contacto por Bardeen, Brattain y Shockley, y su posterior evolución hacia el transistor de efecto de campo inventado por Shockley en 1952, [5] los aparatos electrónicos basados en el tubo de vacío (bulbo), que fue creado en 1906 por Lee de Forest, cedieron su lugar a los compactos dispositivos basados en semiconductores. [6] La invención del transistor fue un gran avance en la reducción de tamaño, consumo de energía, producción de calor y portabilidad en los aparatos e instrumentos electrónicos. Y ya en los días iniciales del desarrollo del transistor se estudiaron las propiedades piezoresistivas de los materiales semiconductores y se estableció un primer vínculo entre los materiales electrónicos (silicio y germanio) y la creación de sensores mecánicos. [7]

En 1964, se produjo el primer MEMS, el transistor de compuerta resonante (transistor de efecto de campo que incorpora una viga volada de oro que vibra a una frecuencia específica de entre 1 a 100 kHz para discriminar señales de alta frecuencia), empleando procedimientos estándar de fabricación microelectrónica en silicio. [8]

A pesar de que los MEMS son una tecnología para el desarrollo y producción de muchos nuevos productos industriales y de consumo, los MEMS son también una tecnología disruptiva que difiere significativamente de la tecnología existente de circuitos integrados, lo que requiere un conjunto completamente diferente de capacidades y competencias para su implemento. [9]

1.2. Planteamiento del problema

Este trabajo propone diseñar y simular nanoestructuras basadas en silicio para su aplicación en sistemas micro/nano-electromecánicos (MEMS/NEMS). En el proyecto se simularán las propiedades mecánicas de estos sistemas con el propósito de comprobar que se pueden obtener resultados confiables a base de softwares de simulación y diseño utilizando propiedades de materiales ampliamente estudiados como semiconductores, aislantes y metales. Adicionalmente, se compararán materiales desarrollados en el laboratorio de semiconductores microelectrónica y nanotecnología (LSMN) con los resultados de las simulaciones. También se diseñarán dispositivos de microfluidos con canales de dimensiones micrométricas para posteriormente simular los distintos comportamientos de los flujos.

1.3. Justificación

Debido a la constante evolución de la microelectrónica y su paso a la nanoelectrónica, así como la fusión de distintas tecnologías en los dispositivos MEMS, un reto de fabricación y diseño es siempre constante. Debido a esto grandes empresas invierten en investigación para el diseño y desarrollo de nuevos materiales y dispositivos. La simulación del funcionamiento y la operación de estos nuevos dispositivos es una técnica que permite reducir fuertemente el tiempo y los gastos de desarrollo y evitar el gasto innecesario de recursos, así como la pronta resolución de problemas.

1.4. Objetivos de investigación

1.4.1. Objetivo general

Diseñar y simular con el uso de softwares especializados, micro y nanoestructuras a base de silicio y oxido de silicio, y polidimetilsiloxano mejoradas con nanofibras de carbono para aplicaciones en dispositivos MEMS.

1.4.2. Objetivos específicos

- Diseñar y simular cantilévers a base de silicio con distintas geometrías.
- Diseñar y simular cantilévers a base de silicio y oxido de silicio mejoradas con películas de oro, plata, cobre y aluminio.
- Diseñar y simular cantilévers a base de silicio mejoradas con nanofibras de carbono, acero y cobre.
- Diseñar y simular micro-canales en sustratos de silicio, oxido de silicio y polidimetilsiloxano (PDMS) para su posible aplicación en dispositivos y sistemas microfluídicos.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Dispositivos MEMS

Las siglas MEMS es un acrónimo para denotar Sistemas Microelectromecánicos (Micro-Electro-Mechanical Systems). Son definidos típicamente como dispositivos de dimensiones micro compuestos por elementos activos y pasivos microfabricados y que realizan diferentes funciones como percepción, procesamiento de datos, comunicación y actuación sobre el entorno *Figura 3*. Los tipos de dispositivos MEMS pueden variar desde estructuras relativamente simples que no tienen ninguna parte móvil, hasta sistemas muy complejos en los que múltiples elementos se mueven bajo el control de la electrónica integrada. [10]

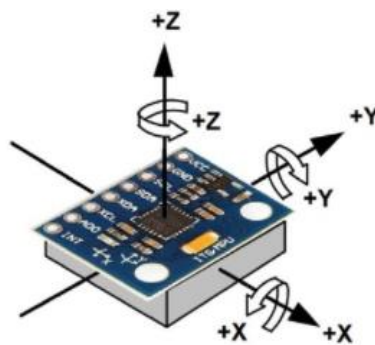


Figura 3 Giroscopio sensor de velocidad angular.

Los materiales más utilizados en la fabricación de MEMS son: silicio, dióxido de silicio y nitruro de silicio; aluminio, oro, plata, cobre, PDMS, entre otros *Figura 4*.

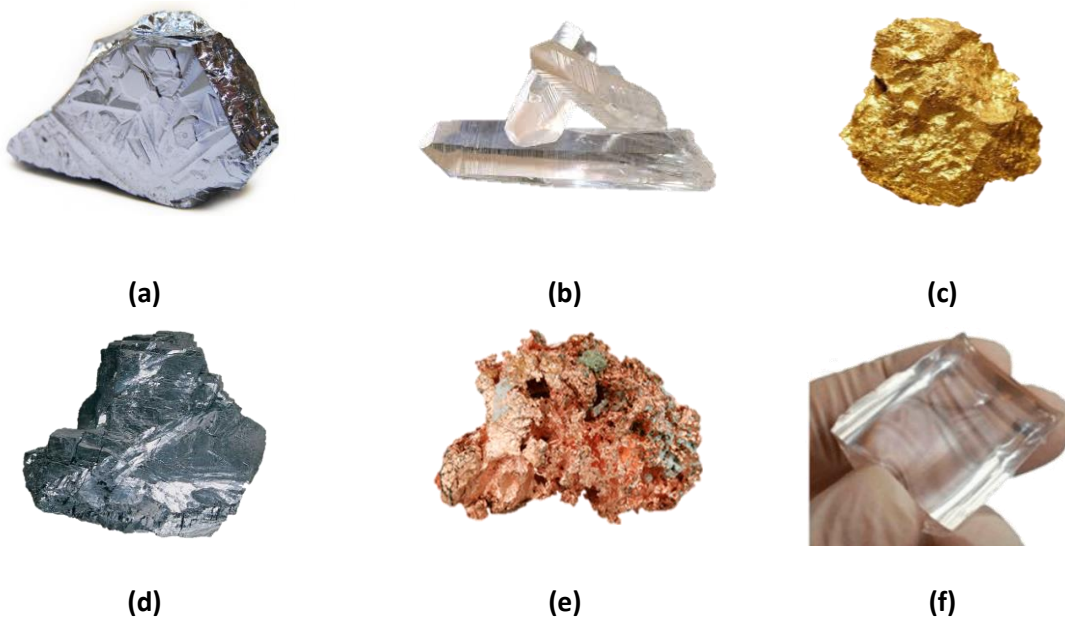


Figura 4 Materiales utilizados para la fabricación de MEMS: silicio (a), óxido de silicio (b), oro (c), plata (d), cobre (e); como ores, y PDMS (f).

Las estructuras que componen un dispositivo MEMS rondan el rango de los nanómetros hasta los micrómetros *Figura 5*. Debido a esto los materiales que se usan para la fabricación de MEMS tienen que ser estudiados ya que a esas dimensiones el comportamiento de un material suele ser distinto al que tendría si este fuera un material de bulto. [11]

Los microsistemas se pueden clasificar en seis distintos tipos:

- **Sensores:** dispositivos MEMS diseñados para medir cambios en el ambiente. Estos microsistemas incluyen sensores químicos, de movimiento, inerciales, térmicos y ópticos.
- **Actuadores:** son un grupo de dispositivos diseñados para proporcionar un estímulo a otros componentes o dispositivos MEMS. En los microsistemas los actuadores son operados electrostática o térmicamente.
- **MEMS RF:** son una clase de dispositivos usados para transmitir señales de radio frecuencia. Los dispositivos típicos incluyen: interruptores, capacitores, antenas, etc.
- **MOEMS (Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems)** son dispositivos diseñados para dirigir, reflejar, filtrar, y/o amplificar la luz. Estos componentes incluyen interruptores ópticos y reflectores.
- **Dispositivos MEMS para microfluidos:** son diseñados para interactuar y trabajar con fluidos. Dispositivos como microbombas y microválvulas son creados para manipular pequeños volúmenes de fluido.
- **Bio MEMS** son dispositivos que, como muchos MEMS para microfluidos, son diseñados para interactuar específicamente con muestras biológicas. Dispositivos como éstos fabricados para interactuar con proteínas, células biológicas, reactivos médicos, etc . [12]

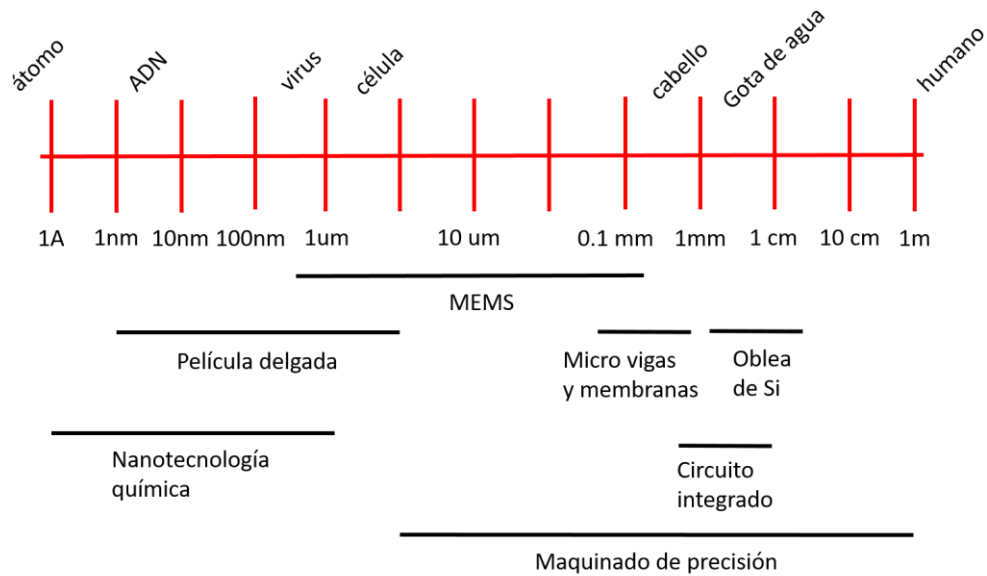


Figura 5 Escala comparativa de macro a nanoescala.[13]

Nanoestructuras MEMS básicas

Las estructuras MEMS se obtienen por los métodos de fabricación de la electrónica moderna como son la fotolitografía y el micromaquinado, estos métodos nos permiten obtener desde las estructuras más simples hasta las estructuras más complicadas. El ejemplo más común es el de un cantiléver (*Figura 6*), estas estructuras pueden ser utilizadas en sensores de aceleración, ópticos, biosensores, entre otros. [14]

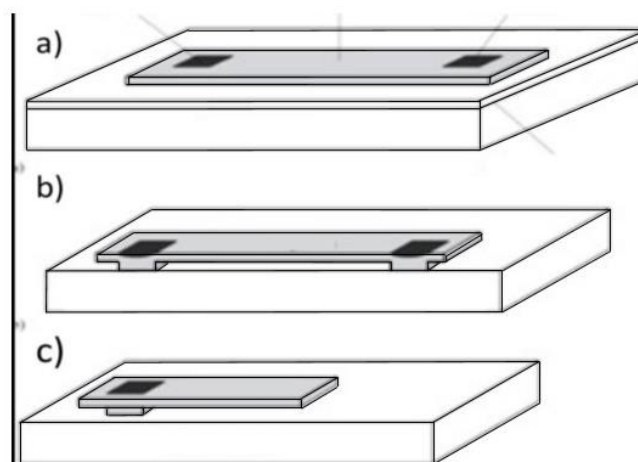


Figura 6 Proceso básico de fabricación de cantiléver. Puente de polisilicio después de una deposición y un grabado químico (a), puente después de remover el óxido de sacrificio (b), cantiléver se puede fabricar quitando uno de los soportes del puente (c).

Microcanales

La microfluídica es una rama multidisciplinaria de la ciencia y sus características fundamentales son el empleo y control de pequeños volúmenes (líquidos o gaseosos) y la multidisciplinaria complejidad de los principios físicos y los dispositivos empleados. Cuenta con abundantes financiadores, como las industrias farmacéuticas y las transnacionales de la actividad química. [15]

Debido a la naturaleza multidisciplinaria y la capacidad de poner un procedimiento de laboratorio completo en un microsistema simple le ha dado a esta tecnología el nombre de “*Lab-on-a-chip*” (laboratorio en un chip) *Figura 7*. En este caso, el chip se define como el patrón de microcanales en el que fluye el fluido, que está moldeado o grabado. [16, 17]

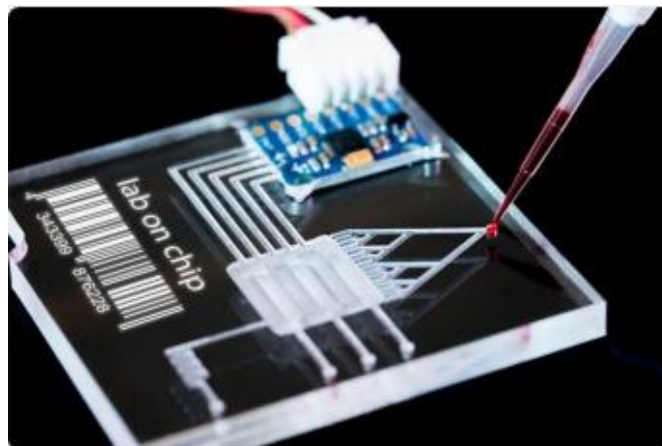


Figura 7 Dispositivo de microfluidos tipo *Lab-on-a-chip*.

Mecanismos flexibles

Los Mecanismos Flexibles (MF) son dispositivos monolíticos que realizan su función a través de la deflexión elástica de sus miembros. Las ventajas de los MF incluyen un mayor rendimiento, ensamblaje reducido o nulo, sin fricción ni desgaste, menos piezas, menor costo y menor peso. Estas ventajas hacen que los MF sean ideales para aplicaciones espaciales o aeroespaciales, donde se desea poco peso y ausencia de lubricación. Aprovechan los puntos estables de energía mínima en sus curvas de energía elástica geoméricamente no lineales. Estos mecanismos *Figura 8* están diseñados específicamente para que la energía almacenada en el mecanismo

desviado pueda liberarse rápidamente cuando se activa el dispositivo. Este enfoque integra el movimiento deseado del mecanismo y el almacenamiento de energía para crear mecanismos biestables con un recuento de piezas drásticamente reducido en comparación con los mecanismos tradicionales. A medida que se aplica una desviación al mecanismo, este pasa rápidamente de una posición estable a la siguiente. [18, 19]

Los mecanismos de liberación se han desarrollado en respuesta a la necesidad de anclar elementos desplegados al cuerpo de la nave espacial para el lanzamiento y el vuelo y luego liberarlos con un comando eléctrico. Los dispositivos de liberación piro mecánicos son mecanismos de liberación comunes en aplicaciones aeroespaciales. Tienen una respuesta rápida y se entienden bien, pero son dispositivos costosos de un solo uso que aplican cargas de choque a la nave espacial cuando se disparan. [20, 21]

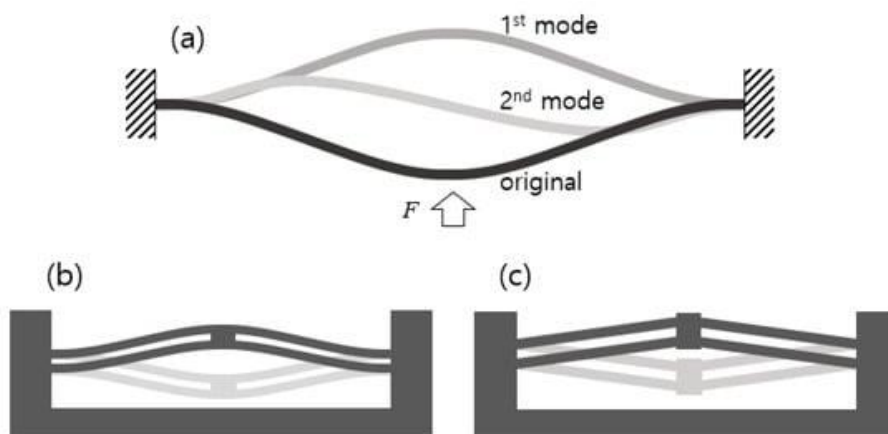


Figura 8 Mecanismo flexible biestable. [22]

2.1.1. Materiales principales utilizados en MEMS y microfluídica

Los materiales utilizados en MEMS tienen distintas propiedades mecánicas a niveles micro y nano en comparación con sus propiedades a macro escala. Para la selección de estos materiales se toman en cuenta atributos como son masa, rigidez, deflexión, frecuencia, también las propiedades de estos materiales pueden verse afectados por su historial de procesamiento como la presión, la temperatura, método de deposición y exposición al grabado [23].

Silicio

El silicio es un elemento químico no metálico de la familia del carbono, es el segundo elemento más abundante en el planeta, siendo superado solo por el oxígeno. [15] Es el material más utilizado para la creación de circuitos integrados que se utilizan en la electrónica de consumo en la industria moderna, tiene propiedades que permiten hacer ciertas operaciones que son necesarias sin la necesidad de perder tanta energía, es decir, disminuye la disipación de energía en comparación con otros materiales. Es un sólido duro relativamente inerte *Tabla 1*. [24-26]

Tabla 1 Propiedades mecánicas del silicio.

