

UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**EVALUACIÓN DE MICROVIGAS PARA EL SENSADO
DE GASES**

**Trabajo de Ascenso presentado para optar a la categoría de
Profesor Asociado**

Elaborado por:

Luis Waldo Escalona Galvis.

C.I. 14.393.871

Naguanagua, 01 de Agosto de 2014.

Resumen

Este trabajo presenta el diseño y desarrollo de microvigas en voladizo, con la finalidad de estudiar su comportamiento para su futura aplicación en el sensado de gases. Para ello, se analiza el caso de la flexión de microvigas por efecto de un campo eléctrico resultante de la diferencia de potencial entre la viga y un electrodo paralelo a ella de longitud menor que la primera. Para ello, se lleva a cabo el análisis de elementos finitos (FEM) de modelos de viga-electrodo, considerando 4 longitudes comerciales de microvigas y 4 diferentes longitudes de electrodos. En consecuencia, se realizan análisis estáticos (con y sin recubrimiento sobre la viga), de respuesta transitoria y de las frecuencias propias. Seguidamente, se describen 3 ensayos experimentales llevados a cabo sobre las microestructuras basadas en los modelos ya mencionados: en el primero se analiza la ruptura dieléctrica en aire a pequeñas separaciones entre electrodos de silicio sometidos a una diferencia de potencial variable, luego se obtiene la flexión en función del potencial aplicado para las combinaciones de viga-electrodo y finalmente se determina el factor de calidad para la primera frecuencia natural en dos longitudes de vigas, al ser accionadas mediante diferentes longitudes de electrodos, en todos los casos, sin recubrimiento. Los resultados del ensayo de potencial de ruptura llevan al establecimiento de 200 V como el límite superior de actuación de las microvigas. El análisis estático (FEM) presenta aproximación a los resultados experimentales válido para estimación cualitativa. Los factores de calidad determinados de las simulaciones difieren de los valores experimentales, evidenciando en todo caso una respuesta subamortiguada. Asimismo, los resultados muestran que cuando el electrodo no recubre toda la longitud de la microviga, es posible lograr desplazamientos en su extremo libre superiores a $1/3$ de la separación inicial viga-electrodo, sin que ocurra el contacto viga-electrodo. Por lo tanto, la flexión apalancada ampliará el rango de desplazamiento del extremo libre de la viga y permitirá accionarla a frecuencias cercanas a la de resonancia con cierto efecto sobre esta última.

Índice General

Introducción	1
Capítulo I. El problema	3
Objetivo general	6
Objetivos específicos	6
Justificación	7
Alcance	7
Limitaciones	8
Capítulo II. Aspectos teóricos	9
Electromecánica de Microestructuras	9
Análisis Electromecánico	11
Balance de energía en sistemas electromecánicos	13
Enfoque Lagrangiano y sus variantes en la Electromecánica	15
Electromecánica para el enfoque del condensador de placas paralelas	16
Electromecánica y extensión en el rango de movimiento	18
Electromecánica de vigas y placas	19
Flexión por apalancamiento	22
Consideraciones en la electromecánica. Descarga eléctrica	22
Amortiguación por compresión de película (Squeeze film damping) en MEMS (Sistemas Microelectromecánicos por Microelectromechanical Systems)	28
Capítulo III. Estructura del trabajo de investigación	35
Fase 1: Revisión bibliográfica	35
Fase 2: Revisión y estudio de herramientas de simulación	36
Fase 3: Desarrollo de modelos para el análisis de elementos finitos	36
Fase 4: Ejecución de las simulaciones mediante el MEF	36
Fase 5: Comparación de resultados y establecimiento de lineamientos futuros	37

Capítulo IV. Desarrollo del trabajo de investigación	38
Aspectos preliminares de diseño	38
Restricciones adicionales	52
Capítulo V. Planteamiento de modelos en elementos finitos	59
Capítulo VI. Resultados del análisis mediante elementos finitos	78
Análisis paramétrico estático de la interacción microviga-electrodo	79
Análisis de los modos de oscilación de las vigas a ensayar	85
Análisis de la respuesta transitoria en las vigas	89
Capítulo VII. Desarrollo experimental	97
Desarrollo de las pruebas experimentales para medición de flexión	97
Desarrollo de las pruebas experimentales para medición de potencial de ruptura	106
Capítulo VIII. Análisis de los resultados	123
Aspectos a tomar en cuenta para el sensado de gases	132
Conclusiones	147
Referencias	150

Índice de figuras

Figura 2.1. Curva característica de histéresis electromecánica que muestra los potenciales donde ocurre inestabilidad (pull-in), el contacto y la liberación entre los electrodos.	12
Figura 2.2. Curva de esfuerzo y desplazamiento que muestra la relación entre energía y coenergía.	14
Figura 2.3. Modelo electromecánico de elementos concentrados para el condensador de placas paralelas.	16
Figura 2.4. Ilustración del concepto de apalancamiento por flexión para incrementar el rango de movimiento estable.	22
Figura 2.5. Amortiguación por película comprimida (a) vista de sección transversal; (b) la presión de amortiguación	32
Figura 4.1. Accionamiento electrostático de una microviga en voladizo.	42
Figura 4.2. Niveles de diseño considerados en el diseño de un sistema microelectromecánico.	43
Figura 4.3. Viga en voladizo. (a) Con carga intermedia aplicada (b) con carga parcialmente distribuida	44
Figura 4.4. Esquemas utilizados para el accionamiento de vigas empotradas. (a) Con carga intermedia concentrada (b) con carga parcialmente distribuida	45
Figura 4.5. Accionamiento electrostático para el caso estudiado	48
Figura 4.6. Accionamiento electrostático con un electrodo. (a) Para la separación inicial (b) con separación reducida debida a la deflexión	48
Figura 4.7. Esquema resumido del proceso Pianoforte. Una oblea adecuada es seleccionada y cubierta con fotorresistencia. En la fotorresistencia se establecen los patrones con los diseños de cada	53

muestra para que actúe como máscara de grabado (A). Se transfiere el patrón de la máscara de grabado al silicio mediante DRIE (B), seguido por la remoción de la fotorresistencia (C). Se deposita una capa protectora gruesa de fotorresistencia encima de los dispositivos (resultantes)(D), para luego realizar el corte en cubos. Se remueve la fotorresistencia y las estructuras son liberadas de la capa de óxido mediante técnicas de grabado por vapor de HF (E).

Figura 4.8. Oblea empleada en Pianoforte y dimensiones de la viga de acuerdo con el proceso de fabricación 55

Figura 4.9. Diseño de máscaras para accionamiento de microvigas 57

Figura 4.10. Aspecto final de las máscaras para accionamiento de microvigas 58

Figura 4.11. Máscaras para determinación de potencial de ruptura 58

Figura 5.1. Generalidad del caso analizado. (V_i es el potencial eléctrico aplicado) 61

Figura 5.2. Geometría para los modelos. (a) En 2D. (b) En 3D 65

Figura 5.3. Distribución de los contornos para la geometría en 2D 66

Figura 6.1. Desplazamiento del extremo libre de la viga de $125\mu\text{m}$ en función del potencial aplicado mediante los electrodos de cuatro longitudes diferentes. 81

Figura 6.2. Desplazamiento del extremo libre de la viga de $225\mu\text{m}$ en función del potencial aplicado mediante los electrodos de cuatro longitudes diferentes. 81

Figura 6.3. Desplazamiento del extremo libre de la viga de $325\mu\text{m}$ en función del potencial aplicado mediante los electrodos de cuatro longitudes diferentes. 82

Figura 6.4. Desplazamiento del extremo libre de la viga de $450\mu\text{m}$ en 82

función del potencial aplicado mediante los electrodos de cuatro longitudes diferentes.

Figura 6.5. Potencial de pull-in en relación a la longitud del electrodo de accionamiento para las longitudes de vigas de 125 μ m, 225 μ m, 325 μ m y 450 μ m. 84

Figura 6.6. Máximo recorrido de la viga en la sección cubierta por el electrodo. Para las longitudes de vigas de 125 μ m, 225 μ m, 325 μ m y 450 μ m. 84

Figura 6.7. Los cuatro primeros modos de oscilación obtenidos para la viga de longitud 125 μ m 87

Figura 6.8. Los cuatro primeros modos de oscilación obtenidos para la viga de longitud 225 μ m 88

Figura 6.9. Los cuatro primeros modos de oscilación obtenidos para la viga de longitud 325 μ m 88

Figura 6.10. Los cuatro primeros modos de oscilación obtenidos para la viga de longitud 450 μ m 89

Figura 6.11. Desplazamiento del extremo libre de la viga de 125 μ m como respuesta a una señal de potencial eléctrico de tipo escalón aplicada a los electrodos cuyas longitudes se presentan en la figura (y el potencial correspondiente entre paréntesis). 90

Figura 6.12. Desplazamiento del extremo libre de la viga de 225 μ m al aplicar una señal de potencial eléctrico de tipo escalón a los electrodos de accionamiento correspondiente (ver longitud en leyenda y potencial entre paréntesis). 91

Figura 6.13. Desplazamiento del extremo libre de la viga de 325 μ m al aplicar una señal de potencial eléctrico de tipo escalón a los electrodos de accionamiento correspondiente (ver longitud en leyenda y potencial entre paréntesis). 92

Figura 6.14. Desplazamiento del extremo libre de la viga de 450 μ m como 93

respuesta a una señal de potencial eléctrico de tipo escalón aplicada a los electrodos cuyas longitudes se presentan en la figura (y el potencial correspondiente entre paréntesis).

Figura 6.15. Ejemplo de respuesta subamortiguada y magnitudes asociadas que deben considerar para la determinación de ξ y ω_n . 94

Figura 7.1. Accionamiento de las vigas mediante la señal proveniente del vibrómetro 97

Figura 7.2. Arreglo experimental para medición de flexión en las microvigas como función del potencial aplicado 100

Figura 7.3. Gráfico de magnitud y fase para las microvigas de 450 μm accionadas mediante electrodos de longitud 80 μm , y 100 μm . Obtenidos del analizador de movimiento (vibrómetro). 105

Figura 7.4. Distribución de puntos para la determinación de la separación entre electrodos 107

Figura 7.5. Imagen de la muestra patrón de calibración del microscopio 110

Figura 7.6. Arreglo experimental utilizado para la medición de potencial de ruptura en electrodos para separaciones comprendidas entre 3 μm y 20 μm .(a) Diagrama general. (b) Circuito eléctrico equivalente 113

Figura 7.7. Gráfico que relaciona la intensidad de corriente y potencial eléctrico aplicado, obtenida del ensayo de medición de potencial de ruptura 115

Figura 7.8. Gráficos asociados al ensayo de determinación de potencial de ruptura dieléctrica. (a) Gráfico I vs V general (b) Primera Derivada al gráfico I vs V y (c) Segunda Derivada al gráfico I vs V. 117

Figura 7.9. Distribución de magnitudes de la segunda derivada respecto al valor cero. 118

Figura 7.10. Determinación del error asociado al potencial de pre-ruptura 118

VPR. Error en la distribución de los datos de segunda derivada y puntos de referencia P1 y P2 para determinar VPR y su error asociado Detalle de P1 y P2 para la determinación de VPR y su error.

Figura 7.11. Gráfico de Potencial eléctrico de ruptura vs separación de electrodos obtenido luego de procesados los resultados de los ensayos. 121

Figura 7.12. Gráficos de Potencial de ruptura contra pxd, para aire a una atmósfera. Considerando datos experimentales y la evaluación de la expresión de la ley de Paschen. 122

Figura 8.1. Gráfico de factores de calidad como función de la longitud de electrodo de accionamiento para vigas de 125 μm , 225 μm , 325 μm y 450 μm de longitud. Se considera $E = 169 \text{ GPa}$. 125

Figura 8.2. Gráficos experimentales y de las simulaciones para microvigas de longitud 450 μm y electrodos de accionamiento de longitud 80 μm . 127

Figura 8.3. Orientación cristalográfica en obleas de silicio. Los ejes X e Y se encuentran en las direcciones $\langle 110 \rangle$. (a) Orientación de una oblea (100). (b) Direcciones y ejes en una oblea (100). Adaptado de Hopcroft (2010). 127

Figura 8.4. Vista de una muestra del proceso de fabricación Pianoforte, donde se evidencia el acabado superficial. Obtenido mediante un Microscopio SEM. Tomado por Dr. Léon Woldering, Universidad de Twente. 129

Figura 8.5. Viga con recubrimiento y viga compuesta equivalente. 136

Figura 8.6. Condiciones de borde para los recubrimientos. 139

Figura 8.7. Desplazamiento del extremo libre de las vigas con y sin recubrimiento en función de la diferencia de potencial viga-electrodo. 140

Figura 8.8. Desplazamiento relativo del extremo libre de las vigas con y sin recubrimiento en función de la diferencia de potencial viga-electrodo. 141

Figura 8.9. Variación de la fuerza respecto a la variación en 142

desplazamiento, en función de la diferencia de potencial viga-electrodo.

Figura 8.10. Detección de posición en microvigas accionadas 144
eléctricamente en un arreglo de nariz electrónica.

Índice de tablas

Tabla 4.1. Dimensiones de microvigas en voladizo de sección rectangular.	40
Tabla 4.2. Frecuencias de resonancia en microvigas para sus 3 primeras frecuencias naturales no amortiguadas.	41
Tabla 4.3. Fórmulas de corte, momento, inclinación y deflexión para vigas rectas elásticas. Considerando carga intermedia concentrada (ver figura 4.3a).	46
Tabla 4.4. Fórmulas de corte, momento, inclinación y deflexión para vigas rectas elásticas. Para una carga distribuida parcialmente (ver figura 4.3b).	47
Tabla 4.5. Dimensiones de las máscaras para el accionamiento de microvigas	57
Tabla 5.1. Modos de aplicación para análisis paramétrico en 2D	67
Tabla 5.2. Ajustes de física para el modo de aplicación Deformación en el plano	67
Tabla 5.3. Ajustes de física para el modo de aplicación de mallado en movimiento	68
Tabla 5.4. Ajustes de física para el modo de aplicación Electrostática	69
Tabla 5.5. Modos de aplicación para análisis de frecuencias de los modos propios 3D	70
Tabla 5.6. Ajustes de física para el modo de aplicación Esfuerzo-deformación de Sólidos	71
Tabla 5.7. Modos de aplicación para análisis transitorio en 2D	71
Tabla 5.8. Ajustes de física para el modo de aplicación Deformación en el plano	72

Tabla 5.9. Ajustes de física para el modo de aplicación Mallado en movimiento	73
Tabla 5.10. Ajustes de física para el modo de aplicación Electrostática	74
Tabla 5.11. Ajustes de física para el modo de aplicación de Amortiguación por película.	75
Tabla 6.1. Longitudes consideradas en los modelos de accionamiento de microvigas	79
Tabla 6.2. Definición del mallado para el análisis estático paramétrico mediante elementos finitos	80
Tabla 6.3. Definición del mallado para el análisis estático mediante elementos finitos	83
Tabla 6.4. Frecuencias de los modos de oscilación resultantes del análisis de frecuencias propias sobre la viga de $125\mu\text{m} \times 50\mu\text{m} \times 3\mu\text{m}$ y los errores resultantes al refinar el mallado	85
Tabla 6.5. Frecuencias de los modos de oscilación resultantes del análisis de frecuencias propias sobre la viga de $225\mu\text{m} \times 50\mu\text{m} \times 3\mu\text{m}$ y los errores resultantes al refinar el mallado	86
Tabla 6.6. Frecuencias de los modos de oscilación resultantes del análisis de frecuencias propias sobre la viga de $325\mu\text{m} \times 50\mu\text{m} \times 3\mu\text{m}$ y los errores resultantes al refinar el mallado	86
Tabla 6.7. Frecuencias de los modos de oscilación resultantes del análisis de frecuencias propias sobre la viga de $450\mu\text{m} \times 50\mu\text{m} \times 3\mu\text{m}$ y los errores resultantes al refinar el mallado	87
Tabla 6.8. Magnitud de los modos de oscilación obtenidos para los valores de módulo de elasticidad considerados en las longitudes de vigas analizadas	89
Tabla 6.9. Parámetros característicos de los arreglos viga-electrodo luego	95

de analizar la respuesta transitoria resultante de realizar el análisis de elementos finitos dependiente del tiempo al aplicar una diferencia de potencial eléctrico de tipo escalón.

Tabla 7.1. Especificaciones de desempeño del vibrómetro para el ensayo de medición de flexión	98
Tabla 7.2. Especificaciones de equipos utilizados en la medición de flexión en las microvigas como función del potencial aplicado	99
Tabla 7.3. Tabla comparativa de los resultados experimentales y las simulaciones	103
Tabla 7.4. Factores de calidad obtenidos de los gráficos de magnitud-frecuencia para vigas de longitud 450 μm , actuadas mediante electrodos de longitud 80 μm y 100 μm .	104
Tabla 7.5. Equipos utilizados y ajustes realizados en la inspección óptica de las muestras con los electrodos a ensayar	108
Tabla 7.6. Resultados obtenidos de la determinación de las separaciones entre electrodos luego de procesar las imágenes capturadas	109
Tabla 7.7. Separación entre electrodos utilizados para los ensayos de potencial de ruptura dieléctrica	112
Tabla 7.8. Especificaciones de equipos utilizados en la medición de potencial de ruptura	114
Tabla 7.9. Resultados de procesar los gráficos I vs V obtenidos de los ensayos de potencial de ruptura dieléctrica.	120
Tabla 7.10. Coeficientes aplicados en la ley de Paschen para aire	121
Tabla 8.1. Parámetros para evaluación de expresiones analíticas de Q.	134
Tabla 8.2. Propiedades de los recubrimientos	137

Tabla 8.3. Frecuencias no amortiguadas en primer modo de oscilación 138
para vigas con recubrimientos metálicos.

Introducción

Con el paso de los años, el área de los sensores para gases ha tenido un amplio y diverso desarrollo. Una tecnología desarrollada corresponde a los sensores de masa con los cuales es posible determinar cambios de masa en compuestos gaseosos mediante la variación en la frecuencia de resonancia de un dispositivo (un cristal resonante de cuarzo o una viga en oscilación) al interactuar con la muestra o mediante la deflexión de una viga como efecto de la masa del medio sensado.

La viga en voladizo es un dispositivo estudiado como elemento de sensado para gases en modo resonante o en modo estático. Cuando opera en modo resonante, se somete a oscilaciones mediante un actuador piezoeléctrico que lleva la microestructura (que cuenta con un recubrimiento) a una frecuencia muy cercana a la de su resonancia para determinar los cambios en concentración del compuesto detectado mediante variaciones en la frecuencia. En el modo estático, la viga recubierta es deformada por acción del compuesto cuando este es adsorbido por el recubrimiento.

El presente trabajo plantea el estudio de microvigas accionadas mediante campos eléctricos resultantes de una diferencia de potencial aplicada entre la viga y un electrodo que la acciona, esto, como alternativa al método piezoeléctrico mencionado así como una variante en el modo estático de operación. Estas microvigas son diseñadas y construidas para ser actuadas en el plano, es decir, siendo flectadas respecto a una posición inicial casi en paralelo con la superficie de la muestra.

El diseño de las microvigas se basa inicialmente en aproximaciones que emplean expresiones analíticas, con las cuales se obtienen estimaciones de desempeño (flexión, modos propios). Luego se hace uso del método de los elementos finitos para obtener información adicional que sirve para el establecimiento de

restricciones experimentales preliminares, así como para obtener información que, las expresiones analíticas por su naturaleza, no son capaces de aproximar. De esta manera se tiene una estimación de los resultados experimentales a esperar, gracias al empleo de análisis paramétricos y análisis basados en el dominio temporal para modelos donde se acopla la mecánica con el electromagnetismo (multifísica), ambos con geometrías bidimensionales, y al análisis estructural de los modos propios con geometrías tridimensionales.

En este sentido, con los resultados obtenidos de las expresiones analíticas y los resultados de las simulaciones mediante elementos finitos, se establecen criterios a ser utilizados en el diseño de los arreglos para su fabricación. Luego de la fabricación de los arreglos (viga-accionamiento), son sometidos a pruebas experimentales para estudiar el grado de aproximación entre las aproximaciones analíticas, simulaciones y lo real.

Con base a las pruebas experimentales, se plantean nuevos modelos en elementos finitos para estimar el efecto que tendrían los recubrimientos sobre las vigas con miras hacia nuevos ensayos. De esta forma, se obtiene información con la cual será posible tomar futuras decisiones hacia la implantación de un accionamiento electrostático en la operación de microvigas en voladizo como sensores para gases.

Finalmente se realiza el cierre del trabajo de investigación, mediante la discusión de los resultados obtenidos y las conclusiones a lugar.

Capítulo I

El problema

El desarrollo de sistemas para la medición de la concentración de compuestos en el aire se ha diversificado e incrementado en las últimas décadas gracias al interés existente en temas sociales como por ejemplo el control de la contaminación ambiental a nivel mundial.

Asimismo, el crecimiento de la población a nivel mundial demanda el uso racional de los recursos energéticos y en un planeta dependiente del uso de combustibles fósiles para la generación de energía, es necesario poder medir las cantidades de compuestos en fase gaseosa de manera exacta, precisa y selectiva para garantizar la operación eficiente y segura de los procesos de generación de energía, así como los de producción de combustibles.

Es por ello que existen sistemas de medición de concentración de gases basados en una amplia gama de sensores. Los sensores son los elementos encargados de la transducción primaria de la variable a medir (concentración). Estos pueden clasificarse en tres familias: sensores de masa, sensores electroquímicos y sensores ópticos.

Los sistemas ópticos de sensado aprovechan la absorción “óptica” característica de los gases para determinar la concentración de los mismos (Yappert, 1996). Presentan alta sensibilidad, selectividad, estabilidad y son insensibles a cambios en las condiciones ambientales. Sin embargo, es difícil reducir su tamaño y su costo es elevado.

Por otro lado, los sensores electroquímicos se basan en la medición de cambios en variables eléctricas como resistividad, intensidad de corriente eléctrica o potencial eléctrico cuando el gas a detectar interactúa con la etapa detectora del sensor (Ho *et al.*, 2001). En general, estos sensores se caracterizan por su buena

velocidad de respuesta, bajo costo (en la mayoría de los casos) y reducido tamaño (Liu *et al.*, 2012). Entre sus problemas se encuentran la baja sensibilidad y selectividad así como irreversibilidad (Liu *et al.*, 2012). Sin embargo, su desarrollo se ve favorecido por el auge que han tenido los procesos de microfabricación para desarrollar sensores de reducido tamaño así como el estudio de nuevos materiales.

Los sensores de masa constan de un material piezoeléctrico que generalmente es una oblea de cristal de cuarzo recubierto en una de sus caras con una capa detectora que reacciona con el gas a sensar (Janata, 2009). El cristal y su recubrimiento forman parte de un circuito oscilador del cual se mide una señal periódica cuya frecuencia depende de la masa del cristal-recubrimiento (Buck *et al.*, 2004). Cuando la concentración del gas a detectar varía, lo hace la masa del conjunto cristal-recubrimiento y esto altera la frecuencia de la señal medida del circuito.

Los sensores piezoeléctricos se caracterizan por su bajo costo y reducido tamaño. Sin embargo su velocidad de respuesta es baja y otros aspectos como estabilidad, sensibilidad, reversibilidad y selectividad dependen significativamente del tipo de recubrimiento empleado, limitando su aplicación (Liu *et al.*, 2012). Sin embargo, el sensado basado en la medición de frecuencia, implica posibilidades dentro del campo de procesamiento de señales con lo cual es posible obtener información específica de las cantidades sensadas.

El desarrollo de procesos modernos para deposición de materiales, fotolitografía y grabado ha permitido el diseño y fabricación de estructuras a escala micrométrica (Hierlemann, 2003). Los procesos aprovechados en la fabricación de circuitos electrónicos, ahora son aplicados para el desarrollo de sistemas microelectromecánicos. En estos sistemas se logra el movimiento de las microestructuras cuya inercia es casi despreciable.

Una microestructura fundamental es la viga o microviga. En el caso de materiales conductores y semiconductores, es posible lograr el desplazamiento de microestructuras como esta mediante accionamientos piezoeléctricos (deformación por aplicación de electricidad) o mediante accionamientos por campos eléctricos resultante de la diferencia de potencia entre un elemento fijo y otro libre de moverse (Senturia, 2001).

Una microestructura abre la posibilidad al desarrollo de sistemas de sensado para gases similares a los sensores de masa. Para ello la estructura que cuenta con un recubrimiento afín al gas a detectar, se hace vibrar a una frecuencia cercana a su frecuencia natural de resonancia que se verá afectada de acuerdo con la concentración de gases.

En la actualidad se han estudiado propuestas de microvigas para el sensado de gases pero el accionamiento considerado es de tipo piezoeléctrico (Lang *et al.*, 2005). Sin embargo, esta forma de accionamiento resulta compleja de implementar en comparación con la alternativa de realizar un accionamiento basado en campo eléctrico.

Es por ello que se plantea el estudio de microestructuras de silicio como elementos básicos de la etapa captadora en el sensado de concentración de gases, teniendo en cuenta que las estructuras estarán sometidas a campos eléctricos para accionarlas a una frecuencia cercana de resonancia.

El uso de silicio como material para sensores microfabricados se extiende desde mediados del siglo 20 cuando se identifica su efecto piezorresistivo lo que permite que, junto al germanio, sea empleado en el desarrollo de galgas extensométricas por tener mejores coeficientes piezorresistivos que los metales. El posterior desarrollo de técnicas de micromecanizado superficial así como el reconocimiento de la posibilidad de integración de estructuras micromecanizadas de silicio con dispositivos de circuitos integrados basados en

este material, marcó la llegada de los sistemas microelectromecánicos (MEMS por Microelectromechanical Systems) ubicando al silicio como el material principal a ser usado en los MEMS (Bushan, 2007).

De esta forma se establecen las bases para, mediante el aprovechamiento de las técnicas de microfabricación utilizadas en el desarrollo de sensores electroquímicos, poder realizar la fabricación de sensores que operen de forma análoga a los sensores de masa pero con una etapa captadora de menores dimensiones.

Objetivo general

Evaluar el comportamiento de microvigas de silicio a ser utilizadas para el sensado de gases.

Objetivos específicos

1. Establecer las características que debe cumplir la microviga para su aplicación como elemento de sensado con la finalidad de poder estudiar el desempeño de la microestructura.
2. Determinar las características que debe cumplir el elemento de accionamiento de la microviga para permitir el sensado y su estudio de desempeño.
3. Analizar las configuraciones de microvigas y accionamientos mediante el Método de los Elementos Finitos (MEF) para establecer aproximaciones más cercanas al fenómeno físico.
4. Comparar los resultados de las simulaciones con aquellos resultados obtenidos de experiencias prácticas, para establecer consideraciones preliminares en el futuro desarrollo de microvigas para el sensado de gases.

Justificación

La presente investigación presentará el estudio de microvigas con la finalidad de aportar en el desarrollo tecnológico del área de sensores de gas, los cuales tienen alta pertinencia en Venezuela como país petrolero y en el mundo en general. Entonces el trabajo propuesto posee alta pertinencia científica.

Esta propuesta a su vez, busca sentar bases que permitan el desarrollo de alternativas de sensado de gases que aprovechen los procesos de fabricación así como la fortaleza de los principios de sensado existentes en la búsqueda de sistemas de sensado con mejores prestaciones.

Debido al amplio uso del MEF en el análisis estructural, así como en el análisis de sistemas físicos en general, su uso en el presente trabajo está justificado porque permitirá establecer criterios en el diseño de las microvigas que son accionadas eléctricamente.

Investigar acerca de Sistemas Microelectromecánicos representa una excelente oportunidad de manejar un área tecnológica novedosa para Venezuela, donde se conjugan factores como herramientas que permiten análisis mediante el MEF, conocimientos básicos en el área del electromagnetismo y la mecánica estructural, de amplio uso en el país.

Alcance

La investigación contempla el diseño y evaluación del comportamiento de microvigas de silicio sometidas al campo resultante de aplicar una diferencia de potencial eléctrico entre la microviga y un electrodo paralelo a esta. El electrodo es de longitud inferior a la microviga pero su ancho es igual al de la última. Las microvigas a evaluar, son obtenidas de un proceso de microfabricación desarrollado por personal de la Universidad de Twente de la ciudad de Enschede (Países Bajos) con la finalidad de evaluar su aplicabilidad futura en sensores

para gases. Las microvigas tendrán un extremo empotrado y otro libre (en voladizo).

Solo se analizará el desempeño de la microestructura y su accionamiento, dejando para otro trabajo otros aspectos como el sistema de sensado de movimiento que necesitaría un sensor así como el estudio de los recubrimientos que deberían tener las microvigas.

Limitaciones

El presente trabajo de investigación puede encontrar algunas restricciones al momento de acceder a la información así como ciertas limitaciones menores de tipo técnicas al momento de ejecutar las simulaciones mediante el MEF.

Capítulo II

Aspectos teóricos

Electromecánica de Microestructuras

La electromecánica, que consiste en la combinación de la electrostática con la mecánica, es quizá el enfoque de acoplamiento más empleado en tecnología de microsistemas para sensado y accionamiento.

Una de las estructuras comúnmente empleadas en electromecánica son las vigas en voladizo. En estas estructuras, el acoplamiento entre la electrostática y la mecánica ocurre dentro de un medio elástico limitado. Básicamente, la energía eléctrica se transforma en energía potencial almacenada en el cuerpo en virtud de su deformación elástica, es decir, energía de deformación, considerando despreciable la disipación de energía por amortiguación. La electromecánica también abarca el acoplamiento entre electrostática y la mecánica de cuerpos rígidos, mediante el establecimiento de restricciones cinemáticas en el análisis de las estructuras y considerando disipación de energía por fuerzas viscosas bajo condiciones dinámicas. Asimismo, la electrostática y la mecánica también contempla la unión entre electrostática y los fluidos en lo que se conoce como electro-termomecánica (Bushan, 2007).

Los microsistemas han dado paso a diversas aplicaciones de electromecánica. Estas aplicaciones incluyen sensores de presión, acelerómetros, giróscopos, resonadores, microbombas, espejos ópticos, obturadores ópticos (accionadores ópticos variables), e interruptores de corriente continua y de radio frecuencia. En estos casos se producen fuerzas electrostáticas, entre un electrodo fijo y uno móvil, que frecuentemente es la masa del acelerómetro o el diafragma en una bomba. Dichas fuerzas existen como consecuencia de una diferencia de potencial entre los electrodos. Por lo tanto, la electromecánica se estudia de acuerdo a dos enfoques: el continuo y estable (analógico), para el cual la estructura describe

desplazamientos “estables” con la aplicación de una diferencia de potencial, y el comportamiento inestable (todo-nada) en el cual el electrodo móvil entra en contacto con el fijo como consecuencia del potencial eléctrico aplicado (Bushan, 2007).

La electrostática aplicada en el accionamiento de estructuras ha sido utilizada en interruptores y microrelés (McCarthy *et al.*, 2002), acelerómetros (Zhang *et al.*, 2009), microbombas (Huang *et al.*, 2002) y microespejos (Toshiyoshi *et al.*, 2001). El funcionamiento de las estructuras bajo accionamiento electrostático viene descrito mediante el gráfico de desplazamiento en función del potencial aplicado, tal y como se presenta en la figura 2.1. Se tiene la primera región (ver figura 2.1) donde se logra el accionamiento estable de la estructura. En esta región, la estructura es accionada hasta un punto de inestabilidad llamado punto de atracción (o pull-in en inglés). Mientras se alcanza el punto de inestabilidad, el desplazamiento aumenta monótonamente hasta que se alcanza el voltaje de atracción. En el punto de inestabilidad, la estructura instantáneamente recorre el resto del espacio existente entre los dos electrodos debido a la inestabilidad y hace contacto con el sustrato (electrodo fijo).

Así entonces, desde el punto de contacto mostrado en la figura 2.1, es posible disminuir la magnitud del potencial eléctrico y en el caso que no ocurra daño en la estructura, entonces entrar a una segunda región mediante un valor de tensión V_R inferior al de inestabilidad debido a que las fuerzas de atracción son muchos mayores para separaciones menores a la existente en el punto de inestabilidad. En esta nueva región la estructura describe un desplazamiento monótono en el cual se evidencia histéresis.

Análisis Electromecánico

El análisis electromecánico abarca la modelación del dominio estructural, el dominio electrostático, y el acoplamiento entre los campos electrostáticos y los elementos estructurales (Bushan, 2007). En este análisis, se manejan tres niveles de complejidad. El más simple consiste en el desarrollo de modelos de elementos concentrados, que permiten comprender de manera básica, la inestabilidad que ocurre en el funcionamiento de las estructuras cuando son accionadas. Entonces se plantea un modelo simple basado en un condensador de placas paralelas y un resorte (que sostiene a una de las placas), donde una de las placas se encuentra fija y la otra (la acoplada al resorte) se desplaza típicamente con un grado de libertad reduciendo el espacio de aire existente entre las placas (Bushan, 2007). El resorte representa la rigidez efectiva k del elemento estructural, que puede ser una viga, una placa o una membrana. Por lo tanto, el condensador de placas paralelas es el dispositivo donde ocurre el acoplamiento electrostático entre los elementos fijos y móviles.

El segundo nivel de complejidad, es un análisis que considera elementos estructurales continuos sometidos a cargas electrostáticas distribuidas (Bushan, 2007). En general, y bajo ciertas restricciones, el problema satisface la ecuación de Euler-Bernoulli para la cual se busca solución:

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} = q(x) \quad (2.1)$$

Donde E es el módulo de Young, I es el momento de inercia de la estructura, $w(x)$ es la deflexión transversal de la viga y $q(x)$ representa la carga electrostática distribuida.

El tercer nivel de análisis se basa en el establecimiento de modelos acoplados como sólidos continuos (Bushan, 2007). Para ello se utilizan aproximaciones por diferencias finitas, elementos finitos y elementos de contornos.

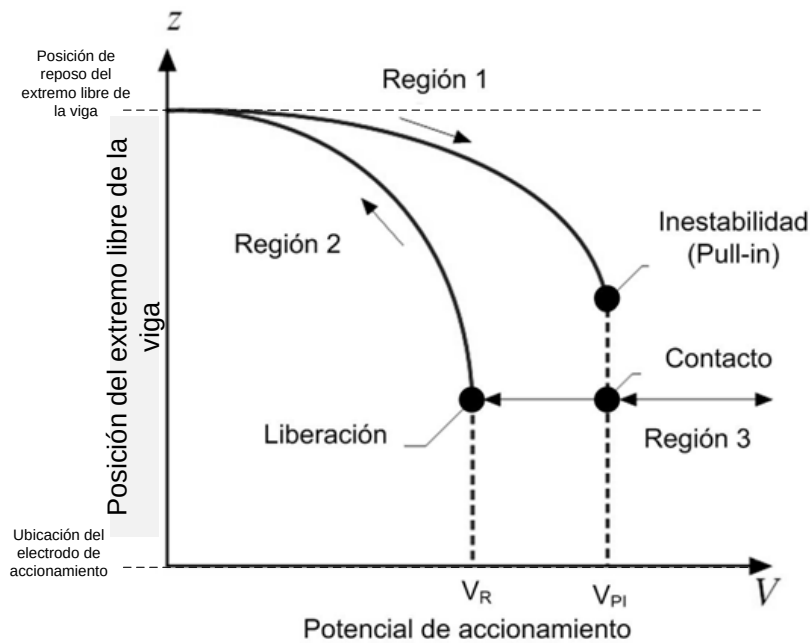


Figura 2.1. Curva característica de histéresis electromecánica que muestra los potenciales donde ocurre inestabilidad (pull-in), el contacto y la liberación entre los electrodos. (Fuente: Bushan, 2007)

La electromecánica y su acoplamiento pueden ser descritos de manera simple mediante un par de conductores, uno de ellos se encuentra fijo y el otro es una estructura elástica, como por ejemplo, una viga en voladizo. Se aplica entonces una diferencia de potencial entre los dos conductores que ocasiona una distribución de cargas superficiales en ellos. Estas cargas producen fuerzas electrostáticas y en consecuencia ocurre la atracción entre ambos conductores. En la medida que el conductor unido al soporte elástico se deforma, acercándose hacia el conductor fijo, ocurre una nueva redistribución de cargas, lo que modifica el campo eléctrico y por lo tanto la fuerza distribuida. Esto se repite hasta que no es necesaria la redistribución para mantener el equilibrio.

Para aproximar lo antes descrito, un algoritmo determina los desplazamientos de la geometría inicial y es actualizado para proseguir con el análisis

electrostático. En consecuencia, se calcula la distribución superficial de carga para determinar las fuerzas electrostáticas (Bushan, 2007). La distribución de fuerzas electrostáticas resultante es utilizada en el análisis mecánico como la carga mecánica aplicada a los conductores, hasta alcanzar la condición de equilibrio.

Balance de energía en sistemas electromecánicos

Las estructuras basadas en actuadores de placas paralelas con muelles y placas soportadas mediante suspensiones sometidas a torsión han sido estudiadas mediante un enfoque analítico (Nemirovsky y Bochobza-Degani, 2001). Este enfoque plantea un sistema de una sola entrada, correspondiente a la carga eléctrica o el potencial eléctrico, aplicados al actuador y que en consecuencia son controlados. Como primer paso, se considera el actuador general que consiste de dos conductores, uno fijo y el otro unido a un soporte elástico.

Para el actuador de carga controlada, su energía total viene dada de acuerdo con la energía mecánica en función de una coordenada general X así como también de la energía eléctrica almacenada en la capacitancia eléctrica del accionador. La energía total viene dada de acuerdo con la ecuación 2.2.

$$U_T(X, Q) = U_M(X) + \frac{Q^2}{2C(X)} \quad (2.2)$$

Donde U_T es la energía total, U_M es la energía mecánica, y la energía eléctrica viene dada por la carga y la capacitancia $C(X)$. Al igualar a cero la primera derivada de la energía total con respecto a la coordenada generalizada, se determina la condición de equilibrio, mientras que al igualar la segunda derivada a cero se determina la estabilidad. Al determinar y combinar la primera y segunda derivada se obtiene la ecuación de pull-in (2.3) para el modelo basado

en control de carga así como la expresión de la carga eléctrica para la condición de pull-in (2.4).

$$\frac{\partial U_M(X_{PI})}{\partial X} \frac{\partial^2 \left[\frac{1}{C(X_{PI})} \right]}{\partial X^2} - \frac{\partial^2 U_M(X_{PI})}{\partial X^2} \frac{\partial \left[\frac{1}{C(X_{PI})} \right]}{\partial X} = 0 \quad (2.3)$$

$$Q_{PI} = \sqrt{\frac{-2 \frac{\partial U_M(X_{PI})}{\partial X}}{\frac{\partial C(X_{PI})}{\partial X}}} \quad (2.4)$$

En el caso del modelo controlado por voltaje, se aplica el enfoque de la co-energía total para el actuador generalizado debido a que el condensador es no lineal, y el actuador es controlado por voltaje. La co-energía depende de la capacidad eléctrica entre los conductores del modelo, el potencial eléctrico a través de los conductores, y la energía mecánica. De esta forma, se tiene:

$$U_T^*(X, Q) = \frac{1}{2} C(X) V^2 - U_M(X) \quad (2.5)$$

La relación entre energía y co-energía se muestra en la figura 2.2.

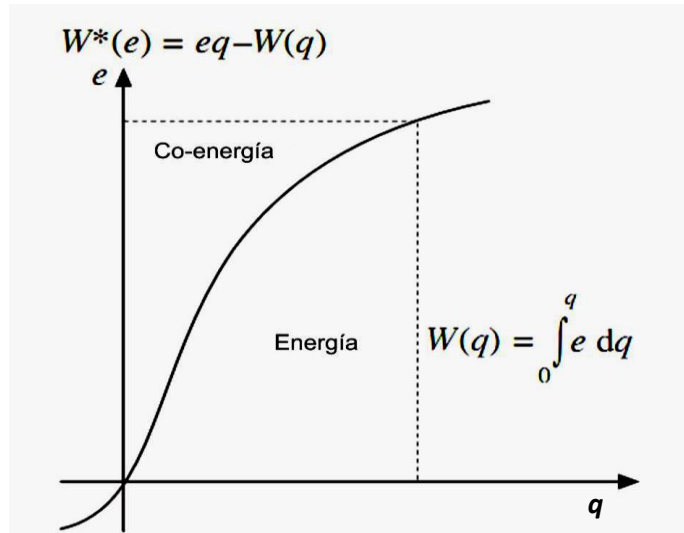


Figura 2.2. Curva de esfuerzo y desplazamiento que muestra la relación entre energía y coenergía. (Fuente: Bushan, 2007)

De forma análoga que con el modelo controlado por carga, es posible combinar la primera y segunda derivada respecto a la coordenada generalizada en el modelo controlado por voltaje para determinar la ecuación de pull-in y el voltaje de pull-in, resultando en las expresiones 2.6 y 2.7.

$$\frac{\partial U_M(X_{PI})}{\partial X} \frac{\partial^2 C(X_{PI})}{\partial X^2} - \frac{\partial^2 U_M(X_{PI})}{\partial X^2} \frac{\partial C(X_{PI})}{\partial X} = 0 \quad (2.6)$$

$$V_{PI} = \sqrt{\frac{2 \frac{\partial U_M(X_{PI})}{\partial X}}{\frac{\partial C(X_{PI})}{\partial X}}} \quad (2.7)$$

Enfoque Lagrangiano y sus variantes en la Electromecánica

Este enfoque ha sido propuesto por Li y Aluru (2002) y Aluru y White (1999) para el análisis electrostático y mecánico. El algoritmo desarrollado se inicia mediante el cálculo de desplazamientos estructurales para la geometría inicial (sin deformación). Luego se aplica el análisis electrostático para calcular la distribución de carga en los conductores para su estado inicial sin deformación. La distribución de carga se utiliza en el cálculo de las fuerzas electrostáticas en la geometría sin deformar hasta que el sistema alcanza equilibrio. La primera ventaja de este enfoque es que el algoritmo no requiere la actualización de la geometría estructural. Una segunda ventaja es la eliminación del error de integración, que ocurre cuando se emplean superficies planas para aproximar superficies curvas. Una variante de este enfoque es el conocido como la técnica Lagrangiana-Euleriana arbitraria (ALE por arbitrary Lagrangian-Eulerian), que captura las ventajas de los métodos de Lagrange y Euler y alivia los inconvenientes de distorsión en el mallado presentes en la formulación de Lagrange (Khoei *et al.*, 2008). La técnica basada en ALE ha sido empleada en el análisis mecánico de estructuras sometidas a grandes deformaciones. Asimismo

su combinación con métodos adaptativos de refinación de mallado ha sido empleada en modelación de materiales para análisis de falla de material, predicción de fragmentación y flujo elástico-plástico aplicado a mallas en movimiento sometidas a deformación como consecuencia de movimiento lagrangiano (Wang, 2010).