PROPIEDADES	UNIDADES
Densidad	2.33 gramos/cm ³
Módulo de Young	180 GPa
Coefficiente de Poisson	0.27
Módulo de compresibilidad	3460 MPa
Dureza Mohs	7

Óxido de silicio

Óxido de silicio o dióxido de silicio es un compuesto de silicio y oxígeno, este compuesto ordenado espacialmente en una red tridimensional forma el cuarzo y todas sus variedades. Principalmente se puede encontrar en la arena. La combinación de las propiedades eléctricas relativamente buenas del silicio, las excelentes propiedades aislantes del SiO₂ y la interfaz de baja densidad de defectos, es el ingrediente clave del circuito integrado moderno. [29,30]

Adicionalmente, las propiedades mecánicas que se muestran en la *Tabla 3*, son útiles en MEMS.

Tabla 2 Propiedades mecánicas del óxido de silicio.

PROPIEDADES	UNIDADES
Densidad	2.65 g/cm ³
Módulo de Young	66.3 MPa
Coefficiente de Poisson	0.15
Módulo de compresibilidad	33.5 GPa
Resistencia a la tracción	45 Pa

Polidimetilsiloxano (PDMS)

El polidimetilsiloxano (PDMS) es uno de los polímeros de alto rendimiento, con propiedades físicas y químicas únicas como flexibilidad, tolerancia térmica, resistencia a la oxidación, facilidad de fabricación, dureza, entre otras propiedades *Tabla 2*. Proporciona una superficie que tiene una energía libre interfacial baja, es químicamente inerte, tiene buena permeabilidad a los gases y buena estabilidad térmica, y es ópticamente transparente. El PDMS ha servido como material estructural predominante para el desarrollo de dispositivos de microfluidos y aplicaciones litográficas blandas. Se prepara a partir de dimetildiclorosilano que reacciona con agua para producir el polímero lineal con grupos terminales hidroxilo o cloruro y bajo diferentes condiciones. [27, 28]

Tabla 3 Propiedades mecánicas del PDMS.

PROPIEDADES	UNIDADES
Densidad	965 kg/m ³
Módulo de Young	0.57 - 3.7 MPa
Coefficiente de Poisson	0.49
Módulo de compresibilidad	61.667 Pa
Resistencia a la tracción	1.1 Pa

Oro

Una de sus características es su alta densidad *Tabla 3* que esta solo por debajo de la del osmio, iridio y platino. No hay un metal tan dúctil o maleable como el oro. El oro puro no se oxida por lo que no se formara ninguna película de óxido sobre él, tiene un color amarillo brillante porque refleja toda la gama de colores excepto el amarillo que absorbe *Tabla 4*. [31, 32]

Tabla 4 Propiedades mecánicas del oro.

PROPIEDADES	UNIDADES
Densidad	19.32 Mg/m ³
Coeficiente de Poisson	0.425
Resistencia a la tracción	220 MPa
Módulo de Young	81 GPa
Módulo de compresibilidad	180 GPa

Plata

La plata es un metal lustroso de color blanco-grisáceo. Esta solo al lado del oro en términos de maleabilidad y ductilidad, también es un buen conductor de calor y de electricidad, de hecho, es el mejor conductor de electricidad, incluso que el cobre y el oro. La plata, se usa en muchas facetas de la fabricación de semiconductores *tabla 5*. [33, 34]

Tabla 5 Propiedades mecánicas de la plata.

PROPIEDADES	UNIDADES
Densidad	10.5 Mg/m ³
Coeficiente de Poisson	0.395
Resistencia a la tracción	340 MPa
Módulo de Young	74 GPa
Módulo de compresibilidad	118 GPa

Cobre

El cobre es un metal blando de color rojizo con una estructura cristalina cubica centrada en las caras *Tabla 6*, refleja la luz roja y naranja y absorbe otras frecuencias en el espectro visible debido a su estructura de bandas, por lo que tiene un color rojizo. Es resistente al desgaste y posee una muy alta conductividad térmica y eléctrica. De hecho, es un excelente conductor de la electricidad que unido a su buena ductilidad y maleabilidad lo hacen el metal más empleado para la fabricación de cables eléctricos. También se utiliza en la construcción, como techado y plomería; maquinaria industrial, etc. [35, 36]

Tabla 6 Propiedades mecánicas del cobre.

PROPIEDADES	UNIDADES
Densidad	8.94 Mg/m ³
Coeficiente de poisson	0.35
Resistencia a la tracción	390 MPa
Módulo de Young	133 GPa
Módulo de compresibilidad	145 GPa

Aluminio

El aluminio es un metal blando y ligero *Tabla 7*. Tiene un aspecto plateado opaco, debido a una fina capa de oxidación que se forma rápidamente cuando se expone al aire. [37, 38]

Tabla 7 Propiedades mecánicas del aluminio.

PROPIEDADES	UNIDADES
Densidad	2.73 Mg/m ³
Coeficiente de Poisson	0.36
Resistencia a la tracción	84 MPa
Módulo de Young	72 GPa
Módulo de compresibilidad	83 GPa

Ácido poliláctico (PLA)

Es un termoplástico fabricado a base de recursos renovables como el almidón de maíz, raíces de tapioca o caña de azúcar. A diferencia de otros materiales de la industria hechos principalmente a base de petróleo. Este polímero semicristalino es uno de los predilectos para el uso de filamentos para impresoras 3D gracias a sus propiedades; tiene una temperatura de fusión de 180 °C, algo relativamente bajo si se compara con el filamento de ABS que puede llegar hasta los 260 °C. El PLA no tiene las mismas propiedades mecánicas que el filamento ABS en cuanto impresiones 3D, el ABS es más resistente y flexible. Aunque el PLA tiene mayor resistencia a factores externos como el calor. [39, 40]

Tabla 8 Propiedades mecánicas del PLA.

PROPIEDADES	UNIDADES
Densidad	1,24 g/cm ³
Resistencia a tracción	3309 MPa
Resistencia a flexión	485 kg/cm ²
Coefficiente de poisson	0.38
Temperatura de deformación	55 °C

Materiales piezoeléctricos

La piezoelectricidad es un fenómeno que ocurre cuando se genera un campo eléctrico en un material cuando este es sometido a una tensión mecánica que lo deforme. Este fenómeno también ocurre a la inversa, la deformación del material cuando se le aplica un campo eléctrico. Los materiales dieléctricos son piezoeléctricos cuando tienen una estructura cristalina anisótropa y un momento dipolar permanente. Se utilizan para producir una transformación de energía eléctrica en mecánica o viceversa. [41, 42] Gran parte de los materiales piezoeléctricos que se utilizan en aplicaciones MEMS son policristalinos, por lo que el efecto piezoeléctrico total producido depende de la contribución de todos los granos del material.

En este punto hay que distinguir entre los materiales piezoeléctricos ferroeléctricos o no ferroeléctricos. Estos materiales se dividen en dos tipos, los de naturaleza

piezoeléctrica que son el cuarzo, turmalina, etcétera. Y los ferroeléctricos; que son el tantalato de litio, nitrato de litio, berlinita, en forma de materiales monocristalinos y cerámicas o polímeros polares, que tras ser sometidos a polarización adquieren propiedades piezoeléctricas. [43] Un ejemplo donde se aplica este tipo de materiales son en los encendedores eléctricos. En su interior llevan un cristal piezoeléctrico al cual golpea bruscamente el mecanismo de encendido. Este golpe provoca una elevada concentración de carga eléctrica, capaz de crear un arco voltaico o chispa, que enciende el mechero. [44]

2.2. Diseño de MEMS asistido por computadora

La palabra diseño proviene del término italiano *Disegno*, que significa delineación de una figura o realización de un dibujo. En la actualidad, el concepto de diseño tiene una amplitud considerable, de tal modo que especifica su campo de acción acompañándose de otros vocablos. Así tenemos: diseño industrial, diseño artesanal, diseño gráfico, diseño textil, diseño mecánico, diseño estructural, diseño arquitectónico, diseño de procesos, etc. [45, 46]

Proceso de diseño

Identificar correctamente las necesidades es una de las primeras etapas del desarrollo de un objeto, es uno de los puntos más importantes en todo el proceso. Fallar en este aspecto es crítico y las consecuencias negativas incluyen, por ejemplo, modificaciones en la producción, incremento de costos, retraso en el lanzamiento al mercado, insatisfacción del cliente y reducidas cuotas de mercado *Figura 9*. [47]

El diseño es un proceso que convierte una necesidad o requisito en un producto terminado o en una solución de diseño. El proceso de diseño comprende 7 etapas:

- **Definir:** En primer lugar, se debe definir el problema, cual es el objetivo. La comprensión del problema y sus limitaciones.
- **Investigar:** En esta etapa se revisa la información como los antecedentes del problema del diseño, usuario final, obstáculos potenciales, entre otros.

- **Idear:** Idear es la etapa donde se identifican las necesidades del usuario y se generan ideas para cumplir con los objetivos, a través de una lluvia de ideas.
- **Prototipar:** La elaboración de prototipos es la creación de estas ideas que se presentan para la revisión de un grupo de usuarios antes de ser presentado al cliente.
- **Selección:** Es la parte donde las propuestas son revisadas, algunas de estas soluciones pueden ser prácticas, pero pueden no ser las mejores.
- **Implementar:** La implementación contempla el desarrollo del diseño y su entrega final al cliente.
- **Aprender:** Analizar si la solución cumplió con el objetivo de diseño, esto puede identificar mejoras que se puedan hacer en un futuro.[48]

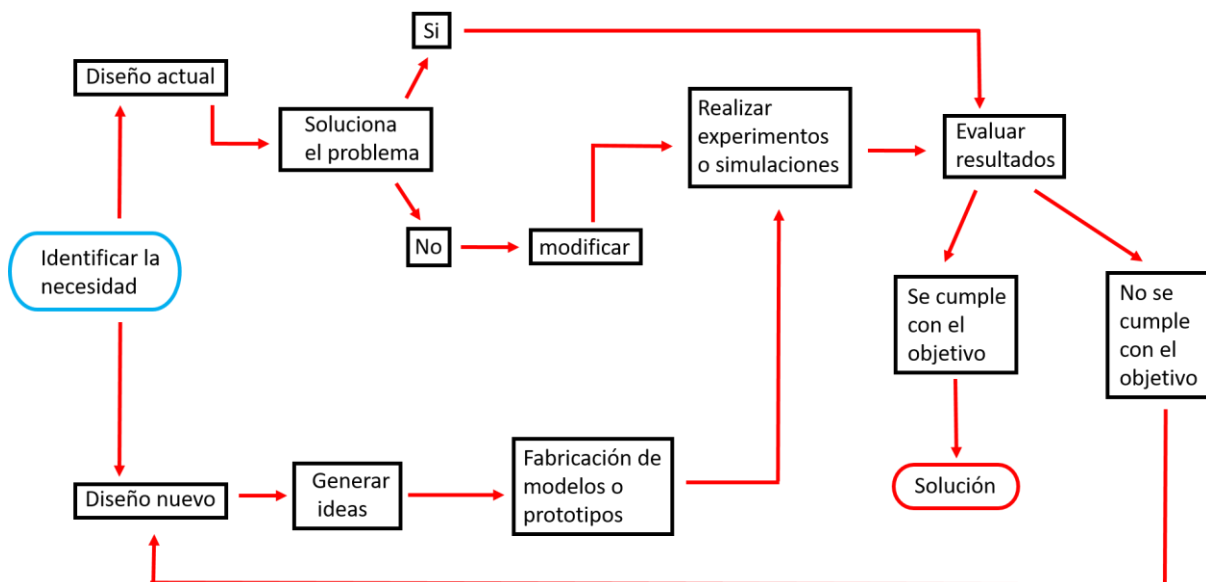


Figura 9 Diagrama de flujo del proceso de diseño general.[49]

Softwares y su proceso para el diseño asistido por computadora

La industrial actual hace uso de muchas herramientas digitales de diseño y simulación de estructuras y dispositivos tales como Ansys, Comsol, Solidworks, Catia, Autocad, Rhinoceros entre otros. Principalmente son utilizadas para la generación de planos de herramientas y equipos, así como diseños y modificaciones de herramientas. Una de las ventajas de contar con un área de diseño es la reducción de los costos de fabricación y los tiempos de espera ante la modificación de un proceso o la aparición de un problema. Sin embargo, el diseño funciona mejor cuando

se tiene la capacidad y los conocimientos para simular aquellas estructuras, mecanismos o dispositivos, que se desean introducir al proceso de manufactura ya que con esto se puede anticipar el resultado de la buena o mala operación de estos diseños. [50]

La razón principal para realizar simulaciones por computadora se encuentra en la posibilidad de construir un sistema virtual sobre el cual se puedan realizar distintas pruebas para observar su comportamiento y dar paso a un proceso iterativo de optimización de los diversos parámetros de diseño hasta obtener una respuesta que se ajuste a las especificaciones marcadas. [51]

Debemos tener en cuenta que el uso de simulaciones por computadora nos permite reducir significativamente los tiempos y costos de desarrollo y contribuye a evitar la creación de prototipos fallidos. Hasta hace apenas unos años, los programas de simulación para circuitos eléctricos tenían un grado de madurez muy superior a las herramientas disponibles para la simulación de MEMS. [52]

Método de los elementos finitos

El método de los elementos finitos (MEF) es un método numérico para la solución aproximada de ecuaciones diferenciales complejas en problemas de física e ingeniería. Se utiliza para resolver ecuaciones diferenciales asociadas a un problema físico sobre geometrías complicadas. Se usa en el diseño y mejora de aplicaciones industriales y productos, así como en la simulación de fenómenos físicos y biológicos complejos. [53] Este método MEF permite obtener una solución numérica de un problema mediante la descomposición del objeto estudiado en un gran número de constituyentes básicos o elementos, los que se interconectan a través de puntos denominados nodos. Esto se basa en el hecho de que es posible de determinar numéricamente el comportamiento físico de cada uno de estos elementos, a partir de las ecuaciones propias del problema tratado y de las condiciones de contorno adyacentes. Luego, una vez determinadas las propiedades de cada elemento, éstas son combinadas para posibilitar la representación de la estructura completa y evaluar su comportamiento. La solución del problema provee los desplazamientos de estos nodos, y a partir de ellos, evaluar las deformaciones y las tensiones del sistema estudiado. [54]

Mallado

El mallado es una parte integral del proceso de simulación de ingeniería en el que las geometrías complejas se dividen en elementos simples que pueden utilizarse como aproximaciones locales discretas del dominio mayor. La malla influye en la precisión, la convergencia y la velocidad de la simulación. Además, como la malla suele consumir una parte significativa del tiempo necesario para obtener resultados de simulación, cuanto mejores y más automatizadas sean las herramientas de malla, más rápida y precisa será la solución. [55]

Simulación

Las simulaciones de MEMS son más complejas que las simulaciones de circuitos electrónicos, principalmente, porque los primeros son regidos por fenómenos de distintos dominios físicos (mecánica, óptica, electromagnetismo, termodinámica, entre otros) que presentan diversos grados de acoplamiento, haciendo el modelado y las simulaciones un problema con alto grado de dificultad. Sin embargo, las herramientas disponibles en la actualidad para la simulación por computadora, permiten llevar a cabo simulaciones multidominio y realizar visualizaciones gráficas de los resultados. [56]

Ansys

Ansys es un programa que utiliza la metodología de elementos finitos, se utiliza para analizar propiedades físicas y mecánicas de materiales, sistemas mecánicos, etc. Permite realizar ensayos mecánicos sobre modelos sólidos tridimensionales, placas, elementos simétricos, modelos simplificados de revolución en 2D, etc. Además, permite hacer ensayos dinámicos, en régimen transitorios, aplicando fuerzas y condiciones de frontera para resolver las ecuaciones necesarias. Inclusive permite realizar análisis con fluidos en régimen estático permanente o dinámico. [57]

nsys Discovery

Ansys Discovery facilita la simulación inicial al combinar flujos de trabajo guiados e intuitivos, resultados de simulación precisos y optimización en una herramienta de simulación completa. [58]

Ansys Workbench

Ansys workbench es la plataforma de integración y flujo de trabajo que conecta las otras versiones del software (fluent, mechanical, spaceclaim, etc.). Permite al usuario configurar sus procesos de simulación y optimizar la exploración a través de parámetros. [59]

Ansys space claim

Esta versión se utiliza para realizar bocetos o modelado de geometrías 2D y 3D, incluso se pueden importar geometrías hechas en otras versiones o distintos programas, después de obtener la geometría deseada se vincula con workbench para definir los parámetros que se desean aplicar. [60]

Ansys mechanical

Ansys Mechanical es una plataforma que se utiliza para el análisis estructural basado en elementos finitos, como la simulación de esfuerzos mecánicos, tensión, presión, vibración, etc. [61]

Ansys fluent

Ansys fluent es una plataforma que permite simular y analizar una amplia variedad de fenómenos de fluidos, por ejemplo, presión, velocidad, temperatura, mezcla de flujos, etc. [62]

Comsol

Comsol es un software que permite crear modelos 2D y 3D para la simulación de cualquier fenómeno físico que se pueda describir mediante ecuaciones en derivadas parciales. Soluciona problemas complejos de forma rápida y precisa,

mientras que su intuitiva estructura está diseñada para proporcionar facilidad de uso y flexibilidad. Cuenta con una biblioteca de modelos la cual cuenta con ejemplos de diversas áreas de aplicación. A través de ellos, los usuarios, sin necesidad de tener conocimiento profundo en matemáticas o análisis numérico, pueden realizar sus modelos.