Electromecánica para el enfoque del condensador de placas paralelas

El elemento clásico para comprender la electromecánica es el condensador de placas paralelas, donde una de sus placas se encuentra fija y la otra suspendida mediante un muelle (elemento elástico). Este elemento básico se muestra en la figura 2.3. El condensador viene descrito mediante un área A ; una separación inicial g y una constante dieléctrica ϵ del medio comprendido entre las placas. La placa móvil se muestra suspendida mediante un muelle de constante elástica K y un solo grado de libertad representado por la coordenada z . La posición inicial de equilibrio viene dada por el estado del condensador (y sus placas) sin carga y el muelle sin elongación. En la medida que la longitud del muelle aumenta como consecuencia del incremento de " z ", el espacio entre placas disminuye (Senturia, 2001).

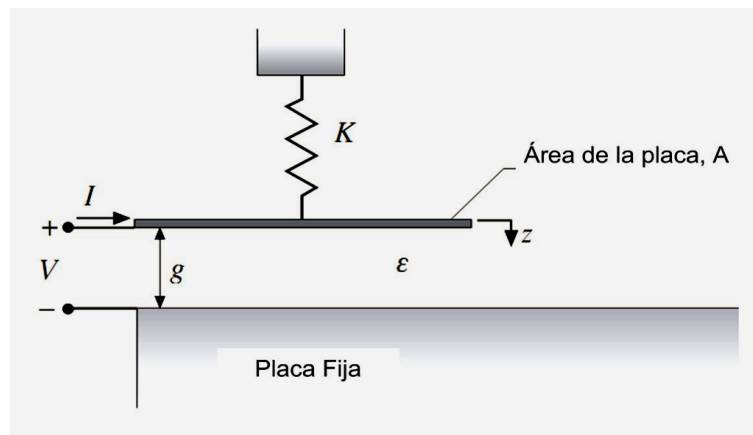


Figura 2.3. Modelo electromecánico de elementos concentrados para el condensador de placas paralelas. (Fuente: Bushan, 2007)

El condensador de placas paralelas puede analizarse desde el punto de vista del potencial eléctrico aplicado entre sus placas o la intensidad de corriente eléctrica que le atraviesa. Al aplicar una diferencia de potencial, la carga en el condensador es:

$$Q = \frac{\varepsilon A}{g} V \quad (2.8)$$

Donde Q es la carga en las placas del condensador, ε es la constante dieléctrica del medio entre placas, A es el área de las placas del condensador, g es la separación instantánea entre placas y V el potencial eléctrico aplicado entre las mismas.

La fuerza electrostática en las placas del condensador es función de ε , A , g y V de acuerdo con la expresión 2.9. La capacitancia instantánea del condensador viene dada por los mismos términos que la fuerza electrostática excepto V como se muestra en la ecuación 2.10.

$$F = \frac{\varepsilon A V^2}{2g^2} \quad (2.9)$$

$$C = \frac{\varepsilon A}{g} \quad (2.10)$$

La fuerza electrostática aumenta con el cuadrado del potencial eléctrico y disminuye con el cuadrado de la separación instantánea. Esta fuerza es la que actúa sobre la placa móvil, por lo tanto el muelle se elongará (o contraerá si el potencial eléctrico disminuye). En este sentido, la elongación en el muelle viene dada por:

$$y = \frac{F}{K} \quad (2.11)$$

Y la separación instantánea viene dada de acuerdo con:

$$g = g_0 - y = g_0 - \frac{\varepsilon A V^2}{2K g^2} \quad (2.12)$$

Retomando la expresión 2.5, la energía mecánica puede considerarse como la energía potencial del muelle (expresión 2.13). Haciendo $y = X$ y sustituyendo 2.10 y 2.13 en 2.6 se llega al desplazamiento “y” para pull-in (2.14).

$$U_M = \frac{Ky^2}{2} \quad (2.13)$$

$$y_{pullin} = \frac{g_0}{3} \quad (2.14)$$

Asimismo, de 2.6 se obtiene el voltaje de pull-in para el modelo de condensador de placas paralelas resultando en la expresión 2.15.

$$V_{pullin} = \sqrt{\frac{8Kg_0^3}{27\epsilon A}} \quad (2.15)$$

Electromecánica y extensión en el rango de movimiento

Los sistemas electromecánicos poseen dos características casi inherentes: no linealidad e inestabilidad (Bushan, 2006). Cuando se desea un funcionamiento en modo todo-nada o con rápidos tiempos de conmutación, la inestabilidad electromecánica es un beneficio significativo. Por otro lado si se desea el control analógico, este debe tomar en cuenta tanto la no linealidad como la inestabilidad. En ambos casos, el rango de movimiento del dispositivo electromecánico es limitado. Este rango de movimiento que antecede a la inestabilidad, ha sido ampliado mediante la adición de un condensador eléctrico pero no ha mejorado el problema de inestabilidad. Investigadores como Toshiyoshi y Fujita (1996), han trabajado en el mejoramiento de la linealidad de espejos accionados electrostáticamente en un escáner óptico, mediante el desarrollo de actuadores operados a torsión por señales de potencial eléctrico que constan de una componente de polarización y una de control. Asimismo llevaron a cabo la

optimización de la geometría de las estructuras móviles, pasando de elementos rectangulares a circulares y romboidales.

Electromecánica de vigas y placas

En el diseño de sistemas microelectromecánicos se sabe que la fuerza electrostática es proporcional al cuadrado del voltaje, e inversamente proporcional al cuadrado de la separación y que la placa colapsará luego de que ocurra un desplazamiento de $1/3$ de la separación inicial. Aunque esto es bueno en un principio, no es adecuado para el diseño electromecánico de otras estructuras como vigas en voladizo y placas, con múltiples soportes, y otras estructuras (Bushan, 2007).

O'Brien y colaboradores (2000) así como Choi y Lovell (1997) han estudiado la electromecánica de las vigas en voladizo y presentan dos modelos mejorados para accionamientos electrostáticos basados en vigas en voladizo. En ambos casos, la viga consiste de un material homogéneo fijado en uno de sus extremos y el resto libremente suspendido a lo largo de su longitud ubicada sobre un electrodo estacionario. El modelo de la viga emplea una geometría simple de ancho W , longitud L , grosor T , y separación inicial en aire Z_0 . La capacitancia del modelo basado en placas paralelas se basa en la capacitancia dada por la longitud y el ancho de la viga. La deflexión de la viga es representada mediante la función del desplazamiento en una viga sometida a una fuerza en su extremo libre. La constante elástica es determinada como el cociente de la fuerza aplicada en el extremo libre y el máximo desplazamiento obtenido en dicho extremo. La capacitancia fue determinada mediante la integración de un diferencial de longitud (considerando el modelo de placas paralelas) a lo largo de la longitud de la viga, donde el espacio existente entre la viga y el electrodo estacionario viene dado por la separación inicial en la función para el desplazamiento mecánico. Esto mostró que la punta de la viga se desplazaba 45% de la

separación inicial antes de pull-in. En este caso el voltaje de pull-in puede expresarse como función del módulo de Young del material de la viga E , el momento de inercia de la sección transversal I , la longitud L , el ancho W , la separación inicial Z_0 , y la constante dieléctrica del aire en el volumen limitado por la viga y el electrodo estacionario de acuerdo con la expresión 2.16.

$$V_1 = \sqrt{\frac{18EI Z_0^3}{5\varepsilon_0 L^4 W}} = 0,5477 \sqrt{\frac{ET^3 Z_0^3}{\varepsilon_0 L^4}} \quad (2.16)$$

En el primer modelo, la viga se define con las mismas características, pero en ella, la fuerza electrostática actúa a lo largo de su longitud, y es considerada mediante un momento flector equivalente aplicado en el extremo libre. El desplazamiento es determinado para una viga uniforme y homogénea, con un momento flector aplicado en su extremo. La constante elástica y la capacitancia fueron determinadas de forma análoga a la antes descrita. Este modelo mostró que el desplazamiento en la viga fue de aproximadamente 46% de la separación inicial antes de pull-in. En este caso el voltaje de pull-in está dado de acuerdo con la expresión 2.17.

$$V_2 = \frac{43}{50} \sqrt{\frac{18EI Z_0^3}{5\varepsilon_0 L^4 W}} = 0,471 \sqrt{\frac{ET^3 Z_0^3}{\varepsilon_0 L^4}} \quad (2.17)$$

En el segundo modelo mejorado, se consideró una viga rígida, cuyo soporte fue reemplazado mediante un eje simple y un muelle equivalente en el extremo libre de la viga. Se introdujeron tres nuevas variables para describir el comportamiento en términos de coordenadas radiales centradas en el eje. Las dos coordenadas radiales definen el inicio del electrodo en r_0 y el fin de la viga/electrodo en r_1 . Un ángulo θ describe el desplazamiento angular de la viga. En este modelo el desplazamiento de la viga antes de pull-in fue 44% de la

separación inicial. El voltaje de pull-in fue estimado mediante las expresiones 2.18 o 2.19, donde r_0 y r_1 han sido reemplazados por 0 y L.

$$V_3 = \frac{11}{25r_1^2} \sqrt{\frac{77ET^3Z_0^3}{25\epsilon_0 \left[\frac{11(r_1-r_0)}{r_1 - \frac{11r_0}{23}} - 14 \ln \left[\frac{25r_1-11r_0}{14r_1} \right] \right]}} \quad (2.18)$$

$$V_3 = \frac{11}{25L^2} \sqrt{\frac{77ET^3Z_0^3}{25\epsilon_0}} = 0,4548 \sqrt{\frac{ET^3Z_0^3}{\epsilon_0 L^4}} \quad (2.19)$$

Como es de esperarse, la dependencia que tiene el voltaje de pull-in con el módulo de Young, el grosor de la viga, su longitud, la separación inicial y la constante dieléctrica del medio es la misma para todos los casos presentes. La diferencia entre los tres modelos viene dada por los coeficientes correspondientes. Al compararse con los resultados experimentales, los modelos que generan a 2.19 y 2.17 fueron más precisos al momento de predecir el voltaje de pull-in para vigas en voladizo mientras que el modelo de placas paralelas presenta una importante desviación. El modelo representado por 2.16 se excede en la predicción del voltaje de pull-in con un mayor error que 2.17 y 2.18. Los modelos para vigas predijeron con mejor precisión en los casos de vigas más anchas, lo que significa que aplican mejor para vigas de dimensiones similares al modelo de placa paralelas empleado en el cálculo de capacitancia eléctrica. Para el caso de vigas angostas, todos los modelos tuvieron pobres predicciones, esto se atribuye al efecto dominante de campos dispersos no uniformes sobre el campo existente en las superficies de los electrodos. La aplicación típica del modelo de placas paralelas es para geometrías con un ancho W y largo L mucho mayores que la separación entre placas Z_0 ($W \gg Z_0$, $L \gg Z_0$, donde “mucho mayor” es un factor mayor de 10).

Flexión por apalancamiento

Como ya se ha mencionado, cuando el electrodo de accionamiento abarca toda la longitud del actuador, el desplazamiento estable controlable de la viga o placa es bastante limitado por el efecto de pull-in. Es posible atacar el problema de pull-in mediante la aplicación de una fuerza electrostática a solo una parte de la estructura empleando el resto de la misma como una palanca para moverla a través de un mayor rango de movimiento (Bushan, 2007). Este concepto, referido como flexión por apalancamiento (o leveraged bending en inglés) (Hung y Senturia, 1999) se muestra esquemáticamente en la figura 2.4 para una viga en voladizo. La idea básica es que las porciones de la viga por encima del electrodo no deflecten más allá del límite de pull-in. El concepto puede aplicarse a otras geometrías de microestructuras así como sus soportes, pero para estructuras tipo viga soportadas en ambos extremos el efecto esperado puede verse afectado por la presencia de esfuerzos residuales (Hung y Senturia, 1999).

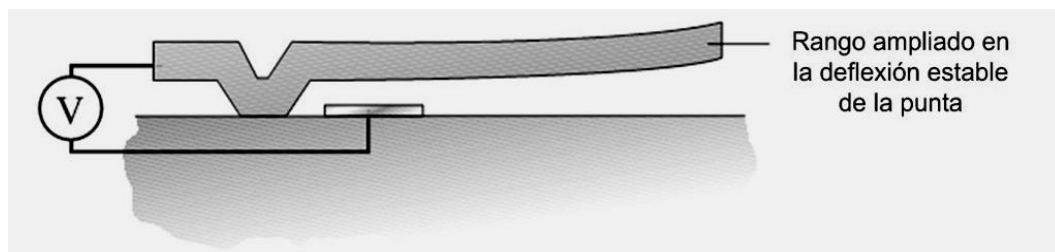


Figura 2.4. Ilustración del concepto de apalancamiento por flexión para incrementar el rango de movimiento estable. (Fuente: Bushan, 2007)

Consideraciones en la electromecánica. Descarga eléctrica

Como ya se ha descrito, el accionamiento electromecánico de una microestructura se realiza mediante la aplicación de una diferencia de potencial eléctrico entre dos placas. Las dos placas pueden ser dos conductores (por ejemplo aluminio), mediante semiconductores (silicio o polisilicio) o una

combinación de conductor y semiconductor (polisilicio y aluminio). Cuando estas placas se construyen próximas entre sí, usualmente están separadas 10µm por aire. Sin embargo, para los actuadores electrostáticos, es deseable reducir la separación para, en consecuencia, minimizar el voltaje requerido para accionamiento (Bushan, 2007).

La existencia de pequeñas separaciones en dispositivos electromecánicos ha llevado al aumento de estudios relacionados con la ruptura dieléctrica en contactos separados por pequeñas distancias (menores a 50 µm), en aire y otras condiciones ambientales. Slade y Taylor (2001) han demostrado que la ruptura dieléctrica entre contactos (metálicos), para aire, ocurre a pequeñas separaciones ubicadas en tres regímenes: menores que 4µm, comprendidas entre 4µm y 6µm, y mayor que 6µm. En el primer caso, los eventos de ruptura siguen el mismo comportamiento que para grandes separaciones. Para el último caso, la ruptura sigue el comportamiento de la ley de Paschen para ruptura en aire. En el caso intermedio (4-6 µm) el proceso de ruptura presenta una transición entre el proceso de ruptura en vacío y la curva de Paschen. En este caso, el potencial de ruptura es menor que el predicho en cada caso, lo que indica contribuciones significativas de factores pertenecientes a ambos casos. Torres y Dhariwal (1999) observaron una desviación respecto de la curva de Paschen para separaciones menores que 4µm.

La región de ruptura en vacío se caracteriza por un potencial de ruptura que es función de la distancia existente entre los electrodos. Esto contrasta con el comportamiento de la ruptura que establece la curva de Paschen, la cual establece dependencia con el producto de la distancia entre electrodos y la presión. En este sentido, el potencial de ruptura en vacío es:

$$V_B = K_v t_g \quad (2.20)$$

La ecuación 2.20, muestra que el potencial de ruptura V_B es proporcional a la separación t_g , donde la constante de proporcionalidad es $K_v = 97 \text{ V}/\mu\text{m}$ para datos de distintas fuentes, como lo indican Slade y Taylor (2001). Los datos de ruptura fueron determinados para electrodos separados en el rango 35-200 μm . Para electrodos espaciados entre 0,2-40 μm en aire, la constante de proporcionalidad se ubicó en el rango 65-110 $\text{V}/\mu\text{m}$.

El campo eléctrico en la superficie del electrodo es un parámetro crítico en la determinación de la ruptura en vacío. Este se estima como el cociente del potencial aplicado entre los electrodos V y la separación entre estos t_g con un factor de modificación β_g . β_g es un factor de intensificación geométrica que captura la variación del campo debido a la geometría macroscópica.

$$E_g = \beta_g \frac{V}{t_g} \quad (2.21)$$

El factor de intensificación geométrica puede determinarse mediante la realización de análisis de elementos finitos para determinar el campo eléctrico macroscópico como función de la separación entre electrodos para la geometría del electrodo bajo consideración. Dicho factor se determina por el cociente entre el campo eléctrico macroscópico E_g , obtenido de simulaciones por elementos finitos, y el campo eléctrico estimado de acuerdo con V/t_g (Slade y Taylor, 2001). El campo eléctrico estimado, V/t_g , puede emplearse como una aproximación razonable cuando la separación entre electrodos es mucho más pequeña que el radio de curvatura del electrodo. Si este no fuera el caso, el factor de modificación debe ser estimado de análisis numérico al emplear métodos por elementos finitos o elementos de contornos.

Un segundo factor se atribuye a la intensificación del campo eléctrico microscópico debido a la rugosidad superficial de los electrodos. El campo eléctrico que incluye los efectos de la geometría y la intensificación microscópica viene dado por la expresión 2.22.

$$E = \beta_m \beta_g \frac{V}{t_g} \quad (2.22)$$

En la expresión 2.22, β_m es el factor por modificación microscópica. El factor de modificación total $\beta_g \beta_m$, el cual puede encontrarse en el rango 100-250 para electrodos pulidos (Davies y Biondi, 1996).

En lo que respecta la determinación del campo eléctrico en la superficie de los electrodos, se determina la densidad de corriente para la emisión de electrones por efecto de campo. Esta densidad de corriente j_{FE} viene descrita por la ecuación de Fowler-Nordheim, la cual depende del campo eléctrico E , la función de trabajo para el material del electrodo ϕ , y los parámetros adimensionales de $t(y)$ y $v(y)$, donde “ y ” es un parámetro definido como $3,79 \times 10^{-5} (E)^{1/2} / \phi$. Típicamente, $t(y)$ tiene como valor la unidad, $v(y)$ viene dado de acuerdo con $0,956-1,06y^2$. La ecuación de Fowler-Nordheim se presenta en 2.23, con j_{FE} en A/m², E en V/m y ϕ en eV.

$$j_{FE} = \frac{1,54 \cdot 10^{-6} E^2}{\phi t y^2} e^{\frac{-6,83 \cdot 10^9 \phi^{3/2} v(y)}{E}} \quad (2.23)$$

La ecuación 2.23 puede reescribirse con E planteado de 2.22 y la densidad de corriente como una corriente de emisión I_e y el área A_e de una microproyección donde la emisión ocurre. La ecuación 2.23 se presenta entonces como la expresión 2.24, de manera tal que la pendiente de la ecuación de Fowler-Nordheim proporciona el factor de intensificación de campo como se muestra en 2.25 donde m es la pendiente. El gráfico de Fowler-Norheim es el gráfico I_e/V^2 versus $1/V$, el cual se construye al medir el voltaje a través de la separación entre electrodos e I_e .

$$\log_{10} \left(\frac{I_e}{V^2} \right) = \log_{10} \left(\frac{1,54 \cdot 10^{-6} A_e \beta^2}{\phi t(y)^2 t_g^2} \right) - \frac{1}{2,303} \left(\frac{6,83 \cdot 10^9 \phi^{3/2} t_g v(y)}{\beta} \right) \frac{1}{V} \quad (2.24)$$

$$\beta = \frac{-2,303.m}{6,83.10^9 \phi^{3/2} t_g \nu(\gamma)} \quad (2.25)$$

Para separaciones mayores que $6\mu\text{m}$, la ruptura eléctrica como función de la separación sigue la curva de Paschen para aire y no sigue la curva de ruptura en vacío para esas mayores separaciones. Como la separación entre electrodos es mayor que el camino libre promedio de las moléculas de aire, se espera que los electrones emitidos impacten con las moléculas de aire dentro del espacio delimitado por los electrodos. Para esas mayores separaciones entre electrodos, se asume que la ruptura eléctrica seguirá la teoría de avalancha de Townsend. Un procedimiento similar debe seguirse para estimar el voltaje de ruptura. Primero, se estima el campo eléctrico en la superficie del electrodo del cátodo, incluyendo los factores de modificación por geometría y microscópico por superficie. Se requiere una estimación del factor total de modificación para este caso. El campo eléctrico se sustituye en la ecuación de Fowler-Nordheim (2.23) para estimar la corriente de emisión de campo. En este caso, los electrones emitidos interactúan con las moléculas del gas del medio ocasionando una avalancha en la corriente. El proceso de corriente de avalancha viene descrito por 2.26, donde t_g es la separación entre electrodos, α es el primer coeficiente de Townsend y γ el segundo coeficiente de Townsend. El primer coeficiente de Townsend representa el número de electrones producidos por unidad de distancia a lo largo de la dirección del campo eléctrico. El segundo coeficiente es el número de electrones generados mediante procesos secundarios por avalancha primaria. La ruptura ocurrirá cuando el denominador de la expresión para corriente se aproxima a cero: $\gamma \exp(\alpha t_g)$ se aproxima a la unidad.

$$I = I_0 \frac{e^{\alpha t_g}}{1 - \gamma e^{\alpha t_g}} \quad (2.26)$$

En la región de transición, el voltaje de ruptura puede ser inferior al predicho por la curva de Paschen o ruptura en vacío. Se sugiere que en este régimen, el proceso de avalancha parcial de electrones se intensifica respecto al proceso de

ruptura de vacío lo que lleva a un menor potencial de ruptura (Slade y Taylor, 2001).

La selección de materiales es otra consideración en el diseño de un microactuador electrostático. Como se mencionó, el par de electrodos puede presentarse en las siguientes combinaciones: conductor-conductor, conductor-semiconductor o semiconductor-semiconductor. En el trabajo de Torres y Dhariwal (1999), se mide el voltaje de ruptura en pares de electrodos de níquel, latón y aluminio. En dicha investigación, no se observó diferencia significativa en el voltaje de ruptura como consecuencia del material de los conductores o su forma. Para grandes separaciones, el voltaje de ruptura fue diferente para diferentes geometrías, sin embargo esto tiene su explicación en el factor de modificación previamente citado. Ono y colaboradores (2000) realizaron la comparación entre combinaciones de electrodos donde emplearon combinaciones con el par de electrodos de semiconductor (silicio) y silicio-metal.

En el caso del electrodo de silicio con electrodo de metal, el voltaje de ruptura se desvió de la curva de Paschen desde separaciones aproximadas de $6\mu\text{m}$. Además, éste fue inferior que el voltaje de ruptura predicho por la curva de Paschen y siguió una dependencia aproximadamente lineal de la separación entre electrodos.

Con el par de electrodos de silicio, el voltaje de ruptura siguió la curva de Paschen para aire. Para separaciones similares, el voltaje de ruptura fue significativamente más alto para la combinación de electrodos silicio-silicio que para la combinación de electrodos silicio-metal.

Amortiguación por compresión de película (Squeeze film damping) en MEMS (Sistemas Microelectromecánicos por Microelectromechanical Systems)

Como las fuerzas de gravedad y la inercia que actúan sobre un cuerpo varían de acuerdo al cubo de su longitud, y las fuerzas superficiales tales como la fuerza viscosa, varían en directa proporción al cuadrado de la longitud, el efecto de las fuerzas superficiales sobre un microdispositivo es relativamente mayor que el efecto de las fuerzas gravitatorias. Por lo tanto, el efecto de las fuerzas superficiales (principalmente la fuerza de amortiguación debido al aire que lo rodea), que puede ser despreciada para un dispositivo de dimensiones convencionales, puede jugar un papel importante en microdispositivos y la importancia del efecto se hace mayor a medida que las estructuras microfabricadas disminuyen en tamaño. Como resultado, el movimiento de pequeñas partes en un dispositivo basado en MEMS puede verse considerablemente afectado por el aire a su alrededor. El aire presenta una fuerza de reacción contraria al movimiento de las partes del dispositivo.

Se ha observado que el siempre presente efecto amortiguador del aire del entorno aumenta cuando una placa oscila cerca de una segunda superficie debido a la acción de la compresión de la película de gas entre las superficies (Bao y Yang, 2007). La amortiguación por compresión de película es más importante que la amortiguación por fuerza de arrastre debido al aire, si el grosor de la película de gas es más pequeño que un tercio del ancho de la placa. Por lo tanto, para la mayoría de los dispositivos micromecánicos para los cuales se evita la presencia de fricción, el efecto de la película comprimida es el más importante efecto amortiguador en su comportamiento dinámico, ya que las tecnologías comúnmente empleadas son sensado capacitivo y accionamiento eléctrico, de las cuales con frecuencia resultan reducidos espacios de aire.

Para dispositivos de MEMS que constan de una placa que se mueve en contra de una película confinada, la amortiguación por película comprimida ha sido un problema de gran importancia ya que domina la amortiguación y afecta de forma sustancial la respuesta en frecuencia del sistema. El comportamiento dinámico de acelerómetros, interruptores ópticos, espejos por micro-torsión, resonadores, entre otros, se encuentra afectado de forma significativa por la amortiguación que provoca la película comprimida de aire en la estructura.

Diversos estudios se han llevado a cabo para considerar el efecto de amortiguación por película comprimida en microestructuras como vigas para microscopios de fuerza atómica, empleando por ejemplo la ecuación de Timoshenko (Lee y Chang, 2009), tomando en cuenta el movimiento rotacional de la estructura y su amortiguación. Asimismo, el estudio de amortiguación por película comprimida ha pasado por el uso de métodos numéricos (Zhang *et al.*, 2009), análisis mediante elementos finitos (Chou *et al.*, 2007), así como la caracterización experimental en estructuras donde el efecto de este tipo de amortiguación es de importancia (Nouira *et al.*, 2007).

Aunque la naturaleza básica de este tipo de amortiguación ha sido estudiada desde 1980, la investigación y desarrollo de dispositivos y tecnologías basadas en MEMS ha impulsado la actividad investigativa en el área. Motivado esto por los siguientes ejemplos: (1) la tecnología de grabado profundo por ión reactivo (DRIE por Deep reactive ion etching) también conocida como plasma acoplado inductivamente (ICP por inductively coupled plasma) desarrollada en años recientes, es capaz de producir dispositivos de placas gruesas perforadas. Esto hace deseable el modelado de amortiguación por película comprimida en placas con perforaciones; (2) el encapsulamiento al vacío de dispositivos microelectromecánicos con la finalidad de alcanzar altos factores de calidad requiere modelos más precisos para la estimación del efecto de este tipo de amortiguación; (3) la creciente aplicación de espejos por torsión en años

recientes (4) la necesidad de realizar cálculo numérico del efecto amortiguador para un diseño preciso una vez establecidos los modelos básicos (Bao y Yang, 2007).

El comportamiento de las películas de aire está gobernado generalmente por efectos viscosos e inerciales dentro del fluido. Sin embargo, para las reducidas geometrías encontradas en dispositivos micromecanizados, el efecto de la inercia es con frecuencia despreciable. En tales casos, el comportamiento del fluido viene gobernado por la bien conocida ecuación de Reynolds.

Para la aplicación de lubricación en el fluido, Osborne Reynolds formuló hace más de un siglo la teoría para la capa existente entre dos superficies en movimiento relativo (Langlois, 1962). Sin embargo, la forma más general de la ecuación de Reynolds para un gas compresible es la ecuación diferencial no lineal obtenida por Tipei en 1954 (Gross *et al.*, 1980):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\rho \frac{h^3}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho \frac{h^3}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \right) = 6 \left\{ 2 \frac{\partial(hP)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho h(u_1 + u_2))}{\partial x} + \frac{\partial(\rho h(v_1 + v_2))}{\partial y} \right\} \quad (2.27)$$

Donde P es la presión en la capa de fluido, ρ es la densidad, μ el coeficiente de viscosidad del fluido, h el grosor de la capa, u_1 y u_2 las velocidades en dirección de x de la placa superior e inferior, respectivamente, y v_1 y v_2 son las velocidades en dirección del eje “y” de las dos placas. Asimismo, las condiciones para la ecuación son: el flujo de aire es estacionario (la variación en el tiempo de la velocidad y la inercia del fluido puede ignorarse) y el gradiente térmico a través del grosor de la capa es despreciable.

Langlois (1962) derivó la forma general de la ecuación de Reynolds basada en las ecuaciones de Navier-Stokes y las ecuaciones generales de la hidrodinámica viscosa. La ecuación de Reynolds se obtiene estableciendo como condiciones que

los números de Reynolds modificados R_S y R_L son muchos más pequeños que la unidad. Estos números vienen definidos de acuerdo a lo siguiente:

$$R_S = \frac{\omega \rho h^2}{\mu}, R_L = \frac{V_L \rho h^2}{w \mu} \quad (2.28)$$

Donde V_L es la velocidad relativa en dirección lateral y w es el ancho de la placa.

La ecuación 2.27 puede simplificarse teniendo en cuenta que, para sistemas electromecánicos (MEMS), R_S posee pequeños valores haciendo los efectos inerciales del fluido despreciables, los movimientos laterales relativos no son considerados y la variación de temperatura es usualmente despreciable debido a las pequeñas dimensiones. Todo resulta en la ecuación simplificada 2.29.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\rho \frac{h^3}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho \frac{h^3}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \right) = 12 \frac{\partial(hP)}{\partial t} \quad (2.29)$$

Para placas paralelas que se desplazan en dirección normal entre si, como h y μ no son función del desplazamiento, entonces 2.29 puede simplificarse en 2.30.

$$\frac{\partial^2 P^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P^2}{\partial y^2} = \frac{24\mu}{h^3} \frac{\partial(hP)}{\partial t} \quad (2.30)$$

Donde, si la presión se normaliza con la presión ambiental P_a , $P = P/P_a$, al emplear las variables normalizadas, $x = x/l$, $y = y/l$, $h = h/h_0$, la ecuación 2.30 para una placa oscilando con pequeñas amplitudes alrededor de su posición de balance puede reescribirse en su forma adimensional 2.31.

$$\frac{\partial^2 \tilde{P}^2}{\partial \tilde{x}^2} + \frac{\partial^2 \tilde{P}^2}{\partial \tilde{y}^2} = 2\sigma \frac{\partial(\tilde{h}\tilde{P})}{\partial t} \quad (2.31)$$

Donde σ se refiere al número de compresión:

$$\sigma = \frac{12\mu\omega l^2}{P_a h_0^2} \quad (2.32)$$

Además, “ ω ” es la frecuencia radial y “ l ” la longitud típica de la placa: el ancho o largo de una placa rectangular, el radio de una placa circular, etc.

Para una par de placas paralelas como se muestra en la figura 2.5(a), la fuerza de resistencia sobre la placa moviéndose en dirección normal contra la placa estacionaria es ocasionada por la presión de amortiguación entre las dos placas. La presión de amortiguación está formada de dos componentes principales: la componente que causa el fluido viscoso de aire cuando el aire es comprimido hacia afuera (o absorbido hacia el interior) de la región de la placa, y la que causa la compresión de la película de aire. La componente de la fuerza asociada al flujo viscoso se conoce como la fuerza de amortiguación viscosa, y la componente asociada con la compresión de aire se conoce como la fuerza de amortiguación elástica.

Si la placa oscila a baja frecuencia, o la placa se mueve a baja velocidad, la película de gas no se comprime de forma apreciable. En este caso, la fuerza de amortiguación viscosa domina. Esta fuerza es proporcional a la velocidad de la placa.

Por otro lado, si la placa oscila a muy alta frecuencia, o se mueve a una elevada velocidad, la película de aire se comprime pero no logra escapar. En este caso, la película de aire trabaja como un fuelle. Así entonces, la fuerza elástica es dominante. Obviamente, la fuerza elástica es directamente proporcional al desplazamiento de la placa.

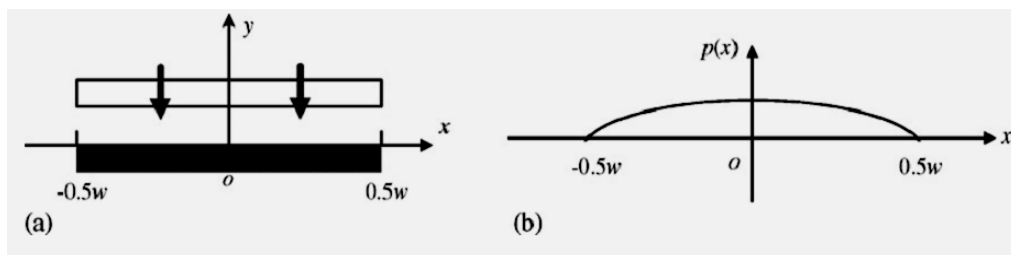


Figura 2.5. Amortiguación por película comprimida (a) vista de sección transversal; (b) la presión de amortiguación, (Fuente: Lee y Chang, 2009)

En general, debido a que las soluciones analíticas se encuentran limitadas sólo a geometrías simples, las estructuras microelectromecánicas son muy complejas

para ser tratadas mediante modelos analíticos, por lo que es necesario hacer uso de la simulación numérica para obtener un resultado más preciso en la etapa final de diseño del dispositivo. La simulación de la amortiguación por película comprimida generalmente puede dividirse en dos niveles: el nivel físico y el nivel de sistemas.

Los métodos a nivel físico tratan la amortiguación en el campo continuo mediante la resolución de la ecuación de Reynolds o la ecuación de Navier-Stokes con el método de elementos finitos (MEF) (Chou *et al.*, 2007). Aunque, en principio es posible obtener resultados bien precisos, su uso puede verse restringido en muchos casos debido a geometrías complejas y los acoplamientos a otros dominios energéticos. Esto significa que debe existir un compromiso entre la precisión deseada y la complejidad del modelo.

Los métodos a nivel de sistemas tratan el efecto de la amortiguación mediante modelos reducidos, los cuales son fácilmente integrados en modelos a nivel de sistema del dispositivo electromecánico por completo. Aunque en sus principios los modelos de sistemas fueron considerados como menos transparentes desde el punto de vista físico y no se ajustaban a las simulaciones predictivas, las diferencias entre los modelos a nivel de sistema y los de nivel físico son un poco vagas. Muchos modelos de circuitos equivalentes tratan la amortiguación con la ecuación de Reynolds y proporcionan resultados precisos con reducido tiempo de cálculo (Schrag y Wachutka, 2004).

Con la finalidad de considerar la amortiguación por película comprimida en modelos donde se presentan placas perforadas, Bao y colaboradores (2003) proponen una ecuación de Reynolds modificada para extender la aplicación de la amortiguación por película comprimida de placas perforadas mediante la adición de un término relacionado con el efecto amortiguador del aire que fluye a través de los orificios existentes. Ellos compararon sus predicciones con datos

experimentales reportados por Kim y colaboradores (1999) y encontraron buena correspondencia entre los resultados.

Cuando el grosor de la película de gas es menor que el camino libre promedio de las moléculas de gas, la ecuación de Reynolds derivada de la teoría de lubricación debe modificarse para considerar el efecto del gas bajo rarefacción. Usualmente, el número de Knudsen (K_n), la razón entre el camino libre promedio (λ) y el grosor característico de la película (h_0), se usa para caracterizar el efecto del flujo de deslizamiento (Ping *et al.*, 2008). La ecuación modificada de Reynolds para películas muy delgadas de gas puede escribirse en su forma adimensional de acuerdo con 2.33.

$$2\Lambda \frac{\partial(PH)}{\partial X} = \frac{\partial(QH^3 \frac{\partial P^2}{\partial X})}{\partial X} + A^2 \frac{\partial(QH^3 \frac{\partial P^2}{\partial Y})}{\partial Y} \quad (2.33)$$

Donde P es la presión en su forma adimensional, $P = p/p_0$, p_0 es la presión ambiental; H es el grosor de la película en forma adimensional, $H = h/h_0$, h_0 es el mínimo grosor de la película; $X = x/L$ y $Y = y/B$ son las coordenadas adimensionales; L es la longitud deslizante; B es el ancho deslizante; $A = L/B$ es la relación de aspecto; Λ es el número de apoyo, $\Lambda = 6\mu UL/p_0(h_0)^2$; μ es la viscosidad dinámica del gas; U es la velocidad; Q es la razón entre Q_p y Q_c ($=D/6$), el cual mide el ajuste en el flujo debido al deslizamiento de moléculas de gas en las superficies sólidas. Una forma conveniente de calcular este factor de flujo es la siguiente correlación :

$$Q_p = \frac{D}{6} + 1,0162 + 0,40134 \ln \left(1 + \frac{1,2477}{D} \right) \quad (2.34)$$

De donde $D = p_0 \cdot h_0 \cdot P \cdot H / \mu (2RT_0)^{1/2}$; R es la constante de los gases (287 J/kg.K); T_0 es la temperatura ambiente (293 K).

Capítulo III

Estructura del trabajo de investigación

El presente trabajo está enmarcado dentro de lo que se conoce como una investigación científica, ya que forma parte del proceso metódico y sistemático dirigido a la solución de problemas o preguntas científicas, mediante la producción de nuevos conocimientos, los cuales constituyen la solución o respuesta a tales interrogantes (Arias, 2004).

Si se analiza en el interés de la persona que investiga, es decir, la orientación o finalidad que persigue, se puede considerar el presente proyecto como una investigación aplicada, cuya finalidad inmediata es la puesta en práctica de los conocimientos adquiridos abocados a la solución de un problema o necesidad presentada en un contexto social determinado (Jiménez, 2000).

También se maneja la investigación experimental ya que se basa en someter a un objeto o grupo de individuos a determinadas condiciones o estímulos (variable independiente), para observar los efectos o reacciones que se producen (variable dependiente) (Arias, 2004).

El desarrollo de la investigación planteada se llevará a cabo de acuerdo con las siguientes fases:

Fase 1: Revisión bibliográfica

Contempla la obtención de documentación (referencias impresas y electrónicas) acerca del principio de funcionamiento, criterios de diseño y construcción de actuadores electrostáticos así como también los sensores de gases. Adicionalmente se realiza el estudio del estado del arte, es decir; el desarrollo actual de la tecnología en el área científica.

Fase 2: Revisión y estudio de herramientas de simulación

Esta fase contempla el estudio de la herramienta de simulación por el MEF llamada COMSOL Multiphysics utilizada por el grupo de investigación Transducers Science and Technology (TST) del instituto MESA+ de la Universidad de Twente de los Países Bajos. No se trabajará con el MEF a nivel de programación ya que COMSOL cuenta con las herramientas gráficas y analíticas suficientes para llevar a cabo la investigación.

Fase 3: Desarrollo de modelos para el análisis de elementos finitos

Como resultado de la revisión bibliográfica y con el conocimiento de las reglas que rigen el proceso de microfabricación de las vigas así como las condiciones para el sensado de gas, se establecen las restricciones geométricas de las estructuras cuyo comportamiento será evaluado.

Al mismo tiempo se analizan los ensayos experimentales a los cuales se someten las estructuras para establecer las restricciones finales en el diseño de las estructuras a estudiar.

De esta forma se cuenta con información suficiente para diseñar los modelos que serán analizados mediante el MEF. Estos modelos se basan en geometrías bidimensionales y tridimensionales de las vigas y de las vigas con sus electrodos de accionamiento.

Fase 4: Ejecución de las simulaciones mediante el MEF

Luego de diseñados los modelos, se establecen los parámetros de simulación para ejecutar el análisis mediante elementos finitos. Una vez definidos los

parámetros se llevan a cabo las corridas de los distintos análisis que ofrece la aplicación COMSOL Multiphysics sobre los modelos planteados. Los resultados obtenidos ofrecen información que será comparada con los resultados obtenidos de pruebas experimentales.

Fase 5: Comparación de resultados y establecimiento de lineamientos futuros

Con base a la comparación de los resultados de la aplicación del MEF y los resultados experimentales, se establecen lineamientos generales con los cuales sea posible continuar futuros trabajos orientados hacia el desarrollo de sensores de gas.

Capítulo IV

Desarrollo del trabajo de investigación

Aspectos preliminares de diseño

En el diseño de un sensor basado en microvigas para la detección de gases es necesario tener en cuenta los modos de operación considerados en la aplicación de estas microestructuras como detectores de gas.

Las vigas en voladizo son la más reciente adición a la familia de sensores de masa (Janata, 2009). De la manera como ha ocurrido con otros tipos de sensores de masa, las microvigas fueron desarrollados para una aplicación completamente diferente: como parte de las puntas para microscopios de sonda de barrido (SPM por Scanning Probe Microscope), a saber en la Microscopía de Fuerza Atómica (AFM por Atomic Force Microscopy). Sin embargo, luego se descubrió que las propiedades estáticas y dinámicas de estas puntas cambian con el ambiente químico en el cual operan (Gimzewski *et al.*, 1993). A diferencia de los otros sensores de masa existentes, las vigas no están construidas ni dependen de materiales piezoeléctricos. Son objetos microfabricados de un material altamente inerte como por ejemplo el nitruro de silicio. La forma y las dimensiones de las vigas son parámetros de diseño y varían de acuerdo con la aplicación. El movimiento de la viga es detectado ópticamente, utilizando un detector sensible a la posición (PSD por Position-Sensitive Detector).

Hay dos modos de operación para las vigas como sensores químicos. Estos son el modo estático, o modo de flexión y el modo dinámico o resonante.

En el modo de flexión, la adsorción de material en una de las caras de la viga ocasiona un esfuerzo que provoca la flexión de la viga, de acuerdo con la ley de Stoney (ver expresión 4.1).

$$\Delta\sigma = \frac{Et^2}{6R_B(1-\nu)} \quad (4.1)$$

Donde σ es el esfuerzo, ν es el cociente de Poisson, t es el grosor, E es el módulo de Young y R_B es el radio de curvatura. Los parámetros a considerar para determinar la deformación dependen del material. Por ejemplo, en el caso del silicio que es un material anisótropo, su módulo de elasticidad dependerá de la orientación de sus planos cristalográficos. Es por ello que para el silicio se puede manejar un valor máximo de E igual a 188 GPa para la dirección $\langle 111 \rangle$ y un valor mínimo de 130 GPa en la dirección $\langle 100 \rangle$ (Hopcroft, 2010). Asimismo, el cociente de Poisson puede adquirir valores que por ejemplo varían desde 0,064 en la dirección $\langle 110 \rangle$ hasta 0,28 en la dirección $\langle 100 \rangle$ (Hopcroft, 2010).

En vista de la influencia de las características de los materiales sobre la respuesta de la viga en voladizo, la información analítica se obtiene mediante una curva de calibración. No existe efecto gravitacional ni inercial en esta medición. El principio de transducción se basa en los cambios asimétricos de la energía superficial y la viga funciona de forma similar a una banda bimetálica. Es un principio interesante de sensado pero poco usual que no será tratado en la presente investigación. Se menciona en el contexto de los sensores de masa solo porque la viga y la instrumentación concomitante son idénticas cuando se aplican en el modo resonante el cual depende de la masa inercial y es por lo tanto un verdadero dispositivo de sensado de masa.

Al momento de considerar la operación de las vigas en modo de resonancia hay que tomar en cuenta la constante elástica equivalente de estas. Esta constante depende de las propiedades del material con el cual han sido fabricadas y de la geometría. Para el caso de vigas largas (largo l) y delgadas (grosor t) de ancho w en las cuales se cumple que $l \gg t$, comúnmente se tiene la expresión aproximada de la constante elástica K que viene dada de acuerdo con la expresión 4.2.

$$K = \frac{Et^3w}{4l^3} \quad (4.2)$$

La frecuencia de resonancia para una viga de sección transversal rectangular viene dada entonces de acuerdo con la expresión 4.3. Donde ρ es la densidad del material de la viga y α_n es un factor que depende del modo de oscilación. En esta expresión se observa que la frecuencia de resonancia no depende del ancho de la viga w . Asimismo, cuando w es mayor o igual que 5 veces el grosor de la viga, E se corrige dividiéndolo por el factor $(1 - \nu^2)$ (Osterberg y Senturia, 1997).

$$F_0 = \frac{t\alpha_n^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{E}{12\rho}}, \quad n = 1, 2, \dots \quad (4.3)$$

La deposición de masa en una cantidad ΔM resulta en la disminución de la frecuencia de resonancia de acuerdo con la expresión 4.4.

$$\Delta M_f = \frac{K(F^{-2} - F_0^{-2})}{4n_c\pi} \quad (4.4)$$

El factor de corrección n_c depende de la geometría y posee un valor de 0,24 para las vigas en voladizo de superficie rectangular más comunes. La expresión 4.4 es válida solo si la constante elástica K no cambia durante el experimento. Esta es una condición que no se satisface si, por ejemplo, la elasticidad de la capa selectiva (capa detectora) cambia al ser expuesta a la muestra.

Considérese microvigas en voladizo con dimensiones típicas como las mostradas en la tabla 4.1, tomando como referencia órdenes de magnitud de longitudes consideradas en el estudio de estas microestructuras para sensado. Al evaluar la expresión 4.3 se obtienen los valores de frecuencia mostrados en la tabla 4.2. Estos resultados corresponden a frecuencias no amortiguadas.

Tabla 4.1. Dimensiones de microvigas en voladizo de sección rectangular.

Ancho, w (μm)	Grosor, t (μm)	Longitud, l (μm)
50	5	450
50	5	325
50	5	225
50	5	125

Tabla 4.2. Frecuencias de resonancia en microvigas para sus 3 primeras frecuencias naturales no amortiguadas.

Ancho, w (μm)	Grosor, t (μm)	Longitud, l (μm)	Primera frecuencia (Hz)	Segunda frecuencia (Hz)	Tercera frecuencia (Hz)
50	5	450	35.381,01	221.744,98	620.954,83
50	5	325	67.831,04	425.120,56	1.190.469,61
50	5	225	141.524,02	886.979,92	2.483.819,31
50	5	125	458.537,83	2.873.814,96	8.047.574,56

De acuerdo con los resultados mostrados en la tabla 4.2, es importante agregar que inherente a la oscilación de un objeto se encuentra la existencia de distintos modos de oscilación asociados a los armónicos. En adición al modo de oscilación lateral, también se encuentra el modo de oscilación torsional. Todos estos modos pueden ser detectados en la dirección x-y mediante un PSD. En el caso de vigas en voladizo resonantes, cada modo de oscilación tiene asociado una sensibilidad (Kim *et al.*, 2001) de acuerdo con el recubrimiento selectivo utilizado para la detección.

En el accionamiento de microvigas, el método tradicionalmente empleado es el encontrado en los sistemas de microscopía de sonda de barrido en modo dinámico. En estos sistemas, se utiliza una microviga accionada piezoeléctricamente para el palpado de la muestra examinada (Ando *et al.*, 2008). A pesar de la efectividad que tiene el accionamiento piezoeléctrico es necesario tener en cuenta el gran espacio requerido para su operación.

Es por ello que en el presente trabajo se explora el método de accionamiento electrostático, el cual es bastante utilizado en los sistemas microelectromecánicos (MEMS por Microelectromechanical Systems). El accionamiento electrostático ha sido utilizado en microvigas en voladizo (Subrahmanyam *et al.*, 2006) y en sistemas con accionamientos de tipo “comb-drive” (Chang *et al.*, 2002).

El accionamiento electrostático tiene como ventaja el hecho de que permite incorporar la viga y su elemento de accionamiento en el mismo proceso de fabricación debido a lo compacto de este último. En el caso de una microviga, es posible lograr su movimiento con tal solo incorporar un electrodo en paralelo con esta. Este electrodo se encuentra fijo y al aplicar una diferencia de potencial entre la viga en voladizo y el electrodo, la primera será atraída al último (ver figura 4.1).

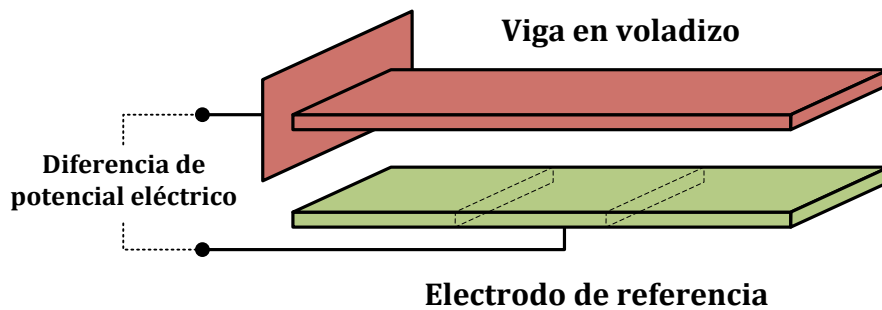


Figura 4.1. Accionamiento electrostático de una microviga en voladizo.

En el marco del presente trabajo de investigación, es necesario realizar el estudio de las microvigas y su accionamiento. Para ello, es conveniente seguir las etapas de diseño como las aplicadas en sistemas microelectromecánicos en general (Senturia, 2001). En este sentido, se consideran 4 niveles: (1) Sistema, (2) Dispositivo, (3) Físico y (4) Proceso. Estos niveles se ilustran en la figura 4.2.

El nivel de dispositivo, mostrado en la figura 4.2, se basa en el planteamiento de formulaciones basadas en elementos básicos utilizados en el análisis de circuitos eléctricos y análisis estructural. En el caso particular del presente proyecto, se trata el caso del accionamiento de una microviga mediante la fuerza de atracción resultante de la aplicación de una diferencia de potencial entre la estructura y un electrodo fijo. Para analizar esto, el uso de la teoría de vigas y su combinación con la deducción simple de la fuerza electrostática existente entre dos placas paralelas separadas una distancia dada, arroja una primera aproximación en el enfoque de nivel de dispositivo.

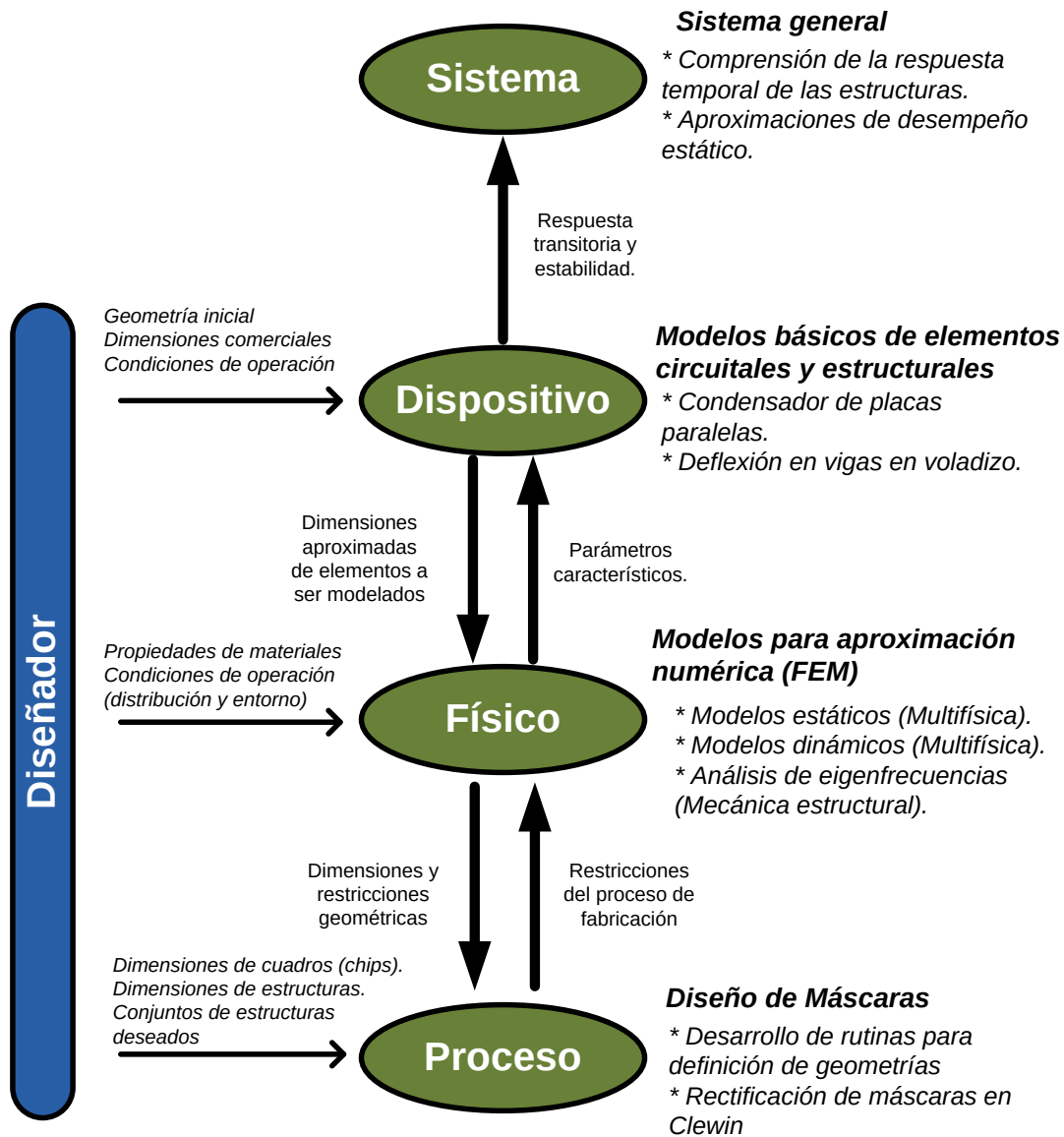


Figura 4.2. Niveles de diseño considerados en el diseño de un sistema microelectromecánico.

En la primera aproximación, se analiza el caso de una viga en voladizo sometida a una carga transversal distribuida parcialmente en una sección de la estructura (ver figura 4.3b). Igualmente, se plantea el caso de una viga sometida a una carga intermedia concentrada (ver figura 4.3a). Para ello, se recurre a la literatura de la teoría de vigas y placas (Young y Budynas, 2002).

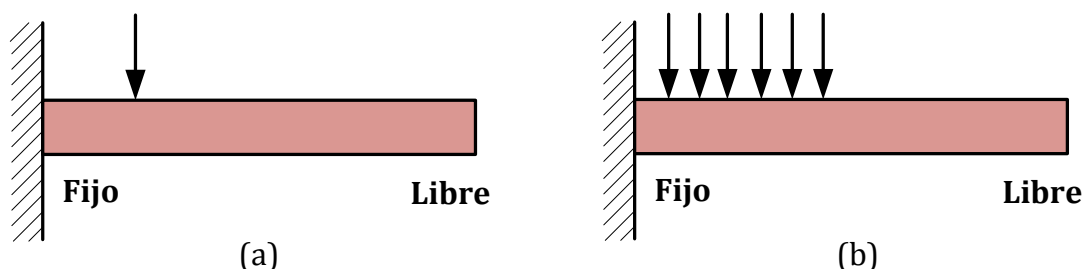


Figura 4.3. Viga en voladizo. (a) Con carga intermedia aplicada (b) con carga parcialmente distribuida

La tabla 4.3 presenta las expresiones relacionadas con el cálculo de la deflexión para vigas elásticas y rectas de acuerdo con la literatura revisada (Young y Budynas, 2002). Estas expresiones aportan soluciones para los casos planteados en la figura 4.4.

En las tablas 4.3 y 4.4, así como en la figura 4.4 se tiene que: W = carga (fuerza); w = carga unitaria (fuerza por unidad de longitud). R_A y R_B son las reacciones verticales en los extremos de la izquierda y derecha, respectivamente, siendo positivas al estar en sentido ascendente. M_A y M_B son los momentos de las reacciones en los extremos izquierdo y derecho, respectivamente. Todos los momentos son positivos cuando ocasionan la compresión en la porción superior de la sección transversal de la viga. La fuerza de corte transversal V es positiva cuando actúa hacia arriba en el extremo izquierdo de una porción de la viga. Todas las cargas aplicadas, acoples y desplazamientos son positivos de acuerdo con la referencia de la figura 4.4. Todas las deflexiones son positivas al ser hacia arriba, y todas las inclinaciones son positivas cuando son hacia arriba y a la derecha. E es el módulo de elasticidad del material de la viga, e I es el momento de inercia del área respecto al eje del centroide de la sección transversal de la viga (Young y Budynas, 2002).

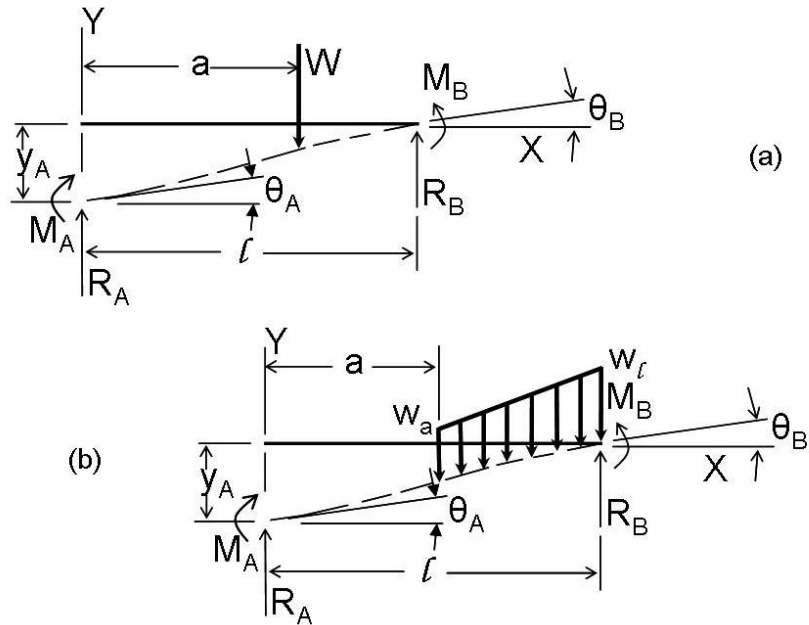


Figura 4.4. Esquemas utilizados para el accionamiento de vigas empotradas. (a) Con carga intermedia concentrada (b) con carga parcialmente distribuida. (Young y Budynas, 2002)

Se establece la función de escalón unitario como $\langle x-a \rangle^0$ donde el uso de los paréntesis angulares $\langle \rangle$ se define como sigue: Si $x < a$, entonces $\langle x-a \rangle^0 = 0$; Si $x > a$, entonces $\langle x-a \rangle^0 = 1$. En $x = a$ la función de escalón unitario no se encuentra definida, así como un cortante vertical se encuentra indefinido directamente debajo de una carga concentrada aplicada. El uso de los paréntesis angulares se extiende a otros casos que incluyen el potencial de la función de escalón unitario y la función ordinaria $(x-a)^n$. De esta manera la cantidad $\langle x-a \rangle^n$ adquiere valor cero cuando $x < a$ y es $(x-a)^n$ si $x > a$.

Tabla 4.3. Fórmulas de corte, momento, inclinación y deflexión para vigas rectas elásticas, considerando carga intermedia concentrada (ver figura 4.3a). (Young y Budynas, 2002)

Corte transversal	
$V = R_A - W\langle x - a \rangle^0$	(4.5)
Momento flector	
$M = M_A + R_A x - W\langle x - a \rangle$	(4.6)
Inclinación	
$\theta = \theta_A + \frac{M_A x}{EI} + \frac{R_A x^2}{2EI} - \frac{W}{2EI} \langle x - a \rangle^2$	(4.7)
Deflexión	
$y = y_A + \theta_A x + \frac{M_A x^2}{2EI} + \frac{R_A x^3}{6EI} - \frac{W}{6EI} \langle x - a \rangle^3$	(4.8)
Valores de frontera	
$R_A = 0 \quad M_A = 0 \quad \theta_A = \frac{W(l-a)^2}{2EI} \quad y_A = \frac{-W}{6EI} (2l^3 - 3l^2 a + a^3)$ $R_B = W \quad M_B = -W(l-a) \quad \theta_B = 0 \quad y_B = 0$	

Considerando la deformación lateral que normalmente acompaña los esfuerzos en las fibras, las vigas de gran ancho (como las tiras metálicas), presentan en su comportamiento mayor rigidez que las expresiones mostradas. El efecto de esta rigidez se toma en cuenta al emplear $E/(1-\nu^2)$ en lugar de E en las fórmulas para deflexión y curvatura si las vigas son muy amplias (Young y Budynas, 2002). Este término se conoce generalmente como el módulo de placa (Young y Budynas, 2002) e indica que el módulo efectivo $\tilde{E}$ se aproxima al módulo de Young E para vigas angostas y al módulo de placa para vigas anchas. Una viga se considera ancha cuando la relación entre su ancho “w” y grosor “t” cumple $w \geq 5t$. Por lo tanto será considerada una viga angosta cuando $w < 5t$ (Osterberg y Senturia, 1997).

Tabla 4.4. Fórmulas de corte, momento, inclinación y deflexión para vigas rectas elásticas. Para una carga distribuida parcialmente (ver figura 4.3b). (Young y Budynas, 2002)

Corte transversal	
$V = R_A - w_a \langle x - a \rangle - \frac{w_l - w_a}{2(l - a)} \langle x - a \rangle^2$	(4.9)
Momento flector	
$M = M_A + R_A x - \frac{w_a}{2} \langle x - a \rangle^2 - \frac{w_l - w_a}{6(l - a)} \langle x - a \rangle^3$	(4.10)
Inclinación	
$\theta = \theta_A + \frac{M_A x}{EI} + \frac{R_A x^2}{2EI} - \frac{w_a}{6EI} \langle x - a \rangle^3 - \frac{w_l - w_a}{24EI(l - a)} \langle x - a \rangle^4$	(4.11)
Deflexión	
$y = y_A + \theta_A x + \frac{M_A x^2}{2EI} + \frac{R_A x^3}{6EI} - \frac{w_a}{24EI} \langle x - a \rangle^4 - \frac{w_l - w_a}{120EI(l - a)} \langle x - a \rangle^5$	(4.12)
Valores de frontera	
$R_A = 0 \quad M_A = 0 \quad \theta_A = \frac{w_a}{6EI} (l - a)^3 + \frac{w_l - w_a}{24EI} (l - a)^3$ $y_A = \frac{-w_a}{24EI} (l - a)^3 (3l + a) - \frac{w_l - w_a}{120EI} (l - a)^3 (4l + a)$ $R_B = \frac{w_a + w_l}{2} (l - a) \quad M_B = -\frac{w_a}{2} (l - a)^2 - \frac{w_l - w_a}{6} (l - a)^2 \quad \theta_B = 0 \quad y_B = 0$	

En otro orden de ideas, en lo que al accionamiento electrostático se refiere, se tiene el caso ilustrado en la figura 4.5. Mediante el modelo de condensador de placas paralelas, es posible determinar la fuerza electrostática que un electrodo ejerce sobre la viga.

Calculando la derivada parcial respecto de la separación entre placas a la expresión de la coenergía del condensador de placas paralelas, es posible determinar la fuerza electrostática que resulta en la expresión 4.13. Donde ϵ es la permitividad del espacio entre el electrodo y la viga, V es la diferencia de

potencial eléctrico (electrodo-viga), A es la superficie del electrodo (la que enfrenta a la viga) y g es la separación inicial.

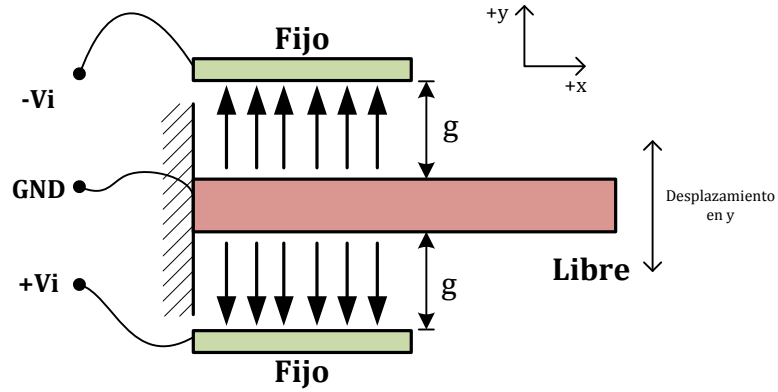


Figura 4.5. Accionamiento electrostático para el caso estudiado

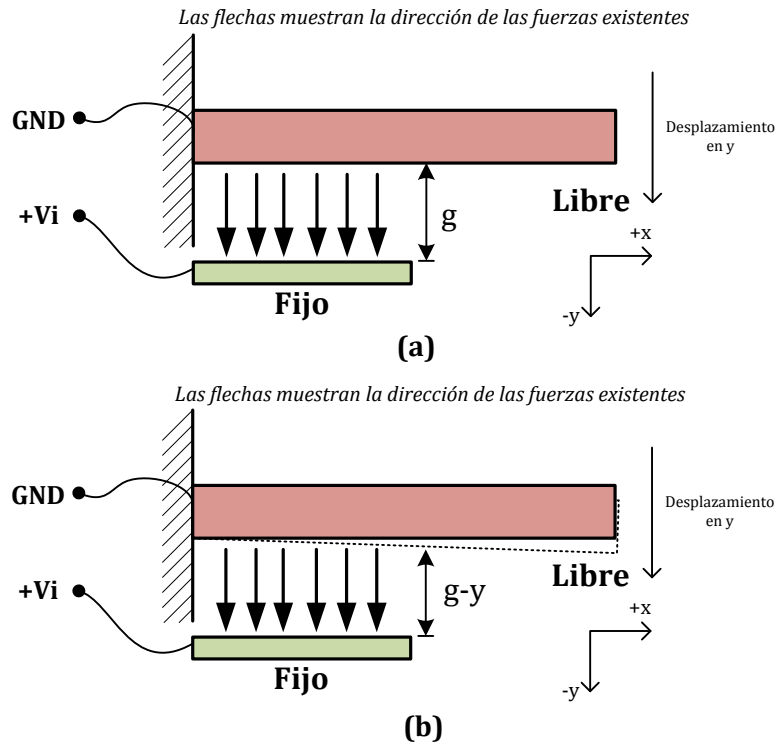


Figura 4.6. Accionamiento electrostático con un electrodo.

(a) Para la separación inicial (b) con separación reducida debido a la deflexión

$$F = \frac{\epsilon AV^2}{2g^2} \quad (4.13)$$

La expresión 4.13 puede expresarse en función de la deflexión en la viga $y(x)$ y la separación inicial como se muestra en la expresión 4.14. De ella puede observarse que mientras la deflexión aumenta, la separación inicial disminuye y en consecuencia la fuerza electrostática aumenta.

$$F = \frac{\epsilon AV^2}{2(g-y(x))^2} \quad (4.14)$$

Al utilizar la expresión 4.14, se determina la fuerza electrostática debida a la separación inicial. De esta manera, si se substituye esta fuerza (o su equivalente) en las expresiones 4.8 y 4.12, es posible estimar la deflexión en la viga despreciando el incremento en la fuerza existente por efecto del aumento de la separación (ver figura 4.6). Se determina así un resultado aproximado para la deflexión, inferior al esperado en la realidad.

Haciendo uso de la expresión 4.8 es posible determinar la deflexión en las vigas con las dimensiones presentadas en la tabla 4.2, considerando una carga distribuida obtenida de acuerdo con la expresión 4.13. De hecho se realizaron diversos cálculos preliminares estableciendo electrodos de accionamiento de dimensiones iguales a las vigas actuadas, así como también electrodos de longitudes inferiores a las que poseen las vigas teniendo en cuenta que para una aplicación de sensado, es conveniente que solo la punta de la viga se encuentre expuesta al gas de estudio.

Los resultados de los cálculos preliminares no se presentan por ser muy extensos. Sin embargo se llega a las siguientes observaciones:

- Asumiendo un grosor menor a 10 μm , para las longitudes dadas es posible alcanzar frecuencias fundamentales de resonancia en el orden de

kHz mientras que en las vigas de menor longitud, los terceros armónicos se encuentran en el orden de MHz.

- Considerando separaciones iniciales de $3\text{ }\mu\text{m}$ entre electrodos y vigas, es posible obtener deflexiones en el orden de micras y décimas de micras en las estructuras de las longitudes mencionadas, mediante magnitudes de diferencia de potencial eléctrico superiores a 100 V. Estas magnitudes de potencial eléctrico serán efectivas para longitudes de electrodos alrededor de $100\text{ }\mu\text{m}$, y con un ancho mayor de $30\text{ }\mu\text{m}$ tanto en la viga como el electrodo que la acciona (los anchos deben ser iguales).

La información antes obtenida es limitada pero suficiente para abordar el nivel físico de diseño (ver figura 4.2). Para ello es necesario plantear análisis basados en el método de los elementos finitos. La herramienta computacional a emplear es COMSOL Multiphysics®. Esta herramienta permite analizar el problema numérico de dominios acoplados que implica la interacción entre la viga y el electrodo de accionamiento. Con ayuda del Método de los Elementos Finitos (MEF) se elaboran y evalúan los diseños de microvigas tomando en cuenta las restricciones obtenidas del nivel de diseño del dispositivo. En este sentido, es necesario llevar a cabo los siguientes análisis:

- Análisis paramétrico estático, para determinar la deflexión en cada viga como consecuencia de un rango de potencial eléctrico aplicado a un electrodo paralelo a la estructura. No se considera el efecto de la amortiguación en este análisis.
- Análisis de frecuencias de modos propios. Este permite el conocimiento de las frecuencias para los modos de oscilación de las vigas, así como también la deformación que las mismas describen.

- Análisis de la respuesta temporal. Con el cual se determina la respuesta temporal (flexión en la viga en función del tiempo) como consecuencia de la aplicación de una señal tipo escalón de potencial eléctrico al electrodo de accionamiento. En este caso se considera el efecto de la amortiguación sobre la estructura en movimiento ya que el objetivo es estimar el factor de calidad resultante.

Los resultados obtenidos en el nivel físico permiten validar el comportamiento real de las microestructuras resultantes al llevar a cabo el nivel de Proceso. Se obtiene un conjunto de muestras del proceso de fabricación. Estas muestras son sometidas a las siguientes pruebas experimentales:

- Ensayo para la medición de deflexión en las vigas en función del potencial eléctrico aplicado. De esta manera se compara y valida la información que arroja el análisis estático mediante el método de los elementos finitos.
- Ensayo de inspección de la frecuencia de resonancia de las microvigas, con el cual se verifican los resultados que aporta el análisis de frecuencias de los modos propios mediante el método de los elementos finitos.
- Ensayo para la determinación de la ruptura dieléctrica en electrodos para separaciones comprendidas entre 3 μm y 20 μm . Este ensayo aporta información que ayuda a establecer criterios para el accionamiento “seguro” de las microvigas, tomando en cuenta las características propias que aporta el proceso de fabricación sobre las muestras.

Las etapas de diseño de nivel Físico y de Proceso se presentan en mayor detalle a lo largo de las próximas secciones.

Restricciones adicionales

Como se observa en la figura 4.2, las etapas de diseño del sistema microelectromecánico siguen un esquema concurrente. Esto quiere decir que por ejemplo, el nivel físico no se desarrolla sin tomar en cuenta elementos del nivel de fabricación. Asimismo, este último nivel, toma información de los niveles físicos y de dispositivo.

Es por ello que es necesario realizar la descripción de ciertos elementos relevantes del proceso de fabricación pues de ellos depende el diseño definitivo de las microvigas que serán estudiadas en el presente trabajo de investigación.

A continuación se lleva a cabo la descripción del proceso de fabricación asociado al presente trabajo. Esta descripción se basa en la información proporcionada por el Dr. Léon Woldering (Universidad de Twente) quien condujo el proceso de construcción de las muestras a ensayar.

El proceso de fabricación empleado para obtener los dispositivos de las obleas fue desarrollado con la finalidad de permitir la libertad de diseñar dentro de ciertas restricciones o reglas, las cuales deben aplicarse al momento de efectuar el diseño de las máscaras que constituyen los diseños con los que se da inicio a la fabricación.

El proceso puede describirse en 5 fases generales que se ilustran en la figura 4.7 y se mencionan a continuación:

1. Preparación de la máscara de grabado mediante fotolitografía.
2. Grabado del dispositivo mediante DRIE (Deep Reactive Ion Etching).
3. Corte de la oblea en cuadros.
4. Liberación de estructuras mediante vapor de ácido fluorhídrico (HF).
5. Separación de las secciones cortadas.

Luego de ejecutadas las etapas del proceso, las muestras fueron inspeccionadas mediante microscopia óptica y microscopia electrónica de barrido para así conocer si el paso se realizó con éxito. Adicionalmente, con estas técnicas se realizó la caracterización de las obleas luego de completada la fabricación.

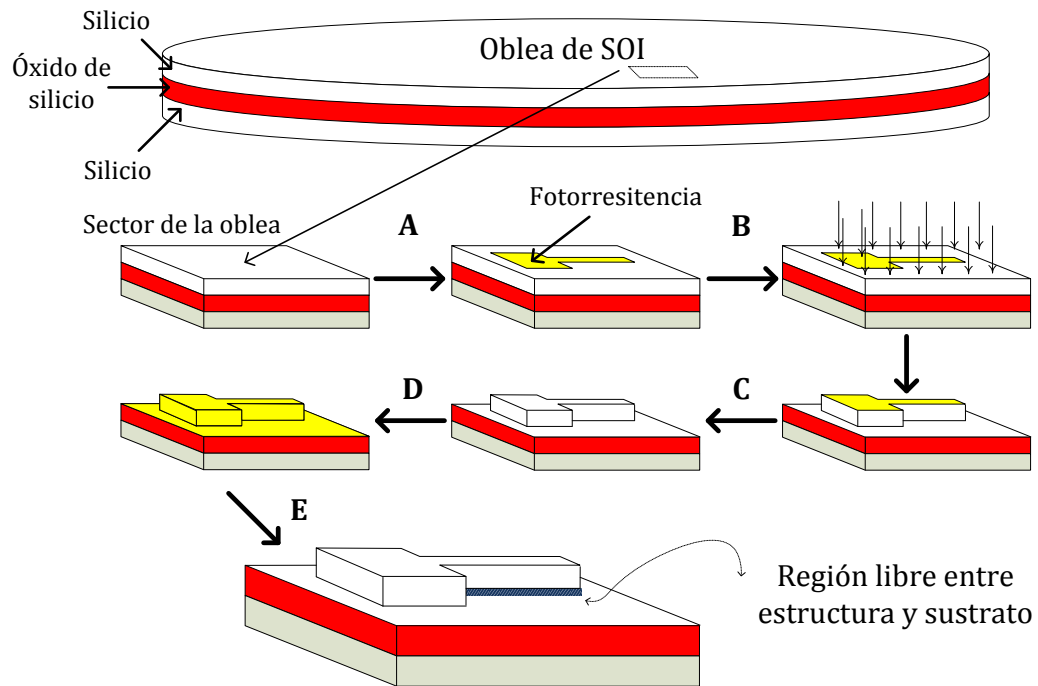


Figura 4.7. Esquema resumido del proceso Pianoforte. Una oblea adecuada es seleccionada y cubierta con fotorresistencia. En la fotorresistencia se establecen los patrones con los diseños de cada muestra para que actúe como máscara de grabado (A). Se transfiere el patrón de la máscara de grabado al silicio mediante DRIE (B), seguido por la remoción de la fotorresistencia (C). Se deposita una capa protectora gruesa de fotorresistencia encima de los dispositivos (resultantes)(D), para luego realizar el corte en cubos. Se remueve la fotorresistencia y las estructuras son liberadas de la capa de óxido mediante técnicas de grabado por vapor de HF (E).

Los diseños de las máscaras consideradas para este trabajo, y planteadas en la primera etapa del proceso de fabricación, se apoyaron en aproximaciones analíticas propias de la etapa de diseño correspondiente a dispositivo.

El proceso de fabricación emplea obleas de Silicio sobre aislador (SOI por silicon-on-insulator). En cada oblea, se tiene una capa de silicio de $50\mu\text{m}$ de grosor y la capa de óxido de $3\mu\text{m}$. De acuerdo con información suministrada por el responsable del proceso de fabricación, Dr. Leon Woldering, para que las estructuras tengan el aspecto final deseado, cada máscara debe seguir las siguientes reglas en su diseño:

1. Ancho mínimo recomendado de la viga: $3\mu\text{m}$.
2. Ancho máximo recomendado de la viga: $10\mu\text{m}$, $7\mu\text{m}$ en el caso de vigas que se crucen.
3. Separación mínima entre estructuras: $3\mu\text{m}$.
4. Separación máxima entre estructuras: $50\mu\text{m}$ (arbitrario).
5. Tamaño mínimo de una estructura fija (de manera tal que el grabado posterior no la libere de la oblea): $70\mu\text{m} \times 70\mu\text{m}$.
6. Las estructuras a perforar deben poseer una perforación mínima de $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$ de sección cuadrilateral.

Las dimensiones de las “vigas” a las que hace referencia Pianoforte se presentan en la figura 4.8, y corresponden a un término referencial usado para todos los diseños manejados en el proceso.

En Pianoforte, el grabado se realiza sobre la superficie de la capa de silicio hasta llegar a la capa de óxido. En este sentido, para desarrollar arreglos efectivos para la flexión de estructuras, las vigas deben accionarse en el plano, para que así su deflexión sea paralela a la superficie de la capa de óxido. Esto impone como

restricción que el grosor de la viga en la oblea sea $50\mu\text{m}$ aproximadamente (impuesto por el grosor de la capa de silicio).

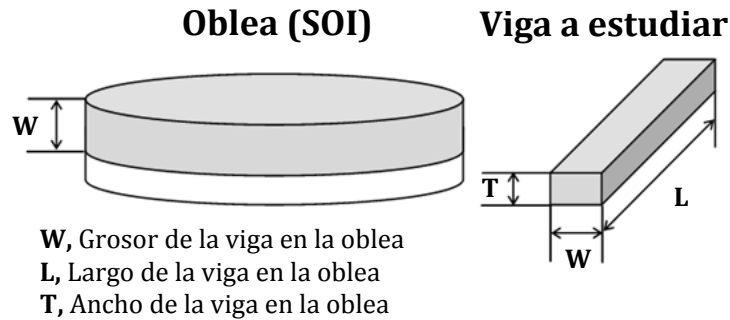


Figura 4.8. Oblea empleada en Pianoforte y dimensiones de la viga de acuerdo con el proceso de fabricación

Debido a la orientación que tendrá la viga en el sustrato, es importante aclarar lo referente a las dimensiones. El grosor definido por el proceso de fabricación para una viga, viene a ser en realidad su ancho desde el punto de vista de los términos asociados a las vigas y tratados hasta ahora. Asimismo, el ancho al que el proceso de fabricación se refiere corresponde al grosor de la viga como estructura.

Dos aspectos generales son de interés al momento de inspeccionar el funcionamiento de microvigas accionadas mediante potencial eléctrico. El primero de ellos, corresponde al máximo potencial de accionamiento al que estas pueden someterse sin que ocurra ruptura dieléctrica del gas comprendido dentro del espacio que separa la viga y el electrodo (en el orden de $3\mu\text{m}$). El segundo aspecto tiene que ver con el accionamiento propiamente dicho donde se mide la flexión ocurrida en la viga ante una señal de potencial eléctrico de amplitud variable en condiciones estacionarias y cuando oscila en condiciones de resonancia.

En este sentido, los diseños de máscara desarrollados en el proceso de fabricación, corresponden a vigas ubicadas entre electrodos de accionamiento de tipo plano y adicionalmente, también se consideran par de electrodos separados a una distancia determinada, para conocer el potencial de ruptura.

Las máscaras se desarrollan mediante el software Clewin 4, el cual utiliza código de Matlab para la definición de las máscaras de las estructuras.

En el diseño de las máscaras de las vigas, se plantean 4 longitudes distintas de vigas en combinación con 4 longitudes de electrodos. Los parámetros a considerar en el diseño se presentan en la figura 4.9, la cual muestra los parámetros más importantes en la definición de las estructuras, que son g_1 , L_c , L_2 y t , correspondientes a la separación viga-electrodo, longitud de la viga, longitud del electrodo y grosor de la viga respectivamente. Los valores de las dimensiones antes mencionadas, así como el resto presentado en la figura 4.9 se presentan en la tabla 4.5.

Las dimensiones de la tabla 4.5 son las de mayor relevancia en la definición de las máscaras. En el diseño final, es necesario incorporar las pistas donde se aplican las señales de accionamiento (terminales), así como una estructura cercana al extremo libre de la viga para garantizar que del proceso de fabricación se obtengan la menor cantidad de imperfecciones superficiales. Aunque no se entrará en mayores detalles, la figura 4.10 muestra el aspecto final de la máscara para una viga de longitud dada.

En el diseño de las máscaras para la evaluación de potencial de ruptura, las dimensiones a considerar son el ancho de los electrodos y la separación entre estos, identificados en la figura 4.11 como w y g respectivamente. El valor de w en todas las máscaras es $70\mu\text{m}$ y g adopta valores comprendidos entre $3\mu\text{m}$ y $20\mu\text{m}$ incrementados en $1\mu\text{m}$.