Este software cuenta con una serie de módulos:

1. Módulo de MEMS
2. Módulo de radiofrecuencia RF
3. Módulo CFD (computational fluid dynamics)
4. Módulo de microfluidos
5. Módulo de mecánica estructural

Entre otros módulos como: AC/DC, corrosión, fatiga, electrodeposición, materiales compósitos, acústica, semiconductores, etc. [63]

Solidworks

Solidworks es un programa utilizado para el diseño y modelado en dos y tres dimensiones, este programa le permite al usuario dibujar y modelar geometrías, también permite la unión de una o más piezas. Teniendo el diseño final, se puede extraer de ellos planos técnicos y otro tipo de información necesaria para su producción. La principal característica de solidworks que hace que sea una herramienta versátil, es su compatibilidad con otros programas y que es un programa paramétrico.

Este software está conformado por tres módulos:

- **Pieza:** es el entorno de trabajo donde se pueden diseñar modelos mediante herramientas de diseños intuitivas. Permite crear modelos tridimensionales partiendo de geometrías de croquis bidimensionales y obtener sólidos, superficies, estructuras metálicas, piezas de chapas, piezas multicuerpo, entre otras.

- **Ensamblaje:** Está formado por un entorno de trabajo preparado para crear conjuntos con ensamblajes mediante la inserción de modelos 3D creados en el módulo de piezas. Los ensamblajes se definen por el establecimiento de relaciones geométricas entre las piezas integrantes.
- **Dibujo:** permite obtener proyecciones ortogonales, secciones y cortes, perspectivas, acotaciones, lista de materiales, vistas explosionadas entre otras funciones.

Otra característica del programa Solidworks es que es un sistema conducido por cotas. Se puede especificar las cotas y las relaciones geométricas entre elementos. Al cambiar las cotas, cambian el tamaño y la forma de la pieza, son por ello alterar la intención del diseño. [64]

Catia

Al igual que otros softwares como solidworks, esta herramienta realiza muchas funciones distintas, como volúmenes, formas, masas, ensamblajes etc. Básicamente se utiliza por su sistema ordenado, tecnología de renderizado, bocetos sencillos de elaborar, desarrollo multiplataforma, colaboración activa, cumplimiento del mercado y conocimientos de ingeniería. Se usa más ampliamente en muchas industrias como la automotriz, de defensa, aeroespacial y de equipos industriales. Otra de las funciones de CATIA es que se puede utilizar para la programación de control numérico. Además del diseño de máquinas, también puede diseñar para láminas de metal, materiales compuestos etc. Básicamente para cualquier material o proceso de fabricación disponible. [65]

Autocad

Autocad es un programa de diseño asistido por computadora (CAD) el cual es usado para diseño 2D y 3D. Es uno de los primeros programas que se usaron para realizar estas tareas. La primera versión de este software usaba solo entidades primitivas como polígonos, círculos, líneas, arcos y texto para construir objetos

complejos. La versión moderna del software incluye un conjunto completo de herramientas para modelado sólido y 3D. Este programa también es compatible con numerosas interfaces de programas de aplicaciones para la automatización y la personalización. [66]

2.3. Fabricación de MEMS

La fabricación de MEMS prácticamente hace uso de todos los procesos bien conocidos para la fabricación de circuitos integrados (IC) de las tecnologías VLSI (Very Large Scale Integration) que se usan desde los años 70. Un buen entendimiento de la tecnología MEMS requiere de un maduro conocimiento de los materiales usados para su construcción y de las tecnologías de fabricación. [67]

2.3.1. Procesos aditivos

Son aquellos procesos a los cuales se le añaden materiales a la oblea, ya sea de forma temporal, de sacrificio o definitiva. Algunos de estos procesos son la oxidación térmica, depósito químico de vapor (CVD) *Figura 10*, físico en fase de vapor (PVD) *Figura 11* y la implantación iónica, entre otros. La oxidación térmica se refiere al crecimiento de dióxido de silicio en obleas de silicio, puede ser en ambientes húmedos o secos, se prefiere la oxidación húmeda para óxidos gruesos, sin embargo, este produce mayor número de imperfecciones en la interfaz con silicio y más alta densidad de defectos en el bulbo del óxido, que puede producir corriente de fuga. La oxidación térmica es realizada en hornos a temperaturas que van de 750°C a 1200°C. [68]

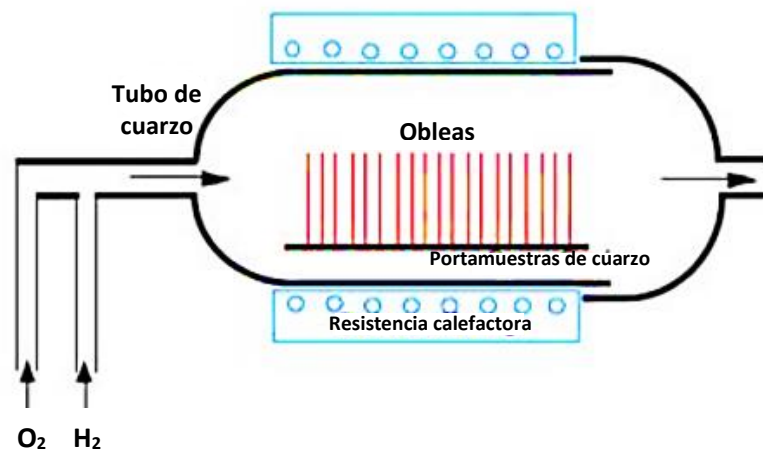


Figura 10 Sistema de deposición química de vapor (PVD) [68].

En un proceso CVD se parte de diferentes gases que al reaccionar entre ellos forman moléculas de la capa que se desea. En un proceso PVD por lo general se parte de un blanco del material que se desea depositar y mediante distintos métodos se consigue evaporar dicho material y depositarlo sobre el sustrato.

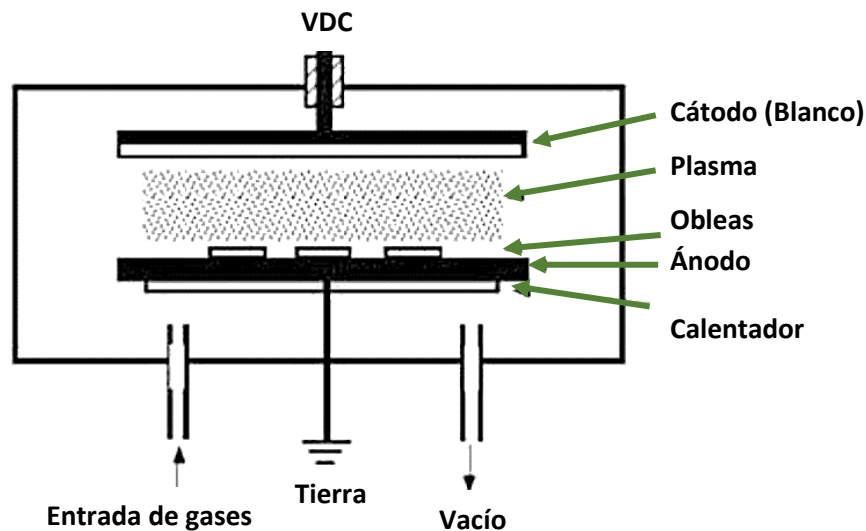


Figura 11 Diagrama de un sistema de sputtering para metalización.

2.3.2. Procesos sustractivos

Los procesos sustractivos son técnicas de micromaquinado que retiran material y estructuras temporales o de sacrificio que han sido depositadas por técnicas aditivas. Algunos ejemplos de procesos de micromaquinado son el ataque químico húmedo y seco (wet/dry etch) y erosión por plasma reactivo.

La técnica de ataque químico húmedo *Figura 12*, se caracteriza por sumergir el sustrato en un químico capaz de disolver materiales específicos que conforman estructuras de sacrificio o temporales provocando un grabado en la superficie del sustrato.

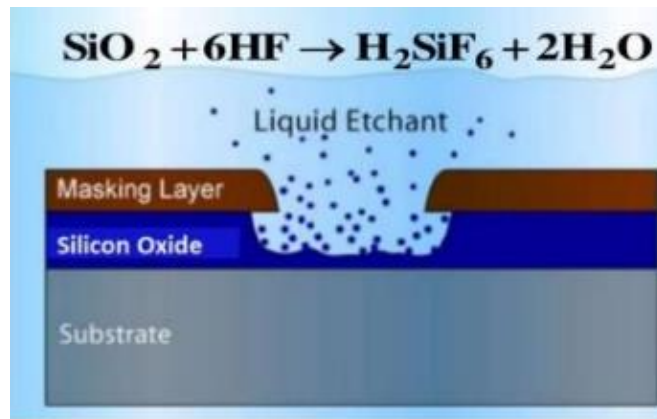


Figura 12 Ataque químico húmedo sobre una película de silicio

Igualmente, el ataque químico seco *Figura 13*, elimina materiales o estructuras de sacrificio dejando un gravado en la superficie, sin embargo, esta técnica emplea iones reactivos para generar dichos patrones. [69]

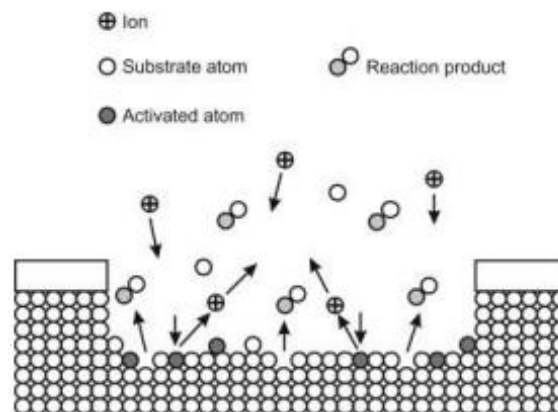


Figura 13 Ataque químico seco, erosión de plasma reactivo.

2.4. Microfluídica

La microfluídica es un campo del conocimiento dedicado a estudiar el comportamiento de los fluidos a microescala, así como los dispositivos que controlan estos flujos. Un fluido es todo cuerpo con la propiedad de fluir, carece de rigidez y elasticidad y puede alterar su forma a cualquier mínimo esfuerzo, estos pueden ser líquidos o gases. En los fluidos líquidos la fuerza intermolecular permite que las partículas se muevan libremente, aunque mantienen enlaces que hacen que las sustancias presenten volumen constante o fijo. [70]

La mecánica de fluidos es la parte de la física que estudia los fluidos en reposo y en movimiento, así como las aplicaciones y mecanismos de ingeniería que utilizan fluidos. Se divide en estática de fluidos que se ocupa de los fluidos en reposo y dinámica de fluidos que se ocupa de los fluidos en movimiento. Se clasifican de dos formas, laminar y turbulento. [71] En el flujo laminar las partículas se desplazan de forma paralela en láminas ordenadas mientras que en el flujo turbulento las partículas siguen movimiento caótico y aleatorio. El número de Reynolds determina la naturaleza del flujo, es decir, si se trata de un flujo laminar o de un flujo turbulento. El número de Reynolds se define como la relación que existe entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas. [72] Como se muestra en la ecuación siguiente.

$$R_e = \frac{\text{Fuerzas Inerciales}}{\text{Fuerzas Viscosas}} = \frac{\rho * D * v}{\mu} = \frac{v * D}{\nu}$$

Donde:

ρ = Densidad del fluido

μ = Viscosidad dinámica del fluido

v = Velocidad del fluido

D = Diámetro interno de la tubería

ν = Viscosidad cinemática del fluido

Ecuación 1 Ecuación que define el comportamiento laminar o turbulento de un fluido a partir de la relación de fuerzas inerciales y viscosas.

3. DETALLES DEL PROCESO DE MODELADO, DISEÑO Y SIMULACIÓN

En este capítulo se describe de forma detallada el proceso de modelado, diseño y simulación de cada uno de los dispositivos realizados y el método utilizado para encontrar la mínima resolución posible de los distintos softwares propuestos. Se detalla también el proceso de mallado, sus restricciones, resoluciones y métodos de eficiencia.

3.1. Materiales y métodos

Se utilizó un equipo de cómputo “work station” con una tarjeta gráfica NVIDIA QUADRO P2200 con 8GB RAM dedicada, 32GB de memoria RAM instalada, procesador Intel Corei7-10700 CPU @ 2.90 GHz.

Como herramientas principales para el desarrollo de estos diseños y sus simulaciones se siguió el proceso mostrado en la *Figura 14*. Se utilizaron programas de diseño asistidos por computadora (CAD), como son el software Ansys Student, Ansys Discovery, el software COMSOL MULTIPHYSICS y SketchUp donde se compararon sus distintas capacidades y funciones.

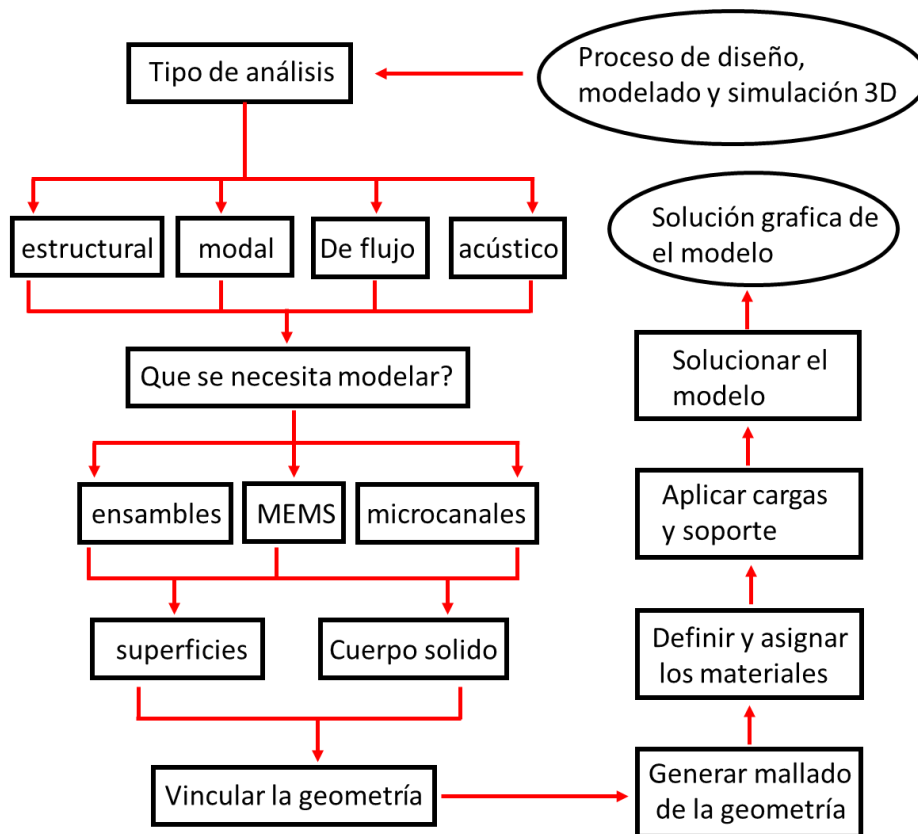


Figura 14 Proceso para el diseño y simulación de una estructura.

3.2. Cantilevers

Los cantilévers mostrados en esta sección fueron modelados en distintas geometrías y materiales tales como: silicio, óxido de silicio, oro, plata, cobre y aluminio bajo las mismas condiciones de estímulos.

Cantiléver tipo viga

Se modeló y simuló un cantiléver monolítico tipo viga con dimensiones milimétricas (15mm x 2mm x 1mm) y *mallado de 250 μm* Figura 15. Se le aplicó un esfuerzo puntual de 7000N sobre un extremo libre del voladizo opuesto al empotramiento. Con esto es posible observar el desplazamiento, determinar la transmisión de fuerzas y detectar las zonas de mayor estrés.

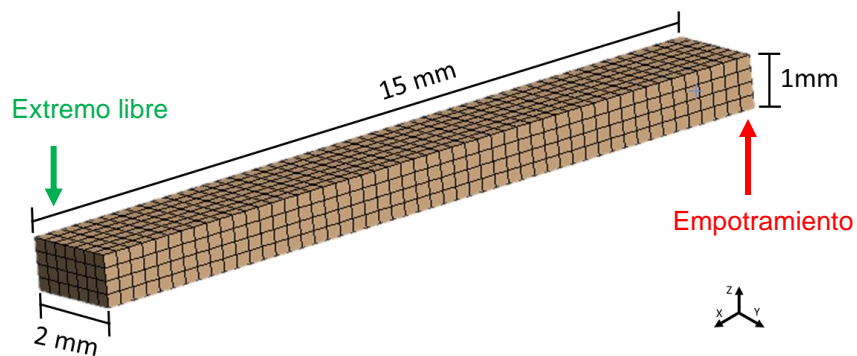


Figura 15 Cantiléver tipo viga de mallado simétrico de 250 μm .

Microcantiléver

Se modeló y simuló un microcantiléver Figura 16, con el propósito de comprender de mejor manera la distribución de los esfuerzos. Se modificaron los puntos clave (key points) de la estructura para reducir su volumen y obtener una sección transversal rectangular. En este diseño se aplicaron 7000N en el extremo contrario del empotramiento con lo que se obtuvo una deformación uniforme con lo que se pudo constatar diferentes zonas de concentración de estrés a lo largo de la estructura voladiza con poca transferencia de estrés en la base de la misma.

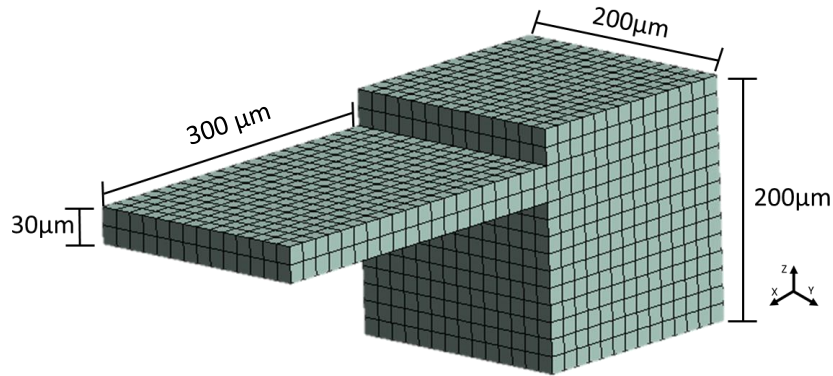


Figura 16 Microcantilever de mallado simétrico de 15 μm .