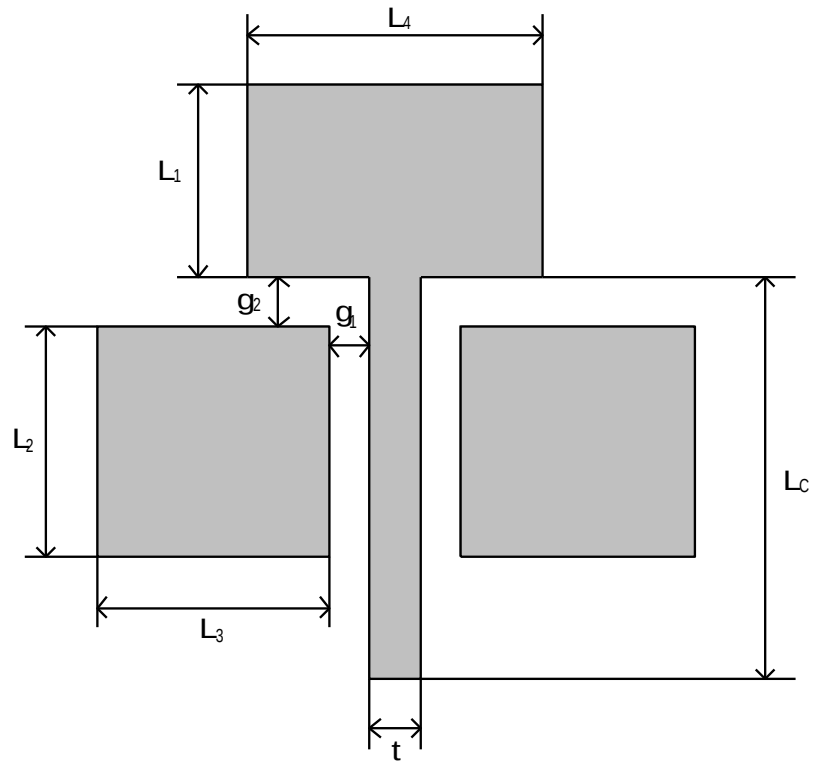


Figura 4.9. Diseño de máscaras para accionamiento de microvigas

Tabla 4.5. Dimensiones de las máscaras para el accionamiento de microvigas

Máscara	Dimensiones							
	L ₁ (μm)	L ₂ (μm)	L ₃ (μm)	L ₄ (μm)	L _c (μm)	t (μm)	g ₁ (μm)	g ₂ (μm)
1,2,3,4	≥70	70, 80, 90, 100	≥70	≥70	125	3	3	5
5,6,7,8	≥70	70, 80, 90, 100	≥70	≥70	225	3	3	5
9,10,11,12	≥70	70, 80, 90, 100	≥70	≥70	325	3	3	5
13,14,15,16	≥70	70, 80, 90, 100	≥70	≥70	450	3	3	5

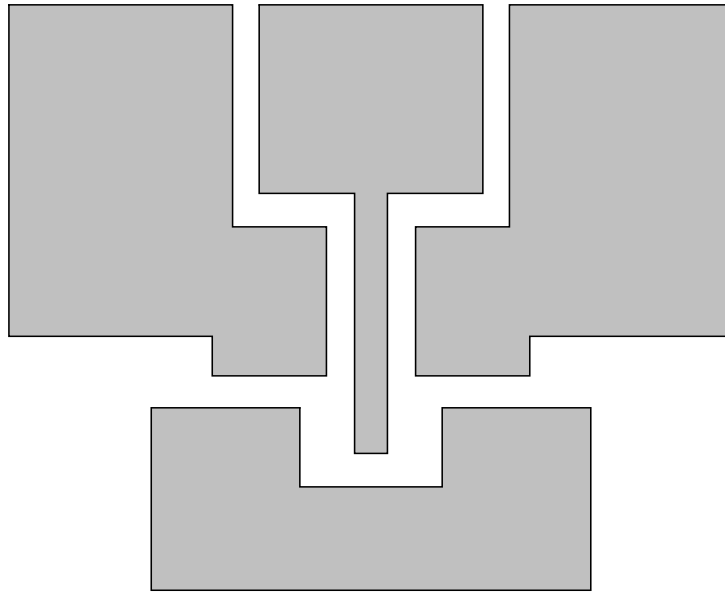


Figura 4.10. Aspecto final de las máscaras para accionamiento de microvigas

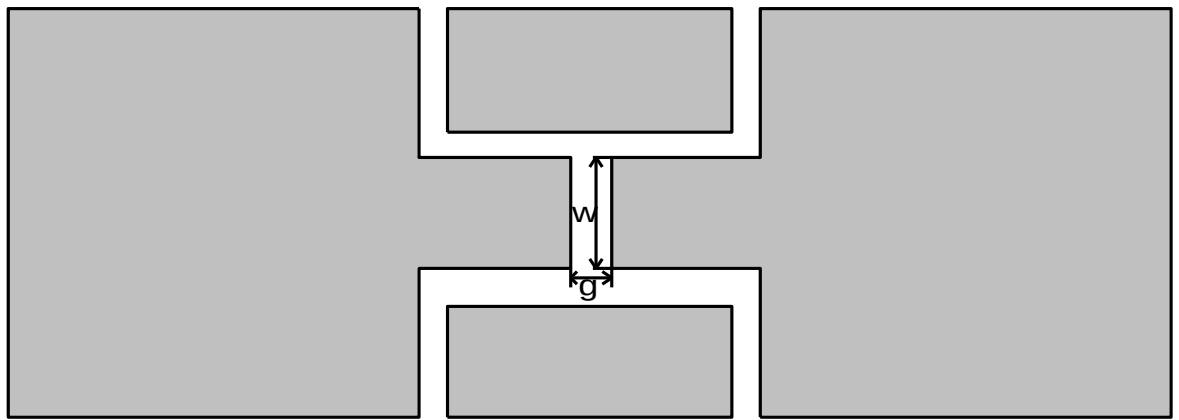


Figura 4.11. Máscaras para determinación de potencial de ruptura

Capítulo V

Planteamiento de modelos en elementos finitos

Para realizar el análisis mediante el MEF, se hace uso de la herramienta computacional COMSOL Multiphysics® la cual cuenta con modos de aplicación con los cuales se realizan diversos tipos de análisis sobre modelos definidos. Los modos de aplicación consisten de plantillas predefinidas e interfaces para el usuario, configuradas con ecuaciones y variables para áreas específicas de la física. Las interfaces consisten de cajas de diálogo personalizadas para la definición de la física en subdominios y entornos, así como bordes y contornos, mediante ecuaciones diferenciales parciales predefinidas.

Existen grupos de modos de aplicación optimizados y disponibles para disciplinas específicas. Entre estos vale la pena destacar el Módulo de Sistemas Microelectromecánicos (MEMS).

Por la naturaleza de los casos que abarca la investigación, correspondiente a microestructuras mecánicas sometidas a esfuerzos debidos a campos eléctricos, es necesario emplear el modo de aplicación de Mecánica Estructural junto al modo de aplicación de Electromagnetismo (específicamente Electrostática) para analizar el efecto del potencial eléctrico sobre la microviga a flectar. Como el efecto de aplicar un potencial eléctrico sobre la microestructura es la deflexión de la misma, un análisis apropiado debe tomar en consideración las deformaciones ya que estas tienen efecto en los desplazamientos definitivos obtenidos del modelo. Para ello debe emplearse el modo de aplicación de Mallado Deformado (ALE por Arbitrary Lagrangian-Eulerian), capaz de actualizar la geometría de la estructura en la medida que sufre cambios con la finalidad de considerar estos en los resultados.

Todos los modos de aplicación para Mecánica Estructural permiten llevar a cabo análisis estacionarios (independientes del tiempo), transitorios (dependientes

del tiempo) y de valores propios. Las ecuaciones a resolver y las herramientas de solución varían de acuerdo con el tipo de análisis.

Los análisis estáticos siempre emplean la misma ecuación pero invocan diferentes herramientas de solución. COMSOL Multiphysics® basa la implementación de los modos de aplicación de mecánica estructural en formulaciones débiles de las ecuaciones de equilibrio en las componentes globales de esfuerzo. Una ecuación en derivadas parciales en forma débil, se produce al multiplicar la forma general de la ecuación diferencial por funciones arbitrarias llamadas funciones de prueba e integrar a lo largo del dominio computacional. La ecuación de equilibrio en su forma compacta viene dada por 5.1.

$$-\nabla \cdot \sigma = F \quad (5.1)$$

Donde σ es el tensor de esfuerzo. Al sustituir las relaciones esfuerzo-deformación y deformación-desplazamiento en 5.1 se obtiene la ecuación de Navier (5.2) considerada en la solución para análisis estáticos.

$$-\nabla \cdot (c \nabla u) = F \quad (5.2)$$

La diferencia existente entre el análisis de valores propios y el estático es que el primero considera la masa. Para obtener las frecuencias de los modos propios, se emplea la formulación planteada en 5.3.

$$-\lambda d_a u - \nabla \cdot c_{sta} \nabla u = 0 \quad (5.3)$$

Donde la frecuencia propia se relaciona con el valor propio λ de acuerdo con la expresión 5.4. Y la densidad aparece en d_a .

$$f = \frac{\sqrt{\lambda}}{2\pi} \quad (5.4)$$

Un problema dependiente del tiempo o transitorio requiere la introducción de la Segunda Ley de Newton, reflejada en la expresión 5.5.

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \nabla \cdot c \nabla u = F \quad (5.5)$$

Mientras que cuando se realiza un análisis de respuesta en frecuencia, se procede a la búsqueda de la respuesta en estado estacionario del sistema (o modelo) ante cargas de excitación de tipo armónica. Las cargas pueden tener amplitud y cambios de fase que dependen de la frecuencia de excitación, f de acuerdo con lo mostrado en la expresión 5.6.

$$F_{freq} = F(f) \cdot \cos\left(2\pi f + F_{ph}(f) \cdot \frac{\pi}{180}\right) \quad (5.6)$$

Donde $F(f)$ es la amplitud y $F_{ph}(f)$ es el cambio de fase de la carga.

Para explicar el planteamiento del análisis de un modelo en COMSOL Multiphysics® 3.5a es conveniente hacer referencia al caso de interés en el presente trabajo. El cual corresponde al de una viga ubicada entre dos electrodos planos de forma tal que cuando se aplica una diferencia de potencial entre alguno de estos y la viga, ocurre la flexión de esta última. La figura 5.1 ilustra el caso de un electrodo actuando sobre la viga.

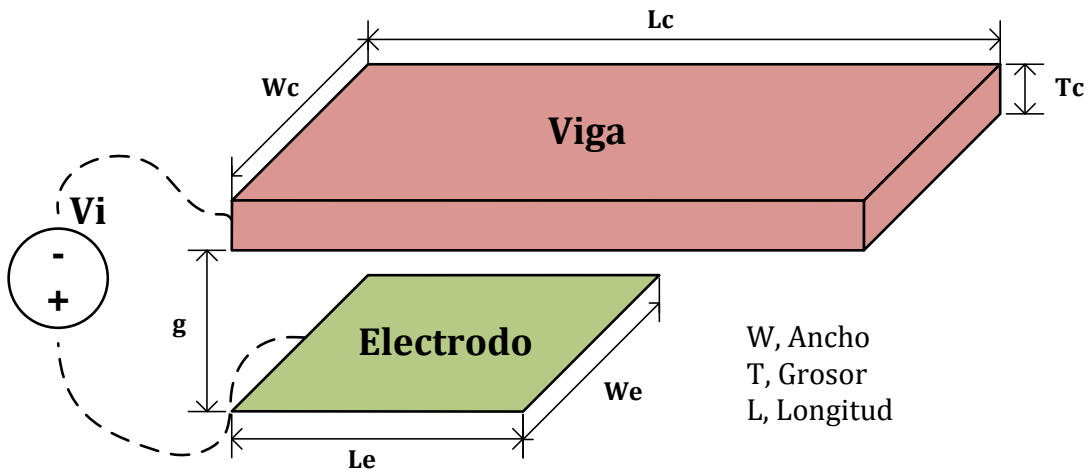


Figura 5.1. Generalidad del caso analizado. (V_i es el potencial eléctrico aplicado)

El desarrollo de un modelo mediante la herramienta COMSOL Multiphysics 3.5a se describe en los párrafos siguientes, tomando en cuenta el caso de la microviga actuada mediante un campo eléctrico, producto de la diferencia de potencial eléctrico entre ella y un electrodo fijo paralelo a la misma. Este caso corresponde con el objeto de estudio del presente trabajo.

En la figura 5.1, la fuerza electrostática ocasionada por el potencial eléctrico aplicado entre el electrodo y la viga provoca la flexión de la última hacia el electrodo que se encuentra fijo. Para conocer la fuerza electrostática, debe determinarse el campo eléctrico en el espacio de aire alrededor de los elementos estudiados. En la medida que la viga se deforma, su geometría y la del volumen de aire a su alrededor cambian. Los desplazamientos que ocurren deben ser considerados al momento de determinar el campo del potencial. Cuando la geometría se deforma, el campo eléctrico entre las dos estructuras cambia de forma continua como resultado de la flexión.

El campo electrostático en el medio (aire) y la viga viene gobernado por la ecuación de electrostática 5.7.

$$-\nabla \cdot (\epsilon \nabla V) = 0 \quad (5.7)$$

Donde las derivadas son respecto a las coordenadas espaciales. Estas son independientes de la deformación del material. El modelo numérico, sin embargo, necesita representar el potencial eléctrico y sus derivadas en una malla en movimiento con respecto a un marco espacial. Para la determinación del campo eléctrico, se emplea el modo de aplicación de Electrostática (Electrostatics), mientras que para conocer las deformaciones, se utiliza el modo de aplicación para Deformación en el Plano (Plain Strain) perteneciente a Mecánica Estructural. Las transformaciones necesarias para considerar las deformaciones del mallado son llevadas a cabo al incorporar el modo de aplicación de Mallado Deformado (Deformed Mesh, ALE), el cual también cuenta

con ecuaciones de “suavizado” que gobiernan el movimiento de la malla en el dominio comprendido por aire. En los casos donde se desea analizar la respuesta transitoria (con un potencial eléctrico variable en el tiempo), se emplea el modo de aplicación de Amortiguación por película comprimida (Squeezed film damping), para tomar en cuenta la amortiguación asociada al volumen de aire que rodea a la viga y que se encuentra entre la separación viga-electrodo.

La superficie inferior de la viga se encuentra a un potencial eléctrico de 0V (referencia), mientras que la superficie del electrodo a V_i (respecto de la referencia). El resto de las regiones que se encuentran alrededor de la viga y electrodo están aisladas eléctricamente. Para evaluar la distribución total de carga superficial en la viga con buena precisión, la herramienta COMSOL permite el uso de restricciones débiles, que corresponden a la reformulación de la condición de borde de Dirichlet en una ecuación en forma débil.

La densidad de fuerza que actúa sobre la superficie de la viga (inferior) resulta de emplear el tensor de esfuerzo de Maxwell que viene dado de acuerdo con la expresión 5.8.

$$F_{es} = -\frac{1}{2}(E \cdot D)n + (n \cdot E)D^T \quad (5.8)$$

Donde E y D son los vectores de campo eléctrico y desplazamiento eléctrico, respectivamente, y n es el vector saliente normal a la superficie del contorno de la viga. Esta fuerza siempre se orienta a lo largo de la normal del contorno.

Las ecuaciones de Navier que gobiernan la deformación de sólidos son escritas de forma apropiada en un sistema de coordenadas que siga y se deforme con el material. En este caso, esas coordenadas de referencia o material son idénticas a las coordenadas actuales del mallado. Por lo tanto, las ecuaciones de sólidos no se ven afectadas por el uso de ALE para el campo electrostático.

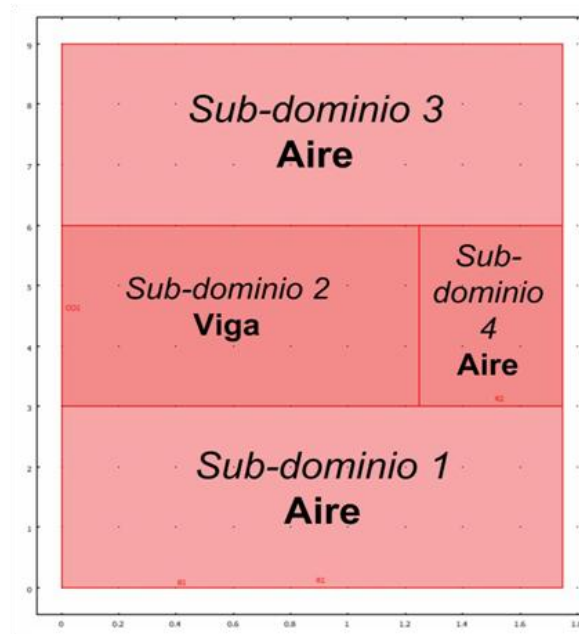
Por otro lado, en lo que respecta a la definición de la geometría, debido a la simplicidad de formas en los elementos analizados y buscando siempre el uso eficiente de los recursos de cómputo, la representación en 2D de la geometría resulta útil y es suficiente en el desarrollo de análisis estáticos, paramétricos, transitorios y de respuesta en frecuencia. En el análisis de frecuencias propias es recomendable emplear una geometría en 3D ya que esta refleja convenientemente los modos torsionales que pudiesen ocurrir en la estructura a ciertas frecuencias. Las geometrías de los modelos en 2D y 3D se presentan en la figura 5.2.

El ajuste de la física del modelo se orienta en dos tareas: (a) el ajuste de los sub-dominios y (b) el ajuste de los contornos. La cantidad y parámetros a ajustar varían de acuerdo con el análisis que se desee llevar a cabo. Los sub-dominios se indican en la figura 5.2 y corresponden a estructuras o volúmenes que comparten las mismas propiedades y restricciones, y que en conjunto son analizadas por la herramienta y definen el modelo completo.

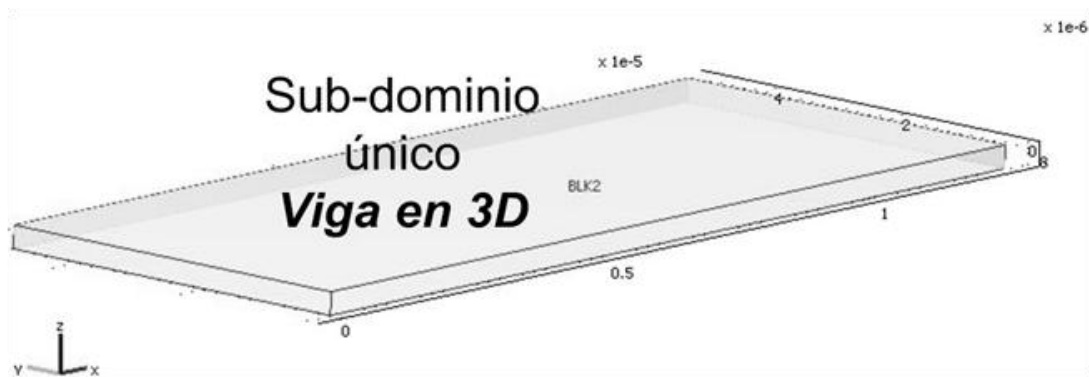
Los contornos, son los límites de los sub-dominios del modelo, y en consecuencia, establecen las condiciones y restricciones de frontera entre los subdominios del modelo global. La figura 5.3 presenta los contornos considerados en el modelo 2D presentado en la figura 5.2 utilizado para todos los análisis de 2D.

Por ejemplo, de acuerdo con la figura 5.3, los contornos 3, 4, 6, 10, 11 y 12, limitan la geometría de la viga (sub-dominio 2). El contorno 8 corresponde al electrodo de accionamiento de la viga. Los contornos 1, 2, 5, 7, 9, 13, 14, 15, 16 y 17 limitan la geometría asociada al medio que rodea la viga y el electrodo de accionamiento (el aire). Estos contornos son esenciales ya que definen las condiciones del modelo y las modificaciones que sobre ellos se hacen, implican cambios importantes en los resultados. Para la geometría en 3D es importante destacar que de acuerdo con el análisis realizado, solamente existe un sub-

dominio delimitado por 6 contornos (no visibles en su totalidad) correspondientes a la cara del hexahedro (ver figura 5.2b).



(a)



(b)

Figura 5.2. Geometría para los modelos. (a) En 2D. (b) En 3D

Los contornos y los sub-dominios deben configurarse, salvo ciertas excepciones, para todos los modos de aplicación. Para hacer una descripción clara y precisa, se presentan las tablas con los ajustes hechos en los sub-dominios y contornos de acuerdo con los análisis desarrollados para los casos estudiados. Los análisis considerados fueron:

- Análisis paramétrico (Estacionario), en 2D.
- Análisis de frecuencias propias, en 3D.
- Análisis dependiente del tiempo, en 2D.

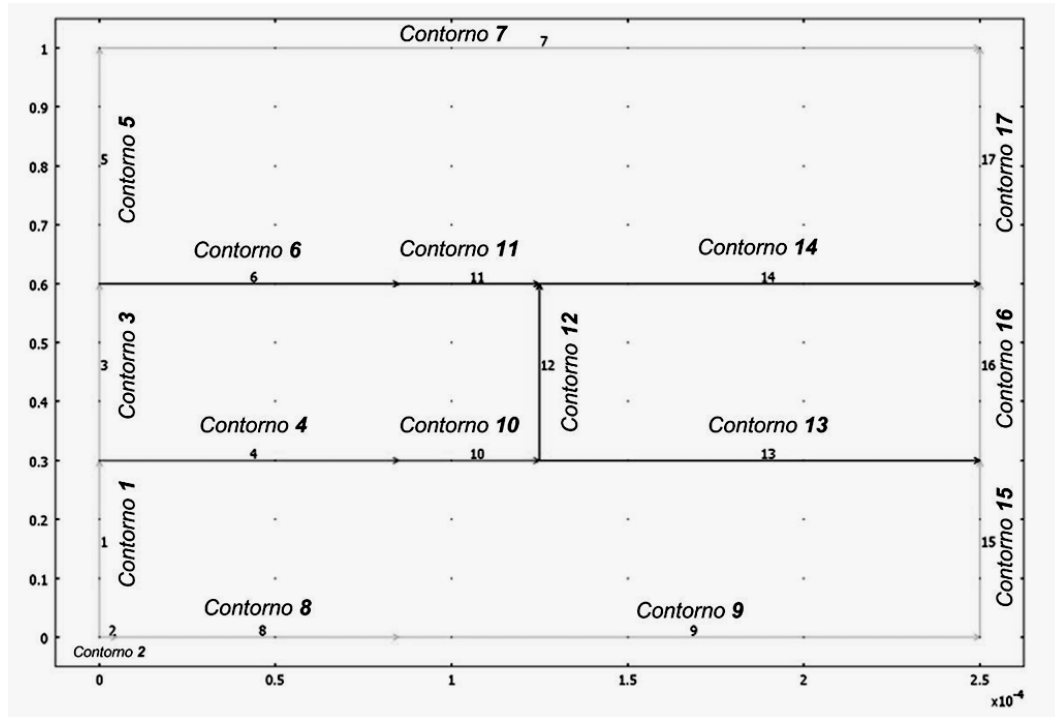


Figura 5.3. Distribución de los contornos para la geometría en 2D, longitudes en μm .

En el ajuste de la física para el análisis paramétrico en 2D, se configuran los modos de aplicación de acuerdo con lo presentado en la tabla 5.1. Para cada modo de aplicación, se ajustan las propiedades de los sub-dominios y contornos tal y como se muestra en las tablas 5.2, 5.3 y 5.4.

Tabla 5.1. Modos de aplicación para análisis paramétrico en 2D

Propiedad	Modo de Aplicación		
	Deformación en el plano (Plain Strain - smpn)	Mallado en movimiento (Moving Mesh - ALE)	Electrostática (Electrostatics - emes)
Tipo de elemento por defecto	Lagrange - Cuadrático	Lagrange - Cuadrático	Lagrange - Cuadrático
Método de suavizado	N/A*	Laplace	N/A*
Tipo de Análisis	Estático	Estático	N/A*
Permitir remallado	N/A*	Desactivado	N/A
Grandes deformaciones	Activado	N/A*	N/A*
Definir marco	N/A*	Marco (ale)	N/A*
Movimiento relativo a:	N/A*	Marco (ref)	N/A*
Crea marco	Desactivado	N/A*	N/A*
Marco	Marco (ref)	N/A*	Marco (ale)
Restricciones débiles	Activadas	Activadas	Activadas
Tipo de restricción	Ideal	No ideal	Ideal

* No aplica

Tabla 5.2. Ajustes de física para el modo de aplicación Deformación en el plano

Sub-dominio (SD) o contorno (CN)	Características
SD N° 1, 3 y 4.	Desactivados.
SD N° 2.	* Material Modelo: Isótropo. Módulo de Young: 169GPa Coeficiente de Poisson: 0,28 Densidad: 2330 kg/m³ Grosor: 50x10⁻⁶ m * Restricciones Condición: libre * Carga Carga nula en X e Y. La carga del cuerpo se define como fuerza/volumen empleando el ancho. * Amortiguación Sin amortiguación. * El resto de las propiedades se dejan por defecto.

Tabla 5.2. (Continuación) Ajustes de física para el modo de aplicación Deformación en el plano

Sub-dominio (SD) o contorno (CN)	Características
CN N° 1,2,5-9,11-17	* Restricción Condición: Libre. * Carga Tipo de carga: distribuida. Cargas en el borde en X e Y ajustada a cero N/m².
CN N° 3	* Restricción Condición: Fija. * Carga Tipo de carga: distribuida. Cargas en el borde en X e Y ajustada a cero N/m².
CN N° 4 y 10	* Restricción Condición: Libre. * Carga Tipo de carga: distribuida. Cargas en el borde en X (Fx) $Fes_nTx_emes^*$ (N/m²) Cargas en el borde en y (Fy) $Fes_nTy_emes^*$ (N/m²)

(En donde, Fes_nTx_emes y Fes_nTy_emes corresponden a los tensores exteriores de esfuerzo de Maxwell).

Tabla 5.3. Ajustes de física para el modo de aplicación de mallado en movimiento

Sub-dominio (SD) o contorno (CN)	Características
SD N° 1, 3 y 4.	* Malla Desplazamiento de malla: desplazamiento libre. * El resto de los elementos quedan ajustados por defecto.
SD N° 2.	* Malla Desplazamiento de malla: Desplazamiento inducido por física. Donde las variables para el desplazamiento son "u" y "v" para "dx" y "dy" respectivamente y en metros. * El resto de los elementos quedan ajustados por defecto.
CN N° 1,2,5,7-9,15-17	* Malla Desplazamiento de la malla: ajustados en dx=0m, dy=0m. * El resto de las propiedades quedan ajustadas por defecto.
CN N° 3,13,14	* Malla Desplazamiento de la malla: dx y dy desactivados. * El resto de las propiedades quedan ajustadas por defecto.
CN N° 4,6,10-12	* Malla Desplazamiento de la malla: ajustados en dx= u [m], dy= v [m]. * El resto de las propiedades quedan ajustadas por defecto.

Tabla 5.4. Ajustes de física para el modo de aplicación Electrostática

Sub-dominio (SD) o contorno (CN)	Características
SD N° 1, 3 y 4.	Ecuación: $-\nabla \cdot d\epsilon_0 \epsilon_r \nabla V = d\rho$ * Física Propiedades del material y fuentes: - Relación constitutiva: $D = \epsilon_0 \epsilon_r E$ - Grosor $d=1m$ - Densidad de carga espacial $\rho=0 \text{ C/m}^3$ - Permitividad relativa $\epsilon_r=1$ * El resto de las propiedades por defecto.
SD N° 2.	Ecuación: $-\nabla \cdot d\epsilon_0 \epsilon_r \nabla V = d\rho$ * Física Propiedades del material y fuentes: - Relación constitutiva: $D = \epsilon_0 \epsilon_r E$ - Grosor $d= 50 \times 10^{-6}m$ - Densidad de carga espacial $\rho=0 \text{ C/m}^3$ - Permitividad relativa $\epsilon_r=11,7$ * Fuerzas Variable para fuerza electromagnética: Fes * El resto de las propiedades por defecto.
CN N° 1-3,5,7,9,15-17	* Ecuación $n \cdot D = 0$ * Condiciones Condición de Contorno: Cero carga / Simetría. El resto por defecto.
CN N° 4,10	* Ecuación $V = 0$ * Condiciones Condición de Contorno: Tierra (referencia). El resto por defecto.
CN N° 6,11-14	* Ecuación $n \cdot (D_1 - D_2) = 0$ * Condiciones Condición de Contorno: Continuidad. El resto por defecto.
CN N° 8	* Ecuación $V = V_0$ * Condiciones Condición de Contorno: Potencial eléctrico. $V_0 = V_{in} [V]$. V_{in} es el parámetro del análisis. El resto por defecto.

En los ajustes de la física para el análisis de frecuencias de los modos propios en 3D se emplea los modos de aplicación configurados de acuerdo con lo presentado en la tabla 5.5.

En el análisis de frecuencias de los modos propios se emplea un solo modo de aplicación debido a que se basa en la geometría y propiedades de la estructura (la viga). Se ajustan así las propiedades de los sub-dominios y contornos de acuerdo con la tabla 5.6.

Tabla 5.5. Modos de aplicación para análisis de frecuencias de los modos propios 3D

Propiedad	Modo de Aplicación
	Esfuerzo-deformación de Sólidos (Solid, Stress-Strain - smsld)
Tipo de elemento por defecto	Lagrange - Cuadrático
Método de suavizado	N/A
Tipo de Análisis	Frecuencia propia
Permitir remallado	N/A
Grandes deformaciones	Activado
Especificar eigenvalores como	Eigenfrecuencia
Definir marco	N/A
Movimiento relativo a:	N/A
Crea marco	Desactivado
Marco	Marco (ref)
Restricciones débiles	Desactivadas
Tipo de restricción	Ideal

En los ajustes de la física para el análisis transitorios (dependiente del tiempo) en 2D se emplean los modos de aplicación configurados de acuerdo con lo presentado en la tabla 5.7.

Tabla 5.6. Ajustes de física para el modo de aplicación Esfuerzo-deformación de Sólidos

Sub-dominio (SD) o contorno (CN)	Características
SD único	* Material Modelo: Isótropo. Módulo de Young: 169GPa Coeficiente de Poisson: 0,28 Densidad: 2330 kg/m³ * Restricciones Condición: libre * Carga Cargas nula en X, Y y Z. Carga definida como fuerza/volumen . * Amortiguación Sin amortiguación. * El resto de las propiedades se dejan por defecto.
Contornos	* Restricción Condición para el soporte de la viga: Fija. Condición para el resto de las superficies: Libre. * Carga (para todos los contornos) Tipo de carga: distribuida. En los bordes en X, Y y Z es cero N/m².

Tabla 5.7. Modos de aplicación para análisis transitorio en 2D

Propiedad	Modo de Aplicación			
	Deformación en el plano (Plain Strain - smpn)	Mallado en movimiento (Moving Mesh - ALE)	Electrostática (Electrostatics - emes)	Amortiguación por película (Film Damping - mmfd)
Tipo de elemento por defecto	Lagrange - Cuadrático	Lagrange - Cuadrático	Lagrange - Cuadrático	Lagrange - Cuadrático
Método de suavizado	N/A	Laplace	N/A	N/A
Tipo de Análisis	Transitorio	Estático	N/A	Transitorio
Permitir remallado	N/A	Desactivado	N/A	N/A
Grandes deformaciones	Desactivado	N/A	N/A	N/A
Definir marco	N/A	Marco (ale)	N/A	N/A
Movimiento relativo a:	N/A	Marco (ref)	N/A	N/A

Tabla 5.7 (Continuación). Modos de aplicación para análisis transitorio en 2D

Propiedad	Modo de Aplicación			
	Deformación en el plano (Plain Strain - smpn)	Mallado en movimiento (Moving Mesh – ALE)	Electrostática (Electrostatics - emes)	Amortiguación por película (Film Damping - mmfd)
Crea marco	Desactivado	N/A	N/A	N/A
Marco	Marco (ale)	N/A	Marco (ale)	Marco (ale)
Restricciones débiles	Activadas	Activadas	Desactivadas	Desactivadas
Tipo de restricción	Ideal	No ideal	Ideal	Ideal

Para cada modo de aplicación, se ajustan las propiedades de los sub-dominios y contornos tal y como se muestra en la tablas 5.8, 5.9, 5.10 y 5.11.

Tabla 5.8. Ajustes de física para el modo de aplicación Deformación en el plano

Sub-dominio (SD) o contorno (CN)	Características
SD Nº 1, 3 y 4.	Desactivados.
SD Nº 2.	* Material Modelo: Isótropo. Módulo de Young: 169GPa Coeficiente de Poisson: 0,28 Densidad: 2330 kg/m³ Grosor: 50x10⁻⁶ m * Restricciones Condición: libre * Carga Carga nula en X e Y. La carga del cuerpo se define como fuerza/volumen empleando el ancho. * Amortiguación Sin amortiguación. * El resto de las propiedades se dejan por defecto.
CN Nº 1,2,5,7-9,13-17	* Restricción Condición: Libre. * Carga Tipo de carga: distribuida. Cargas Fx y Fy ajustadas a cero N/m².

Tabla 5.8. (Continuación). Ajustes de física para el modo Deformación en el plano

Sub-dominio (SD) o contorno (CN)	Características
CN N° 4,6,10,11	* Restricción Condición: Libre. * Carga Tipo de carga: distribuida. Carga $F_x = F_{x_mmfd} + F_{es_nTx_emes}$ [N/m²] Carga $F_y = F_{y_mmfd} + F_{es_nTy_emes}$ [N/m²]
CN N° 3	* Restricción Condición: Fija. * Carga Tipo de carga: distribuida. Cargas F_x y F_y ajustadas a cero N/m².
CN N° 12	* Restricción Condición: Libre. * Carga Tipo de carga: distribuida. Cargas F_x y F_y ajustadas a cero N/m².

En la tabla 5.8 $F_{es_nTx_emes}$ y $F_{es_nTy_emes}$ corresponden a los tensores exteriores de esfuerzo de Maxwell. Mientras que F_{x_mmfd} y F_{y_mmfd} son las cargas debidas a la película de aire.

Tabla 5.9. Ajustes de física para el modo de aplicación Mallado en movimiento

Sub-dominio (SD) o contorno (CN)	Características
SD N° 1, 3 y 4.	* Malla Desplazamiento de malla: desplazamiento libre. * El resto de los elementos quedan ajustados por defecto.
SD N° 2.	* Malla Desplazamiento de malla: Desplazamiento inducido por física. Donde las variables para el desplazamiento son "u" y "v" para "dx" y "dy" respectivamente y en metros. * El resto de los elementos quedan ajustados por defecto.
CN N° 1,2,5,7-9,15-17	* Malla Desplazamiento de la malla: ajustados en $dx=0m$, $dy=0m$. * El resto de las propiedades quedan ajustadas por defecto.

Tabla 5.9. (Continuación). Ajustes de física para el modo de aplicación Mallado en movimiento

Sub-dominio (SD) o contorno (CN)	Características
CN N° 3,13,14	* Malla Desplazamiento de la malla: dx y dy desactivados. * El resto de las propiedades quedan ajustadas por defecto.
CN N° 4,6,10,11	* Malla Desplazamiento de la malla: ajustados en dx= u [m], dy= v [m]. * El resto de las propiedades quedan ajustadas por defecto.

Tabla 5.10. Ajustes de física para el modo de aplicación Electrostática

Sub-dominio (SD) o contorno (CN)	Características
SD N° 1, 3 y 4.	Ecuación: $-\nabla \cdot d\epsilon_0\epsilon_r \nabla V = d\rho$ * Física Propiedades del material y fuentes: - Relacion constitutiva: $D = \epsilon_0\epsilon_r E$ - Grosor $d=1\text{m}$ - Densidad de carga espacial $\rho=0\text{ C/m}^3$ - Permitividad relativa $\epsilon_r=1$ * El resto de las propiedades por defecto.
SD N° 2.	Ecuación: $-\nabla \cdot d\epsilon_0\epsilon_r \nabla V = d\rho$ * Física Propiedades del material y fuentes: - Relacion constitutiva: $D = \epsilon_0\epsilon_r E$ - Grosor $d= 50 \times 10^{-6}\text{m}$ - Densidad de carga espacial $\rho=0\text{ C/m}^3$ - Permitividad relativa $\epsilon_r=11,7$ * Fuerzas Variable para fuerza electromagnética: Fes * El resto de las propiedades por defecto.
CN N° 1-3,5,7-9,15-17	* Ecuación $n.D = 0$ * Condiciones Condición de Contorno: Cero carga / Simetría. El resto por defecto.
CN N° 4,10	* Ecuación $V = 0$ * Condiciones Condición de Contorno: Tierra (referencia). El resto por defecto.

Tabla 5.10. (Continuación). Ajustes de física para el modo de aplicación Electrostática

Sub-dominio (SD) o contorno (CN)	Características
CN N° 6,11-14	* Ecuación $n.(D_1-D_2) = 0$ * Condiciones Condición de Contorno: Continuidad. El resto por defecto.
CN N° 8	* Ecuación $V = V_0$ * Condiciones Condición de Contorno: Potencial eléctrico. $V_0 = V_{in}$ [V]. V_{in} es el parámetro del análisis. El resto por defecto.

Tabla 5.11. Ajustes de física para el modo de aplicación de Amortiguación por película.

Sub-dominio (SD) o contorno (CN)	Características
CN N° 4,6	* Ajustes Deformación de contorno: $dx=u$, $dy=v$, [m] Deformación del canal base: $d_{0X}=0m$, $d_{0Y}=0m$ Grosor inicial de la película: $h_0=3 \times 10^{-6}m$ Presión ambiental: 101.325 Pa Camino libre promedio a $P_{\lambda,0}$: $\lambda_0=68 \times 10^{-9}m$ Presión de referencia para λ_0: 101.325 Pa Viscosidad dinámica: $\eta=18,27 \times 10^{-6}Pa.s$ Coeficiente de acomodación de momento tangencial: $\alpha_v = 0,85$ Función de flujo relativo: Q_{ch} en deslizamiento.
CN N° 10,11	* Ajustes Deformación de contorno: $dx=u$, $dy=v$, [m] Deformación del canal base: $d_{0X}=0m$, $d_{0Y}=0m$ Grosor inicial de la película: $h_0= (20 \times 10^{-6}m)$ Presión ambiental: 101.325 Pa Camino libre promedio a $P_{\lambda,0}$: $\lambda_0=68 \times 10^{-9}m$ Presión de referencia para λ_0: 101.325 Pa Viscosidad dinámica: $\eta=18,27 \times 10^{-6}Pa.s$ Coeficiente de acomodación de momento tangencial: $\alpha_v = 0,85$ Función de flujo relativo: Q_{ch} en deslizamiento.

En la definición de los parámetros para el modelo transitorio se consideran parámetros esenciales. El primero de ellos se conoce como el camino libre promedio (λ) que corresponde a la longitud media del camino que recorre una partícula (fotón, átomo o molécula) entre impactos sucesivos. Este término depende de la presión ambiental y el valor asignado fue obtenido de literatura (Kumar. y Pratap, 2004). El coeficiente de acomodación de momento tangencial (TMAC por “total momentum accommodation coefficient”) relaciona la cantidad de momento que trae una molécula en sentido de su movimiento (en el flujo que describe) que es transferido por esta a la pared que impacta al momento que ocurre una colisión de moléculas circulando en una canal (Arkilic *et al.*, 2001). Aunque se han obtenido valores de TMAC cercanos a cero en aire para microcanales con baja relación de aspecto (Jang et al, 2003), para el modelo que se estudia se asume un valor típico cercano a la unidad. Para los modelos planteados se considera un efecto reducido de rarefacción (el gas se hace menos denso) en el fluido limitado por el canal equivalente a la separación entre electrodo y viga, de esta forma se ajusta el modelo bajo una condición de flujo deslizante.

Luego de los ajustes de los dominios y contornos de los modelos a analizar, el siguiente paso corresponde a la generación del mallado. Este paso se realiza antes de ejecutar la simulación. El mallado de los dominios requiere la definición del elemento que conforma la malla el cual puede ser de geometría triangular o en cuadriláteros para el caso de modelos en 2D, y geometría tetrahédrica, hexahédrica o prismática para el caso de modelos en 3D. La creación de mallas con elementos triangulares se conoce como triangulación y es una forma muy flexible y bien establecida para realizar mallado porque puede realizarse casi de forma completamente automatizada para planos en dos dimensiones (2D) y hasta en espacios tridimensionales (3D) (Liu y Quek, 2003). La generación de elementos triangulares puede realizarse de forma automática en COMSOL, mientras que los elementos cuadriláteros deben definirse con ayuda del usuario.

La ventaja de emplear triángulos radica en la flexibilidad de modelar geometrías complejas y sus contornos. La desventaja está en que la precisión de los resultados de la simulación basada en elementos triangulares es con frecuencia inferior a la obtenida cuando se emplean elementos cuadriláteros. Sin embargo, las mallas con elementos cuadriláteros son más difíciles de generar en forma automatizada (Liu y Quek, 2003).

En el análisis de modelos mediante COMSOL Multiphysics®, el mallado empleado para modelos bidimensionales fue de tipo cuadrilátero. A pesar de que los elementos cuadriláteros deben ser definidos por el usuario, se busca ganar en precisión aprovechando la simplicidad de la geometría. Para el caso de los modelos tridimensionales, se hace uso de un mallado con elementos tetrahédricos generados automáticamente con ayuda del programa.

Después de establecer el mallado, se lleva a cabo el cálculo y el post-procesamiento de la solución. Para ejecutar los cálculos, se escoge la herramienta de solución. Normalmente, al emplear COMSOL, la herramienta de solución es seleccionada automáticamente al escoger el tipo de análisis deseado.

Capítulo VI

Resultados del análisis mediante elementos finitos

Antes de iniciar la corrida de los modelos, con el objetivo de hacer uso eficiente del recurso computacional y garantizar a su vez resultados confiables dentro del método, es necesario establecer el número de elementos que conforman el mallado de la geometría discretizada en cada modelo. Para ello se determina la respuesta del modelo ante diversos niveles de refinación en el tamaño de las mallas, tomando la respuesta de variables como por ejemplo: el esfuerzo. Por lo tanto, se evalúa la respuesta de cada modelo, iniciando con mallados compuestos por elementos “gruesos”, que serán refinados, hasta llegar a elementos “finos” para los cuales el error existente entre las magnitudes de respuestas obtenidas en pasos de refinado consecutivos, sea aceptable.

El estudio de las microvigas para el presente trabajo se orienta hacia 3 experiencias: (1) el análisis electromecánico paramétrico en condiciones estáticas que ocurre en la microviga al evaluar un rango de valores de potencial eléctrico viga-electrodo, (2) el análisis de frecuencias de modos propios y (3) el análisis de la respuesta transitoria (en el tiempo) en la microviga al aplicar un potencial eléctrico en forma de escalón. Solo se determina el mallado a las dos primeras experiencias mientras que en la tercera se aplica un mallado fino tomando en consideración la cantidad de elementos obtenidos del análisis estático. La razón por la que se procede de esta manera se fundamenta en el hecho que se busca reducir el tiempo de cómputo total asociado con el análisis de respuesta transitoria sacrificando un poco la precisión de los resultados pero contando con información para valoración y discusión.

Es importante mencionar que el análisis en elementos finitos se aplica en arreglos de microviga-electrodo de longitudes variables pero de ancho y grosor constante. Todos los electrodos y microvigas poseen un ancho de 50 μm , el grosor de las microvigas es 3 μm . Mientras que las longitudes de los electrodos y las microvigas son las mostradas en la tabla 6.1.

Tabla 6.1. Longitudes consideradas en los modelos de accionamiento de microvigas

Longitudes de electrodos (μm)	Longitudes de microvigas (μm)	Separación viga-electrodo (μm)	Cantidad de modelos por longitud de microviga
70, 80, 90, 100	125	3	4
70, 80, 90, 100	225	3	4
70, 80, 90, 100	325	3	4
70, 80, 90, 100	450	3	4
Total de modelos			16

Análisis paramétrico estático de la interacción microviga-electrodo

De acuerdo con la definición de los dominios y los contornos llevada a cabo para los modelos, se determina la cantidad de elementos recomendada para el mallado de acuerdo con la geometría de los elementos (los cuadriláteros) y los ajustes en los modos de aplicación. Luego de un análisis del mallado para las combinaciones mostradas en la tabla 6.1 se obtiene el número suficiente de elementos para que la solución converja estableciendo una banda de error relativo de 2-5%. Para ello se evalúa la respuesta de los 16 modelos para un valor de potencial eléctrico fijo de 100V ante distintos refinamientos en el mallado hasta alcanzar un error relativo de magnitud igual o inferior al 5% en el esfuerzo en la base de la viga. El análisis paramétrico se realiza considerando el módulo de elasticidad igual a 169 GPa, valor que también es considerado para el

análisis del mallado. La tabla 6.2 muestra un resumen con la cantidad de elementos seleccionada en el mallado de los modelos.

Tabla 6.2. Definición del mallado para el análisis estático paramétrico mediante elementos finitos

Longitud de Viga (μm)	Longitud de electrodo (μm)	Número de elementos en mallado	Error en Esfuerzo (%)	Error en Desplazamiento (%)
125	70	950	1,82	0,99
	80	950	1,53	1,53
	90	950	1,43	1,23
	100	950	4,32	0,35
225	70	950	1,84	0,47
	80	950	1,49	1,79
	90	950	1,42	1,49
	100	950	1,26	1,28
325	70	969	1,90	3,49
	80	969	1,72	2,84
	90	969	0,79	3,45
	100	969	1,98	1,13
450	70	988	3,50	6,06
	80	988	3,92	3,92
	90	969	2,62	4,36
	100	969	2,92	2,90

Llevada a cabo la determinación del número de elementos que conforman el mallado, se realiza la corrida del análisis de elementos finitos en búsqueda de las soluciones para los modelos dada las condiciones. El resultado de simular la deflexión en las vigas como función de la diferencia de potencial aplicada entre el electrodo de accionamiento considerando las 4 longitudes de viga así como las 4 longitudes de electrodos, se presenta en el conjunto gráficos comprendidos entre las figuras 6.1 y 6.4. La tabla 6.3 presenta los desplazamientos obtenidos en los extremos libres de las vigas para los modelos. Vale la pena mencionar que para todos los casos simulados, el máximo esfuerzo presente en la estructura (específicamente en el extremo fijo) no supera al esfuerzo de fluencia del

material (Silicio), lo que garantiza que la estructura trabaje en la zona elástica del material que la constituye.

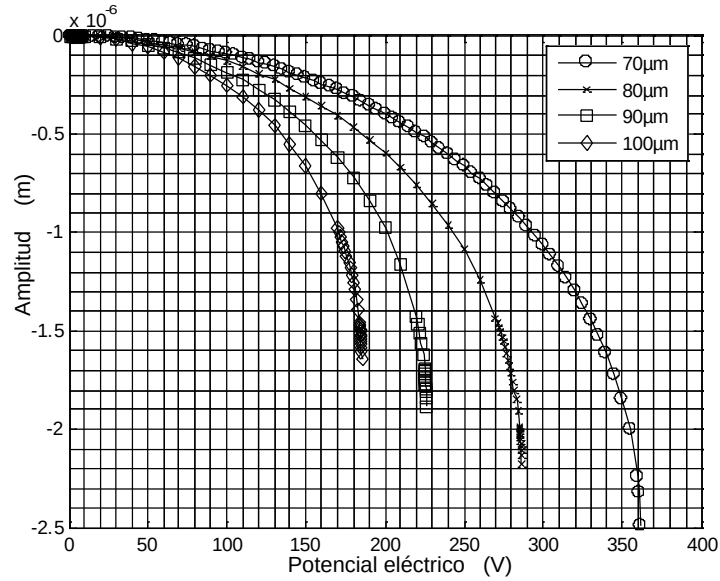


Figura 6.1. Desplazamiento del extremo libre de la viga de 125µm en función del potencial aplicado mediante los electrodos de cuatro longitudes diferentes.

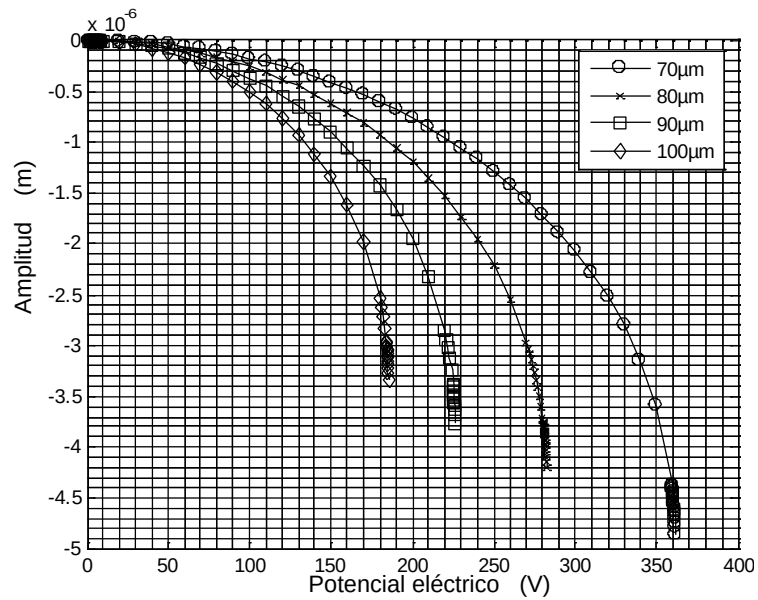


Figura 6.2. Desplazamiento del extremo libre de la viga de 225µm en función del potencial aplicado mediante los electrodos de cuatro longitudes diferentes.

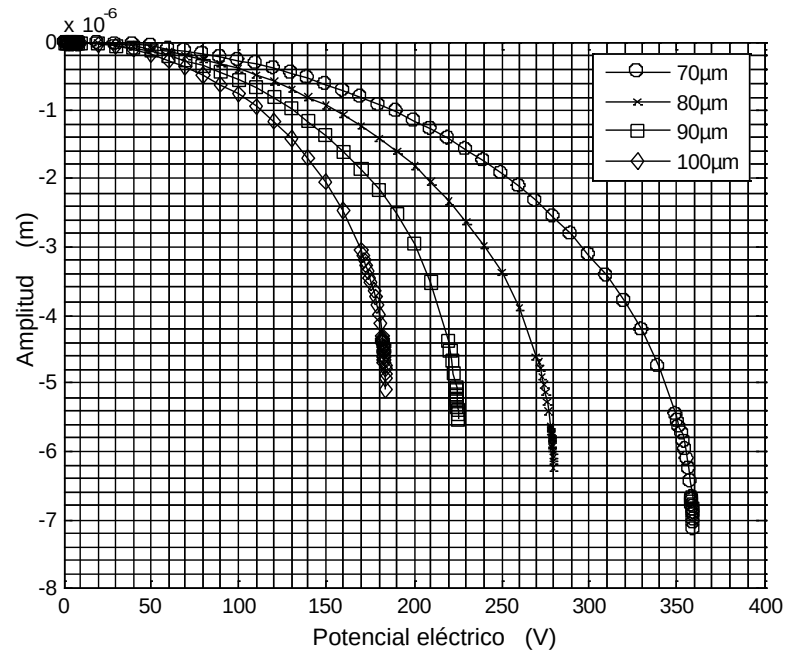


Figura 6.3. Desplazamiento del extremo libre de la viga de 325 μm en función del potencial aplicado mediante los electrodos de cuatro longitudes diferentes.

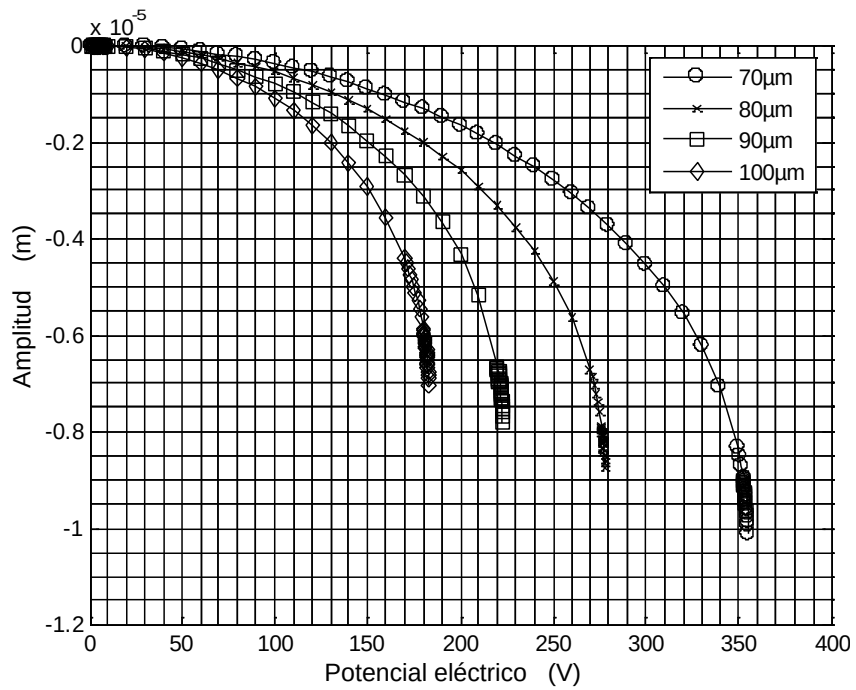


Figura 6.4. Desplazamiento del extremo libre de la viga de 450 μm en función del potencial aplicado mediante los electrodos de cuatro longitudes diferentes.

Otro resultado obtenido de la simulación y mostrado en la tabla 6.3, corresponde al potencial de pull-in para el cual la viga entra en contacto con el electrodo. Con este valor se obtiene un límite de operación para el potencial de accionamiento aplicado por el electrodo. El comportamiento de este potencial de pull-in en función de la longitud del electrodo se observa en la figura 6.5.

Asimismo, del análisis de elementos finitos se obtiene el desplazamiento descrito por la viga en la zona cubierta por el electrodo antes de presentarse el colapso con el electrodo. Los resultados de estos desplazamientos obtenidos se presentan en la figura 6.6 en forma porcentual en relación con la separación inicial existente entre el electrodo y la viga que corresponde en todo caso a $3\mu\text{m}$.

Tabla 6.3. Máximos desplazamientos de los extremos libres de las vigas y potencial eléctrico de pull-in para distintas longitudes de electrodos.

Longitud de la viga (μm)	Longitud de electrodo (μm)	Resultado MEF Potencial eléctrico de pull-in (V)	Máximo desplazamiento (μm)
125	70	362	2,49
	80	286,2	2,18
	90	226,2	1,88
	100	185,3	1,64
225	70	362	4,86
	80	282,2	4,21
	90	226,2	3,77
	100	185,3	3,34
325	70	360,1	7,15
	80	279,7	6,23
	90	225,1	5,54
	100	183,9	5,09
450	70	355,4	10,13
	80	277,8	8,76
	90	222,7	7,80
	100	182,8	7,03

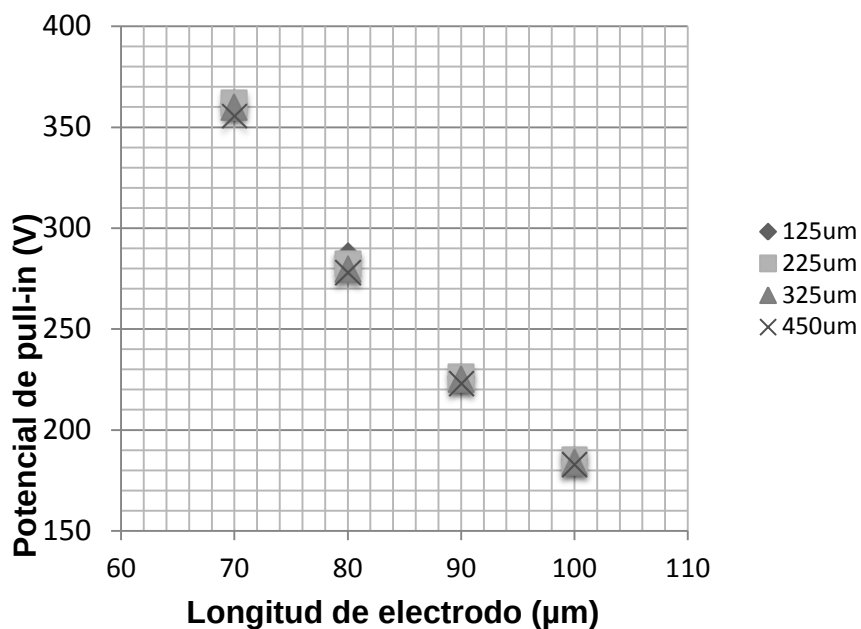


Figura 6.5. Potencial de pull-in en relación a la longitud del electrodo de accionamiento para las longitudes de vigas de 125 μm , 225 μm , 325 μm y 450 μm .

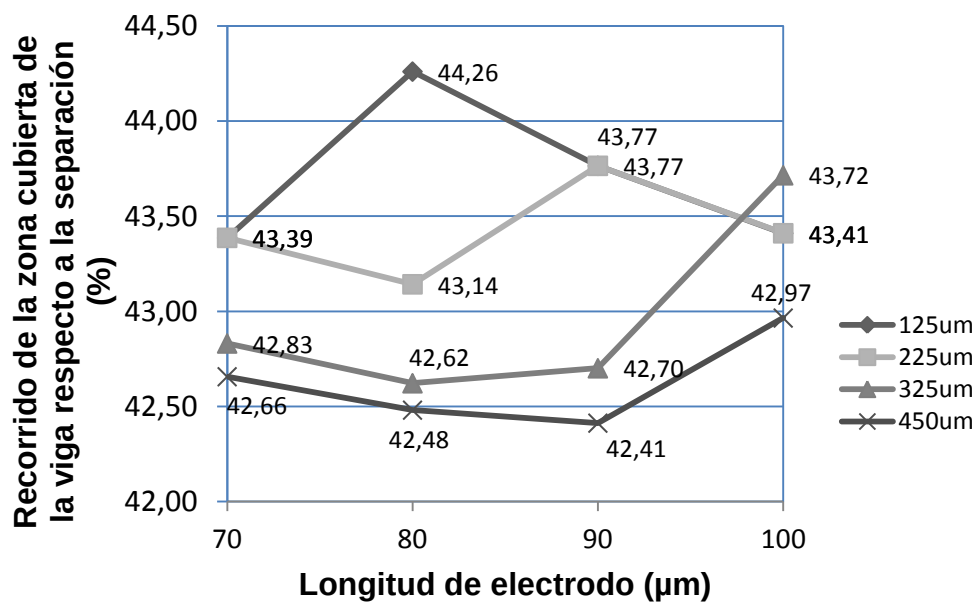


Figura 6.6. Máximo recorrido de la viga en la sección cubierta por el electrodo. Para las longitudes de vigas de 125 μm , 225 μm , 325 μm y 450 μm .

Análisis de los modos de oscilación de las vigas a ensayar

En el diseño de un sensor basado en microviga, su operación en modo resonante es un aspecto de sumo interés. Por lo tanto es necesario conocer las frecuencias asociadas a los modos propios de cada microviga, así como la forma que adquiere al manifestarse cada modo de oscilación.

De la misma forma que con el análisis estático de la interacción viga-electrodo, se hizo el análisis de las frecuencias propias para las 4 longitudes de microvigas establecidas, iniciando con la determinación del número de elementos que conforman el mallado mediante el análisis del refinamiento. En el caso de las frecuencias propias, el análisis de la estructura se realiza en 3D. Los resultados del análisis de mallado se presentan en las tablas 6.4, 6.5, 6.6 y 6.7. De este resultado se observa que la variación del error relativo es despreciable a medida que se refina el mallado, se ha utilizado el valor de 169 GPa para el módulo de Young.

Tabla 6.4. Frecuencias de los modos de oscilación resultantes del análisis de frecuencias propias sobre la viga de $125\mu\text{m} \times 50\mu\text{m} \times 3\mu\text{m}$ y los errores resultantes al refinar el mallado

Elementos	Primer Modo (Hz)	Error (%)	Segundo modo (Hz)	Error (%)	Tercer modo (Hz)	Error (%)	Cuarto modo (Hz)	Error (%)
117	291.676,10	-	1.569.088	-	2.223.588	-	3.990.250	-
206	273.812,70	-6,52	1.476.020	-6,31	1.815.188	-22,50	3.981.299	-0,22
350	271.142,10	-0,98	1.430.624	-3,17	1.710.458	-6,12	3.975.845	-0,14
635	270.382,80	-0,28	1.413.522	-1,21	1.693.085	-1,03	3973.669	-0,05
979	269.923,30	-0,17	1.407.971	-0,39	1.685.198	-0,47	3.971.875	-0,05
1.374	269.570,40	-0,13	1.405.472	-0,18	1.681.478	-0,22	3.970.976	-0,02
1.942	269.481,20	-0,03	1.402.720	-0,20	1.680.274	-0,07	3.970.564	-0,01
3.763	269.312,70	-0,06	1.399.283	-0,25	1.678.472	-0,11	3.969.566	-0,03
21.603	269.010,40	-0,11	1.394.767	-0,32	1.675.907	-0,15	3.968.408	-0,03

Tabla 6.5. Frecuencias de los modos de oscilación resultantes del análisis de frecuencias propias sobre la viga de $225\mu\text{m} \times 50\mu\text{m} \times 3\mu\text{m}$ y los errores resultantes al refinar el mallado

Elementos	Primer Modo (Hz)	Error (%)	Segundo modo (Hz)	Error (%)	Tercer modo (Hz)	Error (%)	Cuarto modo (Hz)	Error (%)
138	74.424,29	-	493.449,70	-	1.530.193	-	2.791.979	-
328	72.895,05	-2,05	461.070,80	-6,56	1.315.068	-14,06	2.492.090	-10,74
638	72.668,29	-0,31	455.741,70	-1,16	1.286.081	-2,20	2.440.124	-2,09
1.176	72.577,27	-0,13	453.886,00	-0,41	1.275.850	-0,80	2.419.057	-0,86
1.734	72.550,47	-0,04	453.391,80	-0,11	1.272.030	-0,30	2.411.650	-0,31
2.484	72.523,77	-0,04	453.104,10	-0,06	1.270.551	-0,12	2.409.066	-0,11
3.487	72.513,94	-0,01	452.977,30	-0,03	1.269.834	-0,06	2.407.521	-0,06
5.075	72.508,90	-0,01	452.903,60	-0,02	1.269.413	-0,03	2.406.529	-0,04
7.200	72.499,59	-0,01	452.826,30	-0,02	1.269.086	-0,03	2.405.906	-0,03

Tabla 6.6. Frecuencias de los modos de oscilación resultantes del análisis de frecuencias propias sobre la viga de $325\mu\text{m} \times 50\mu\text{m} \times 3\mu\text{m}$ y los errores resultantes al refinar el mallado

Elementos	Primer Modo (Hz)	Error (%)	Segundo modo (Hz)	Error (%)	Tercer modo (Hz)	Error (%)	Cuarto modo (Hz)	Error (%)
185	40.408,77	-	260.272,40	-	553.409,00	-	644.443,61	-
487	39.775,79	-1,57	255.681,70	-1,76	513.501,60	-7,21	641.511,90	-0,45
787	39.531,68	-0,61	248.184,00	-2,93	508.208,50	-1,03	641.395,80	-0,02
1.689	39.463,75	-0,17	247.296,90	-0,36	505.364,60	-0,56	641.072,50	-0,05
2.459	39.456,06	-0,02	247.121,50	-0,07	504.370,50	-0,20	641.028,70	-0,01
3.415	39.444,79	-0,03	247.010,30	-0,04	504.121,90	-0,05	640.962,80	-0,01
5.038	39.433,89	-0,03	246.927,10	-0,03	503.083,70	-0,21	640.926,60	-0,01
7.312	39.432,98	0,00	246.911,70	-0,01	502.614,00	-0,09	640.894,50	-0,01
10.680	39.425,60	-0,02	246.858,00	-0,02	502.096,70	-0,10	640.853,90	-0,01

La tabla 6.8 presenta los resultados de aplicar el análisis de frecuencias propias a las vigas con las 4 longitudes ya establecidas. Asimismo, las figuras 6.7, 6.8, 6.9 y 6.10 presentan la deformación que ocurre en las vigas para los cuatro primeros modos de oscilación.

Tabla 6.7. Frecuencias de los modos de oscilación resultantes del análisis de frecuencias propias sobre la viga de $450\mu\text{m} \times 50\mu\text{m} \times 3\mu\text{m}$ y los errores resultantes al refinar el mallado

Elementos	Primer Modo (Hz)	Error (%)	Segundo modo (Hz)	Error (%)	Tercer modo (Hz)	Error (%)	Cuarto modo (Hz)	Error (%)
229	21.202,21	-	137.226,10	-	338.108,00	-	388.605,30	-
673	20.665,99	-2,53	131.824,20	-3,94	337.286,50	-0,24	366.698,10	-5,64
1.029	20.548,73	-0,57	128.913,40	-2,21	337.090,30	-0,06	362.037,80	-1,27
2.351	20.533,15	-0,08	128.672,10	-0,19	337.058,80	-0,01	360.700,30	-0,37
3.475	20.528,13	-0,02	128.613,70	-0,05	337.000,80	-0,02	360.079,50	-0,17
5.052	20.524,88	-0,02	128.575,50	-0,03	337.001,00	0,00	359.565,00	-0,14
6.894	20.522,29	-0,01	128.556,50	-0,01	336.995,40	0,00	359.316,30	-0,07
10.071	20.519,01	-0,02	128.534,20	-0,02	336.969,60	-0,01	358.998,00	-0,09
14.251	20.516,20	-0,01	128.514,90	-0,02	336.955,60	0,00	358.588,40	-0,11

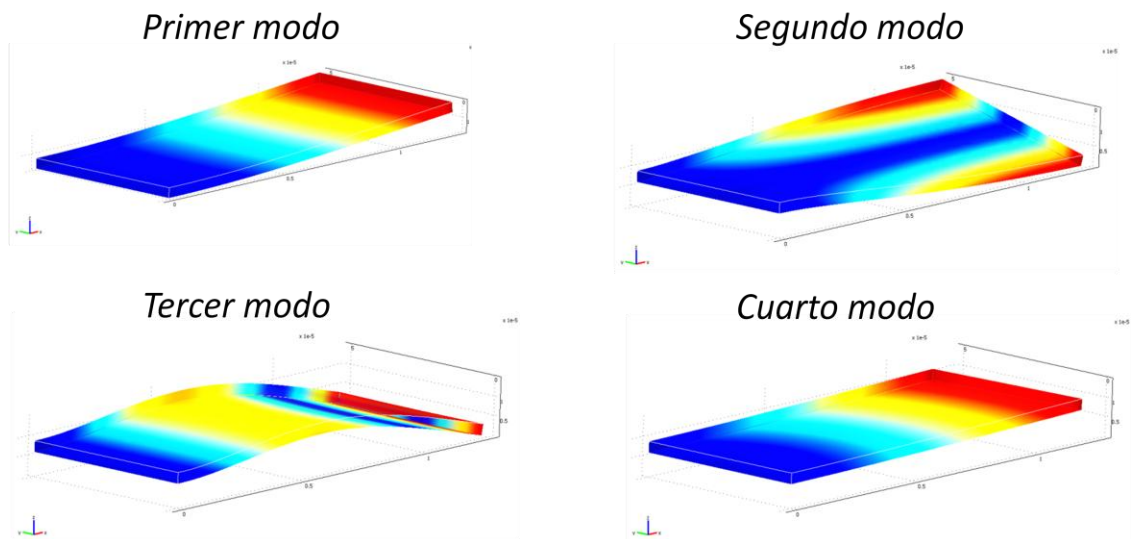


Figura 6.7. Los cuatro primeros modos de oscilación obtenidos para la viga de longitud $125\mu\text{m}$

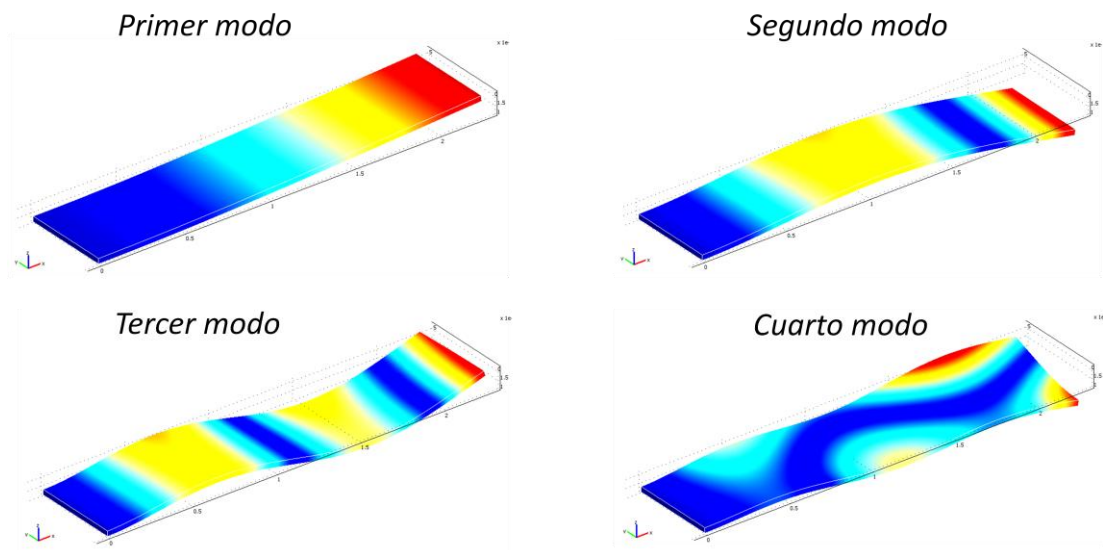


Figura 6.8. Los cuatro primeros modos de oscilación obtenidos para la viga de longitud $225\mu\text{m}$

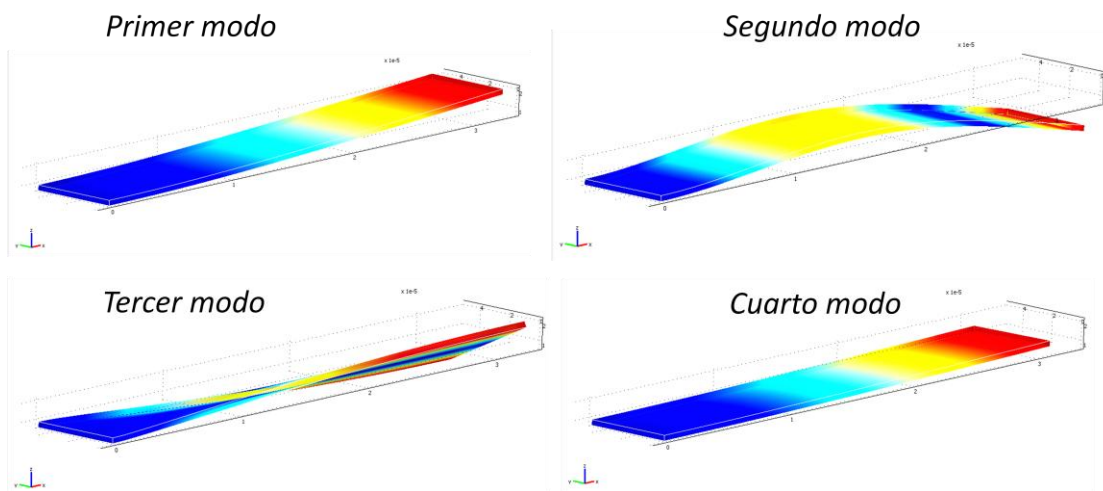


Figura 6.9. Los cuatro primeros modos de oscilación obtenidos para la viga de longitud $325\mu\text{m}$

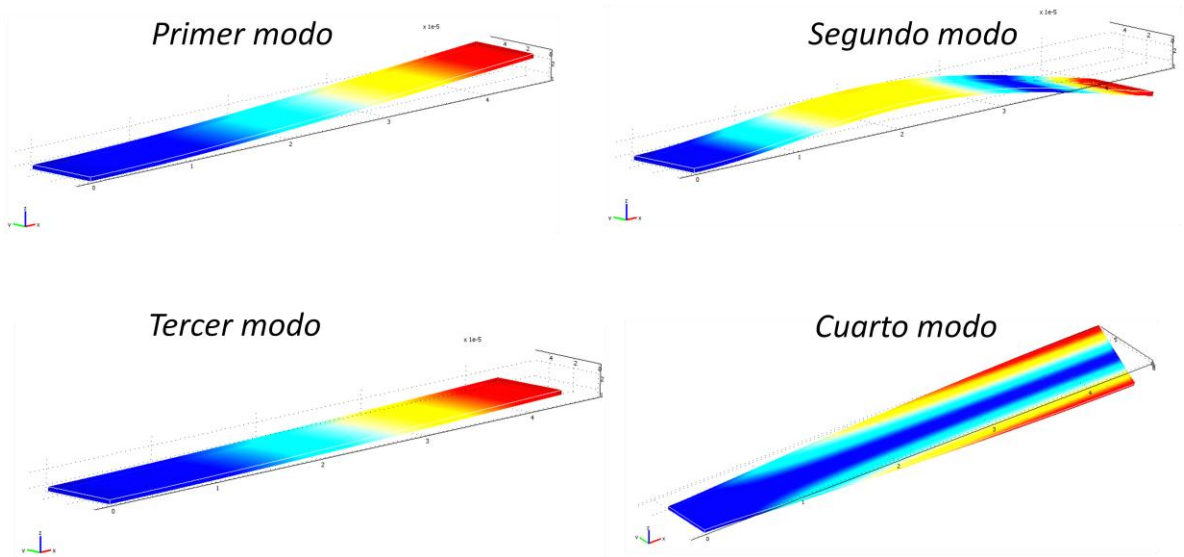


Figura 6.10. Los cuatro primeros modos de oscilación obtenidos para la viga de longitud 450 μ m

Tabla 6.8. Magnitud de los modos de oscilación obtenidos para los valores de módulo de elasticidad considerados en las longitudes de vigas analizadas

Módulo de Young (GPa)	Longitud de viga (μ m)	Primer Modo (Hz)	Segundo modo (Hz)	Tercer modo (Hz)	Cuarto modo (Hz)
169	125	269.481,2	1.402.720	1.680.274	3.970.564
	225	82.678,61	516.473	1.447.834	2.744.997
	325	39.433,89	246.927,1	503.083,7	640.926,6
	450	20.524,88	128.575,5	337.001	359.565

Análisis de la respuesta transitoria en las vigas

Para conocer la respuesta dinámica de las vigas ante el efecto de la película de aire que le rodean y del microcanal que se forma en el espacio viga-electrodo se realiza el análisis de la respuesta transitoria de las estructuras al aplicar una señal de potencial eléctrico de tipo escalón respecto al electrodo de

accionamiento. Se toman las 4 longitudes consideradas para las vigas y las 4 longitudes de electrodos de accionamiento. Los gráficos resultantes se presentan en las figuras desde 6.11 hasta 6.14.

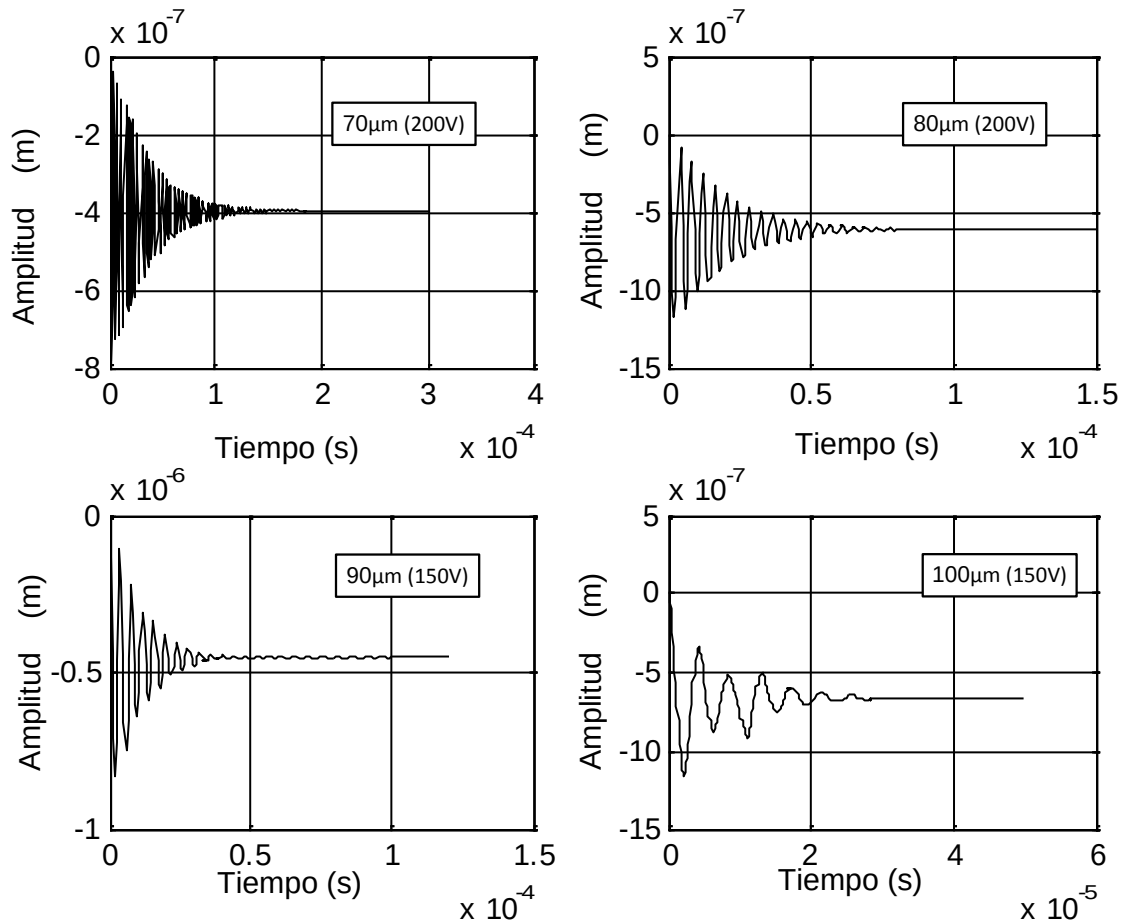


Figura 6.11. Desplazamiento del extremo libre de la viga de 125 μm como respuesta a una señal de potencial eléctrico de tipo escalón aplicada a los electrodos cuyas longitudes se presentan en la figura (y el potencial correspondiente entre paréntesis).

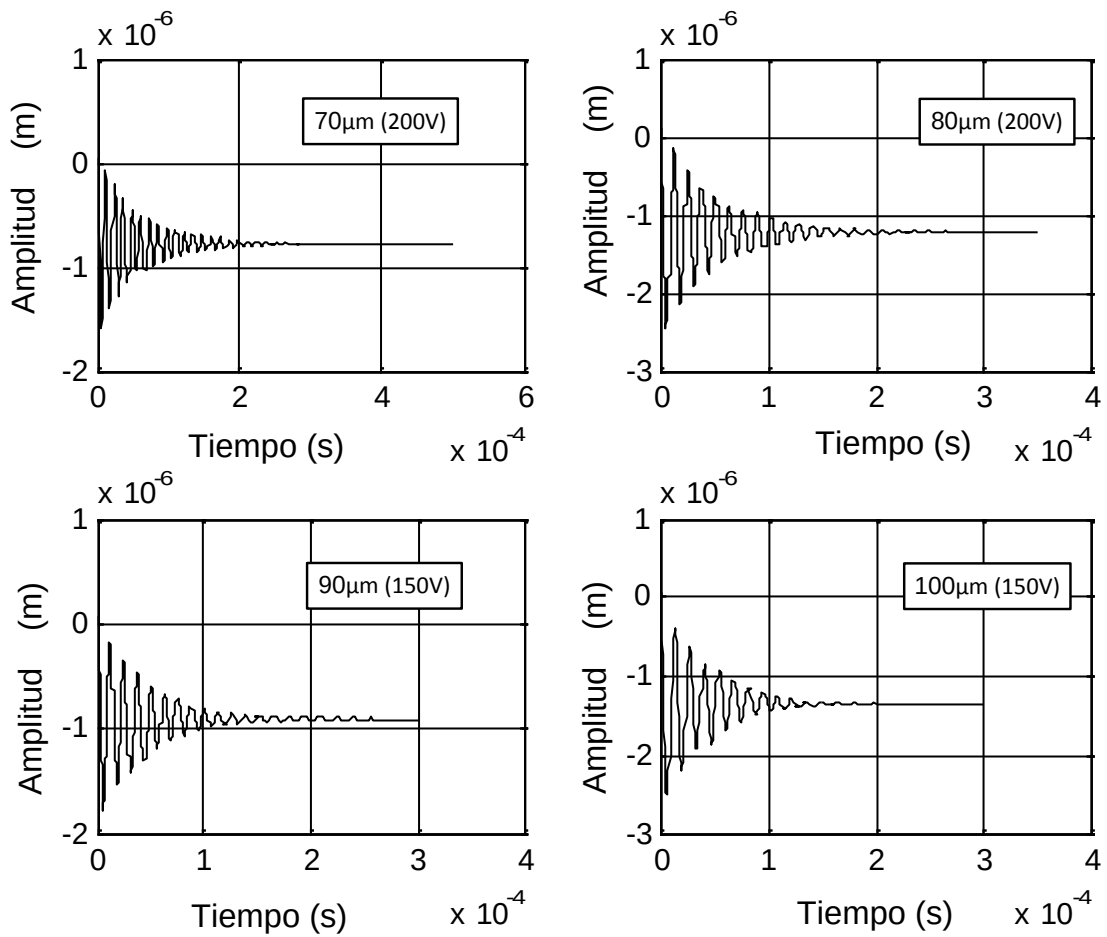


Figura 6.12. Desplazamiento del extremo libre de la viga de 225 μm al aplicar una señal de potencial eléctrico de tipo escalón a los electrodos de accionamiento correspondiente (ver longitud en leyenda y potencial entre paréntesis).