Cantilévrs para análisis de frecuencias

Se modelaron y simularon tres cantilévrs monolíticos *Figura 17*, rectangular delgado, rectangular y triangular, con el objetivo de comparar resultados utilizando geometrías y materiales diversos. La sección transversal del voladizo fue modificada para tener cantilévrs de distintos espesores (2.3 μm , 23 μm y 70 μm) y para el tercer caso *Figura 17 (c)*, se modificó la sección transversal de manera que se pudiese restringir el desplazamiento.

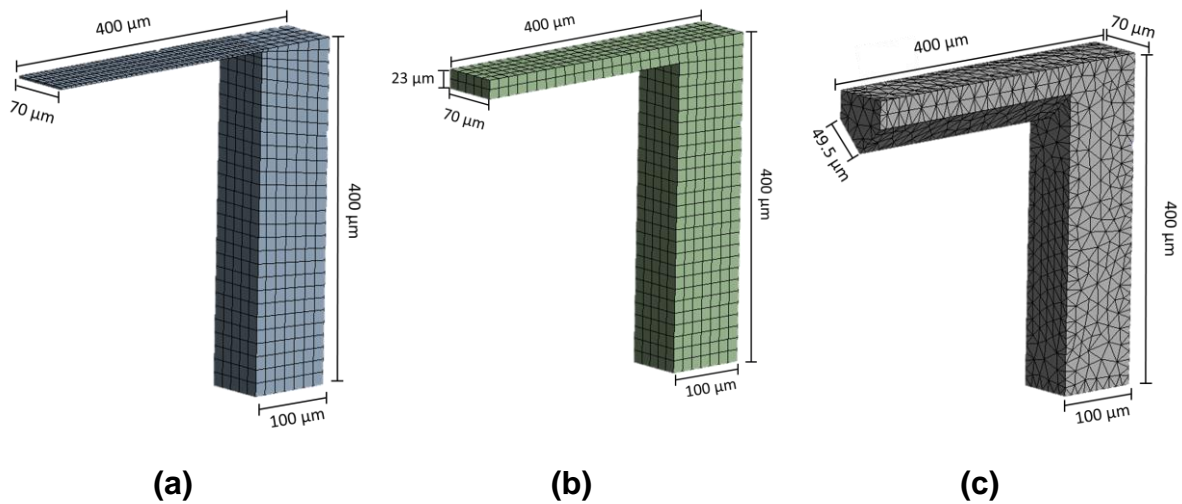


Figura 17 Cantilévr rectangular delgado (a), cantilévr rectangular (b), cantilévr triangular (c).

cantilévers reforzados con fibras

En esta sección se muestran diversas estructuras tipo cantiléver con NF embebidas de carbono, acero y cobre. El objetivo de esto es mejorar las propiedades mecánicas de los cantilévers y modular la frecuencia de resonancia.

Microestructura tipo cantiléver con nanofibras de refuerzo

Se modeló y simuló una estructura tipo cantiléver compuesta de dos materiales. Se definió silicio como material cuerpo y base del cantiléver, a la cual le agregamos grupos de tres NF de carbono, acero y cobre *Figura 19*, para reforzar la estructura. Se modeló la geometría en un plano bidimensional y posteriormente se generó una estructura volumétrica.

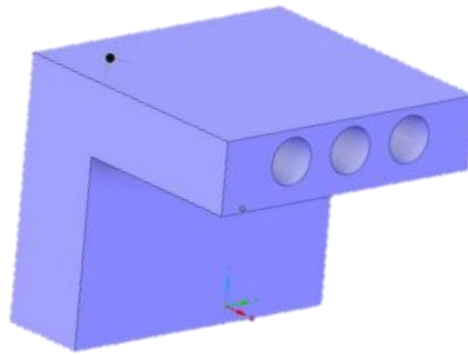


Figura 18 Estructura a base de silicio con cavidades para embeber NF de distintos materiales.

Se modelaron grupos de tres NF de distintos materiales, de medidas $1000 \times 1000 \times 100$ nm los cuales tienen una separación de 50 nm entre cada uno, estas NF se adhieren a la estructura con unión antiderrape. Las fibras fueron sometidas a tensión para posteriormente transmitir un esfuerzo de compresión a toda la estructura. Se aplicó una fuerza de 200, 400 y 600 N como se observar en la *Figura 19*.

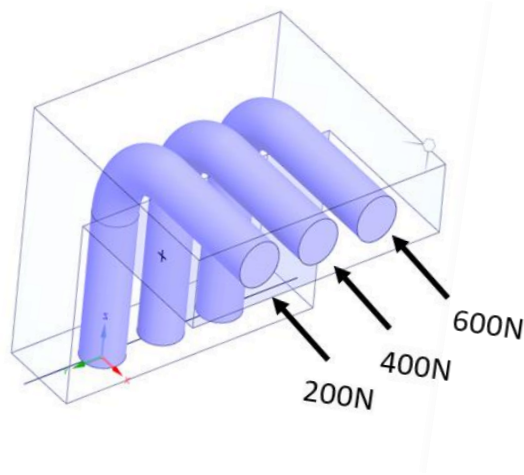


Figura 19 Estructura a base de silicio con cavidades por las cuales pasan los nanotubos de carbono.

Peineta de cinco dedos con refuerzo de NF

Se modeló una estructura tipo peine compuesta de cinco dedos (cantilévers) a base de silicio, dicha estructura esta reforzada con NF como se muestra en la *Figura 20*. Su función es reducir la deformación ante un esfuerzo aplicado y modular la frecuencia natural de cada dedo individualmente. Para realizar el diseño de esta estructura se utilizó el software ANSYS DISCOVERY. Se dibujó la geometría de una NF en un plano de dos dimensiones, posteriormente se formó el volumen de la fibra y replicó cinco veces, se modeló la geometría de la estructura con cinco dedos de distintas longitudes para posteriormente adherir las NF. Se simuló la vibración del sistema aplicando una tensión puntual de 100 N en cada NF como se muestra en la *Figura 20*. Este proceso se replicó en NF de carbono, acero y cobre.

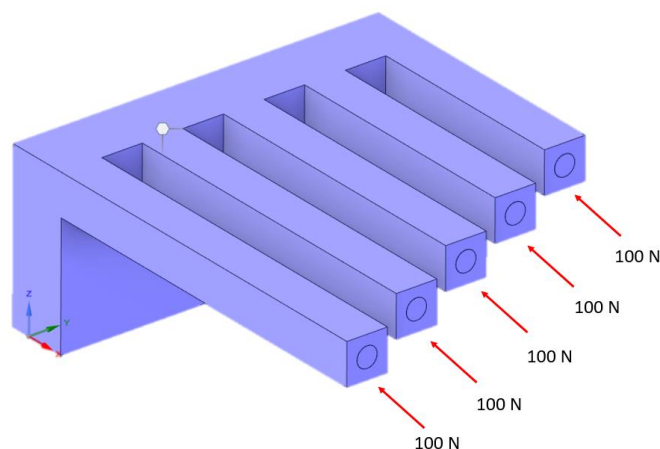


Figura 20 Peineta de 5 dedos de distintas longitudes reforzados individualmente con NF.

Mecanismo flexible con dos grados de libertad (GDL)

Se modeló y simuló un mecanismo flexible con dos GDL *Figura 23*, este mecanismo presenta un movimiento en 2 ejes X, Y. Para el diseño de este dispositivo se tomó como base el diseño del mecanismo flexible que se realizó anteriormente *Figura 21*, el cual tiene un solo GDL. Se le agregó una estructura con 4 articulaciones flexibles las cuales permiten el movimiento en el eje Y. Se dibujó la geometría de la estructura en un plano bidimensional y a partir del plano de se generó la estructura volumétrica.

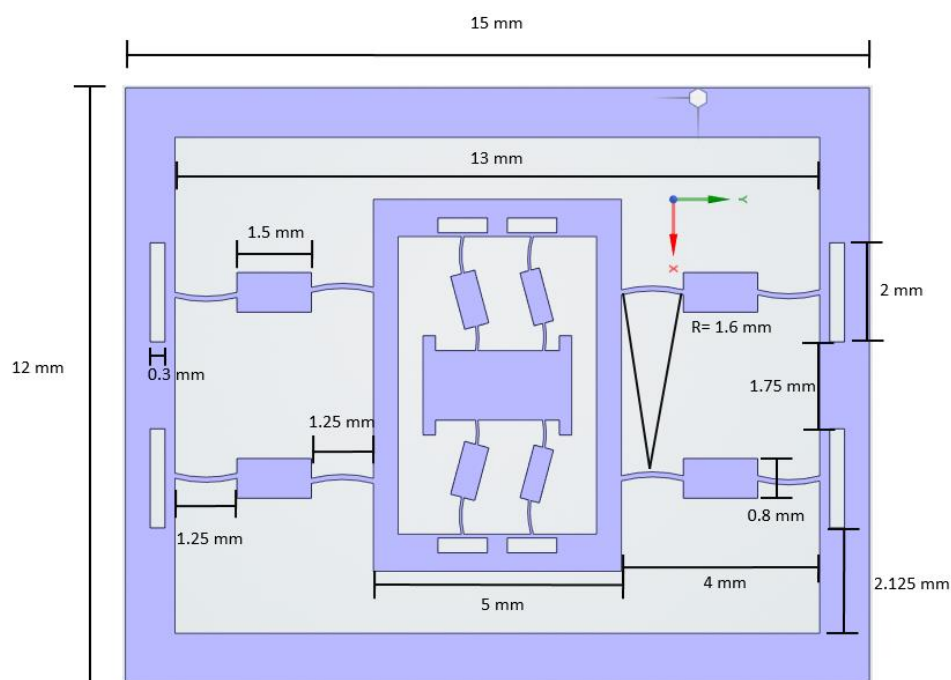


Figura 23 Medidas del Mecanismo flexible con movimiento en 2 ejes.

En la *Figura 24* se comparó el mallado fino (a) y un mallado burdo (b) del dispositivo con el objetivo de comparar resultados y se comprobó que para geometrías complejas o muy pequeñas se requiere de un mallado más fino, esto se puede observar en las membranas que soportan la estructura interna del dispositivo, como se observa en la *Figura 24 (a)* la membrana flexible (círculo rojo) presenta un gradiente de color más amplio mientras que en la *Figura 24 (b)* no se presenta ese gradiente.

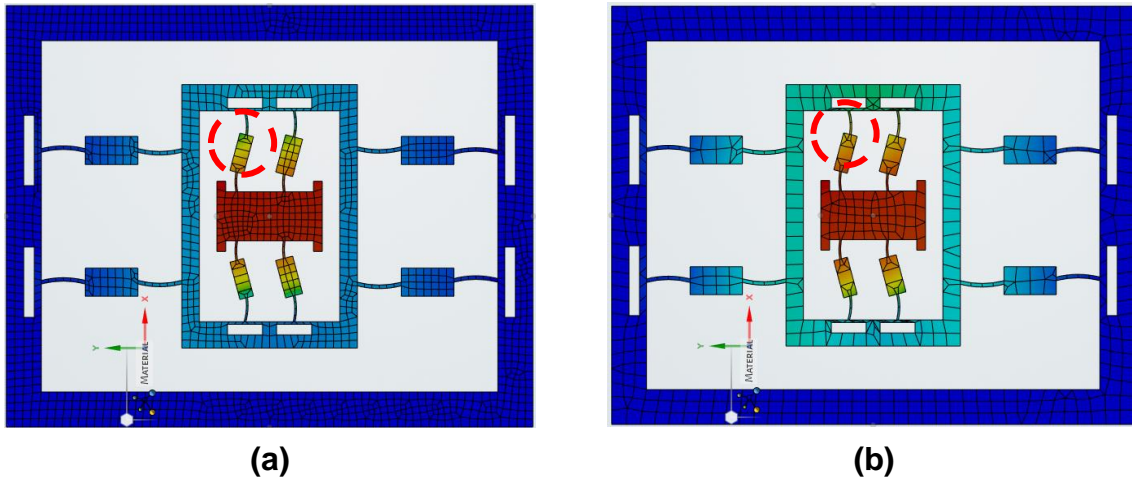


Figura 24 Comparación de un mallado fino (a) y uno medianamente fino (b)

3.4. Dispositivos de microfluidos

En esta sección se incluyen los diseños más destacados en microfluídica, modelos 2D y 3D, así como distintas simulaciones de microcanales y dispositivos.

Microcanales convergentes

Se modeló una estructura básica para fluidos con 3 microcanales de entrada y una salida *Figura 25*, por medio del software ANSYS. Estos microcanales son un diseño básico muy útil en interconexiones para converger o divergir flujos. Se considera dispositivo pasivo ya que no interactúa con el fluido por medio de estímulos físicos o reacciones químicas.

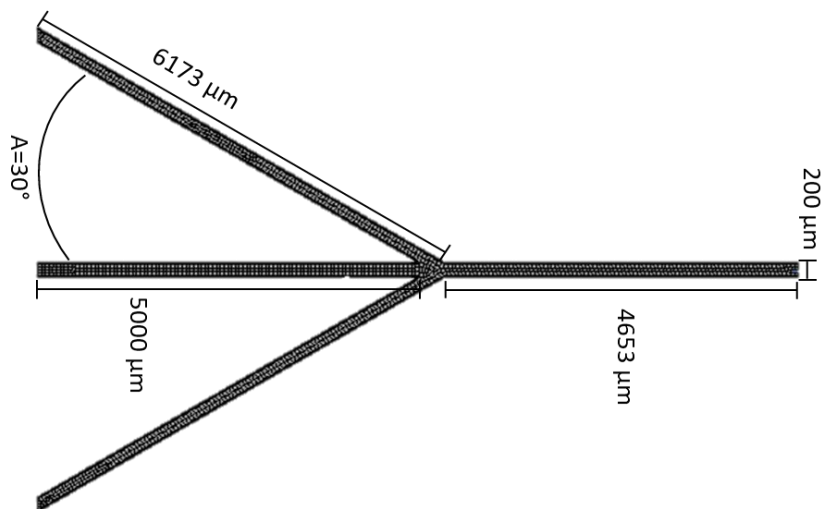


Figura 25 Microcanales de convergencia o divergencia de flujos.

Serpentín mezclador de sustancias

Se modeló un mezclador de microfluidos en forma de serpentín con el objetivo de simular la homogenización de la mezcla de dos fluidos *Figura 26*. Se dibujó la geometría del dispositivo en Ansys Space Claim, después se le aplicó un mallado de 14625 nodos y 13584 elementos. Posteriormente, en Ansys fluent asignamos agua y etanol como fases de la mezcla y una velocidad de flujo de 0.0103 m/s para cada una, y se definieron las entradas y la salida de flujo del dispositivo. En la *Figura 26* se muestra la fracción volumétrica de cada fluido en $t > 0$, donde las zonas rojas representan el etanol (fase 2) y las zonas azules agua (fase 1) y un gradiente de la mezcla entre las interfaces de cada fluido. Este tipo de dispositivos se utilizan en el tratamiento de aguas residuales y procesado químico, también se utilizan en sistemas de microanálisis en monitoreo de parámetros ambientales e industriales.

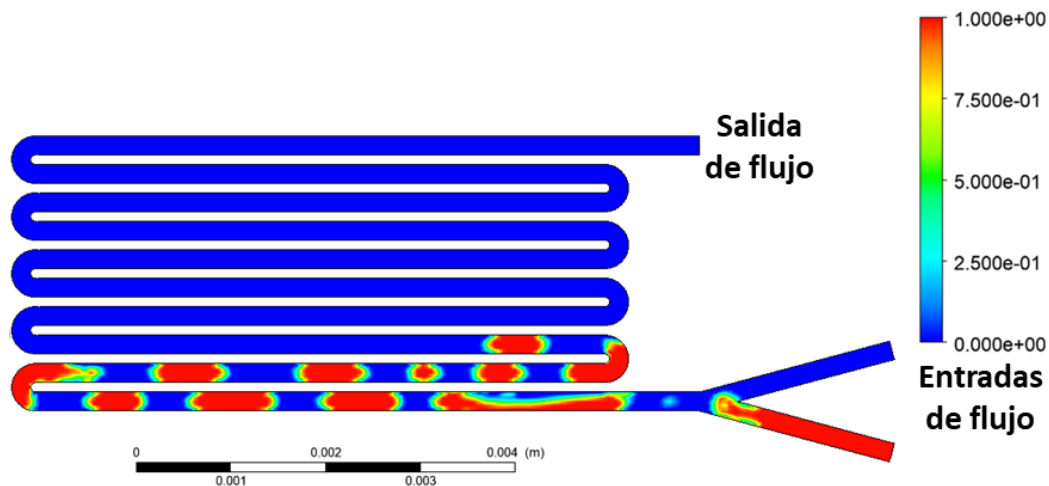


Figura 26 Simulación de fracción volumétrica en serpentín mezclador de flujos.

Serpentín mezclador mejorado con microestructuras internas

Se modificó la geometría original del serpentín *Figura 26* de Agregando microestructuras internas basadas en la *válvula Tesla* invertida. El objetivo de esto es eficientizar la homogenización de la mezcla de dos fluidos. En la *Figura 27* se muestra la fracción volumétrica de agua y etanol en $t > 0$, donde las zonas rojas representan el etanol (fase 2) y las zonas azules agua (fase 1). Comparado con el diseño de la *Figura 26*, el serpentín mejorado mezcla las fases en fracciones más pequeñas.

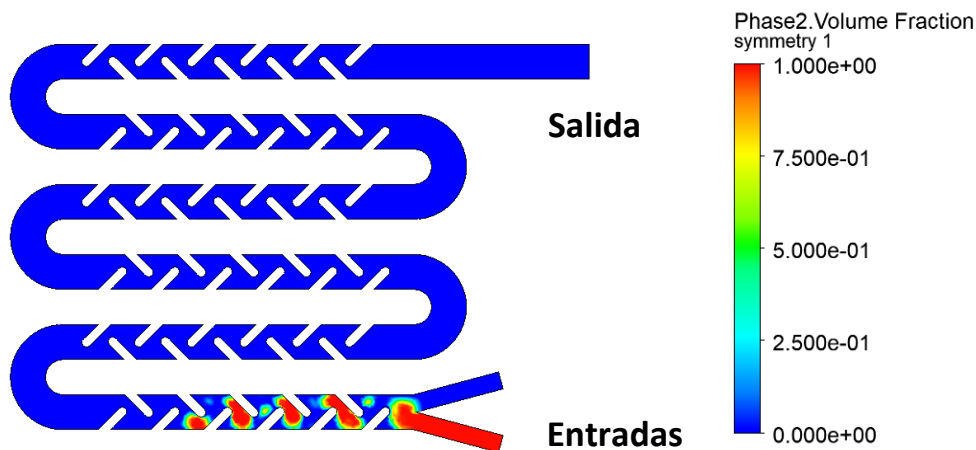


Figura 27 Simulación de fracción volumétrica en serpentín mejorado con estructuras internas para promover la mezcla.

Microespiral Fibonacci

Se modeló un dispositivo de microfluidos en forma de espiral, basado en el espiral de Fibonacci *Figura 28* en el software Ansys Discovery, con entrada y salida únicas. El objetivo del dispositivo es mejorar la resistencia térmica y disipar el calentamiento de un dispositivo en el flujo, se puede utilizar en dispositivos de enfriamiento de procesamiento más pequeños y más rápidos para mejorar la transferencia de calor de los componentes o sistemas. Se modeló la geometría del dispositivo en un plano bidimensional, posteriormente se creó la estructura volumétrica del canal *Figura 28 a*). Se simularon bajo distintas condiciones de presión, velocidad y dirección de flujo *Figura 28 b*).

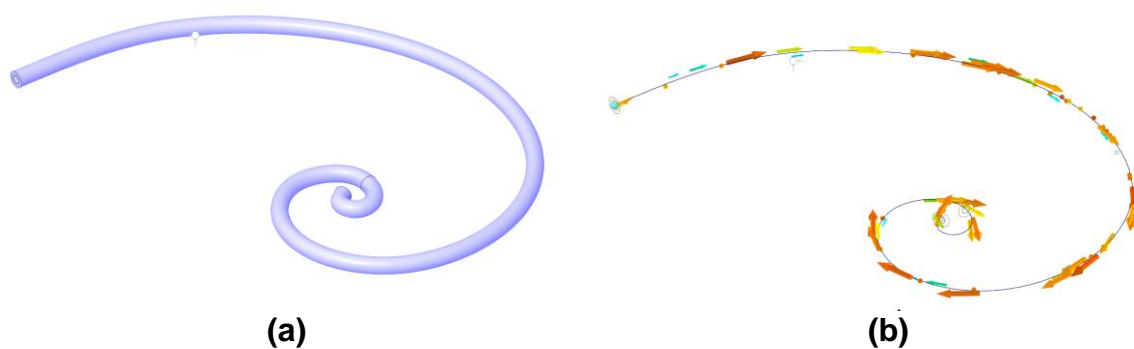


Figura 28 (a) Microcanal en forma de espiral Fibonacci, (b) dirección y velocidad de flujo.

Espiral separadora de partículas

Se modeló un espiral separador de partículas de una entrada y dos salidas *Figura 29*, su función principal es separar partículas o células de un fluido el flujo de

Dean. Se simularon líneas de corriente internas para determinar el carácter laminar o turbulento del flujo, ya que el funcionamiento del dispositivo se fundamenta en el número de Dean derivado de flujos laminares en microcanales curvos.



Figura 29 Vista isométrica de espiral para separar microfluidos

Micro válvula Tesla

Se diseñaron distintas versiones de la *válvula Tesla* a escala micrométrica *Figura 30* y *Figura 31*, estos diseños reducen el flujo en la dirección de bloqueo (entrada - salida) casi hasta cero, mientras que en la dirección opuesta (libre) permite un flujo constante.

Se dibujó la geometría de la estructura en tres dimensiones y se simuló su funcionamiento en dirección de bloqueo y libre (entrada-salida-entrada). La presión de salida se mantuvo constante en ambos casos, esto debido a la posición de las hojas de la válvula que no contribuyen en gran medida al flujo de reversa cuando se utiliza en dirección de bloqueo *Figura 30 (b)*.

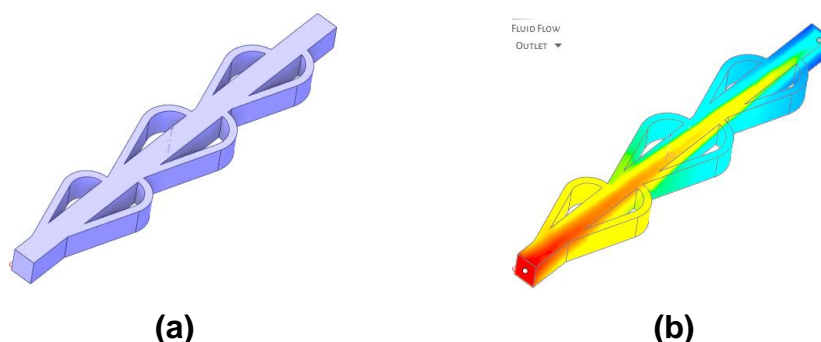


Figura 30 Micro Válvula Tesla. Modelo 3D (a) y simulación de un flujo en dirección de bloqueo.

Para mejorar el modo de bloqueo de la válvula, se modificó el ángulo de entrada y salida de las hojas como se puede observar en la *Figura 31*.

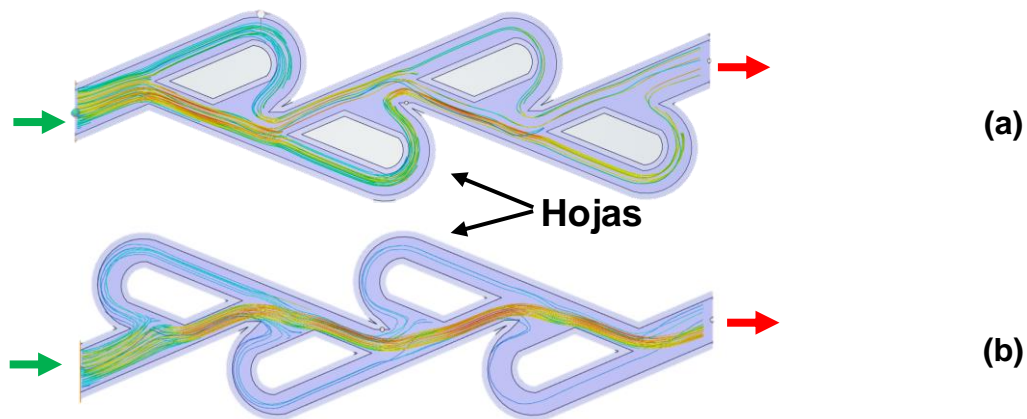


Figura 31 Simulación de líneas de corriente en la válvula de Tesla. El flujo disminuye en modo bloqueo (a), el flujo es constante en modo libre (b).

Válvula de espiral Tesla

Se diseñó un dispositivo de microfluidos que fusiona la geometría de un separador de partículas y una válvula Tesla de una entrada y dos salidas *Figura 32*, su estructura permite un empaquetamiento más eficiente. Su simulación como separador de partículas no fue posible por deficiencias de hardware, pero podría ofrecer ciertas ventajas como mayor sensibilidad en la discriminación de tamaños de partículas o células.

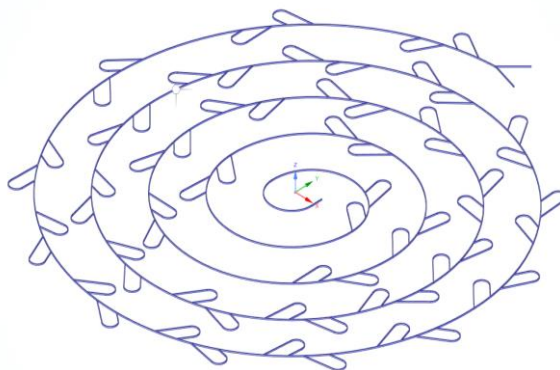


Figura 32 Válvula de espiral Tesla. Funciones de válvula unidireccional y separador de partículas.

Generador de microgotas

Se diseñó y modeló un dispositivo generador de microgotas *Figura 33* en Ansys Space Claim, el dispositivo requiere de 3 canales de entrada y uno de salida. La geometría fue mallada con 4990 nodos y 4764 elementos. Este dispositivo funciona utilizando un flujo de agua que corta un flujo de aceite generando microgotas de este

último. Se estableció la velocidad de flujo de 0.0103 m/s para ambas fases. En la *Figura 33* se muestra la fracción volumétrica de cada fluido en $t > 0$, donde las zonas rojas representan el aceite (fase 2) y las zonas azules agua (fase 1) y un gradiente de la mezcla entre las interfaces de cada fluido donde se pueden observar microgotas de ~ 300 micras de diámetro. Estos dispositivos se utilizan en sistemas de liberación de fármacos (DDS), encapsulación de células, proteínas y nanopartículas no orgánicas.

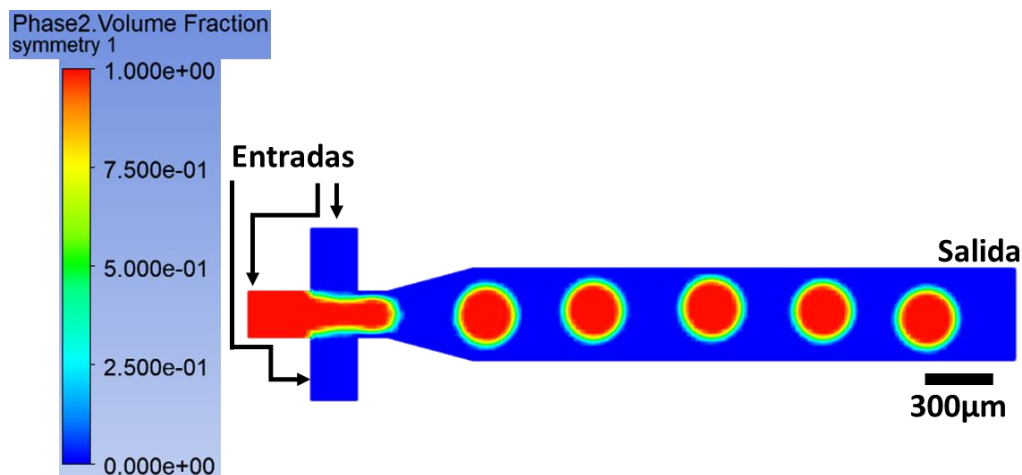


Figura 33 Simulación del funcionamiento de un generador de microgotas de aceite de $\sim 300 \mu\text{m}$ de diámetro, representación de fracción volumétrica.

Dispositivo microamortiguador

Se diseñó un dispositivo de microfluidos milimétrico con microcanales internos utilizando el programa Ansys Discovery *Figura 34*. Su función principal es amortiguar el impacto mediante un fluido de aceite similar al funcionamiento de un amortiguador de auto convencional. Se modelaron sus componentes en geometrías individuales, el vástago y la cámara de trabajo, posteriormente se ensamblaron las piezas.

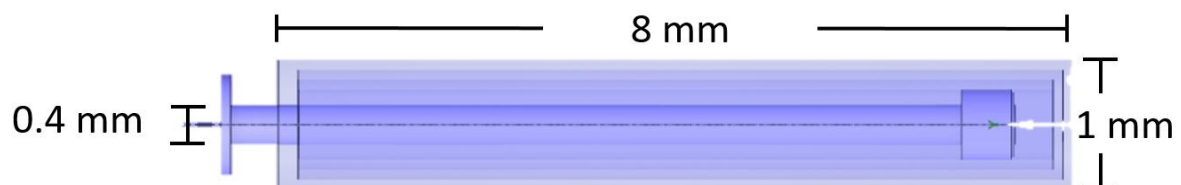


Figura 34 Vista lateral del microamortiguador.

Componentes:

- 1.Vástago
- 2.Cámara de trabajo
- 3.Cámara reguladora
- 4.Embolo
- 5.Articulación de fijación
- 6.Orificios calibrados

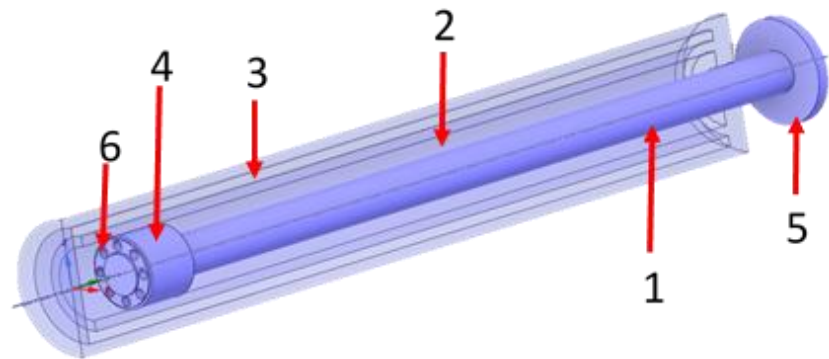


Figura 35 Vista isométrica del microamortiguador con corte transversal.

Se realizó un mallado individual de las piezas *Figura 36*, esto permite ahorrar capacidad de cómputo en piezas que no lo requieren acelerando la resolución del modelo y dando precisión al resultado donde se requiere.

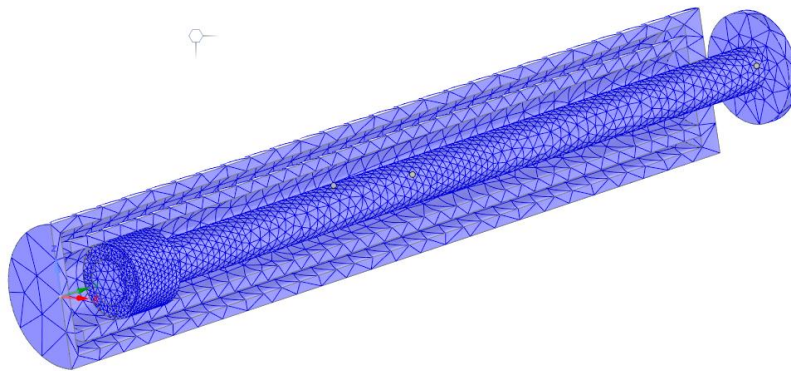


Figura 36 Vista isométrica del microamortiguador con mallado.

Cuando se le aplica una presión a la parte superior del pistón , este se desplaza dentro de la cámara de presión la cual está llena de un fluido viscoso el cual amortigua el esfuerzo y reduce la velocidad del desplazamiento, el fluido es comprimido y pasa por los orificios calibrados que se encuentran en el embolo al mismo tiempo que pasa por la cámara reguladora, cuando el pistón se libera de esta presión, regresa a su posición inicial y el fluido regresa a la cámara de trabajo *Figura 37*.

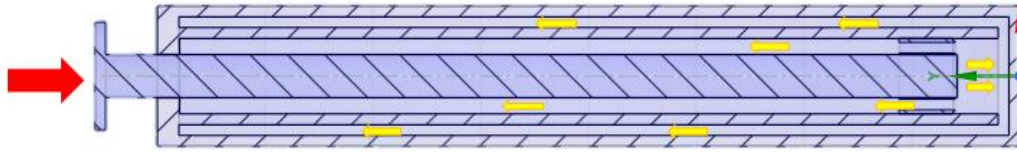


Figura 37 Corte transversal del microamortiguador donde se observa la dirección del flujo viscoso.

Sistemas Microelectromecánicos, MEMS

Cantiléver electrostático

Se modeló un cantiléver actuador y sensor electrostático, para aplicaciones de biodetección de alta deformabilidad mecánica y sensibilidad. El dispositivo propuesto consta de un cuerpo, ancla y voladizo de PDMS, electrodo inferior y superior metálico.

Componentes

1. Capa de cobre
2. Voladizo (PDMS)
3. Base (PDMS)
4. Electrodo superior (cobre)
5. Electrodo inferior (cobre)
6. Capa de PDMS

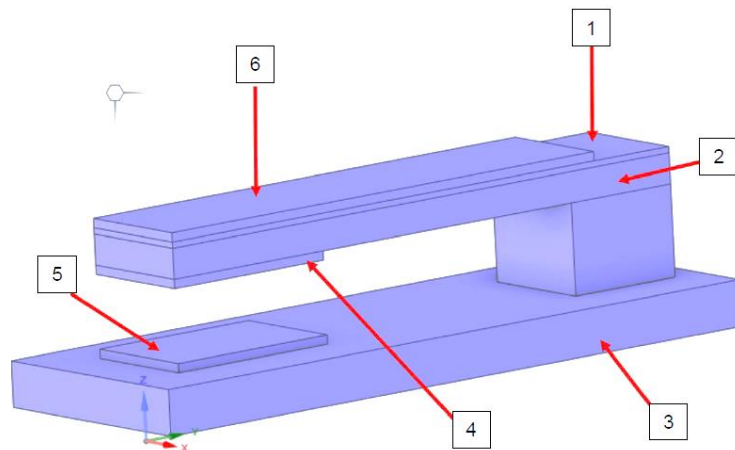


Figura 38 Componentes del actuador electrostático.