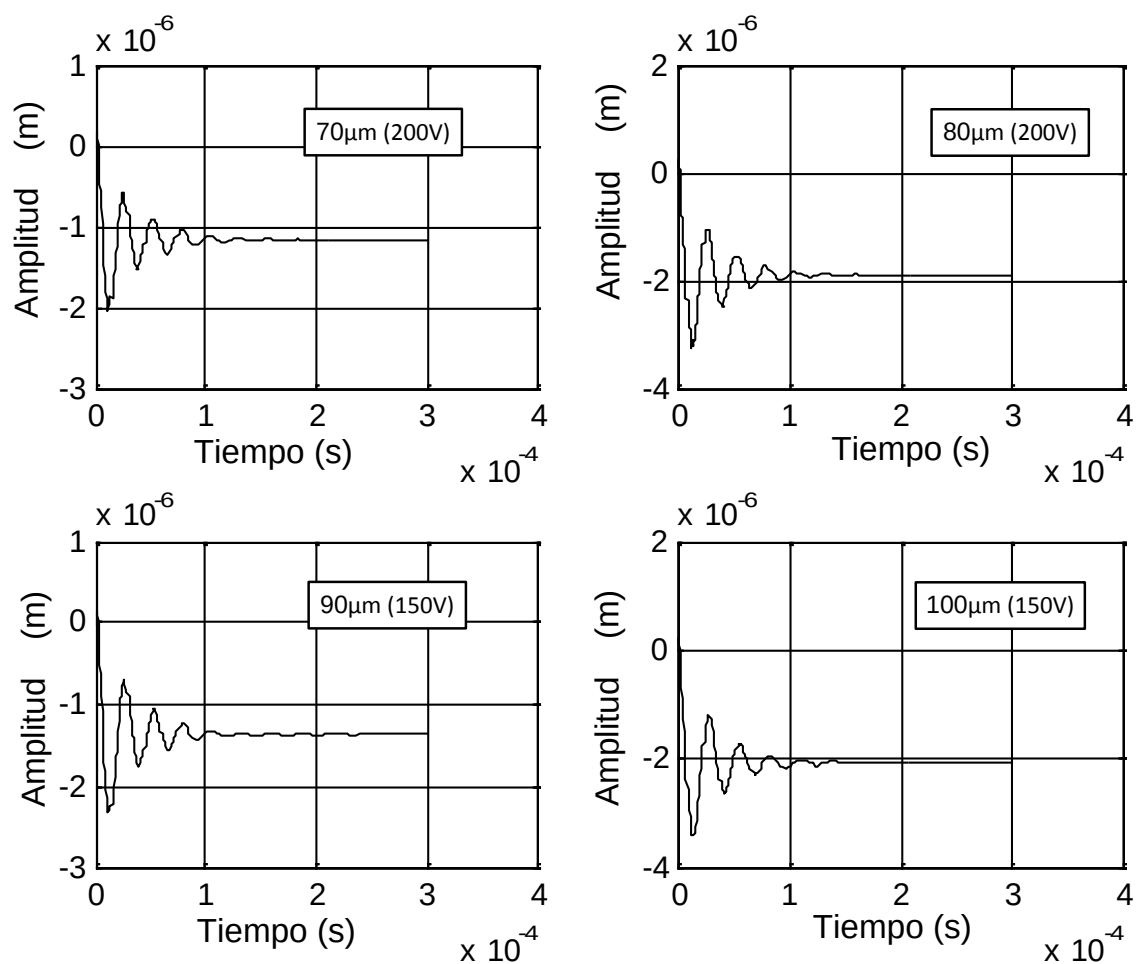


Figura 6.13. Desplazamiento del extremo libre de la viga de 325 μm al aplicar una señal de potencial eléctrico de tipo escalón a los electrodos de accionamiento correspondiente (ver longitud en leyenda y potencial entre paréntesis).

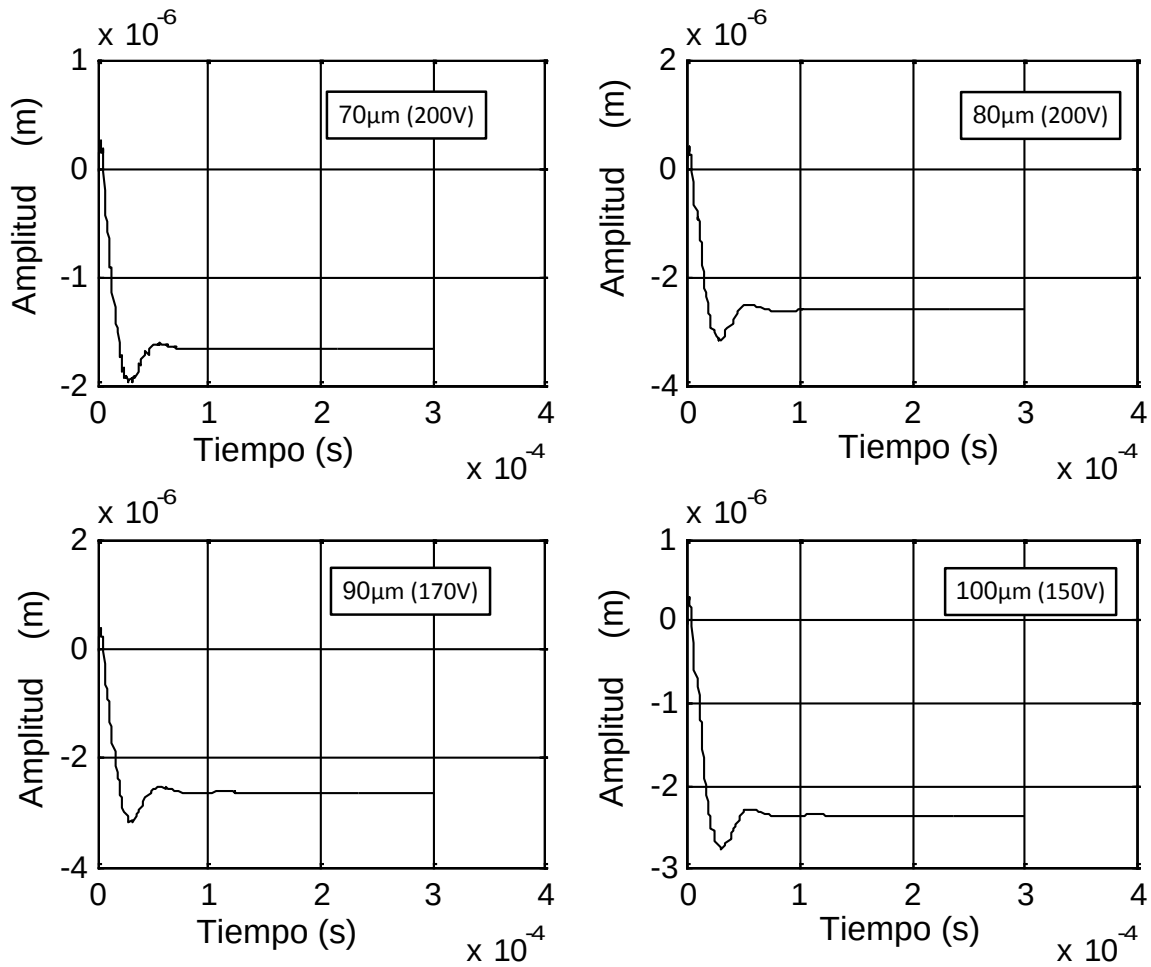


Figura 6.14. Desplazamiento del extremo libre de la viga de 450 μm como respuesta a una señal de potencial eléctrico de tipo escalón aplicada a los electrodos cuyas longitudes se presentan en la figura (y el potencial correspondiente entre paréntesis).

De los gráficos de respuesta transitoria es posible determinar la información que describa el comportamiento dinámico de la viga para las condiciones que impone la presencia de electrodos de accionamiento, de longitud variable, en paralelo y a $3\mu\text{m}$. Las respuestas obtenidas de los análisis en el tiempo corresponden a sistemas de segundo orden con respuesta subamortiguada. Por lo tanto los parámetros que caracterizan su funcionamiento son el coeficiente de amortiguamiento ξ y la frecuencia no amortiguada ω_n . En el caso de las respuestas transitorias tratadas, debe cumplirse que $\xi < 1$.

Los parámetros característicos se obtienen mediante la inspección de los gráficos, de donde es posible determinar las magnitudes de los dos primeros picos de la señal respecto al valor en estado estacionario, así como el valor del período de oscilación. La figura 6.15 ilustra la información a obtener de los gráficos de las respuestas.

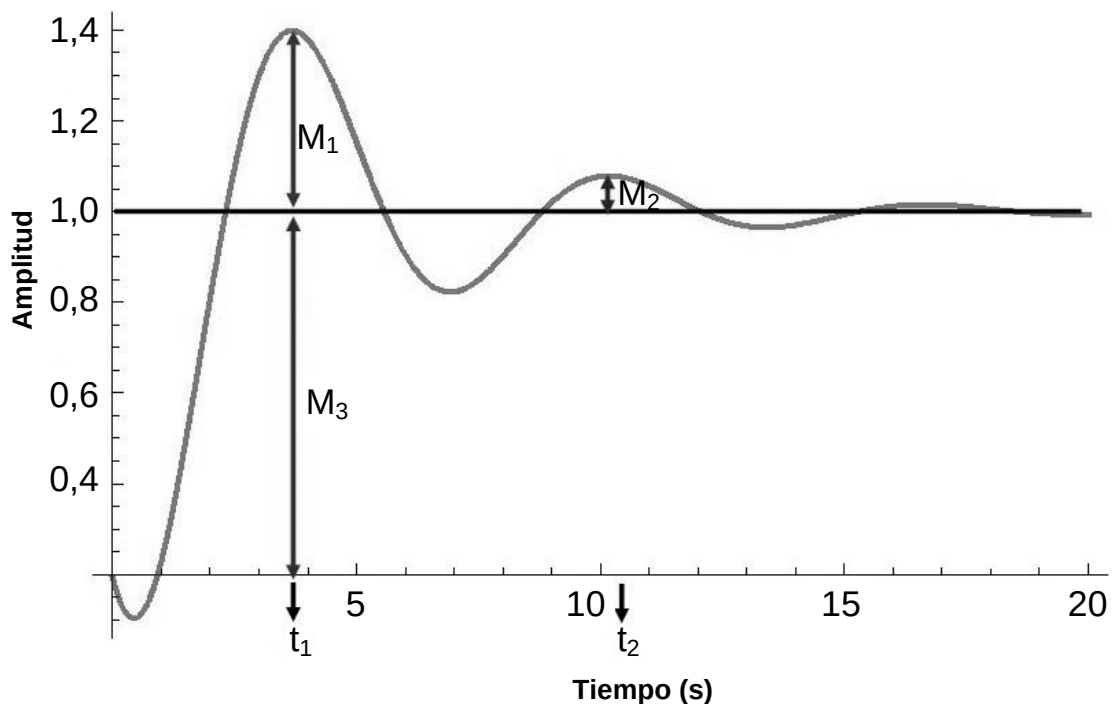


Figura 6.15. Ejemplo de respuesta subamortiguada y magnitudes asociadas que deben considerar para la determinación de ξ y ω_n .

Con base a la figura 6.15, el valor del período de oscilación se identifica como τ_p y puede calcularse como la diferencia $t_2 - t_1$, mientras que las magnitudes de los dos primeros picos de la señal son identificados como M_1 y M_2 . Los valores de ξ y ω_n se obtienen de las expresiones analíticas 6.1, 6.2 y 6.3.

$$\tau_p = \frac{2\pi}{\omega_p} \quad (6.1)$$

$$\omega_p = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2} \quad (6.2)$$

$$\frac{M_2}{M_1} = e^{\frac{-2\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}} \quad (6.3)$$

Tabla 6.9. Parámetros característicos de los arreglos viga-electrodo luego de analizar la respuesta transitoria resultante de realizar el análisis de elementos finitos dependiente del tiempo al aplicar una diferencia de potencial eléctrico de tipo escalón.

Longitud de viga (μm)	Longitud de electrodo (μm)	Frecuencia natural no amortiguada ω_n (rad/s)	Frecuencia natural no amortiguada f_n (Hz)	Coefficiente de amortiguamiento ξ	Factor de calidad Q
125	70	1.634.319,38	260.109,4	0,0130	38,53
	80	1.563.454,32	248.830,901	0,0093	53,96
	90	1.575.219,24	250.703,342	0,0209	23,92
	100	1.505.877,43	239.667,276	0,0685	7,30
225	70	520.729,39	82.876,4626	0,0225	22,25
	80	490.755,89	78.106,0431	0,0213	23,52
	90	500.078,56	79.589,7886	0,0231	21,61
	100	462.012,21	73.531,355	0,0262	19,11
325	70	249.478,62	39.705,6627	0,0744	6,72
	80	236.886,30	37.701,5374	0,0692	7,22
	90	235.659,29	37.506,2532	0,0700	7,14
	100	222.830,53	35.464,4974	0,0714	7,01
450	70	123.677,95	19.683,9111	0,2478	2,02
	80	120.196,55	19.129,8303	0,2437	2,05
	90	118.302,18	18.828,3327	0,2471	2,02
	100	119.644,35	19.041,9452	0,2927	1,71

Atendiendo el hecho que la viga se sometería a oscilaciones en un sistema de MFA en modo dinámico, resulta conveniente determinar el factor de calidad (Q) del sistema correspondiente a la viga accionada mediante el electrodo. Esto es posible si se conoce el coeficiente de amortiguamiento al utilizar la expresión 6.4.

$$Q = \frac{1}{2\xi} \quad (6.4)$$

Los resultados de inspeccionar los gráficos de respuesta transitoria se presentan en la tabla 6.9.

Capítulo VII

Desarrollo experimental

Desarrollo de las pruebas experimentales para medición de flexión

Las vigas obtenidas del proceso de fabricación fueron sometidas a pruebas de flexión para obtener la relación existente entre el desplazamiento del extremo libre de la viga y el potencial eléctrico con el cual es actuada. Para esto se contó con un microanalizador de movimiento Polytec también identificado como vibrómetro.

Con el vibrómetro es posible medir los desplazamientos que ocurren en las microestructuras al ser sometidas a excitaciones periódicas a su entrada (ver ejemplo en figura 7.1). De esta manera, el equipo efectúa un registro fotográfico de los desplazamientos que ocurren en la estructura, al efectuar mediciones estroboscópicas con las cuales es posible conocer el estado de la estructura como función del tiempo en el intervalo definido por el período de la señal de entrada. El vibrómetro se conecta a un computador que sirve de interfaz para la configuración de las experiencias de medición así como también el procesamiento de la información obtenida del equipo mediante herramientas de software proporcionadas por el fabricante del equipo.

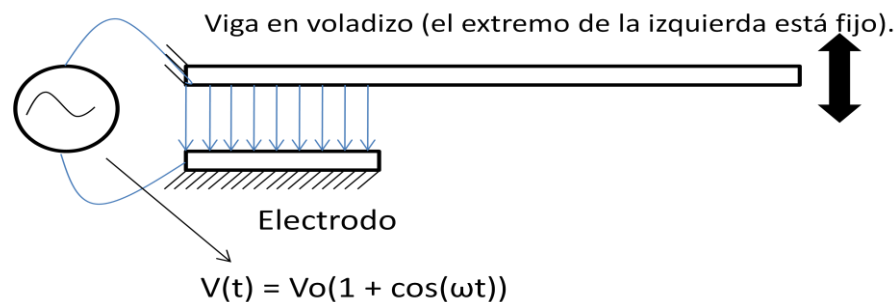


Figura 7.1. Accionamiento de las vigas mediante la señal proveniente del vibrómetro

Dentro de las funciones del vibrómetro, se encuentra la posibilidad de configurar señales periódicas, de magnitud variable, frecuencia variable y señales de amplitud variables con su componente de polarización. En cualquier caso, la señal será de magnitud pico-pico inferior a 10V.

De acuerdo con los resultados obtenidos de las simulaciones, las vigas describen deformaciones, para potenciales eléctricos aplicados con magnitudes superiores a los 100V. Conocida la limitación que implica la magnitud de la señal generada por el vibrómetro, se incluye un amplificador de alta ganancia (100) y baja frecuencia (aproximadamente 1 kHz) en la etapa de salida del vibrómetro y los electrodos conectados al arreglo con la microviga a examinar.

Para conocer la forma de onda de la señal amplificada (que debe ser sinusoidal) en función del tiempo, se emplea un osciloscopio digital que registrará la señal aplicada a las muestras durante el ensayo. Asimismo, el registro del osciloscopio permite conocer la magnitud de la señal en función del tiempo para así determinar la relación entre desplazamiento (registrado por el vibrómetro como función del tiempo) y el potencial eléctrico aplicado. Se ajusta la frecuencia a un valor lo suficientemente bajo, que en este caso correspondió a 10 Hz, con el cual es posible obtener una característica desplazamiento-voltaje, poco afectada por la dinámica de la estructura.

Tabla 7.1. Especificaciones de desempeño del vibrómetro para el ensayo de medición de flexión

<i>Característica</i>	<i>Descripción</i>
<i>Tipo de medición</i>	Desplazamiento planar
<i>Rango de frecuencia para vibración</i>	1 Hz – 1 MHz
<i>Velocidad máxima</i>	0,1m/s – 10 m/s (dependiente del aumento).
<i>Máxima amplitud pico-pico para desplazamientos a 2kHz para aumento de 50X</i>	179 μm
<i>Resolución para los desplazamientos</i>	1 nm
<i>Resolución temporal</i>	100ns (tiempo de exposición estroboscópica).

Tabla 7.2. Especificaciones de equipos utilizados en la medición de flexión en las microvigas como función del potencial aplicado

Nombre del equipo	Componente	Especificación técnica
Osciloscopio	<i>Unidad compacta</i>	Tektronix TPS 2014. 4 Channel Digital Storage Oscilloscope. 100 MHz. 1 GS/s.
Vibrómetro, Polytec Modelo MSA 500	<i>Componentes ópticos</i>	• Cámara de barrido progresivo, 1,4Mpíxel (1392 x 1040), Interfaz IEEE 1394 FireWire. • Fuente de luz de larga duración tipo LED, longitud de onda de 525 nm, longitud de coherencia $\approx 8\mu\text{m}$. • Láser de Clase 2 (nivel de seguridad) • Diámetro de haz, para la anchura a media altura (FWHM) de $\approx 0,9\mu\text{m}$ (con lente objetivo de 50X). • Escáner doble piezoeléctrico regulado, resolución: 512 x 512 puntos dentro del punto de vista. • Etapa de traslación piezoeléctrico-objetivo, rango máximo de la carrera: 250 μm. • Distancia parafocal de 95 mm. • Objetivo para medición de vibraciones con aumento de 50X, distancia segura de acercamiento ≥ 13 mm. Campo de visión de 0.18 mm x 0,134 mm, resolución por píxel de 0,129 μm, resolución vertical de 0,025 μm.
	<i>Etapa electrónica-óptica</i>	• Tarjeta generadora de patrones para producir pulsos estroboscópicos para la iluminación del objeto. • Generador interno de señales, de hasta 1 MHz, voltaje máximo de salida $\pm 10\text{V}$ con offset ajustable.
	<i>Sistema para administración de datos.</i>	• Computador personal industrial, Intel Core 2, 2,8 GHz, 4 GB RAM, 700 GB HDD. • Tarjeta de gráficos de alta gama. • Adaptador IEEE 1394 FireWire. • Interfaz de red tipo Ethernet LAN. • Sistema operativo Microsoft Windows ® XP.
Amplificador Electrónico	<i>Unidad compacta</i>	P 265 High Voltage Amplifier. Módulo 107. Ganancia = -100.

La figura 7.2 presenta el arreglo experimental empleado en las pruebas experimentales para medición de flexión en las microvigas. Las especificaciones de desempeño del vibrómetro para el ensayo de medición de flexión se presentan en la tabla 7.1. Asimismo, la descripción de los equipos empleados en las pruebas experimentales se presenta en la tabla 7.2.

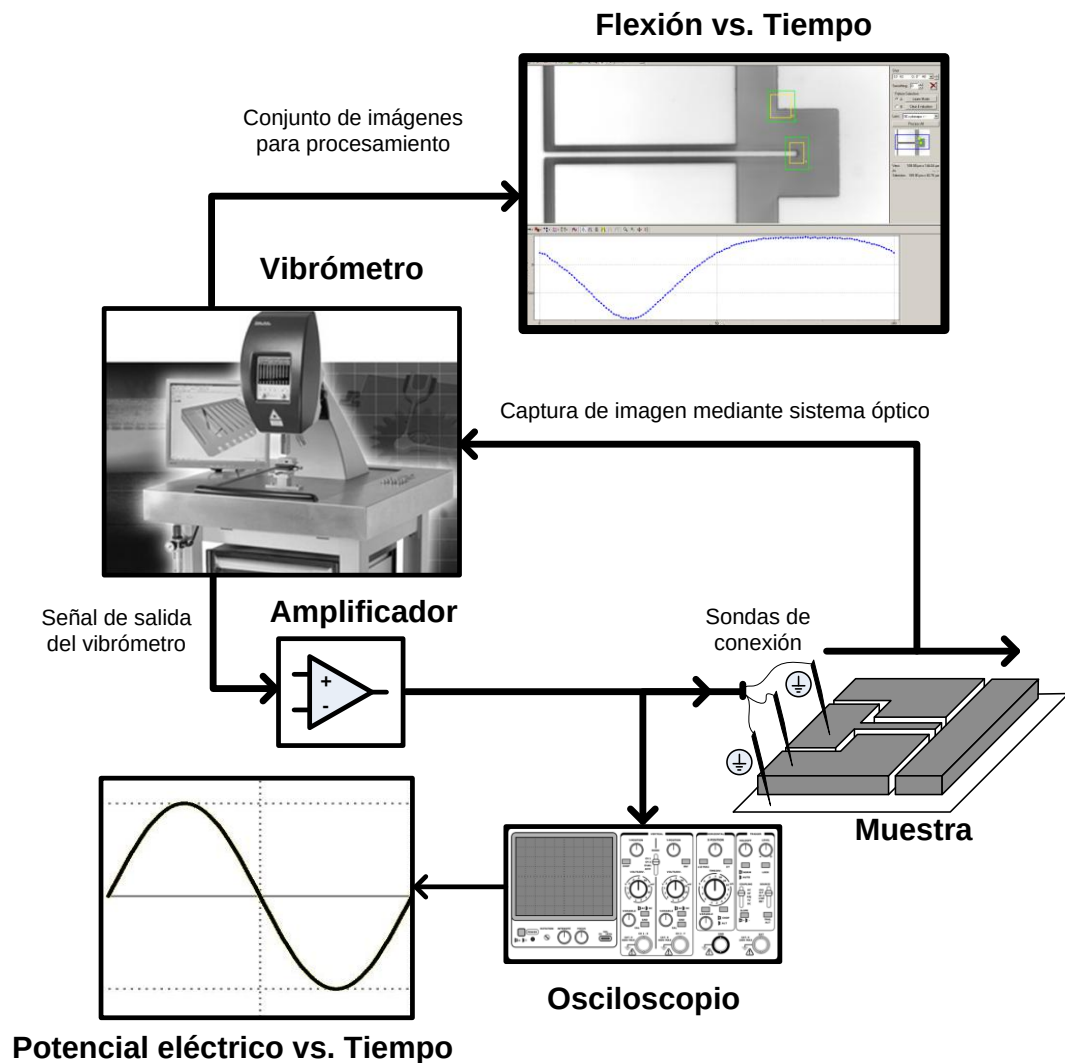


Figura 7.2. Arreglo experimental para medición de flexión en las microvigas como función del potencial aplicado

El ensayo realizado se describe a continuación:

1. Se conecta la microviga a ensayar y su electrodo de accionamiento al arreglo mostrado en el figura 7.2, verificando que tanto la microviga, como la capa de óxido de la muestra se encuentren al mismo potencial. En este sentido, se utilizan micro-sondas para la conexión eléctrica de las microestructuras al sistema de medición. En todo momento debe garantizarse que el sistema óptico del vibrómetro se encuentre adecuadamente enfocado sobre la región de la estructura donde se ocurren los desplazamientos a registrar, que para este caso corresponde a la región del extremo libre de la microviga. Esto garantiza el registro apropiado de los desplazamientos.
2. Se realiza la configuración del vibrómetro mediante la herramienta de software disponible para medición de desplazamientos en el plano. En esta herramienta se ajustan los parámetros de las señales que generará el vibrómetro para la ejecución de las pruebas, la cantidad de puntos (intervalos en un período) a registrar así como también el contraste y brillo de la imagen capturada.
3. Una vez realizada la configuración, se da inicio al ensayo donde se aplica la señal periódica de potencial eléctrico a la muestra a través del vibrómetro mientras se realiza el registro de imágenes de la muestra. La herramienta de procesamiento del vibrómetro genera un archivo con la secuencia de imágenes registradas, de esta forma es posible analizar la información obtenida del ensayo.
4. Con ayuda del osciloscopio se registra la señal aplicada a la muestra.
5. Se repiten los pasos 1, 2, 3 y 4 para todas las muestras.

Con los registros obtenidos de cada experiencia práctica, se realiza lo siguiente:

1. Se efectúa un ajuste de datos de la señal de salida del amplificador registrada por el osciloscopio (ver figura 7.2). La señal se ajusta a la expresión $v(t) = A + B \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f(=10 \text{ Hz}) \cdot t)$ con ayuda de MATLAB®.
2. Se procesan los archivos obtenidos del vibrómetro con la finalidad de obtener el gráfico desplazamiento vs. tiempo en el extremo libre de la microviga. El gráfico resultante se almacena en un archivo de texto plano para facilitar su procesamiento.
3. El rango de valores de las abscisas del gráfico obtenido del vibrómetro es evaluado en la expresión determinada en el paso 1. De esta manera se obtiene el rango de valores de potencial eléctrico asociado al rango de valores de las ordenadas del gráfico del vibrómetro. En consecuencia, se tiene el rango de valores necesarios para construir el gráfico desplazamiento vs. potencial eléctrico aplicado.

Los máximos desplazamientos obtenidos, luego de analizar los datos experimentales, se comparan con aquellos de las simulaciones (ver tabla 7.3). Para ello se efectúa un ajuste de los gráficos de las simulaciones mediante MATLAB ®. El apéndice B presenta los gráficos comparativos.

En otro orden de ideas, luego de efectuado el ensayo para determinación de la deflexión en las microvigas en función del potencial, se llevó a cabo un ensayo para la estimación de la frecuencia de resonancia en las vigas construidas. Este ensayo consiste en hacer oscilar las vigas mediante señales sinusoidales con su componente DC. Se mide entonces la amplitud en la flexión de las vigas para un rango de frecuencias de oscilación (establecido en la frecuencia de la señal sinusoidal). Luego se grafica la magnitud de la flexión en las vigas en función de la frecuencia con la finalidad de determinar la frecuencia donde ocurre el pico de resonancia. Con el software del vibrómetro se determinan las magnitudes en

decibeles de acuerdo con la expresión $20 \times \log(A_s/A_r)$, donde A_s es la amplitud de la oscilación medida en la viga a una frecuencia dada y A_r es una amplitud de referencia establecida como 1m.

Tabla 7.3. Tabla comparativa de los resultados experimentales y las simulaciones

Longitud de Microviga (μm)	Longitud de Electrodo (μm)	Máximo Potencial de accionamiento (V)	Desplazamientos en los extremos libres de las microvigas (luego de procesamiento)	
			Experimental (μm)	FEM (μm)
125	70	291	2,32	0,99
125	80	226,5	1,56	0,84
125	90	187,13	1,42	0,82
125	100	157,51	1,37	0,78
225	70	291	4,37	1,94
225	80	226,5	3,34	1,70
225	90	187,13	2,90	1,63
225	100	157,51	2,73	1,56
325	70	291	6,23	2,93
325	80	226,5	4,68	2,58
325	90	187,13	4,96	2,46
325	100	148,33	3,47	2,06
450	70	274,8	6,50	3,65
450	80	226,5	6,47	3,69
450	90	187,13	6,11	3,57
450	100	138,78	3,35	2,44

El arreglo experimental para el ensayo de frecuencia de resonancia es similar al mostrado en la figura 7.2 con la diferencia que se empleó un amplificador marca EasyLab modelo LM3325 con 8 canales, el cual ofrece el máximo ancho de banda disponible para el ensayo, correspondiente a 200 kHz. Vale la pena destacar que el amplificador utilizado para los ensayos de deflexión versus potencial eléctrico opera satisfactoriamente para frecuencias inferiores 1 kHz solamente.

Sobre la base de los análisis de los resultados de frecuencias propias mediante el método de los elementos finitos, y considerando las limitaciones impuestas por el amplificador seleccionado, el ensayo de frecuencia de resonancia quedó limitado a la microviga de 325 μm y 450 μm solamente. Sin embargo, solo fue posible obtener resultados útiles para la microviga de longitud igual a 450 μm .

Luego de llevar a cabo los ensayos para las 4 longitudes de electrodos asociadas a las 2 longitudes de microvigas antes mencionadas, se obtuvieron resultados solo para las longitudes de electrodos de 80 μm y 100 μm para las microvigas de 450 μm . Los resultados de magnitud en función de la frecuencia, se presentan en la figura 7.3.

De los gráficos mostrados en la figura 7.3, es posible obtener, mediante inspección gráfica, los factores de calidad en cada arreglo electrodo-viga respectivo. Para ello, se determina (para cada gráfico) el pico de frecuencia que corresponderá a la frecuencia de resonancia amortiguada y el ancho de banda delimitado por el rango de frecuencias que cortan la gráfica de magnitud a -3dB por debajo del pico de resonancia. El factor de calidad será el resultado del cociente entre la frecuencia de resonancia y el ancho de banda. Los resultados se muestran en la tabla 7.4.

Tabla 7.4. Factores de calidad obtenidos de los gráficos de magnitud-frecuencia para vigas de longitud 450 μm , actuadas mediante electrodos de longitud 80 μm y 100 μm .

Longitud de viga (μm)	Longitud de electrodo (μm)	Frecuencia amortiguada (Hz)	Factor Q
450	80	18.250	11,77
	100	18.250	13,52

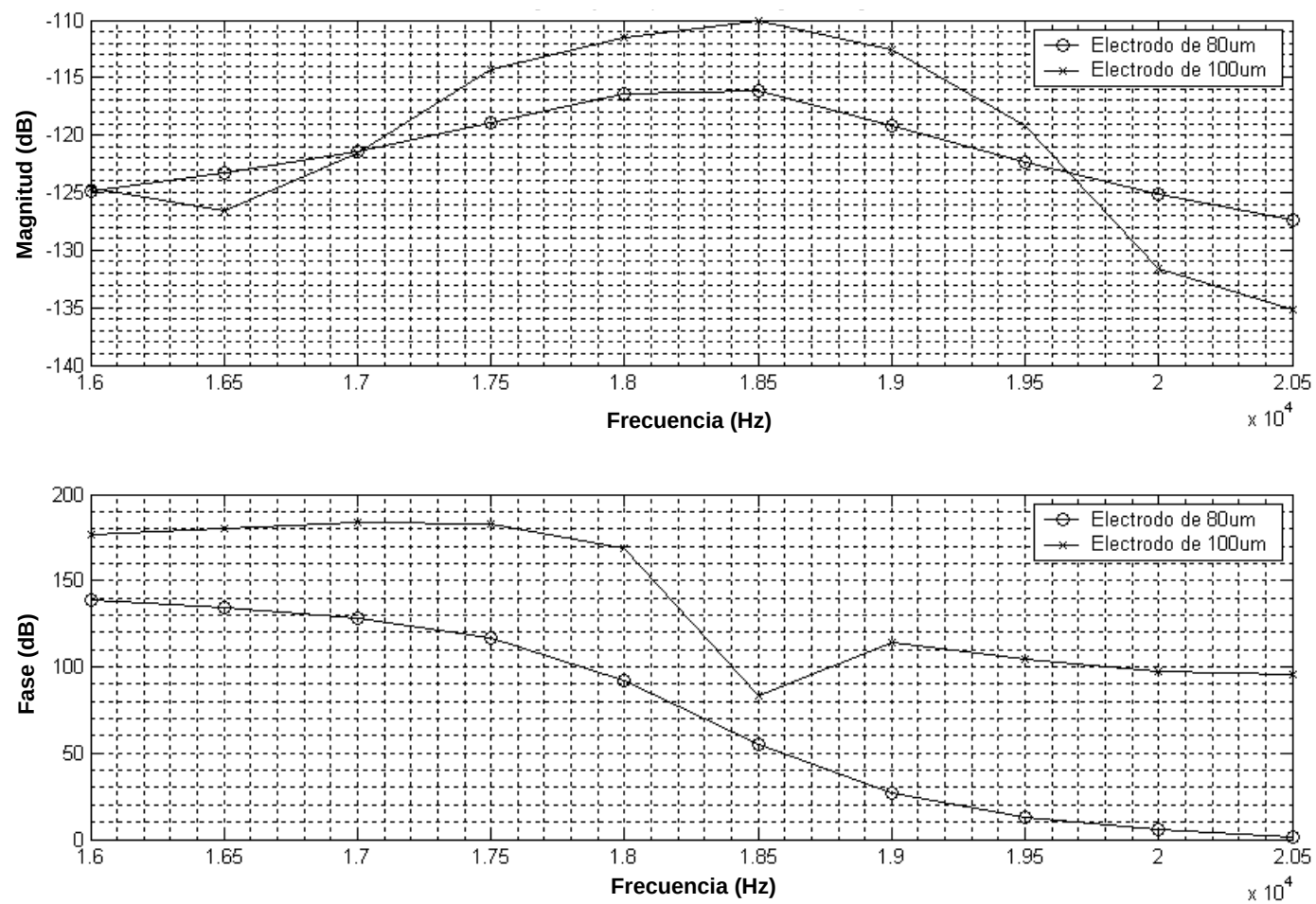


Figura 7.3. Gráfico de magnitud y fase para las microvigas de 450 μm accionadas mediante electrodos de longitud 80 μm , y 100 μm . Obtenidos del analizador de movimiento (vibrómetro).

Desarrollo de las pruebas experimentales para medición de potencial de ruptura

Los electrodos diseñados para la medición de potenciales de ruptura, obtenidos de Pianofoorte, fueron sometidos a un ensayo en el que gradualmente se incrementó la diferencia de potencial eléctrico aplicada entre el par de electrodos, midiéndose la corriente a través de la fuente para cada nuevo valor de potencial aplicado. En cada ensayo, el potencial eléctrico se incrementó desde 0 V hasta aquel valor donde la corriente a través de la fuente presentara un incremento súbito de aproximadamente 10.000 veces la magnitud de la corriente de fuga.

Antes de someter los electrodos al ensayo de potencial de ruptura, se realizó la medición de la separación existente entre cada par de electrodos resultante de la etapa de fabricación correspondiente al parámetro g mostrado en la figura 4.11.

Para determinar la distancia entre los planos de las caras de los electrodos, se establece la premisa que estos son paralelos. Por lo tanto, medir la separación entre las caras de los electrodos se basa en conocer el promedio de las distancias entre puntos pertenecientes a cada plano a lo largo de la dimensión w (ver figura 4.11) tal y como se ilustra en la figura 7.4. Además de determinar la separación promedio ($\bar{g}$), se calcula la incertidumbre asociada obtenida de la desviación estándar s_g (véanse las expresiones 7.1 y 7.2).

$$\bar{g} = \frac{\sum_{i=1}^n g_i}{n} \quad (7.1)$$

$$s_g = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (g_i - \bar{g})^2}{n-1}} \quad (7.2)$$

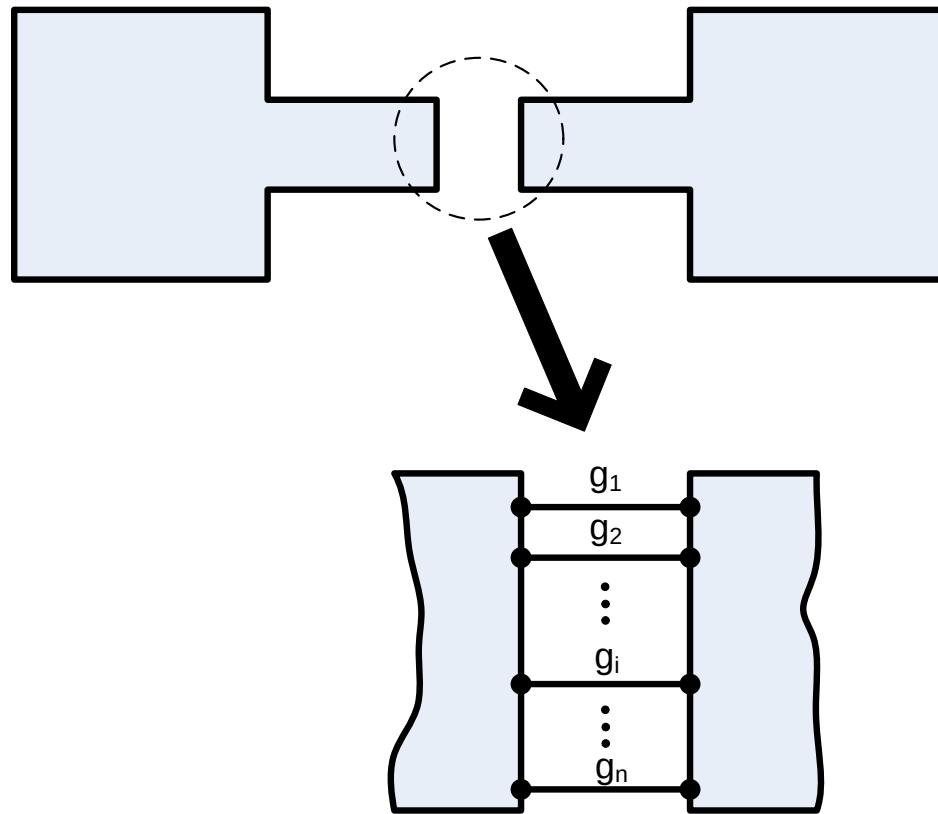


Figura 7.4. Distribución de puntos para la determinación de la separación entre electrodos

La determinación de las distancias entre las caras de los electrodos se realizó mediante la inspección de las imágenes capturadas para cada par de electrodos con una cámara integrada a un microscopio óptico (las especificaciones de estos equipos se presentan en la tabla 7.5). Para ello también se contó con una interfaz de visualización y manipulación conectada a la cámara (identificada en la tabla 7.5), con la cual se almacenó la imagen capturada con una resolución de 2500x1290 píxeles.

Tabla 7.5. Equipos utilizados y ajustes realizados en la inspección óptica de las muestras con los electrodos a ensayar

Nombre de equipo	Descripción/Ajuste
Microscopio	LEICA DM 2500-M Aumento de 100X
Cámara	NIKON Digital Sight DS-Fi1 114923
Interfaz HMI	NIKON Digital Sight DS-L2 213496 Ajuste en imagen de 2500x1920 píxel

En el mismo orden de ideas, se empleó la herramienta de software ImageJ para tomar las medidas sobre cada imagen capturada, escalando los resultados en píxel a micra. Para escalar apropiadamente las medidas, el sistema de visualización ofrece diferentes escalas con las cuales es posible asignar unidades de longitud a las imágenes capturadas. En todo momento es necesario mantener el mismo ajuste de aumento en el microscopio. En total se examinaron 36 muestras que incluyen 2 parejas de electrodos separados a distancias comprendidas dentro del rango de 3 μm a 20 μm . Los resultados de calcular las separaciones promedios, así como sus desviaciones estándar, se presentan en la tabla 7.6.

Para asignar la escala adecuada a la imagen (micras/píxel), se dispone de una muestra patrón que consiste en un conjunto de cuadrados de 5x5 μm distribuidos en la superficie de un chip de Silicio. La distancia entre lados de cuadrados que se enfrentan es de 5 μm . La imagen de la muestra patrón se presenta en la figura 7.5 y en la esquina inferior derecha se encuentra la escala ajustada con la interfaz de visualización (10 x 10 μm).

Tabla 7.6. Resultados obtenidos de la determinación de las separaciones entre electrodos luego de procesar las imágenes capturadas

Muestra	s_g (píxel)	s_g (μm)	$\bar{g}$ (píxel)	$\bar{g}$ (μm)
3 μm (a)	0,97	0,05	67,23	3,33
3 μm (b)	0,92	0,05	65,80	3,26
4 μm (a)	1,16	0,06	85,00	4,21
4 μm (b)	1,35	0,07	85,40	4,23
5 μm (a)	0,82	0,04	104,30	5,16
5 μm (b)	0,82	0,04	105,00	5,20
6 μm (a)	0,88	0,04	125,10	6,19
6 μm (b)	0,74	0,04	125,10	6,19
7 μm (a)	0,79	0,04	146,80	7,27
7 μm (b)	1,20	0,06	148,10	7,33
8 μm (a)	1,46	0,07	168,97	8,36
8 μm (b)	1,20	0,06	167,10	8,27
9 μm (a)	1,89	0,09	188,00	9,31
9 μm (b)	1,17	0,06	187,60	9,29
10 μm (a)	2,01	0,10	205,50	10,17
10 μm (b)	1,87	0,09	206,20	10,21
11 μm (a)	1,17	0,06	228,60	11,32
11 μm (b)	1,90	0,09	226,50	11,21
12 μm (a)	2,68	0,13	248,50	12,30
12 μm (b)	2,60	0,13	246,90	12,22
13 μm (a)	1,41	0,07	269,00	13,32
13 μm (b)	1,69	0,08	267,20	13,23
14 μm (a)	2,01	0,10	284,60	14,09
14 μm (b)	1,57	0,08	286,13	14,17
15 μm (a)	1,16	0,06	305,30	15,11
15 μm (b)	1,16	0,06	302,30	14,97
16 μm (a)	0,92	0,05	325,20	16,10
16 μm (b)	1,37	0,07	325,10	16,09
17 μm (a)	0,88	0,04	346,90	17,17
17 μm (b)	1,37	0,07	346,10	17,13
18 μm (a)	1,32	0,07	369,20	18,28
18 μm (b)	0,95	0,05	366,70	18,15
19 μm (a)	1,05	0,05	385,00	19,06
19 μm (b)	1,08	0,05	388,40	19,23
20 μm (a)	0,85	0,04	406,50	20,12
20 μm (b)	1,49	0,07	406,00	20,10

En la imagen de la figura 7.5 se determina la relación entre longitud y número de píxeles con tan solo medir sobre las escalas indicadas en el extremo de la figura. Asimismo, debe estimarse la incertidumbre que introduce el uso de la escala y para ello se realiza un conjunto de medidas de longitud en tramos de cuadros alineados en filas y en columnas, manteniendo siempre la misma cantidad de cuadros en los tramos paralelos. En consecuencia, se obtiene la desviación estándar para el conjunto de medidas en las filas así como también para el conjunto en las columnas. Estas dos desviaciones se manejan como errores independientes para estimar la incertidumbre asociada al uso de la escala (que se asociará a s_E).