Se le aplicó un esfuerzo paralelo al eje de libertad del actuador para detectar las zonas de mayor estrés y posible falla *Figura 39*.

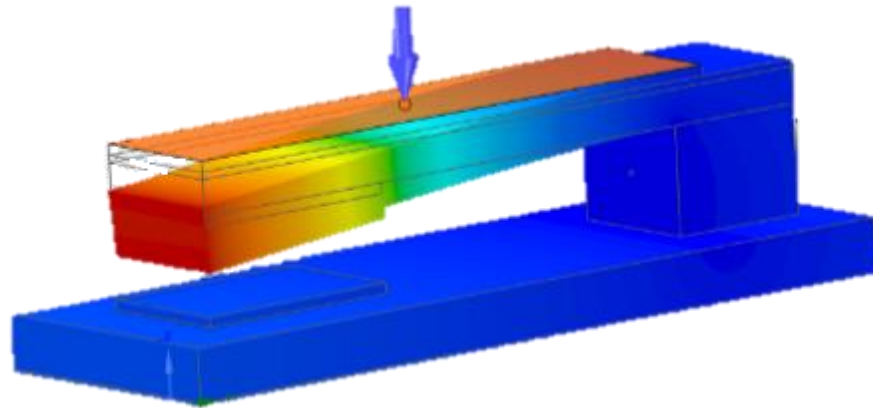


Figura 39 Análisis de desplazamiento y estrés en cantiléver electrostático de PDMS

Acelerómetro

Se diseñó y modeló un dispositivo acelerómetro *Figura 40*, que en esencia es una agrupación de cantilévers que forman peinetas fijas y móviles cuya función es provocar el cambio de la capacitancia derivado del desplazamiento de las peinetas móviles. Este mismo mecanismo puede provocar la deflexión de las peinetas fijas y aprovecharse por medio de materiales piezoeléctricos como el titanato - circonato de plomo ($\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$). Este dispositivo como todos en su clase, pueden ser utilizados como actuadores o sensores bajo el mismo principio de funcionamiento. En la *Figura 40* se puede observar el resultado de desplazamiento y deformación de la simulación del sistema.

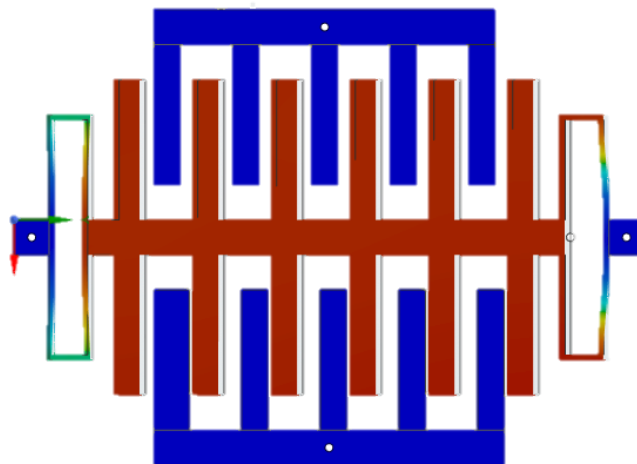


Figura 40 Acelerómetro MEMS, simulación de desplazamiento y deformación.

Giroscopio de silicio

En Ansys Discovery, se diseñó un giroscopio de cuatro GDL longitudinales en los ejes X (sense), Y (drive), ubicados en las peinetas móviles drive (1GDL), peinetas móviles sense (1GDL), masa de prueba (2GDL) en los ejes XY *Figura 41*. Este dispositivo tiene espacios de detección capacitivos mínimos de $2,5\ \mu\text{m}$ y un espesor en su estructura de silicio de $30\ \mu\text{m}$, 3mm de largo y 3mm de ancho. Se determinó la frecuencia natural en sus ejes de libertad por medio de simulaciones modales del sistema.

Componentes

1. Ancla
2. Sense estacionario
3. Masa de prueba
4. Sense movil
5. Drive estacionario
6. Drive movil

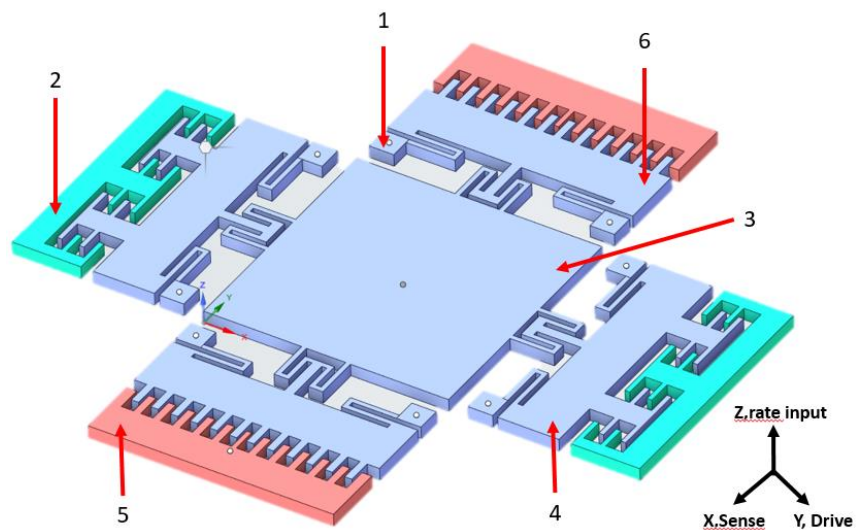


Figura 41 Giroscopio de cuatro grados de libertad y sus componentes.

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Resultados cantilevers

Cantiléver tipo viga

En la *Tabla 9* se muestra los resultados de las frecuencias naturales y su máximo desplazamiento de uno de sus modos de vibración de una viga tipo cantiléver *Figura 42* a base de Si, SiO₂, Au, Ag, Cu, y Al,

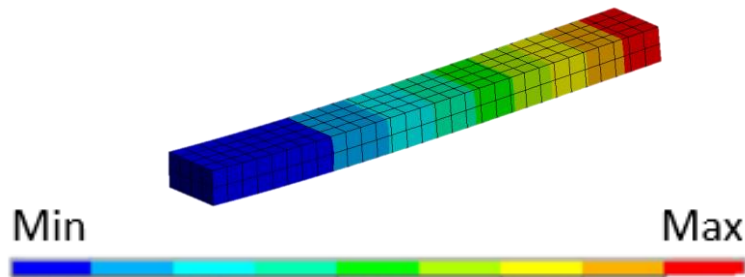


Figura 42 Simulación de viga tipo cantiléver

Tabla 9 Tabla de modos de vibración, frecuencia natural y máximo desplazamiento de una viga tipo cantiléver utilizando Silicio como material principal.

Material de la viga	Frecuencia natural (Hz)	Máximo desplazamiento (μm)
Si	6319.7	239.26
SiO ₂	4163.5	244.98
Au	1483.3	83.266
Ag	1918.9	112.84
Cu	2782.8	122.28
Al	3733.6	238.62

Se simularon 3 cantilevers *Figura 43* y se obtuvieron resultados de distintas frecuencias modificando su voladizo y modificando el material como se observa en la *Tabla 10*, *Tabla 11* y *Tabla 12*.

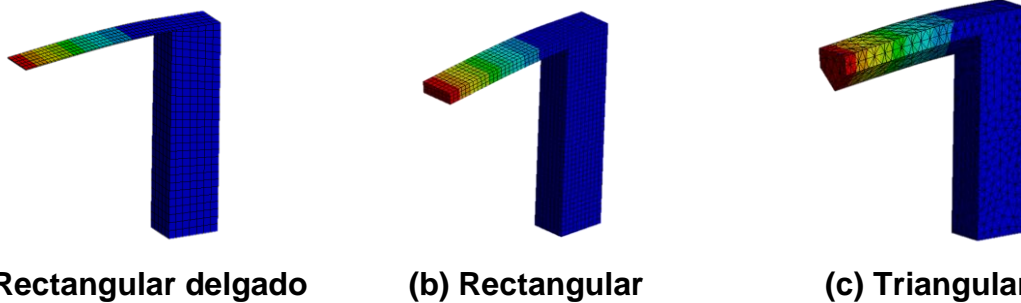


Figura 43 Simulación del funcionamiento de los distintos cantilévver en su modo natural de vibración. Cantilévver rectangular delgado (a), Cantilévver rectangular (b), Cantilévver triangular (c).

Tabla 10 Frecuencia natural y máximo desplazamiento de un cantilévver de voladizo cuadrado

(a) rectangular delgado	Si	SiO ₂	Au	Ag	Cu	Al
Frecuencia natural (Hz)	342100	225100	80602	104160	150870	202470
Máximo desplazamiento (μm)	58756	60148	20463	27727	30037	54756

Tabla 11 Frecuencia natural y máximo desplazamiento de un cantilévver de voladizo rectangular

(b) rectangular delgado	Si	SiO ₂	Au	Ag	Cu	Al
Frecuencia natural (Hz)	36683	24070	8707	11233	16230	21793
Máximo desplazamiento (μm)	1.8896e5	1.9332e5	65915	89277	96667	1.7624e5

Tabla 12 Frecuencia natural y máximo desplazamiento de un cantiléver de voladizo triangular

(b) triangular	Si	SiO2	Au	Ag	Cu	Al
Frecuencia natural (Hz)	799180	526120	188780	243680	352610	473280
Máximo desplazamiento (μm)	38393	39320	13371	18114	19623	35771

Cantiléver con película delgada

Los cantiléver tipo viga fueron agregados con masa en forma de película delgada metálica de 100 y 250 nm. El cantiléver inicial sin película tuvo un grosor de 500 nm para llegar a un grosor total de 750 nm (Figura 44). Esto derivó en el cambio de la frecuencia natural del cantiléver de silicio sin películas metálicas y en la amplitud de desplazamiento como se muestra en la gráfica.

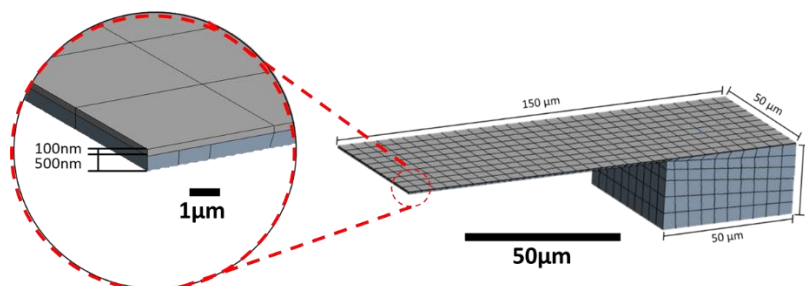


Figura 44 Cantiléver tipo viga adicionado con película delgada metálica de 100 nm.

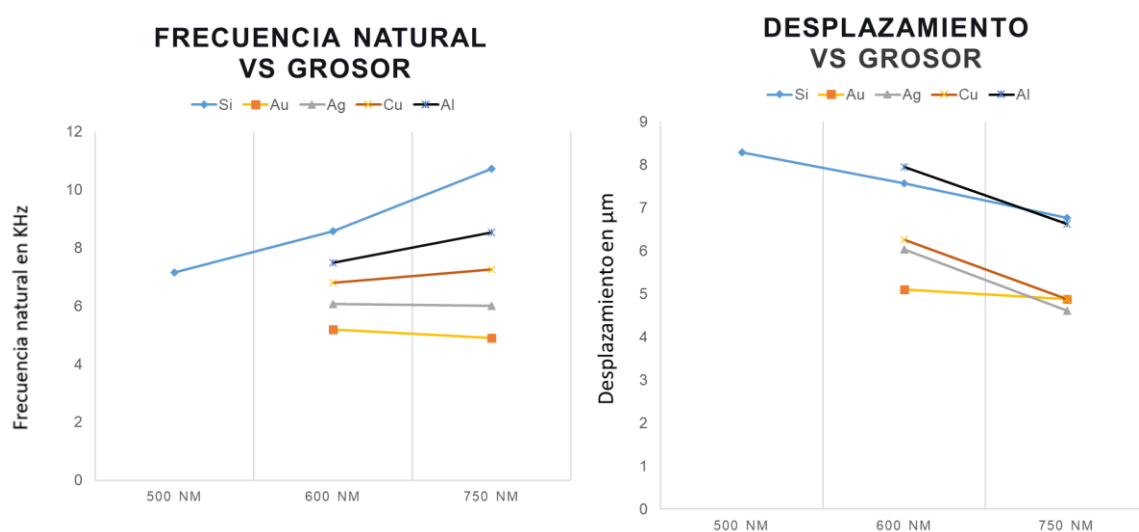


Figura 45 Gráficas de frecuencia natural (a) y desplazamiento (b), en cantiléver de silicio con películas delgadas metálicas de Au, Ag, Cu, y Al.

Cantiléver con NF

Se simuló la estructura *Figura 46* con tres materiales distintos para sus NF. Para la primera simulación se utilizó la estructura de silicio con NF de acero, se les aplicó un esfuerzo de tensión de 200N, 400N, y 600N a cada una de las NF de acero y como resultado se obtuvo un esfuerzo de compresión en el cantiléver con una deformación no uniforme sobre todo el voladizo. Se obtuvo un desplazamiento máximo de $5.9757 \mu\text{m}$ en la zona en color rojo como se observa en la imagen *Figura 24*. A esta estructura de silicio con NF de acero también se le realizó una simulación de su frecuencia natural, y obtuvimos como resultado una frecuencia de 34375 Hz. En la segunda simulación se utilizó la misma estructura, pero ahora con NF de carbono, se obtuvo su frecuencia natural la cual fue de 43764 Hz, en la tercera simulación en la cual se utilizaron NF de cobre y su frecuencia natural fue de 32147 Hz.

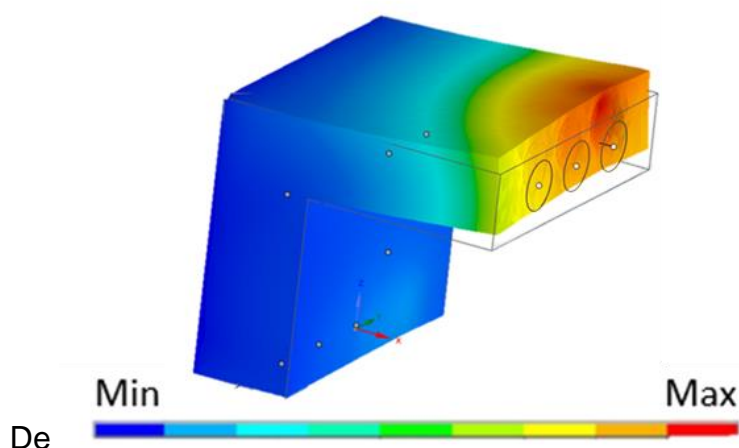


Figura 46 Simulación del desplazamiento del cantiléver derivado de la compresión resultante transmitida por las NF de refuerzo.

Se generó un corte transversal *Figura 47* para apreciar mejor la vista de las NF dentro de la estructura tipo cantiléver para apreciar en cual se genera un mayor esfuerzo de tensión y deformación de la estructura y se observó que en la tercera fibra de izquierda a derecha es donde se genera una mayor tensión. Los resultados de la simulación *Figura 48* nos permiten mejorar la resistencia a la tracción de las micro/nano estructuras de silicio, óxido de silicio y otros materiales y en cierta manera modularlas según aplicación y necesidades. Estructuras como estas son muy

utilizadas en edificaciones de hormigón, donde cables de acero en compresión refuerzan vigas de concreto provocando esfuerzos diseñados para resistir cargas distribuidas homogéneamente.

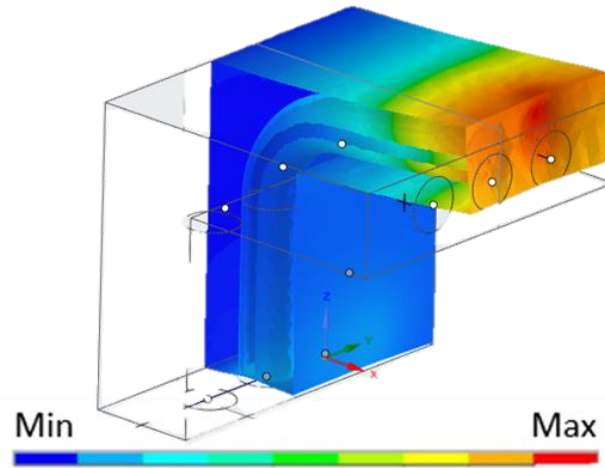


Figura 47 Corte transversal de la estructura. Deformación interna de las NF.

FRECUENCIA NATURAL VS NANOFIBRAS

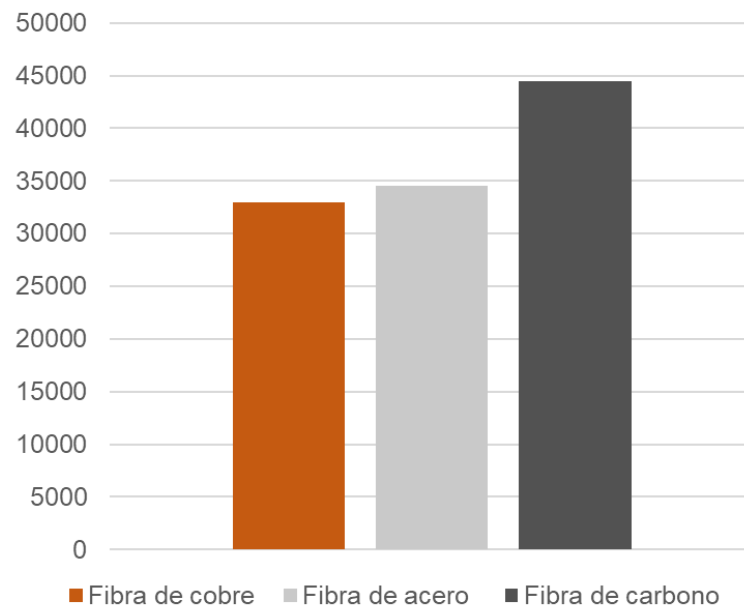


Figura 48 Grafica de la frecuencia natural de los distintos materiales utilizados como fibras de refuerzo para la microestructura.