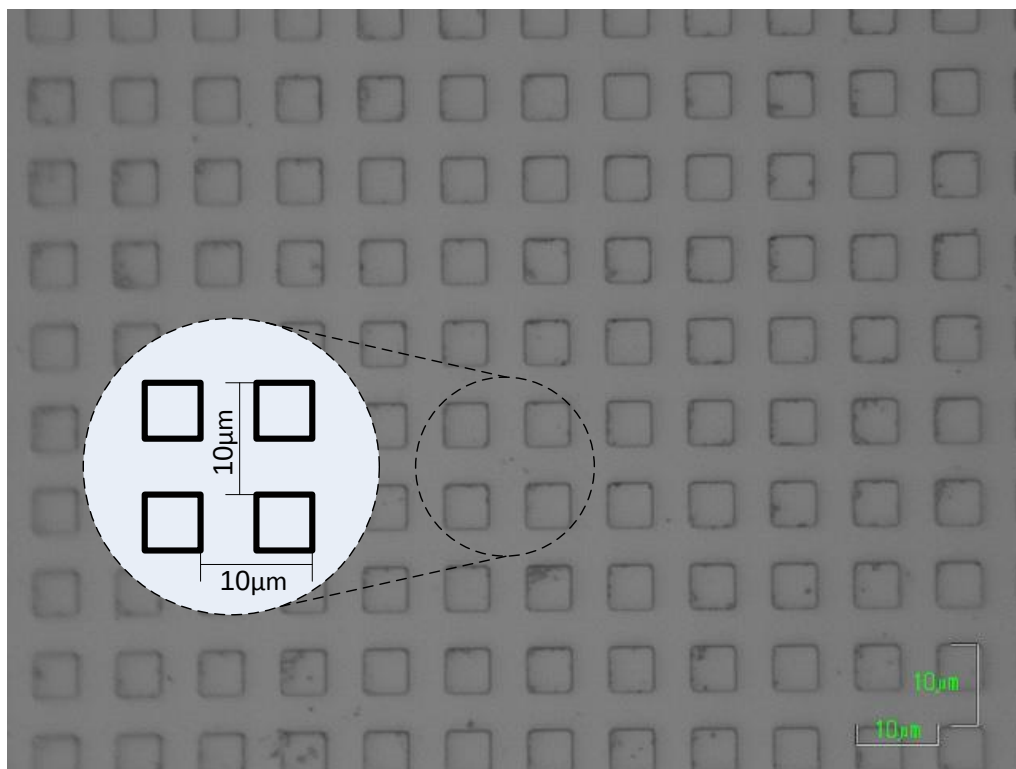


Figura 7.5. Imagen de la muestra patrón de calibración del microscopio

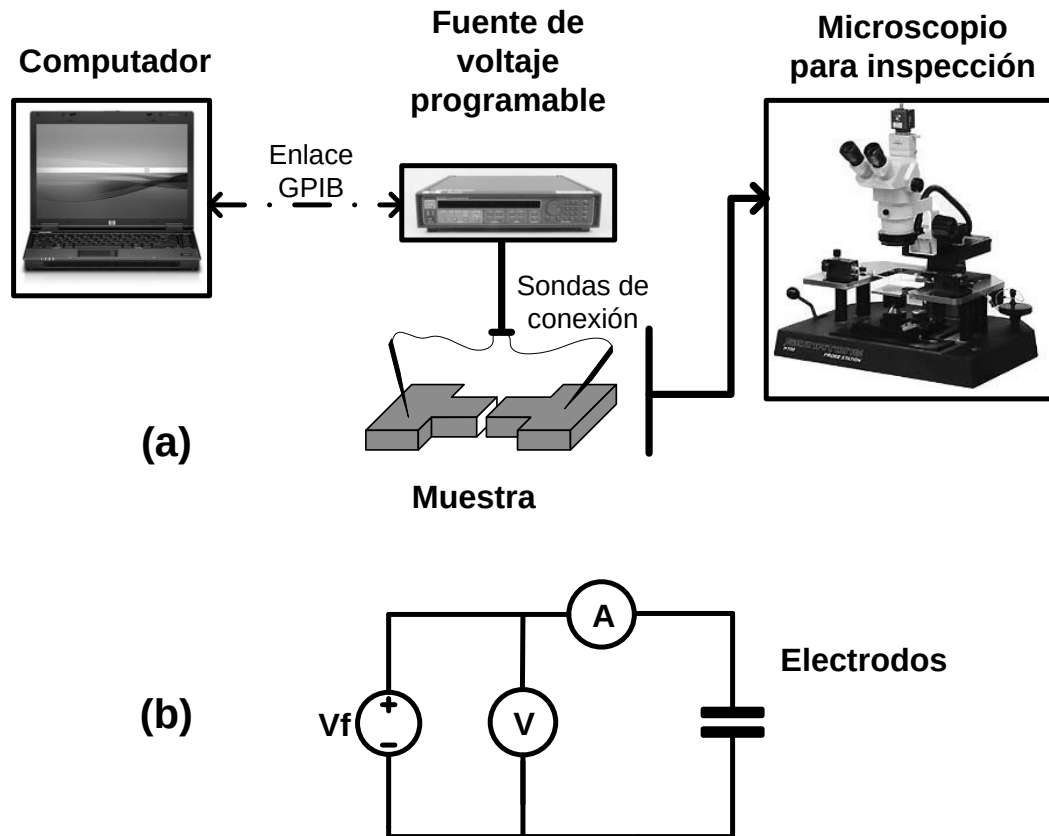
Como la medición de la separación entre electrodos pasa por el previo conocimiento de la proporción existente entre la medida en píxel y su equivalente en unidades de longitud, entonces para cada separación medida se atribuye una incertidumbre debida a la contribución de s_E y s_g como errores dependientes. De esta manera, se tiene el conjunto de datos correspondientes a las separaciones entre electrodos y su incertidumbre estimada correspondiente, como se muestra en la tabla 7.7.

Una vez determinada la separación entre los electrodos, se llevó a cabo los ensayos para la medir los potenciales de ruptura dieléctrica. Tal y como se describió anteriormente, el ensayo se basó en aplicar una diferencia de potencial eléctrico variable entre los electrodos a examinar. Esta diferencia de potencial se incrementa gradualmente desde 0 V en pasos de 1 V, registrando en todo momento el potencial aplicado y la intensidad de corriente eléctrica que circula a través de la fuente. Cuando el potencial es tal que provoca la ruptura del dieléctrico presente entre los electrodos, ocurre un cambio súbito en la magnitud de la intensidad de corriente.

El montaje utilizado para determinar el potencial de ruptura dieléctrica de los electrodos se muestra en la figura 7.6. La descripción de los equipos empleados se presenta en la tabla 7.8.

Tabla 7.7. Separación entre electrodos utilizados para los ensayos de potencial de ruptura dieléctrica

<i>Incertidumbre en patrón por filas</i> <i>$s_{ph} (\mu m)$</i>	0,03
<i>Incertidumbre en patrón por columnas</i> <i>$s_{pv} (\mu m)$</i>	0,05
<i>Incertidumbre combinada</i> <i>$s_E (\mu m)$</i>	0,06
<i>Muestra</i>	<i>Medida</i> <i>$\bar{g} \pm (s_E + s_g)$</i>
3 μm (a)	3,33 $\pm$ 0,11
3 μm (b)	3,26 $\pm$ 0,11
4 μm (a)	4,21 $\pm$ 0,12
4 μm (b)	4,23 $\pm$ 0,13
5 μm (a)	5,16 $\pm$ 0,10
5 μm (b)	5,20 $\pm$ 0,10
6 μm (a)	6,19 $\pm$ 0,10
6 μm (b)	6,19 $\pm$ 0,10
7 μm (a)	7,27 $\pm$ 0,10
7 μm (b)	7,33 $\pm$ 0,12
8 μm (a)	8,36 $\pm$ 0,13
8 μm (b)	8,27 $\pm$ 0,12
9 μm (a)	9,31 $\pm$ 0,15
9 μm (b)	9,29 $\pm$ 0,12
10 μm (a)	10,17 $\pm$ 0,16
10 μm (b)	10,21 $\pm$ 0,15
11 μm (a)	11,32 $\pm$ 0,12
11 μm (b)	11,21 $\pm$ 0,15
12 μm (a)	12,30 $\pm$ 0,19
12 μm (b)	12,22 $\pm$ 0,19
13 μm (a)	13,32 $\pm$ 0,13
13 μm (b)	13,23 $\pm$ 0,14
14 μm (a)	14,09 $\pm$ 0,16
14 μm (b)	14,17 $\pm$ 0,14
15 μm (a)	15,11 $\pm$ 0,12
15 μm (b)	14,97 $\pm$ 0,12
16 μm (a)	16,10 $\pm$ 0,11
16 μm (b)	16,09 $\pm$ 0,13
17 μm (a)	17,17 $\pm$ 0,10
17 μm (b)	17,13 $\pm$ 0,13
18 μm (a)	18,28 $\pm$ 0,13
18 μm (b)	18,15 $\pm$ 0,11
19 μm (a)	19,06 $\pm$ 0,11
19 μm (b)	19,23 $\pm$ 0,11
20 μm (a)	20,12 $\pm$ 0,10
20 μm (b)	20,10 $\pm$ 0,13



**Figura 7.6. Arreglo experimental utilizado para la medición de potencial de ruptura en electrodos para separaciones comprendidas entre $3 \mu\text{m}$ y $20 \mu\text{m}$.
(a) Diagrama general. (b) Circuito eléctrico equivalente**

Cuando se llevan a cabo las pruebas sobre los electrodos, se registra el valor de intensidad de corriente eléctrica presente (I) para cada valor de potencial eléctrico aplicado (V). De esta manera se obtiene un gráfico I vs V del cual se extrae la información de interés, que para este caso corresponde al potencial de ruptura dieléctrica. Sin embargo, como se observa en la figura 7.7, en el gráfico la relación I/V es lineal para el primer rango de valores de potencial eléctrico (encerrados en la región 1) y esto es debido a la presencia de corriente de fuga.

Seguidamente, para un segundo rango de valores de potencial (región 2), la relación I/V deja de ser lineal hasta que ocurre el aumento significativo en la corriente (región 3).

Tabla 7.8. Especificaciones de equipos utilizados en la medición de potencial de ruptura

Nombre del equipo	Especificación técnica
Fuente de alto voltaje	Keithley 237. High Voltage Source Measure Unit. <i>Fuente de tensión</i> Máximo Rango $\pm 1.100,0$ V. Mínimo incremento 100mV. Exactitud (1 año, 18° - 28°C) $\pm (0,04 \% + 240 \text{ mV})$. <i>Mediciones voltimétricas</i> Máximo Rango $\pm 1.100,0$ V. Resolución 10 mV Exactitud (1 año, 18° - 28°C) $\pm (0,035 \% + 100 \text{ mV})$. <i>Mediciones amperimétricas</i> Máxima corriente ± 10 mA Resolución 100 fA Exactitud (1 año, 18° - 28°C) $\pm (0,3 \% + 1 \text{ pA})$.
Controllador GPIB para USB	National Instruments GPIB-USB-B. Compatibilidad con IEEE 488.1 e IEEE 488.2.
Computador Portátil	ACER Travel Mate 8000. Procesador Intel Pentium 1.600 MHz 512 MB RAM. Windows XP Professional 2002. Service Pack 2.
Microscopio	LEICA DM 2500-M Aumento de 100X
Sondas de conexión	Sondas marca The Micromanipulator.

Determinar un valor asociado al potencial de ruptura dieléctrica pasa por conocer el potencial para el cual la corriente adopta valores (por encima de V_{PR} en la figura 7.7) tales que en el gráfico aparece una componente adicional a la corriente de fuga, es decir; cuando se trabaja en la región 2 (ver figura 7.7). De la figura 7.7 resulta evidente que para V_R ocurre el mayor incremento de intensidad de corriente. Sin embargo, es a partir de V_{PR} cuando la estructura (en este el arreglo de electrodos) sufre cambios físicos generalmente irreversibles,

como consecuencia del potencial aplicado. Es así como estimar el valor de V_{PR} , el cual se referirá como pre-ruptura, es un enfoque conservador a considerar en el presente trabajo, por encontrarse enmarcado en el diseño de un sistema microelectromecánico.

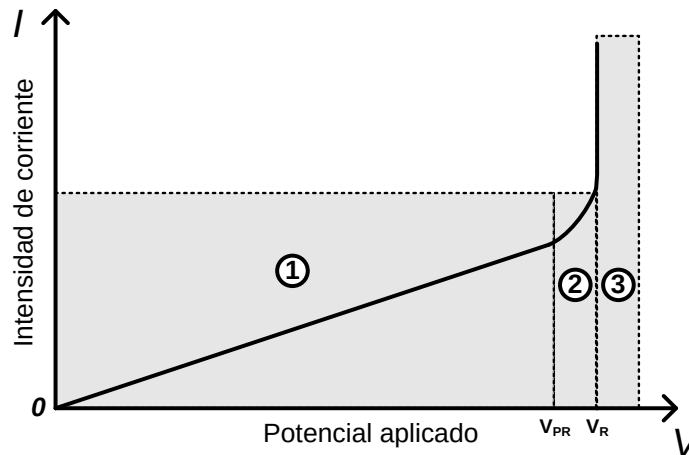


Figura 7.7. Gráfico que relaciona la intensidad de corriente y potencial eléctrico aplicado, obtenida del ensayo de medición de potencial de ruptura

Como en la región 1 (ver figura 7.7), la relación I vs V es lineal, entonces al aplicar la primera y segunda derivada al gráfico, es de esperarse una constante y el cero respectivamente, en la mencionada región. En este sentido, con el gráfico de la segunda derivada aplicado a la curva I vs V , es posible determinar con propiedad el valor de V_{PR} teniendo como condición que V_{PR} será aquel valor donde la segunda derivada adquiere un valor distinto de cero y mantiene una tendencia creciente. La figura 7.8 presenta el comportamiento esperado en los gráficos resultantes al aplicar primera y segunda derivada.

En el mismo orden de ideas, una vez realizados los ensayos a los electrodos, con el uso de MATLAB® se determina la aproximación de la primera y segunda derivada a los datos obtenidos mediante el comando *diff*. Los datos obtenidos de aplicar la segunda derivada presentan una distribución alrededor de cero, es

decir, no resultan exactamente en este valor como es de esperarse. Estableciendo que cero (0) es la estimación para los valores de segunda derivada, se calcula la raíz del error medio cuadrático para el conjunto de datos que conforman la segunda derivada. De esta manera se cuenta con una estimación del error que aporta la presencia de datos fuera del criterio de referencia (magnitud cero). Asimismo, se tiene la base para determinar el error asociado el criterio seguido en cálculo de V_{PR} . La figura 7.9 ilustra la forma de la distribución de datos de la segunda derivada sobre la estimación de V_{PR} .

La distribución de los datos de la segunda derivada de la corriente alrededor del valor esperado (cero) en la región de pre-ruptura, debe contribuir en el error total del valor del VPR. Para estimar esta contribución, primero se determina la raíz del error cuadrático medio (RMSE por Root Mean Square Error) asociada a la distribución antes mencionada. Para ello se aplica la ecuación 7.3, donde n es el número de elementos del conjunto, t es el valor asociado al centro de la distribución de datos correspondiente a cero e y_i es el valor correspondiente de la segunda derivada en la posición i . El error resultante se identifica como $esdl$.

$$RMSE(t) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - t)^2} \quad (7.3)$$

Luego de conocido el RMSE, se establece el criterio a seguir para estimar V_{PR} y su error asociado. El potencial V_{PR} se establece como el valor de potencial para el cual la segunda derivada de la intensidad de corriente se incrementa irreversiblemente de cero hasta el pico característico mostrado en la figura 7.8(c).

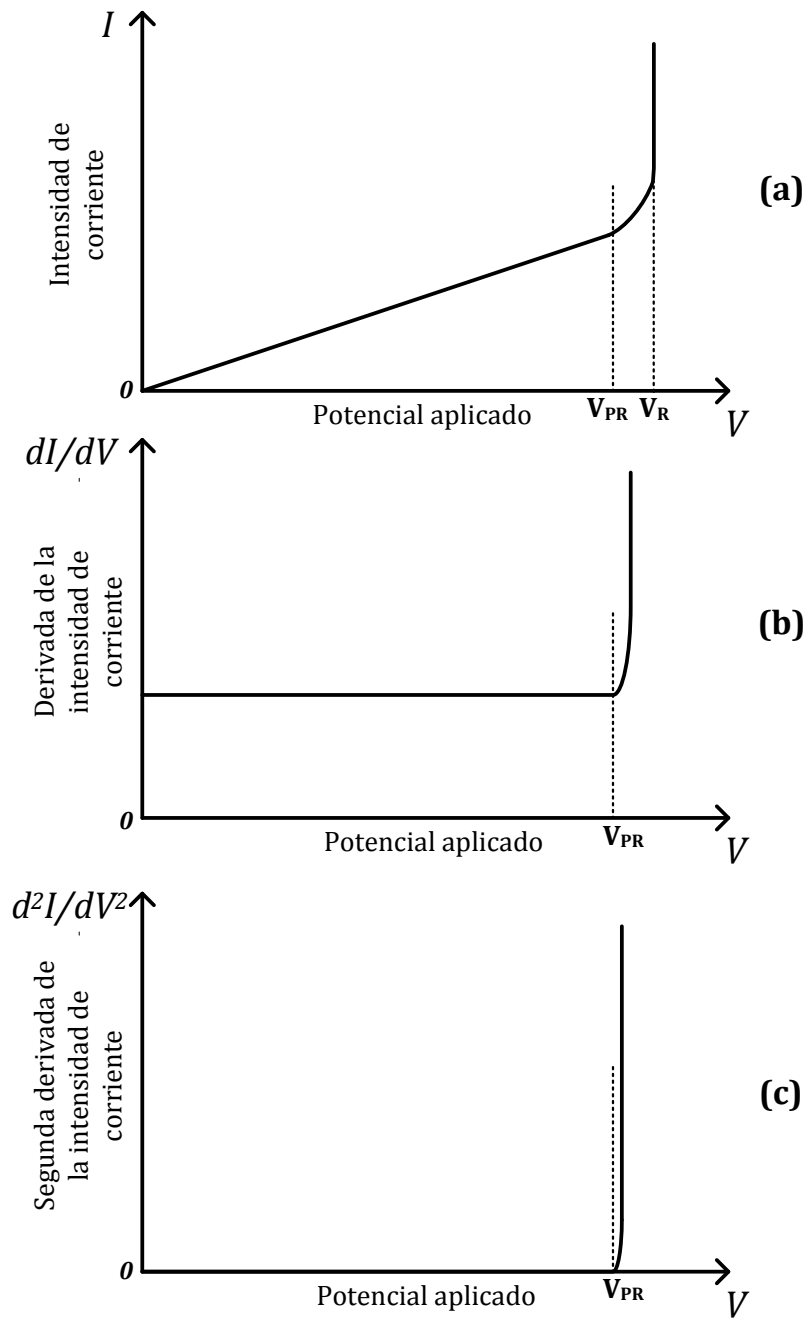


Figura 7.8. Gráficos asociados al ensayo de determinación de potencial de ruptura dieléctrica. (a) Gráfico I vs V general (b) Primera Derivada al gráfico I vs V y (c) Segunda Derivada al gráfico I vs V .

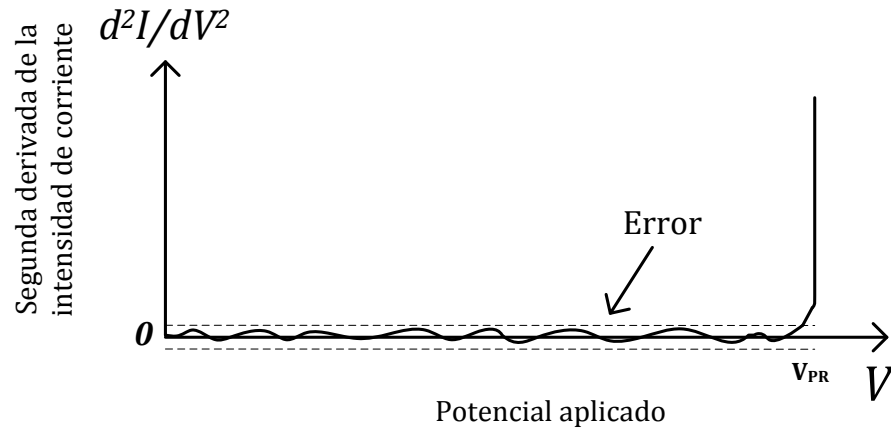


Figura 7.9. Distribución de magnitudes de la segunda derivada respecto al valor cero.

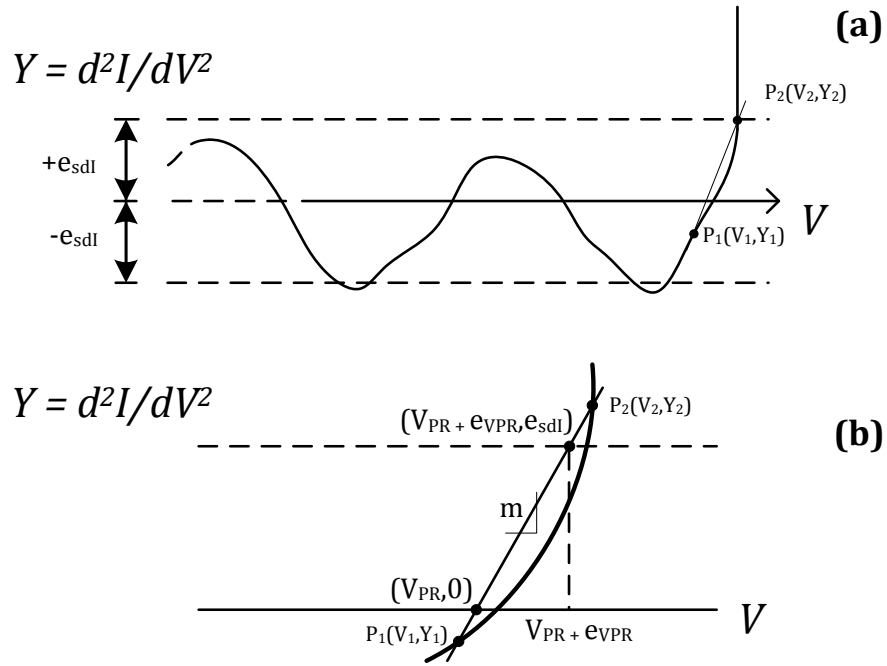


Figura 7.10. Determinación del error asociado al potencial de pre-ruptura V_{PR} . (a) Error en la distribución de los datos de segunda derivada y puntos de referencia P_1 y P_2 para determinar V_{PR} y su error asociado, (b) Detalle de P_1 y P_2 para la determinación de V_{PR} y su error.

En este sentido, para determinar V_{PR} del gráfico de la segunda derivada, se inspecciona la curva en la región donde la salida sufre el incremento desde cero hasta un pico. De esta inspección se toman dos puntos mediante inspección visual: uno de ellos identificado como P_1 , ubicado inmediatamente por debajo de $y = 0$ (o en $y = 0$) y otro, identificado como P_2 , localizado inmediatamente por encima del valor correspondiente a $esdl$ (véase la figura 7.10(a)). Estos dos puntos definen una recta que intercepta las rectas paralelas $y = 0$ e $y = esdl$. De esta intersección resultan dos puntos con los cuales es posible tener V_{PR} y una desviación, dependiente de $esdl$, que se identifica como e_{VPR} . La tabla 7.8 presenta los puntos obtenidos para cada grupo de datos, los errores $esdl$ y e_{VPR} .

La figura 7.11 presenta el gráfico V (potencial eléctrico) vs g (separación entre electrodos) que resume los resultados plasmados en las tablas 7.7 y 7.9. Resulta interesante comparar la ley de Paschen con los datos obtenidos y mostrados en la figura 7.11. La expresión 7.4 describe la relación entre el potencial eléctrico de ruptura V_b y la separación entre electrodos d (sometidos a una diferencia de potencial) de acuerdo con Paschen, para condiciones de presión de trabajo dada (Rodríguez *et al.*, 2009).

$$V_b = \frac{B \times p \times d}{\ln\left(\frac{A \times p \times d}{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}\right)} \quad (7.4)$$

Donde γ se conoce como el coeficiente secundario de ionización, cuyo valor generalmente se desconoce. Los valores de los coeficientes (γ incluido) de la expresión 7.4 para aire, se presentan en la tabla 7.10.

Tabla 7.9. Resultados de procesar los gráficos I vs V obtenidos de los ensayos de potencial de ruptura dieléctrica.

Muestra	X_1 (V)	Y_1 (A/V ²)	X_2 (V)	Y_2 (A/V ²)	V_{PR} (V)	e_{sdl} (A/V ²)	e_{VPR} (V)
3um-a	379	-2,00.10 ⁻¹¹	385	1,51.10 ⁻⁹	379,08	4,83.10 ⁻¹⁰	1,89
3um-b	385	-1,00.10 ⁻¹¹	386	1,40.10 ⁻¹⁰	385,07	3,85.10 ⁻¹¹	2,57.10 ⁻¹
4um-a	357	-5,09.10 ⁻¹⁰	364	7,85.10 ⁻⁵	357,00	3,37.10 ⁻¹¹	3,01.10 ⁻⁶
4um-b	357	-7,30.10 ⁻¹¹	362	3,70.10 ⁻¹¹	360,32	7,22.10 ⁻¹²	3,28.10 ⁻¹
5um-a	353	-3,62.10 ⁻¹⁰	356	8,67.10 ⁻⁵	353,00	2,41.10 ⁻¹¹	8,34.10 ⁻⁷
5um-b	353	-1,57.10 ⁻¹⁰	354	8,52.10 ⁻⁵	353,00	2,66.10 ⁻¹¹	3,12.10 ⁻⁷
6um-a	343	-5,00.10 ⁻¹²	344	2,73.10 ⁻⁹	343,00	3,83.10 ⁻¹⁰	1,40.10 ⁻¹
6um-b	345	-2,78.10 ⁻¹⁰	350	8,01.10 ⁻⁵	345,00	2,26.10 ⁻¹¹	1,41.10 ⁻⁶
7um-a	318	-2,00.10 ⁻¹¹	323	5,41.10 ⁻⁵	318,00	9,62.10 ⁻¹¹	8,89.10 ⁻⁶
7um-b	349	-2,86.10 ⁻⁹	350	8,40.10 ⁻⁵	349,00	1,97.10 ⁻¹⁰	2,34.10 ⁻⁶
8um-a	350	-5,68.10 ⁻¹⁰	352	7,23.10 ⁻⁵	350,00	6,38.10 ⁻¹¹	1,77.10 ⁻⁶
8um-b	344	-7,48.10 ⁻¹⁰	349	5,47.10 ⁻¹⁰	346,89	1,13.10 ⁻¹⁰	4,35.10 ⁻¹
9um-a	350	-5,45.10 ⁻¹⁰	354	9,67.10 ⁻⁸	350,02	5,15.10 ⁻⁹	2,12.10 ⁻¹
9um-b	350	-6,32.10 ⁻⁹	351	6,34.10 ⁻⁵	350,00	4,16.10 ⁻¹⁰	6,55.10 ⁻⁶
10um-a	356	-1,75.10 ⁻⁹	358	4,67.10 ⁻⁹	356,55	2,80.10 ⁻¹⁰	8,71.10 ⁻²
10um-b	354	-1,81.10 ⁻¹⁰	358	2,69.10 ⁻⁹	354,25	1,44.10 ⁻¹⁰	2,00.10 ⁻¹
11um-a	366	-2,29.10 ⁻¹⁰	367	1,95.10 ⁻¹⁰	366,54	3,02.10 ⁻¹¹	7,13.10 ⁻²
11um-b	360	-3,72.10 ⁻¹⁰	361	8,40.10 ⁻¹¹	360,82	2,44.10 ⁻¹¹	5,35.10 ⁻²
12um-a	374	-6,09.10 ⁻¹⁰	375	2,42.10 ⁻¹⁰	374,72	5,38.10 ⁻¹¹	6,32.10 ⁻²
12um-b	374	-4,53.10 ⁻⁹	375	1,66.10 ⁻⁵	374,00	2,94.10 ⁻¹⁰	1,77.10 ⁻⁵
13um-a	380	-3,40.10 ⁻¹¹	382	6,68.10 ⁻⁹	380,01	3,43.10 ⁻¹⁰	1,02.10 ⁻¹
13um-b	379	-5,40.10 ⁻¹¹	381	2,14.10 ⁻⁹	379,05	1,98.10 ⁻¹⁰	1,81.10 ⁻¹
14um-a	385	-2,56.10 ⁻⁹	387	3,25.10 ⁻⁹	385,88	2,39.10 ⁻¹⁰	8,23.10 ⁻²
14um-b	386	-1,00.10 ⁻¹¹	389	3,03.10 ⁻⁵	386,00	2,23.10 ⁻¹⁰	2,21.10 ⁻⁵
15um-a	395	-1,00.10 ⁻¹²	397	6,77.10 ⁻⁹	395,00	3,40.10 ⁻¹⁰	1,01.10 ⁻¹
15um-b	394	-1,00.10 ⁻¹²	395	3,61.10 ⁻⁹	394,00	1,99.10 ⁻¹⁰	5,51.10 ⁻²
16um-a	406	-2,00.10 ⁻¹²	407	3,90.10 ⁻⁹	406,00	1,95.10 ⁻¹⁰	5,00.10 ⁻²
16um-b	408	-1,36.10 ⁻¹⁰	409	1,30.10 ⁻⁶	408,00	9,28.10 ⁻¹²	7,14.10 ⁻⁶
17um-a	414	-3,40.10 ⁻¹¹	416	4,07.10 ⁻⁹	414,02	2,00.10 ⁻¹⁰	9,75.10 ⁻²
17um-b	414	-1,00.10 ⁻¹²	417	2,17.10 ⁻⁶	414,00	1,91.10 ⁻¹¹	2,64.10 ⁻⁵
18um-a	431	-3,86.10 ⁻¹⁰	432	5,43.10 ⁻⁹	431,07	6,50.10 ⁻¹⁰	1,12.10 ⁻¹
18um-b	426	-3,50.10 ⁻¹⁰	428	8,13.10 ⁻⁵	426,00	2,59.10 ⁻¹¹	6,37.10 ⁻⁷
19um-a	428	-2,22.10 ⁻¹⁰	435	1,37.10 ⁻⁹	428,98	6,74.10 ⁻¹¹	2,97.10 ⁻¹
19um-b	435	0	437	1,72.10 ⁻⁶	435,00	3,21.10 ⁻¹¹	3,74.10 ⁻⁵
20um-a	447	-2,00.10 ⁻¹⁰	450	9,33.10 ⁻⁷	447,00	1,32.10 ⁻¹¹	4,23.10 ⁻⁵
20um-b	441	-5,00.10 ⁻¹¹	443	1,92.10 ⁻⁹	441,05	4,18.10 ⁻¹⁰	4,24.10 ⁻¹

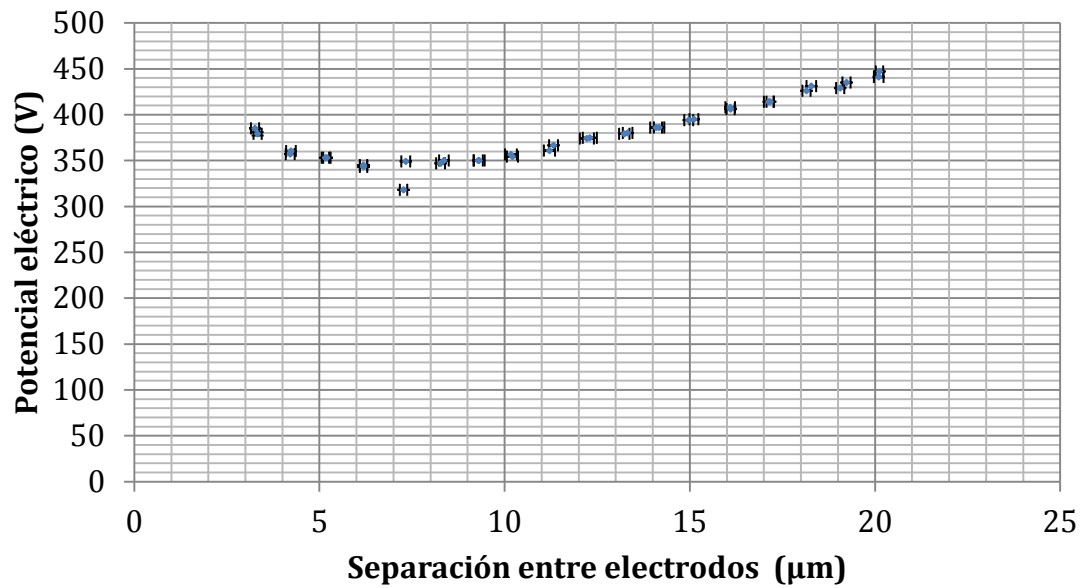


Figura 7.11. Gráfico de Potencial eléctrico de ruptura vs separación de electrodos obtenido luego de procesados los resultados de los ensayos.

Tabla 7.10. Coeficientes aplicados en la ley de Paschen para aire (Rodríguez et al.,2009).

A [cm ⁻¹ Torr ⁻¹]	B [V cm ⁻¹ Torr ⁻¹]	γ
15	365	10 ⁻²

La figura 7.12 presenta los gráficos de una serie de datos de potencial de ruptura obtenidos experimentalmente (tabla 7.8) y otra de potenciales eléctricos resultantes de aplicar la expresión 7.2, en función del producto $p \times d$ para $p=1$ atm y d comprendida entre 5 μm y 20 μm . Se han obviado los valores de incertidumbre determinados en los valores experimentales y solo se han adoptado los valores enteros, teóricamente establecidos para d .

Al evaluar la expresión de la ley de Paschen, se obtienen valores de potencial negativo para separaciones inferiores a 5 μm . Es por ello que estos casos se

descartan al no ser posible obtener un resultado interpretable físicamente de la expresión 7.2.

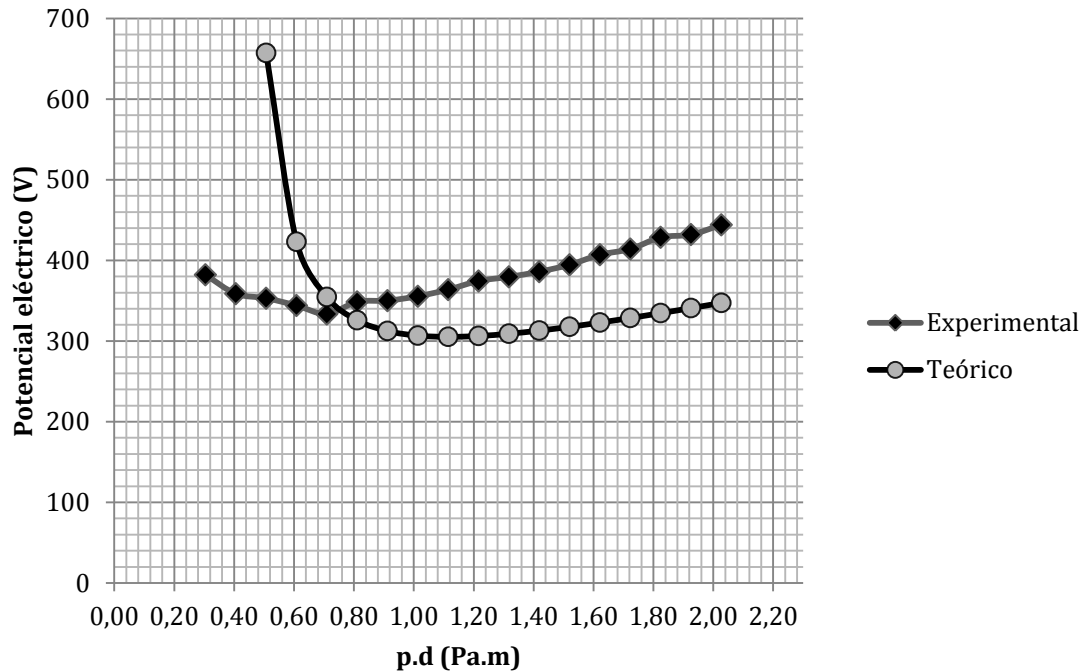


Figura 7.12. Gráficos de Potencial de ruptura contra $p \cdot d$, para aire a una atmósfera. Considerando datos experimentales y la evaluación de la expresión de la ley de Paschen.

Capítulo VIII

Análisis de los resultados

De acuerdo con los resultados del análisis paramétrico mediante elementos finitos en los que se determina la flexión de la viga de acuerdo con una diferencia de potencial viga-electrodo creciente, la sección cuya longitud es igual a la del electrodo de accionamiento describe una flexión para la cual el punto más alejado del empotramiento describe un desplazamiento vertical superior al 40% de la separación inicial viga-electrodo. Este resultado se aproxima a los obtenidos por O'Brien y colaboradores (2000) así como por lo obtenido por Choi y Lovell (1997), quienes, a pesar de llevar a cabo un análisis para electrodos de la misma longitud de la viga, dieron con desplazamientos máximos de 45% y 46% antes de ocurrir pull-in.

En el mismo orden de ideas, al ocurrir flexión por apalancamiento (Hung y Senturia, 1999) como resultado del accionamiento eléctrico, los resultados de las simulaciones en elementos finitos muestran que en el extremo libre de las vigas en voladizo, el desplazamiento vertical es superior a un tercio de la separación inicial entre el electrodo y la viga, así como también el 45% ya comentado. Asimismo, la mayor deflexión en una microviga (antes de pull-in) se logra con el electrodo de accionamiento de menor longitud, a expensas por supuesto, de un mayor potencial eléctrico aplicado.

Lo antes mencionado permite afirmar que el potencial de pull-in en el caso que las longitudes del electrodo y la viga no sean iguales, viene determinado principalmente por la longitud que tenga el electrodo. Esto concuerda con aproximaciones analíticas que aproximan el potencial de pull-in (O'Brien *et al.*, 2000; Choi y Lovel, 1997). No se mostrarán valores de potencial ya que existe buena correspondencia como la evidenciada entre los desplazamientos verticales del extremo más alejado del empotramiento (en este trabajo) y los

desplazamientos del extremo libre de la viga cuando el electrodo que la acciona es de igual longitud (lo planteado en las referencias consultadas).

Siguiendo en otro orden de ideas, del análisis de frecuencias en modos propios, y en específico los gráficos tridimensionales de los modos de oscilación que este arroja, se observa que, si las vigas oscilan a frecuencias cercanas a la de resonancia, en su primer modo de oscilación, la viga no experimenta deformaciones torsionales en su geometría o deformaciones axiales en forma de cresta, propia de modos de oscilación superiores. Para el caso de segundos y terceros armónicos, la viga describe un comportamiento que pudiera favorecer su uso como detectora de gas. Sin embargo, para el presente estudio, la obtención experimental de la frecuencia de resonancia de las vigas estuvo afectada por la calidad de los resultados obtenidos y por las limitaciones de ancho de banda en algunos componentes electrónicos así como de las características del analizador de movimientos los cuales formaron parte del montaje de laboratorio.

Con respecto a las respuestas transitorias (respuesta de las microvigas a un potencial en forma de escalón), las simulaciones arrojaron resultados con respuestas subamortiguadas para las 4 longitudes de microvigas, para las 4 longitudes de electrodo planteadas. En la microviga de 125 μm , se observa que las magnitudes de los factores de calidad tienden a disminuir a medida que la longitud del electrodo aumenta desde 80 μm hasta llegar a 100 μm . Pero por otro lado, para las longitudes de electrodos de 225 μm , 325 μm y 450 μm , no se observa un efecto significativo al incrementar la longitud del electrodo de accionamiento. Lo mencionado se ilustra en la figuras 8.1.