En la gráfica de la Figura 48 se compara la frecuencia natural de los distintos materiales utilizados como fibras de refuerzo para la microestructura que sirven para aumentar o disminuir su frecuencia natural, se puede observar que la barra color azul

representa las fibras de acero, la naranja las fibras de carbono y la barra en color verde las fibras de cobre, y como hay una diferencia en su frecuencia natural solo modificando el material de las fibras sin necesidad de modificar la geometría de la estructura, se puede observar que utilizando NFC, la estructura alcanza una frecuencia más alta comparada con los otros dos materiales.

Cantilever de cinco dedos con NFC

Se observa que en la simulación la deformación resultante derivado de las distintas fuerzas aplicadas sobre cada NFC y el desplazamiento máximo en la parte de color rojo que fue de $1.7709 \mu\text{m}$ *Figura 49*, también observa una deformación distinta en cada uno de los cantilévers que componen la peinetas, de esta forma podemos manipular la resistencia individual de cada cantiléver y modular su frecuencia natural.

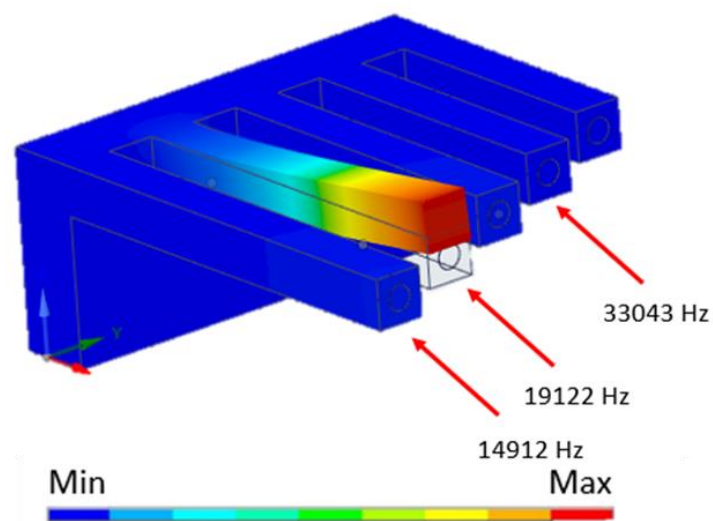


Figura 49 Simulación de la frecuencia natural de los voladizos de la peinetas con NFC de refuerzo.

Tabla 13 Resultados de frecuencias de los cantilévers con distintos tamaños

Cantiléver con fibras	Fibras de carbono (Hz)	Fibras de cobre (Hz)	Fibras de acero (Hz)
9mm	14912 Hz	11648 Hz	12146 Hz
8mm	19122 Hz	14931 Hz	15580 Hz
7mm	24700 Hz	19288 Hz	20129 Hz
6mm	33043 Hz	25809 Hz	26945 Hz
5mm	44813 Hz	35023 Hz	36551 Hz

En las gráficas de la *Figura 50* se muestra una comparación de la frecuencia natural de los cinco cantilévers de distintos tamaños que componen la micropeineta de silicio utilizando diferentes materiales para las fibras de refuerzo que sirve para aumentar o disminuir la frecuencia natural de la estructura. Para poder entender mejor la gráfica se dividió por materiales de las NF, carbono, cobre y acero, se graficó la frecuencia natural de cada uno de los cinco cantilévers de la estructura de cada material, las barras en color verde para el cantiléver de 9mm, naranja para cantiléver de 8mm, roja para el cantiléver de 7mm, amarilla para el cantiléver de 6mm y azul para el cantiléver 5mm. En cuanto a longitud, se puede observar que los cantilévers más largos muestran una frecuencia más baja sin importar el material de la fibra. Por otro lado, los cantilévers con NF más de materiales más duros, muestran frecuencias más altas que sus homólogos de la misma longitud.

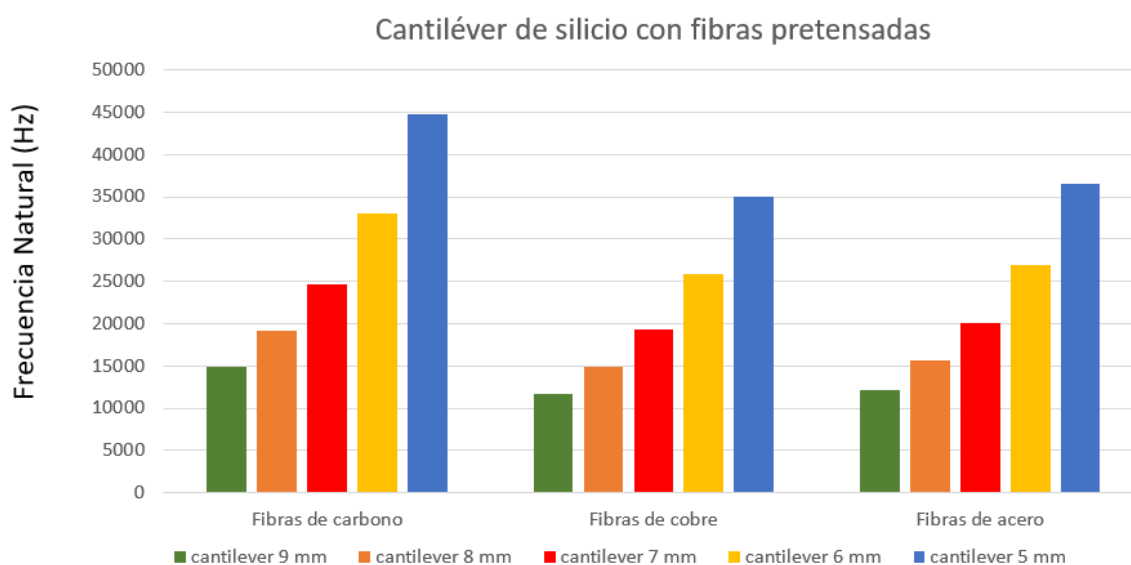


Figura 50 Gráfica de la frecuencia natural de los distintos materiales utilizados para las fibras para el pretensado de la microestructura en cada uno de los cantilévers

4.2. Resultados mecanismos flexibles

Simulación de MF biestable

Se simuló el dispositivo compuesto de dos estructuras *Figura 51* en la cual utilizamos dos materiales distintos para poder comprar resultados de su frecuencia natural, estrés, desplazamiento y deformación. Utilizando silicio para la estructura como primera simulación, aplicando una presión de 500 Pa sobre la estructura interna se obtuvo un desplazamiento de $0.010357\mu\text{m}$ y alcanzando su máximo estrés en las extremidades de las barras flexibles (220730 Pa), también se obtuvo una frecuencia natural de 13785 Hz. Posteriormente se utilizó el PDMS para la estructura, en este caso el desplazamiento fue de $3.5694\text{e}8\ \mu\text{m}$ y el estrés generado sobre las extremidades de sus articulaciones fue de 241370 Pa. También se obtuvo una frecuencia natural de 0111533 Hz. Como se esperaba, el estrés máximo se localizó en la misma zona para ambas estructuras (Si y PDMS). El desplazamiento fue mayor para PDMS ya que es mas flexible, sin embargo, la frecuencia fue mayor para la estructura de Si debido a su dureza.

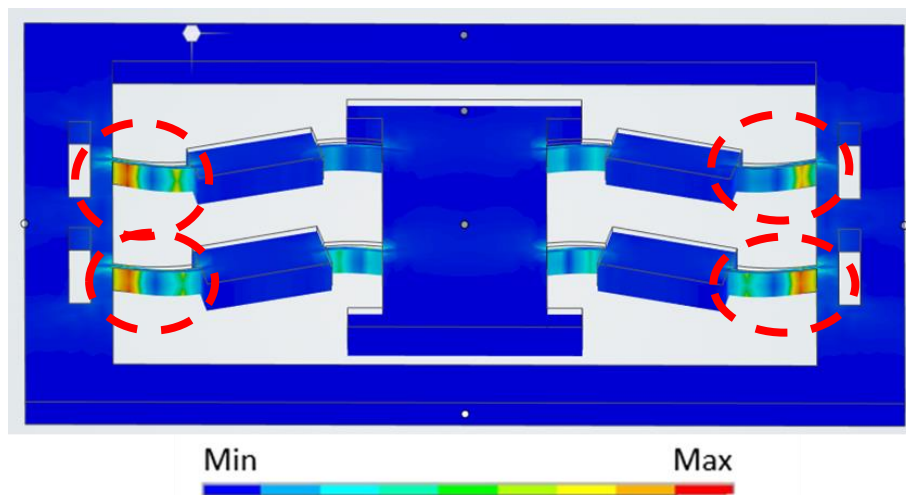


Figura 51 Vista inferior, partes de la estructura donde se genera su máximo estrés marcadas con un círculo punteado color rojo.

Simulación de MF con dos grados de libertad

Se simuló y se aplicó una presión de 500 Pa sobre la estructura interna del dispositivo a base de silicio, esta estructura tuvo un desplazamiento de $0.013439\ \mu\text{m}$

en el eje Y el cual tiene como soporte la estructura exterior, también se obtuvo su máximo estrés (0.14433 MPa) el cual se generó en las extremidades de las cuatro membranas flexibles y que es menor estrés comparado con el modelo anterior como se observa en la *Figura 51*. La frecuencia natural de este dispositivo a base de silicio fue de 2786.9 Hz. Posteriormente se aplicó otra presión de 500 Pa en el eje X de la estructura interna, y se obtuvo un desplazamiento en sus dos GDL (eje X,Y) también se generó una deformación en la estructura donde se unen las barras flexibles *Figura 53 (b)*. Posteriormente se simuló el mismo dispositivo de material PDMS aplicando la misma fuerza de presión (500 Pa) para comparar desplazamiento, estrés, y deformación de la misma estructura utilizando otro material con distintas propiedades, en este caso su desplazamiento fue de 3.5694×10^{-8} μm y un estrés máximo de 0.24137 MPa en las extremidades de sus articulaciones *Figura 54*. De igual manera se simuló su frecuencia natural 0111533 Hz.

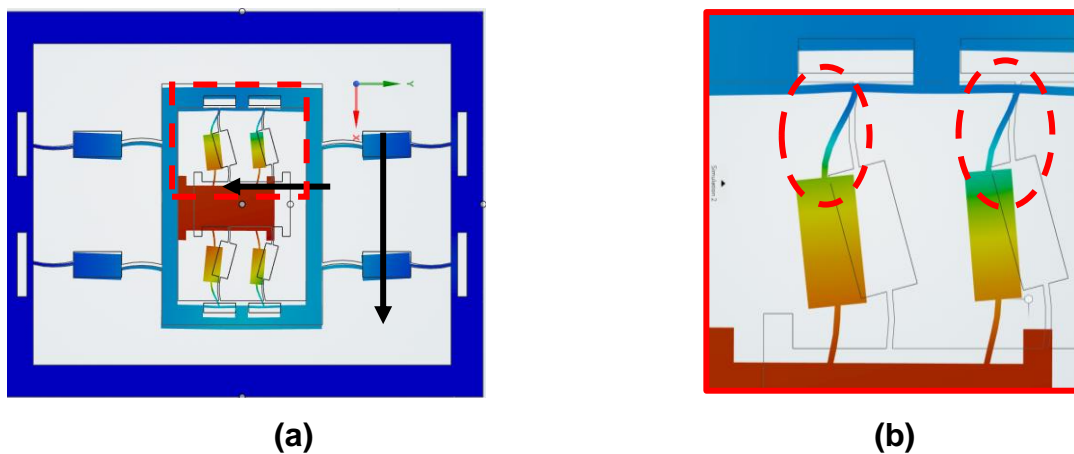


Figura 52 Simulación del desplazamiento en la estructura interna derivado de la presión sobre estructura interna en el eje X (a), deformación de la estructura en las extremidades de las membranas flexibles (b).

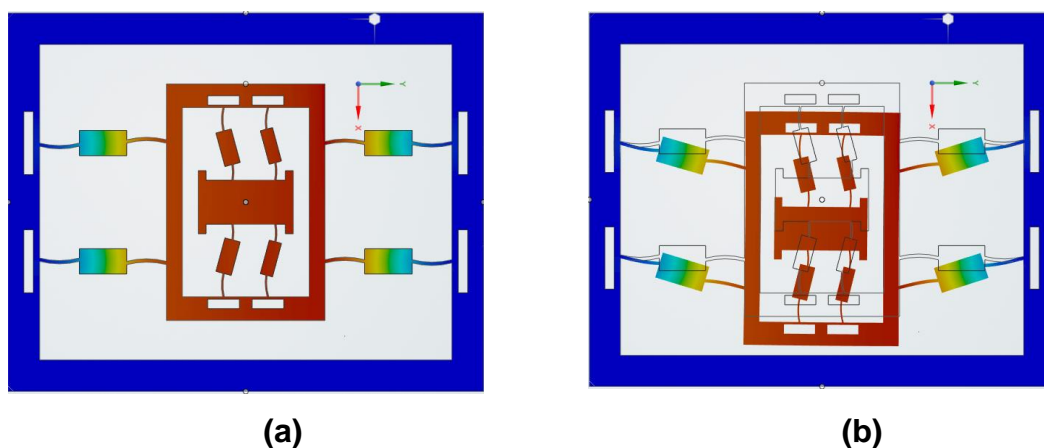


Figura 53 Simulación del desplazamiento de la estructura externa. Posición de equilibrio 1 (a) posición de equilibrio 2 (b).

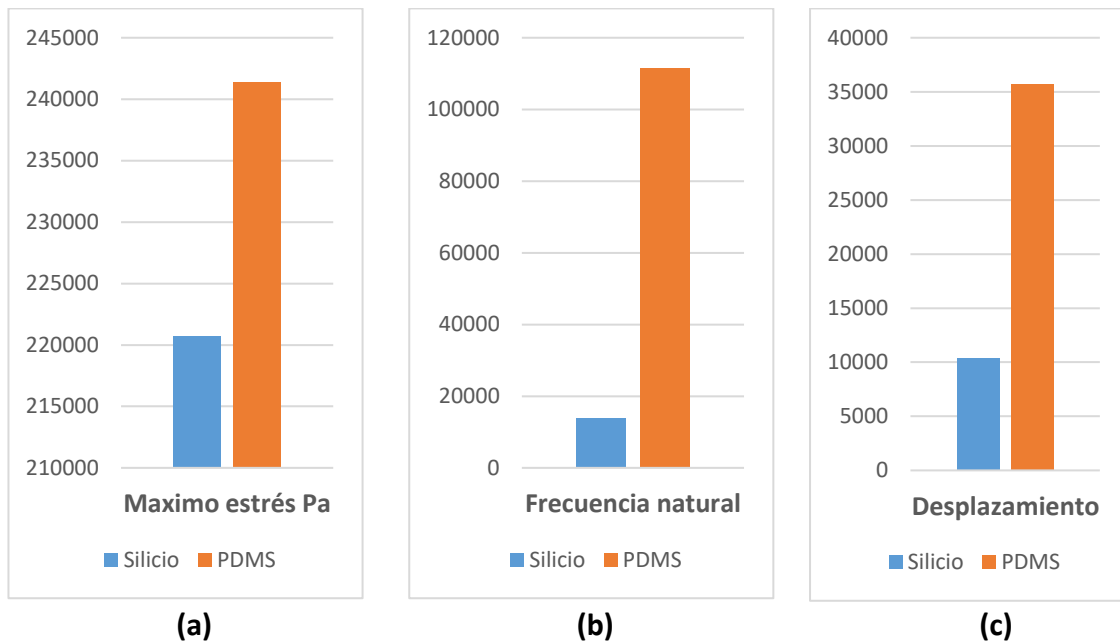


Figura 54 Gráfica de Máximo estrés (a), gráfica de frecuencia natural (b), y gráfica de máximo desplazamiento(c) en estructura MF base silicio y base PDMS

4.3. Resultados microfluídica

Diseños ANSYS

Se diseñaron y simularon microcanales mezcladores de flujos, en ellos se simularon distintas condiciones de uso. Pudiéndose obtener velocidades, presiones, temperaturas, direcciones y fracciones volumétricas. Como se muestra en la *Figura 55*

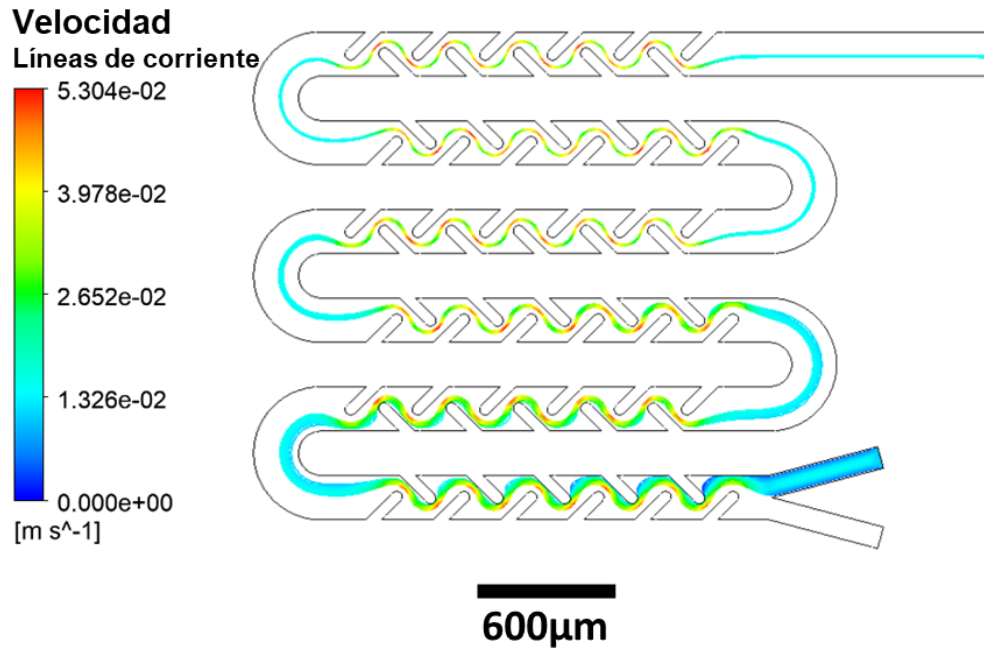


Figura 55 Simulación de flujo en serpentín mezclador donde es posible apreciar la ruta de la corriente y su velocidad en escala colorimétrica.

Se diseñaron y simularon distintos espirales separadores y mezcladores de flujo masi como disipadores de calor. La simulación del funcionamiento de estos dispositivos nos permitió obtener datos relevantes como grado de turbulencia, direcciones de flujo, interacción de dos o más fases, distribución de temperatura y disipación del calor. En la *Figura 56* podemos ver un ejemplo de simulación de un disipador en forma de espiral Fibonacci. Este espiral fue base del diseño de distintos dispositivos para aplicaciones en discriminación por diámetro de células o partículas.

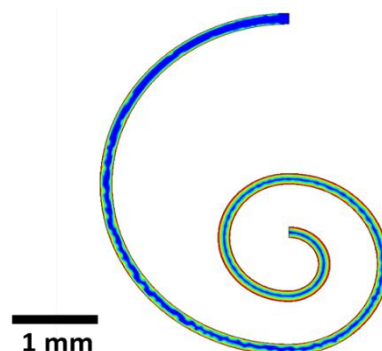


Figura 56 Disipador de calor Fibonacci, y colorimetría de temperatura.

Diseños COMSOL

Se diseñaron, modelaron y simularon distintos dispositivos en el software COMSOL, estos diseños son de relevancia ya que COMSOL es un software

mayormente dedicado a microestructuras. En la *Figura 57* se muestran dos diseños distintos de microbombas piezoeléctricas, de aspas (izquierda) y de película flexible (derecha). Estas simulaciones requieren del módulo multifísica, ya que muestra dirección de flujo, presión, y desplazamiento derivado de estímulos eléctricos en materiales piezoeléctricos.

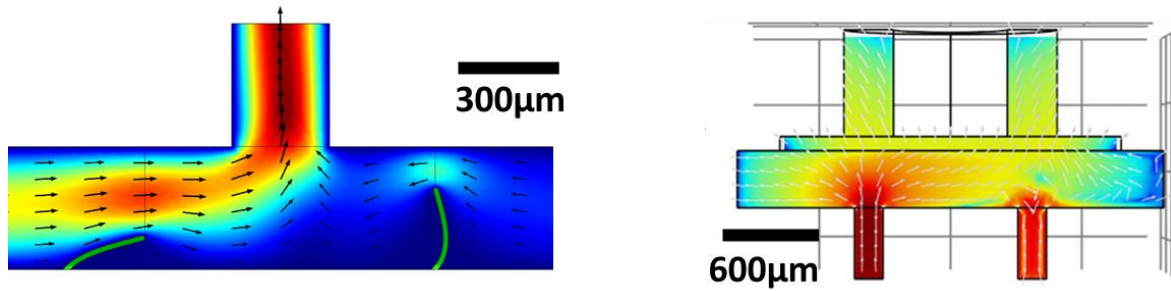


Figura 57 Simulación de flujo en microbombas piezoeléctricas de aspas (izquierda) y de película flexible.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

5.1. Conclusiones

Cantilévers basados en silicio y óxido de silicio mejorados con NFC

- Los cantilévers a base de Si y SiO₂ pueden modular su frecuencia natural dependiendo de la tensión aplicada a las NFC adheridas a la estructura. Existe una relación frecuencia-tensión, a mayor tensión mayor frecuencia.

Películas de oro, plata cobre, aluminio mejoradas con nanofibras de carbono

- Las películas de distintos metales modifican la frecuencia natural de los cantilévers basados en silicio. La masa agregada al cantiléver reduce su frecuencia natural independientemente del metal actuando como amortiguador del sistema.

Cantilévers basados en PDMS mejorados con NFC

- Los cantilévers basados en PDMS muestran una menor frecuencia, pero un mayor desplazamiento al aplicarse un esfuerzo menor comparado con un cantiléver a base de Silicio.

Nanoestructuras de composites de Si, SiO₂, y metálicos mejorados con NFC

- Las nanoestructuras de composites mejoran su responsividad mecánica y aprovechan las propiedades de distintos materiales para modular sus propiedades.

Microcanales en sustratos de Si, SiO₂ y PDMS para aplicaciones en dispositivos de microfluidos

- Los dispositivos de microfluidos basados en Si, SiO₂ y PDMS no muestran gran diferencia en su funcionamiento derivado del material, la principal diferencia radica en su geometría.

Conclusión general

El diseño y la simulación de dispositivos y sistemas, microelectronicos, fluídicos y mecánicos aporta información valiosa para la optimización de procesos de

fabricación. Permite detectar posibles fallas antes y después de la fabricación, mejorar el funcionamiento a partir del diseño y encontrar nuevas aplicaciones.

5.2. Trabajo futuro

- Además de Ansys, la variedad de softwares disponibles en el mercado como COMSOL, Solidworks, Catia, etc. Son herramientas explotables de gran utilidad que vale la pena seguir explorando.
- Trabajar con licencias completas que permitan el diseño y la simulación con todas las herramientas y la física disponible para obtener resultados más fieles.
- Hacer uso de simulaciones multi-física que nos permitan ampliar las aplicaciones de los diseños y refinar los resultados.
- Basado en los diseños, fabricar dispositivos y estudiar sus propiedades para así comparar los resultados simulados.

6.REFERENCIAS

- [1] Gaudó, M. V. (2006). Diseño y fabricación de sistemas micro/nano electromecánicos integrados monolíticamente para aplicaciones de sensores de masa y sensores biológicos con palancas como elementos transductores (Doctoral dissertation, Universitat Autònoma de Barcelona).
- [2] Gad-el-Hak, M. (Ed.). (2005). *MEMS: design and fabrication*. CRC press.
- [3] Janson SW y Helvajian H, 1999, MEMS, Microengineering and Aerospace Systems. AIAA 99-3802
- [4] Bao, M. (2005). *Analysis and design principles of MEMS devices*. Elsevier.
- [5] Shockley, W. (1952). A unipolar" field-effect" transistor. *Proceedings of the IRE*, 40(11), 1365-1376
- [6] Hijiya, J. A. (1992). *Lee de Forest and the Fatherhood of Radio*. Lehigh University Press.
- [7] Böer, K. W. (2014). *Handbook of the physics of thin-film solar cells*. Springer Science & Business.
- [8] Nathanson, H. C., et. al., "The Resonant Gate Transistor," *IEEE Trans. Elec. Dev.*, 14 (3), 117-133, 1967.
- [9] De Los Santos, H.J., *Introduction to Microelectromechanical (MEM) Microwave Systems*, Artech House Microwave Library, Artech House, Boston, MA, 1999.
- [10] Maluf N., Williams K., "An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering", 2nd Edition, 2004, Artech House Inc.
- [11] Ghodssi, R., & Lin, P. (Eds.). (2011). *MEMS materials and processes handbook* (Vol. 1). Springer Science & Business Media.
- [12] Márquez, David, & Cárdenas, Oscar (2006). Estado del arte de los sistemas microelectromecánicos. *Ciencia e Ingeniería*, 27(3),109-117.[fecha de Consulta 14 de Diciembre de 2021]. ISSN: 1316-7081. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=507550779002>
- [13] <https://adciesparquegoya.wordpress.com/2017/12/09/nanociencia/>

- [14] Osiander, R., Darrin, M. A. G., & Champion, J. L. (2018). *MEMS and microstructures in aerospace applications*. CRC press.
- [15] Kim, H., Luo, D., Link, D., Weitz, D. A., Marquez, M., & Cheng, Z. (2007). Controlled production of emulsion drops using an electric field in a flow-focusing microfluidic device. *Applied Physics Letters*, 91(13), 133106.
- [16] Rivas, D. F. (2008). Microfluidos: ¿ cuánto hay de nuevo?. *Revista Cubana de fisica*, 25(2B), 142-149.
- [17] Sui, Y., Teo, C. J., Lee, P. S., Chew, Y. T., & Shu, C. (2010). Fluid flow and heat transfer in wavy microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(13-14), 2760-2772.
- [18] Gou, Y., Chen, G., & Howell, L. L. (2021). A design approach to fully compliant multistable mechanisms employing a single bistable mechanism. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 49(7), 986-1009.
- [19] Sönmez, Ü., & Tutum, C. C. (2008). A compliant bistable mechanism design incorporating elastica buckling beam theory and pseudo-rigid-body model. *Journal of Mechanical Design*, 130(4)
- [20] Fowler, R. M., Howell, L. L., & Magleby, S. P. (2011). Compliant space mechanisms: a new frontier for compliant mechanisms. *Mechanical Sciences*, 2(2), 205-215.
- [21] Xu, Q. (2017). Design of a large-stroke bistable mechanism for the application in constant-force micropositioning stage. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 9(1), 011006.
- [22] Kim, W.-B.; Han, S.-Y. Microinjection Molding of Out-of-Plane Bistable Mechanisms. *Micromachines* **2020**, 11, 155.
- [23] Gabriel K, Jarvis J, Trimmer W (1988). Pequeñas maquinas, grandes oportunidades: un informe sobre el campo emergente de la microdinamica: informe del taller sobre investigación de sistemas microelectromecánicos. Fundación nacional de ciencias. Laboratorios AT&T Bell.
- [24] Dutta, S., & Datta, P. (2010). Silicon—A Versatile Material!
- [25] Fan, L., Yang, D., & Li, D. (2021). A review on metastable silicon allotropes. *Materials*, 14(14), 3964.

- [26] Petersen, K. E. (1982). Silicon as a mechanical material. *Proceedings of the IEEE*, 70(5), 420-457.
- [27] Schneider, F., Draheim, J., Kamberger, R., & Wallrabe, U. (2009). Process and material properties of polydimethylsiloxane (PDMS) for Optical MEMS. *Sensors and Actuators A: Physical*, 151(2), 95-99.
- [28] Lin, L., & Chung, C. K. (2021). PDMS microfabrication and design for microfluidics and sustainable energy application. *Micromachines*, 12(11), 1350
- [29] Nekrashevich, S. S., & Gritsenko, V. A. (2014). Electronic structure of silicon dioxide (a review). *Physics of the Solid State*, 56(2), 207-222.
- [30] Xu, Y., Hu, X., Kundu, S., Nag, A., Afsarimanesh, N., Sapra, S., ... & Han, T. (2019). Silicon-based sensors for biomedical applications: a review. *Sensors*, 19(13), 2908.
- [31] George, M. A., & Glaunsinger, W. S. (1994). The electrical and structural properties of gold films and mercury-covered gold films. *Thin Solid Films*, 245(1-2), 215-224.
- [32] Wang, B., Yin, S., Wang, G., Buldum, A., & Zhao, J. (2001). Novel structures and properties of gold nanowires. *Physical Review Letters*, 86(10), 2046.
- [33] Smith, D. R., & Fickett, F. R. (1995). Low-temperature properties of silver. *Journal of research of the National Institute of Standards and Technology*, 100(2), 119.
- [34] Fuster, G., Tyler, J. M., Brener, N. E., Callaway, J., & Bagayoko, D. (1990). Electronic structure and related properties of silver. *Physical Review B*, 42(12), 7322.
- [35] Rodrigues, M. A., Silva, P. P., & Guerra, W. (2012). Cobre. *Química nova na escola*, 34(3), 161-162.
- [36] Wei, T. R., Qin, Y., Deng, T., Song, Q., Jiang, B., Liu, R., ... & Chen, L. (2019). Copper chalcogenide thermoelectric materials. *Science China Materials*, 62(1), 8-24.]
- [37] Santos, M. C., Machado, A. R., Sales, W. F., Barrozo, M. A., & Ezugwu, E. O. (2016). Machining of aluminum alloys: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 86(9), 3067-3080.
- [38] Mondolfo, L. F. (2013). *Aluminum alloys: structure and properties*. Elsevier.]

- [39] Serna, L., & Albán, F. (2003). Ácido poliláctico (PLA): Propiedades y aplicaciones. *Ingeniería y competitividad*, 5(1), 16-26.
- [40] Hashima, K., Nishitsuji, S., & Inoue, T. (2010). Structure-properties of super-tough PLA alloy with excellent heat resistance. *Polymer*, 51(17), 3934-3939]
- [41] T. Ikeda "fundamentals of piezoelectricity" Oxford university press (1996).
- [42] S.trolier-Mckinstry and M muralt "thin film piezoelectrics for MEMS" journal of electroceramics. (2004) 12 (1-2) pp. 7-17 (11).
- [43] C.giordano et al, "AlN on polysilicon piezoelectric cantilevers for sensors/actuators" microelectronic Engineering (2009) 86 (4-6)pp. 1204-1207.
- [44] Jacquelin, E., Adhikari, S., & Friswell, M. I. (2011). A piezoelectric device for impact energy harvesting. *Smart Materials and Structures*, 20(10), 105008.
- [45] Ediciones G. Gili (1985), S.A. de C.V., Mexico 3ª. Edicion, I.S.B.N. 968-887-027-7, manual de diseño industrial
- [46] Gilbert, J. R. (1998). Integrating CAD tools for MEMS design. *Computer*, 31(4), 99-101.
- [47] Cooper RG (1999). From experience: the invisible success factors in product innovation. *Journal of Product Innovation Management* 16: 115-33.
- [48] Gavin Ambrose, Paul harris (2009). Basics Design 08: Design Thinking. Bloomsbury publishing, ISBN 2940439389, 9782940439386
- [49] Coley F, HousemaN O, Roy R (2007). An introduction to capturing and understanding the cognitive behaviour of design engineers. *Journal of Engineering Design* 18 (8):311-25.
- [50] Pfleeger, S. L. (1995). Experimental design and analysis in software engineering. *Annals of Software Engineering*, 1(1), 219-253.
- [51] Niranjana, A., & Gupta, P. (2020). Modeling and simulation software in mems design. *International journal of engineering and advanced technology*, 9(3).

- [52] Simionescu P. A., Taylor & Francis Limited, (2019). Computer-aided graphing and simulation tools for AutoCAD.
- [53] Bathe, K. J. (2007). Finite element method. *Wiley encyclopedia of computer science and engineering*, 1-12.
- [54] Massa, J., Giró, J., & Giudici, A. (2015). Compendio de cálculo estructural II. *FCEFYN-UNC. Academia*, 371-399.
- [55] Dhatt, G., Lefrançois, E., & Touzot, G. (2012). *Finite element method*. John Wiley & Sons.
- [56] Leu, M. C., ElMaraghy, H. A., Nee, A. Y., Ong, S. K., Lanzetta, M., Putz, M., ... & Bernard, A. (2013). CAD model based virtual assembly simulation, planning and training. *CIRP Annals*, 62(2), 799-822.
- [57] <https://www.ansys.com>
- [58] <https://www.ansys.com/products/3d-design/ansys-discovery>
- [59] Lawrence L. K., SDC publication (2010), ANSYS Workbench tutorial: structural & thermal Analysis using the ANSYS Workbench Release 12.1 Environment.
- [60] Lee H-H., SDC publications, (2018). Finite Element Simulations with ANSYS workbench 19.
- [61] Thompson M. K., Thompson J. M., Butterworth-heinemann, (2017). ANSYS mechanical APDL for finite element analysis.
- [62] Matsson J., SDC Publications, (2019). An introduction to ANSYS fluent 2019
- [63] William B J Zimmerman (2006), World scientific Publishing Company, Multiphysics Modeling with finite element methods.
- [64] Kurowski M. P., SDC publications, (2010). Engineering Analysis with Solidworks Simulation 2010.
- [65] Koh J., onsia (2017), CATIA V5 Design fundamentals.
- [66] Fane B., John wiley & sons, (2019), autocad for dummies.

- [67] Gad-el-Hak, M. (Ed.). (2005). *MEMS: design and fabrication*. CRC press.
- [68] T. Leondes C., Springer Science & business Media,(2007), Mems/Nems handbook techniques and applications design Methods
- [69] Proulx T., Springer science & business media, (2011). MEMS and Nanotechnology, volumen 2: proceedings of the 2010 annual conference on experimental and applied mechanics.
- [70] G.U.N.T. (07 de 2005). Gunt hamburg. Recuperado el 7 de 10 de 2015, de Equipos para la educacion en ingenieria: http://www.gunt.de/static/s3410_3.php
- [71] Brunton, S. L., Noack, B. R., & Koumoutsakos, P. (2020). Machine learning for fluid mechanics. *Annual review of fluid mechanics*, 52, 477-508
- [72] REYNOLDS, N. Y. (09 de 2006). Fluidos.eia. Recuperado el 7 de 10 de 2015, de Fluidos.eia:
<http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/conceptosbasicosmfluidos/reynolds/numero.html>