Como se ilustra en la figura 8.1, las simulaciones, que utilizaron el modo de aplicación de amortiguación por película delgada de aire de COMSOL, muestran los efectos de las fuerzas de superficies que aparecen sobre la microviga por efecto del aire que le rodea. En este sentido, las magnitudes de los factores de

calidad asociados al efecto del aire, varían principalmente al modificar las longitudes de las microvigas, siendo la excepción en el caso de las microvigas de 125 μm donde se observa una tendencia casi decreciente en los valores de factor de calidad a medida que aumenta la longitud del electrodo de accionamiento, lo que puede atribuirse al efecto amortiguador de la película de aire comprendida en el espacio viga-electrodo, y que a medida que menor sea la sección recubierta de la viga por el electrodo, menor el efecto amortiguador que esta produce.

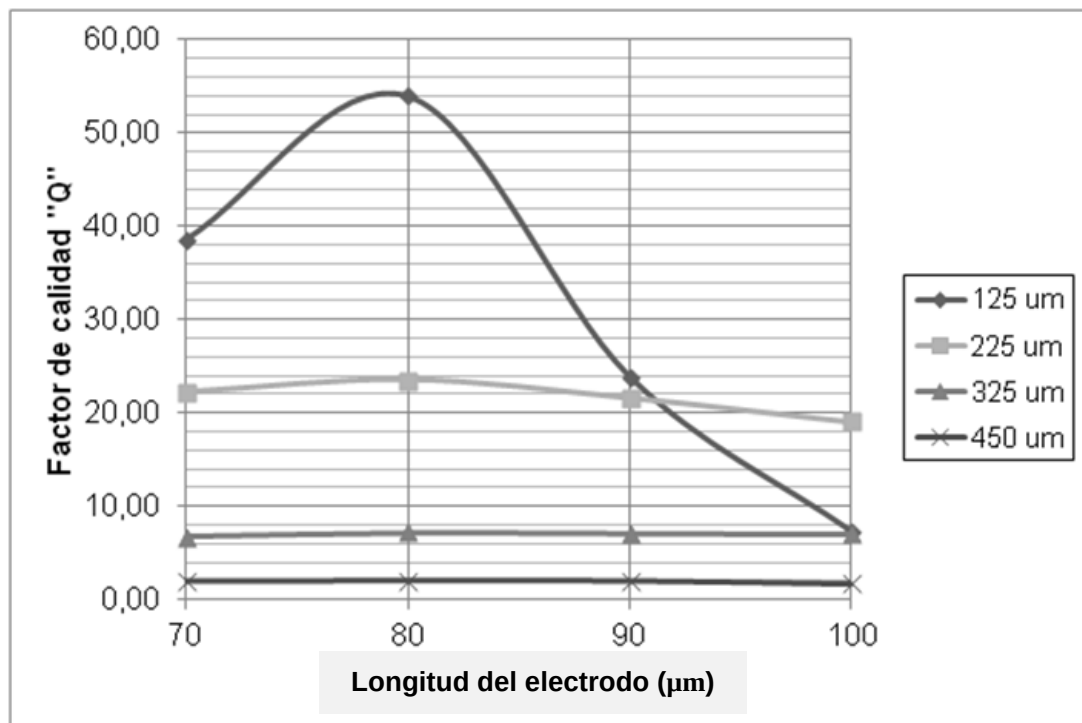


Figura 8.1. Gráfico de factores de calidad como función de la longitud de electrodo de accionamiento para vigas de 125 μm , 225 μm , 325 μm y 450 μm de longitud. Se considera $E = 169 \text{ GPa}$.

Asimismo, en todo momento los factores de calidad son mayores que la unidad, variando en inversa proporción al incremento de la longitud del electrodo, lo que corrobora que a mayor superficie, mayor amortiguamiento.

Todos los resultados ya mencionados, obtenidos de las simulaciones, provienen de modelos basados en las reglas de fabricación descritas anteriormente. Por lo tanto, los ensayos experimentales efectuados, son planteados como elementos de comparación entre el funcionamiento de las muestras fabricadas a ciertas pruebas y algunos de los análisis efectuados.

En este sentido, se llevaron a cabo los ensayos para medición de flexión, obviando el efecto transitorio ocasionado por el accionamiento de la viga al ser conectada en el analizador de movimiento (vibrómetro). Los resultados no mostraron una clara cercanía entre los resultados experimentales y las simulaciones hechas mediante elementos finitos cuando se considera un módulo de elasticidad igual 169 GPa. Sin embargo, al considerar un valor de 130 GPa (otro valor típicamente utilizado), se obtiene mejor aproximación. La figura 8.2 presenta un gráfico comparativo para el caso de una microviga de longitud igual a 450 μm actuada mediante un electrodo de 80 μm . Es importante destacar que para todas las combinaciones de electrodo viga consideradas, el comportamiento es análogo al mostrado en la figura 8.2.

Con respecto a las consideraciones de módulo de elasticidad, es importante destacar que la oblea utilizada durante el proceso de fabricación de las microvigas es una SOI con orientación (100). Esto quiere decir, que la orientación de sus planos cristalográficos es la mostrada en la figura 8.3. Por lo tanto, considerando las características del proceso de fabricación, el diseño de las vigas se hace para que su accionamiento sea en “el plano”, quedando longitudinalmente en paralelo con el corte plano primario (ver figura 8.3). En este sentido, el valor de módulo de elasticidad a considerar (considerando al material isótropo) debe ser 169 GPa (Hopcroft, 2010).

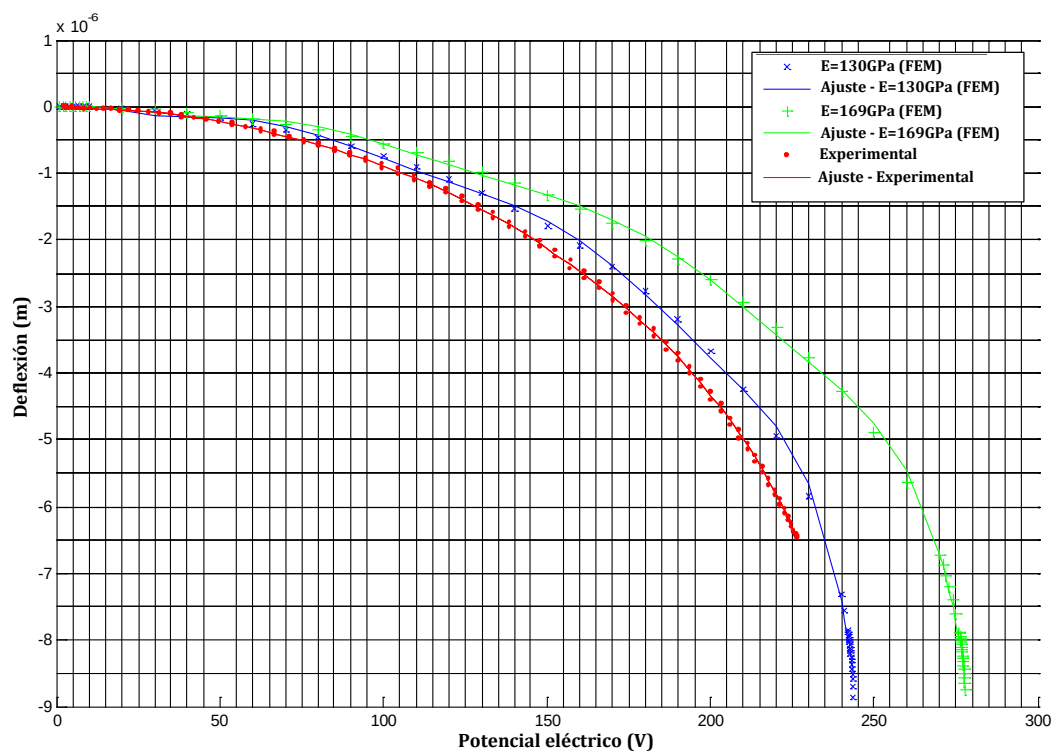


Figura 8.2. Gráficos experimentales y de las simulaciones para microvigas de longitud $450\ \mu\text{m}$ y electrodos de accionamiento de longitud $80\ \mu\text{m}$.

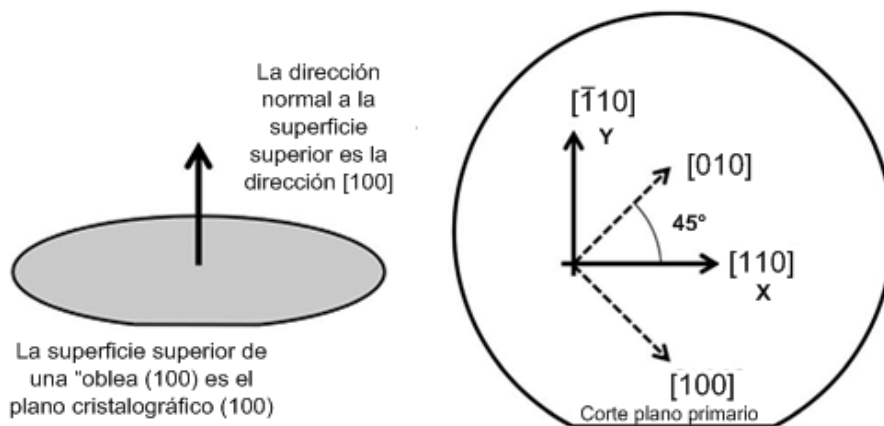


Figura 8.3. Orientación cristalográfica en obleas de silicio. Los ejes X e Y se encuentran en las direcciones $\langle 110 \rangle$. (a) Orientación de una oblea (100). (b) Direcciones y ejes en una oblea (100). Adaptado de Hopcroft (2010).

Las discrepancias existentes entre las simulaciones y los ensayos son de esperarse, debido a que el silicio es un material anisótropo y sus propiedades no son constantes en todas las direcciones de los planos en su geometría. Adicionalmente, no debe olvidarse que si bien el proceso de fabricación es capaz de obtener resultados con buena resolución en el conformado de las geometrías, este nunca será 100 % exacto.

Otro factor que contribuye a las discrepancias entre los modelos en elementos finitos y los resultados experimentales, corresponde a las restricciones que el modelo numérico impone sobre el análisis. Para el caso del análisis paramétrico, se consideró solo la deformación en el plano. Esto quiere decir que se asume que la deformación normal al plano x-y (vista lateral) de la viga y los esfuerzos de corte de los planos x-z e y-z (planos perpendiculares al eje longitudinal de la viga), son nulos. Por lo tanto, el efecto de las no uniformidades superficiales propias del acabado del proceso de fabricación, es despreciado. Esto hace menos realistas los resultados de la simulación, la cual resulta efectiva cuando la carga a la que es sometida la viga actúa sólo en la dirección normal a la cara enfrentada al electrodo y no varía en la dirección del ancho, aspecto que no se garantiza si la superficie de la viga presenta surcos en su topografía (ver figura 8.4). A pesar de la situación mostrada, es difícil determinar si la anisotropía tiene mayor peso que el proceso de fabricación sobre los resultados obtenidos.

En otro orden de ideas, las pruebas para la determinación de la frecuencia de resonancia arrojan información que permite observar los efectos de emplear electrodos de longitudes diferentes solo para las microvigas de 450 μm y para el 75% de los electrodos planteados.

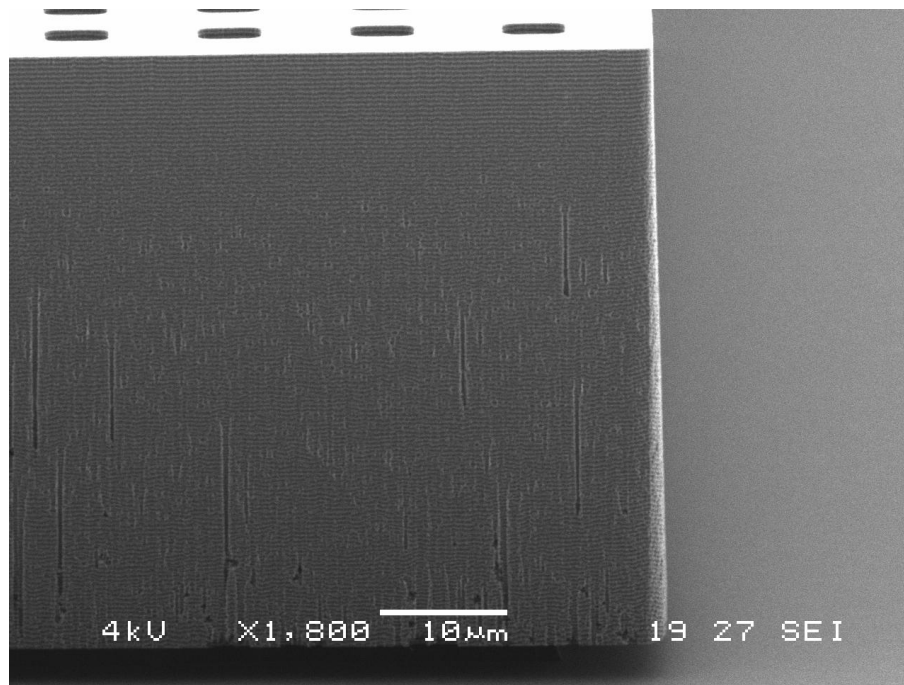


Figura 8.4. Vista de una muestra del proceso de fabricación Pianoforte, donde se evidencia el acabado superficial. Obtenido mediante un Microscopio SEM. Tomado por Dr. Léon Woldering, Universidad de Twente.

De los casos mencionados, se obtienen factores de calidad muy superiores a los que plantean los modelos en elementos finitos, encontrándose solo como similitud, el hecho de que, para todos los casos sus magnitudes son superiores a 0,5, típico de un sistema con respuesta subamortiguada. En los casos evaluados, el rango de frecuencias analizadas, contiene el valor de frecuencia de resonancia determinado del análisis de frecuencias de modos propios basado en el método de los elementos finitos. En consecuencia, de los resultados experimentales, se obtienen mayores factores de calidad, que evidencian el efecto de la amortiguación por película comprimida y el aporte de otras causas no contempladas en las simulaciones.

Un aspecto relacionado con los ensayos para obtención de frecuencia de resonancia, es el efecto del accionamiento eléctrico sobre las oscilaciones. La señal de potencial eléctrico aplicado entre los electrodos viene dada por una componente de polarización y una función sinusoidal, como ambos son de la misma magnitud pico, entonces el potencial eléctrico resultante se encontrará dentro de un rango comprendido entre 0 y el doble de la magnitud pico de la señal sinusoidal. En este sentido, es posible modificar, con la frecuencia de la señal sinusoidal, la frecuencia de la fuerza de excitación aplicada sobre la viga.

Sin embargo, al utilizar el accionamiento eléctrico ya descrito (señal de polarización + sinusoidal), es probable que incida sobre la frecuencia de resonancia de la viga, principalmente si la magnitud del potencial de polarización y la magnitud pico del potencial sinusoidal, no son iguales ya que se tendría el caso de una viga “precargada”, ocurriendo una situación similar al caso cuando se pretensa una cuerda y luego se hace vibrar.

Como ya se presenció, el potencial de pull-in impone un límite en el rango de potencial eléctrico de accionamiento, ya que en condiciones de operación, no es recomendable que la viga entre en contacto con el electrodo. Sin embargo, otro factor que tiene tanto o mayor peso que el potencial eléctrico de pull-in, es el potencial de ruptura dieléctrica.

Los datos procesados del ensayo para determinación de ruptura dieléctrica, arrojan valores de precisión en las medidas de separación entre electrodos, comprendidos entre $\pm 0,1 \mu\text{m}$ y $\pm 0,19 \mu\text{m}$, correspondientes al $\pm 0,5 \%$ y $\pm 3,4 \%$ del valor medio obtenido para cada muestra, lo que se considera aceptable para una confiabilidad del 68 %. Asimismo, de acuerdo con el criterio aplicado para el análisis de la incertidumbre asociada al voltaje de ruptura, el error resultante en cada caso es despreciable.

De los ensayos efectuados, se observa que el mínimo potencial de ruptura medido, para los electrodos diseñados y evaluados en aire, es 318 V cuando la separación entre ellos es de 7 μm . Para separaciones inferiores a 7 μm , el gráfico resultante (figura 7.10), describe una tendencia creciente del potencial con el decremento del producto $p.d$, mientras que para separaciones superiores a 7 μm , existe una tendencia creciente con el incremento de $p.d$.

El gráfico 7.10 se asemeja al obtenido por Chen y colaboradores (2006) para electrodos de silicio dopado tipo n. Asimismo, este gráfico sigue la forma establecida por la ecuación de Paschen pero no adopta los mismos valores, al compararlo con el caso de aire a presión atmosférica (ver figura 7.11). Las discrepancias pueden atribuirse a aspectos geométricos de las muestras, como lo es el acabado superficial de las caras de los electrodos, así como a la composición del material (silicio no dopado). Adicionalmente, debe tenerse en cuenta el efecto de las condiciones ambientales, las cuales no son idénticas para las experiencias referidas y la llevada a cabo, a pesar de tratarse de aire como el medio presente.

Sin embargo, y a pesar de las discrepancias, es válido afirmar que una zona segura para la operación de las microvigas resultantes del proceso de fabricación Pianoforte, viene dada por la aplicación de potenciales eléctricos inferiores a 300 V.

Sobre la base de los potenciales eléctricos de pull-in obtenidos mediante el método de los elementos finitos, y considerando los potenciales de ruptura dieléctrica determinados experimentalmente, mientras menor es la longitud del electrodo, la máxima deflexión vendrá limitada por el potencial eléctrico de manera que no ocurra ruptura dieléctrica del medio gaseoso presente.

Aspectos a tomar en cuenta para el sensado de gases

El sensado mediante microvigas se basa en la detección del cambio de masa asociado a la adsorción del compuesto sensado. En este sentido, es posible plantear dos formas de analizar el cambio de masa. La primera, se basa en la determinación de la deflexión de la microviga como resultado del incremento de masa.

La deflexión de la viga en modo estático resulta de dos mecanismos: la masa adicional (proveniente por ejemplo del recubrimiento) y el esfuerzo superficial de la especie adsorbida. Sin embargo, el esfuerzo superficial puede no correlacionarse con la cantidad de material adsorbido. La deflexión del extremo libre de la viga depende del tipo de carga a la cual sea sometida (Goeders *et al.*, 2008).

Este método de sensado en el modo estático no proporciona información suficientemente exacta acerca de la cantidad de moléculas adsorbidas, ya el efecto sobre la deflexión lo producen las primeras capas de moléculas inmovilizadas de acuerdo como lo establecen Lendraitis y colaboradores (2005).

La segunda forma se basa en la determinación de la variación de frecuencia de la viga en modo resonante (con recubrimiento) para su primer, segundo o tercer armónico como efecto del incremento de masa asociado a la adsorción de sustancia.

Al considerar la operación de la microviga en modo resonante, es necesario poder determinar el valor del factor de calidad (Q) al cual operará la viga. En el caso de una microviga para el sensado de gases, el medio a detectar influirá en el valor de Q . Sin embargo, como la detección de gases encuentra una de sus mayores aplicaciones en el sensado de contaminantes en el aire, es interesante conocer el valor de Q cuando la viga opera en aire.

El factor de calidad depende de la geometría de la microviga en voladizo y del fluido en el cual esta se encuentra inmersa. Un incremento en los efectos de la amortiguación implica reducción en el valor de Q . Un alto valor de Q es deseable ya que reduce la magnitud del mínimo cambio en la frecuencia de resonancia (aumenta la resolución en la frecuencia). Para un factor de calidad igual a 10, el mínimo cambio de frecuencia de resonancia detectable es aproximadamente 25 Hz, mientras que un valor de Q igual a 100 permite una resolución en frecuencia menor que 10 Hz (Goeders *et al.*, 2008).

El efecto amortiguador del aire sobre el valor de Q de las microvigas es discutido con detalle por Newell (1968) quien presenta una cantidad de expresiones para el factor de calidad de una microviga en voladizo amortiguada por aire. El primer caso se presenta cuando la presión es tan baja que el amortiguamiento por aire es despreciable. En este caso, Q es independiente de la presión y debe ser determinado empíricamente. El segundo caso se presenta cuando el amortiguamiento por el aire es el mecanismo dominante pero las moléculas de aire se encuentran tan alejadas que no interactúan entre ellas. En ese caso, el valor de factor de calidad viene dado por la expresión 8.1.

$$Q_i = \left(\frac{\pi}{2}\right)^{3/2} \rho t f_i \left[\frac{\left(\frac{R_0 T}{M_0}\right)^{1/2}}{P} \right] \quad (8.1)$$

Donde ρ es la densidad de la microviga en voladizo, t es el grosor de la microviga, f_i es la frecuencia de resonancia de la microviga, R_0 es la constante universal de los gases, M_0 es la masa molar del aire, T es la temperatura y P es la presión del aire (Goeders *et al.*, 2008).

El caso final es aquel en el que las moléculas de aire si interactúan entre ellas, y aquí se asume que el aire interactúa como un fluido viscoso. Como la viscosidad será independiente de la presión, el factor de calidad también lo será. Si se utiliza la ley de Stokes para amortiguación, se obtiene la expresión 8.2.

$$Q_i = \left[\frac{w (E \rho)^{1/2}}{24 \mu} \right] \left(\frac{t}{L} \right)^2 \quad (8.2)$$

Donde w es el ancho de la microviga, t es el grosor, L es su longitud, y μ es la viscosidad del aire. De esta manera, el valor del factor de calidad se encuentra fuertemente influenciado por el medio que rodea a la microviga (Goeders *et al.*, 2008).

Con base a los valores de Q obtenidos experimentalmente, resulta conveniente evaluar las expresiones 8.1 y 8.2 para comparar y tener alguna aproximación de la situación en la que se encuentran las microvigas cuando son accionadas mediante un campo eléctrico. Para ello, se evalúan los datos mostrados en la tabla 8.1.

Tabla 8.1. Parámetros para evaluación de expresiones analíticas de Q .

Parámetro	Magnitud	Unidad
Densidad del silicio (ρ)	2.330	kg/m ³
Módulo de elasticidad (E)	169	GPa
Grosor de la viga (t)	3	μm
Ancho de la viga (w)	50	μm
Longitud de la viga (L)	450	μm
Frecuencia de resonancia en primer modo (f_i)	18.250	Hz
Constante universal de los gases (R_0)	8,314472	(Pa.m ³ /mol.K)
Temperatura ambiental (T)	297	K
Masa molar (M_0)	28,97x10 ⁻³	kg/mol
Presión ambiental (P)	101.325	Pa
Viscosidad dinámica del aire (μ)	18,39	Pa.s

Al evaluar la expresión 8.1, el valor obtenido de Q es igual a 0,7236. Mientras que al evaluar la expresión 8.2, se obtiene un valor aproximadamente igual a 6. De los valores obtenidos, aquel de la ecuación 8.2 es el que mejor se aproxima a los

valores obtenidos experimentalmente y a las simulaciones ya que su magnitud se encuentra entre ambos. Esto puede sugerir que en la amortiguación existente en la viga, el aire tiene una influencia importante y además existe interacción entre sus partículas.

Cuando la viga opera en modo resonante como sensor para gases, es necesario que sea recubierta por una capa uniforme de material. Este recubrimiento dará como resultado una nueva frecuencia de resonancia para el conjunto (viga + recubrimiento) en condiciones iniciales.

Para estimar la frecuencia de resonancia del arreglo viga-recubrimiento, primero es necesario conocer la rigidez a la flexión de este de acuerdo como lo establece Pandey *et al.* (2009).

Considerando que desplazamiento respecto al eje neutro es igual en las láminas correspondientes a la viga y su recubrimiento, es posible analizar ambos elementos como dos resortes en paralelo. Se define E_B como el módulo de elasticidad del material de la viga y E_C del recubrimiento. Similarmente, I_B es el momento de inercia de la microestructura de la viga respecto al eje neutro e I_C de la capa de recubrimiento. Entonces, la rigidez a la flexión asociada a EI puede calcularse de acuerdo con la expresión 8.3.

$$(EI)_{efectiva} = E_B I_B + E_C I_C \quad (8.3)$$

Esto significa que el cálculo de la rigidez a la flexión de la viga compuesta implica el cálculo del momento de inercia de la estructura correspondiente a la viga y de la capa de recubrimiento respecto a su eje neutro. De acuerdo con la figura 8.5 el momento de inercia de la estructura de la viga (solamente) respecto al eje neutro de la estructura compuesta viene dado por la expresión 8.4.

$$I_B = \frac{W \cdot t_B^3}{12} + W \cdot t_B \left(\frac{H}{2} - \frac{t_B}{2} \right)^2 \quad (8.4)$$

Y para la capa de recubrimiento se tiene la expresión 8.5.

$$I_C = \frac{W \cdot t_C^3}{12} + W \cdot t_C \left(\frac{H}{2} - \frac{t_C}{2} \right)^2 \quad (8.5)$$

Sustituyendo los resultados de las expresiones 8.4 y 8.5 en 8.3, se obtiene un valor efectivo de rigidez a la flexión.

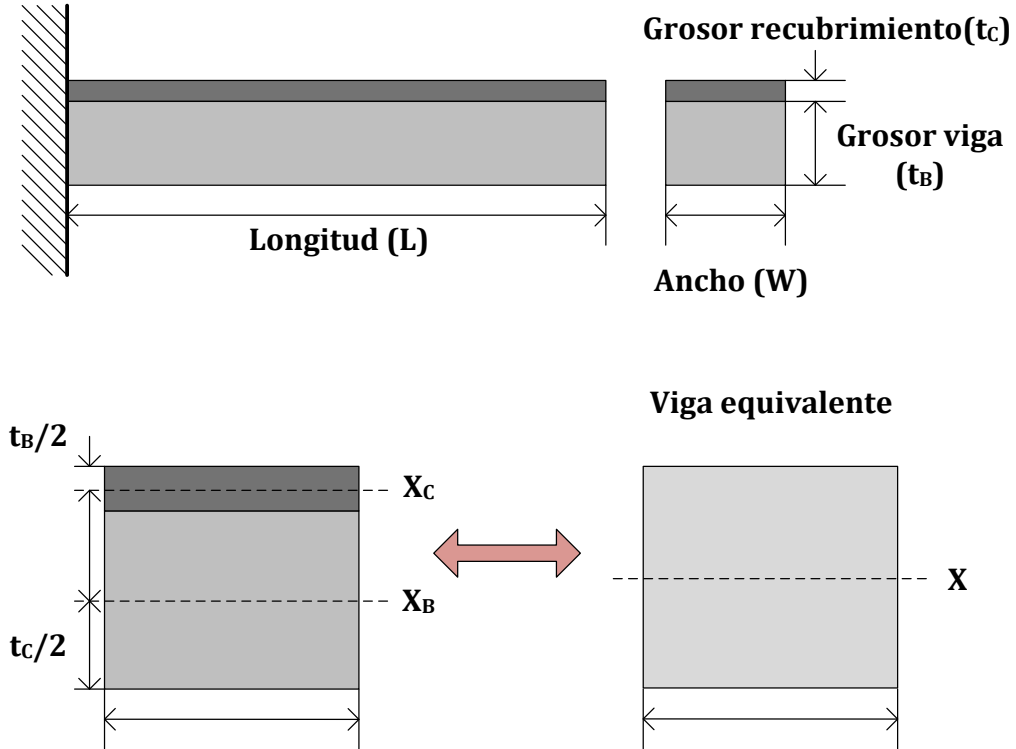


Figura 8.5. Viga con recubrimiento y viga compuesta equivalente.

Asimismo, la frecuencia de resonancia puede calcularse empleando la expresión 8.6.

$$f = C \sqrt{\frac{E \cdot I}{\rho L^4}} \quad (8.6)$$

Donde ρ es la densidad lineal (masa por unidad de longitud) de una viga compuesta por el material de la viga (M_B) y el de su recubrimiento (M_C), de acuerdo con 8.7.

$$\rho = \frac{M_B + M_C}{L} \quad (8.7)$$

L es la longitud de la viga y C es una constante que depende del modo de oscilación considerado, el cual por tratarse del primer modo, es igual 3,516 (Pandey *et al.*, 2009). Para los modos comprendidos del segundo hasta el cuarto, los valores de C son 22,036; 61,697 y 120,902 respectivamente.

En el estudio de microvigas cubiertas mediante capas selectivas para detección de gases, algunos materiales utilizados como recubrimientos que vale la pena mencionar son platino (Lang *et al.*, 1998), aluminio, oro (Leandraitis *et al.*, 2005) y paladio (Arecco, 2003).

Tomando en cuenta los materiales estudiados en investigaciones anteriores, es posible evaluar las expresiones 8.3, 8.4, 8.5 y 8.6. De esta manera es posible conocer cuánto sería la frecuencia no amortiguada del conjunto viga-recubrimiento.

Tomando las propiedades del aluminio y oro (Joshi *et al.*, 2014) y del platino y el paladio (Vaz *et al.*, 2004), mostradas en la tabla 8.2, se obtienen los resultados mostrados en la tabla 8.3 para una microviga de 50 μm ×450 μm ×3 μm (ancho×largo×grosor) y una capa de recubrimiento de 50 μm ×450 μm ×100nm (ancho×largo×grosor).

Tabla 8.2. Propiedades de los recubrimientos

Material	Módulo de Elasticidad (GPa)	Densidad (kg/m ³)
Aluminio	70	2.700
Oro	82	19.000
Platino	140	21.450
Paladio	116	12.020

Tabla 8.3. Frecuencias no amortiguadas en primer modo de oscilación para vigas con recubrimientos metálicos.

Combinación	Ib (m ⁴)	Ic (m ⁴)	EI_efectiva (N.m ²)	Frecuencia en primer modo (Hz)
<i>Si, Au</i>	1,13E-22	1,13E-23	2,00E-11	20.511,18
<i>Si, Al</i>	1,13E-22	1,13E-23	1,99E-11	20.441,81
<i>Si, Pt</i>	1,13E-22	1,13E-23	2,07E-11	18.581,43
<i>Si, Pd</i>	1,13E-22	1,13E-23	2,04E-11	19.493,04

En la tabla 8.3 se observa que las frecuencias no amortiguadas del primer modo de oscilación obtenidas analíticamente para los arreglos viga-recubrimiento son inferiores a la frecuencia no amortiguada de la viga (sin recubrimiento).

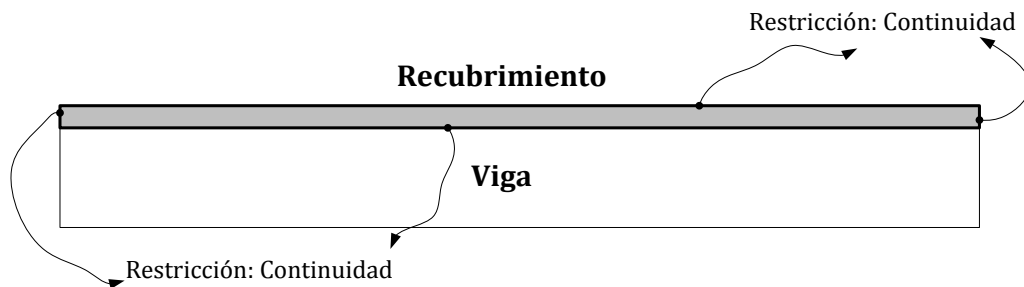
Para explorar con mayor detalle el efecto del recubrimiento sobre el desempeño del conjunto viga-recubrimiento, se plantean análisis estáticos en elementos finitos sobre modelos de vigas recubiertas sometidas a un campo eléctrico resultante de la diferencia de potencial existente entre la viga y un electrodo paralelo a esta. El valor considerado para la longitud del electrodo es 100 μm .

Para llevar a cabo estos análisis, se plantean los modelos siguiendo las mismas consideraciones tomadas previamente para los análisis estáticos efectuados sobre las 4 longitudes de vigas sin recubrimientos. Adicionalmente, se agrega la capa de recubrimiento que corresponde a otra viga del mismo ancho y longitud de la microviga.

Los materiales empleados para el recubrimiento corresponden a los mismos mostrados en la tabla 8.2. Las condiciones de borde planteadas en la capa de recubrimiento son las indicadas en la figura 8.6.



Restricciones Mecánicas



Restricciones Eléctricas

Figura 8.6. Condiciones de borde para los recubrimientos.

Se lleva a cabo entonces un análisis paramétrico en el que se observa la deflexión de la microviga recubierta al ser sometida al campo eléctrico resultante de la diferencia de potencial entre esta y un electrodo paralelo de 100 μm de largo a una separación de 3 μm .

El potencial eléctrico evaluado en el análisis paramétrico está comprendido en el rango de 1 a 180 V. Como se observa en la figura 8.7, los extremos no empotrados de todas las vigas recubiertas describen un desplazamiento inferior al de la viga sin recubrimiento. Esto significa que el recubrimiento hace de la viga un elemento más rígido.

De los materiales evaluados, el platino (de mayor módulo de elasticidad) es el que ofrece mayor rigidez y por lo tanto, provoca un menor desplazamiento del

extremo libre de la viga. Para el caso de los otros materiales (aluminio, paladio y oro), difícilmente se puede discriminar la diferencia entre los desplazamientos.

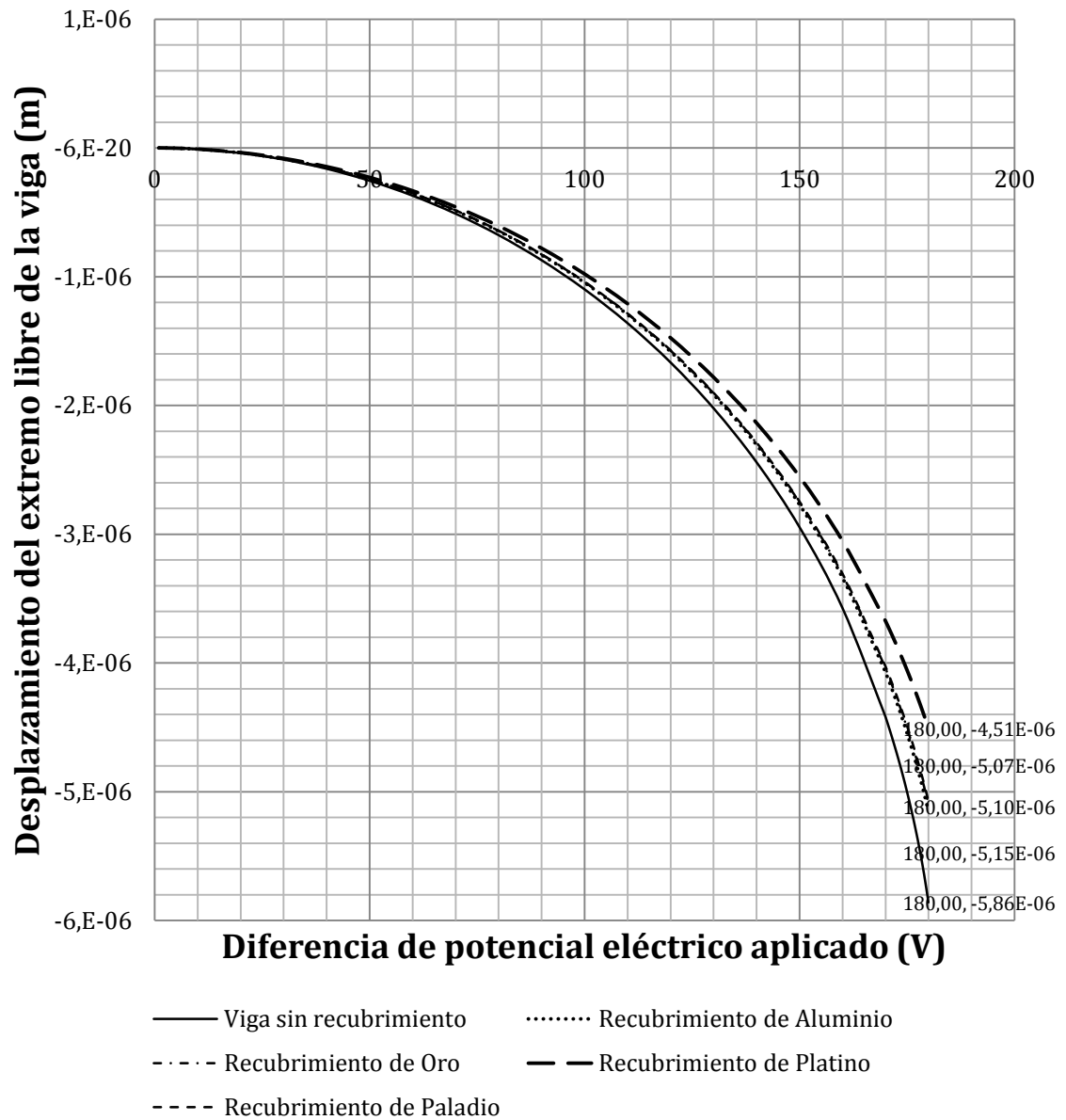


Figura 8.7. Desplazamiento del extremo libre de las vigas con y sin recubrimiento en función de la diferencia de potencial viga-electrodo.

Si se expresan los desplazamientos en las microvigas recubiertas como porcentaje del desplazamiento de la viga sin recubrir, se observa que para el

recubrimiento de platino, se obtiene aproximadamente un 10% de desviación respecto a la viga sin recubrimiento. Por otro lado, para el recubrimiento de aluminio, la desviación es de aproximadamente 4% mientras que para los otros dos materiales se encuentra alrededor del 5%. Estas desviaciones se evidencian dentro de un rango de potenciales eléctricos de 0 a 100 V aproximadamente (ver figura 8.8).

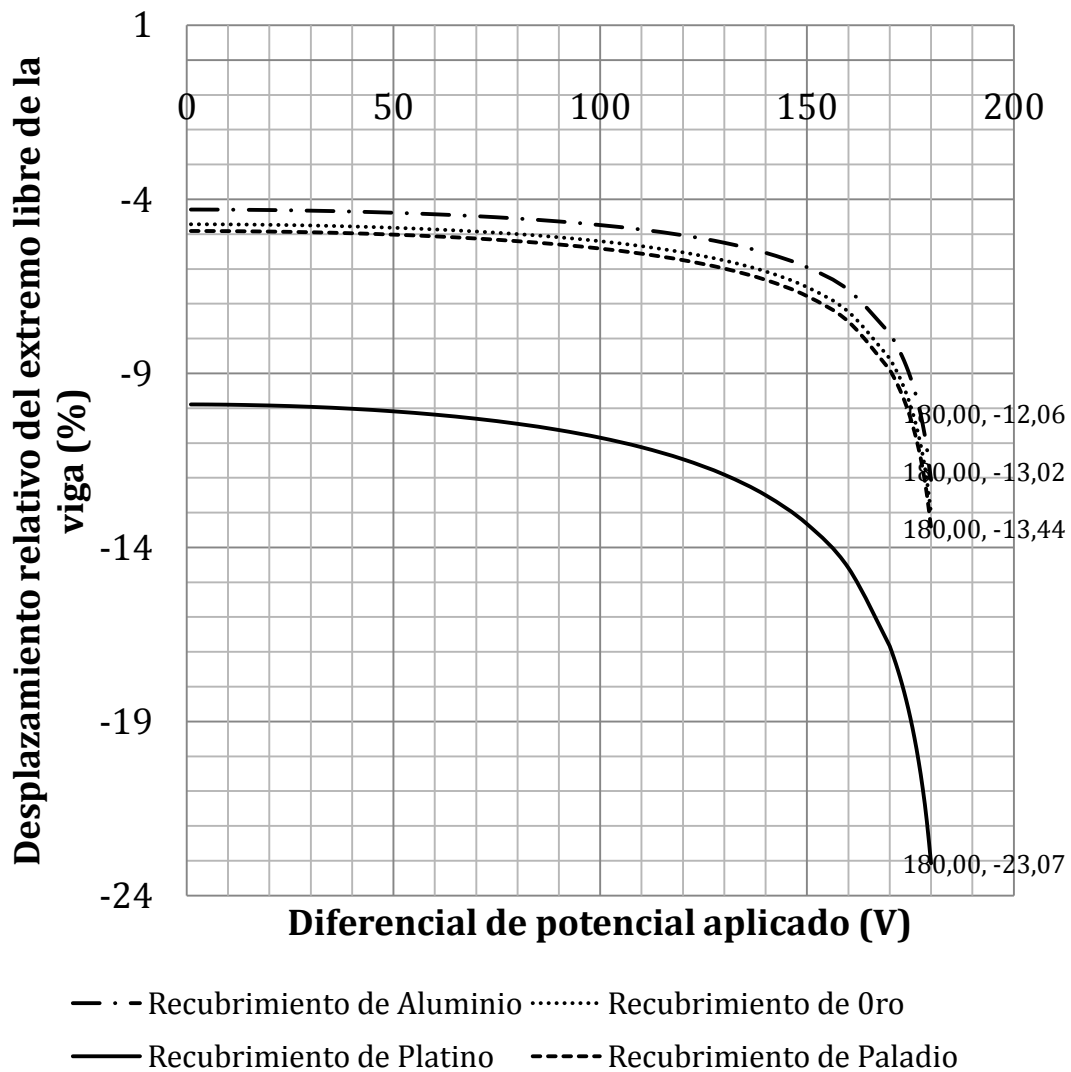


Figura 8.8. Desplazamiento relativo del extremo libre de las vigas con y sin recubrimiento en función de la diferencia de potencial viga-electrodo.

Para valores de potencial eléctrico mayores que 100 V, las desviaciones son mayores y esto es mucho más evidente cuando el potencial eléctrico es mayor que 150 V, potencial para el cual la viga se acerca a la condición de pull-in.

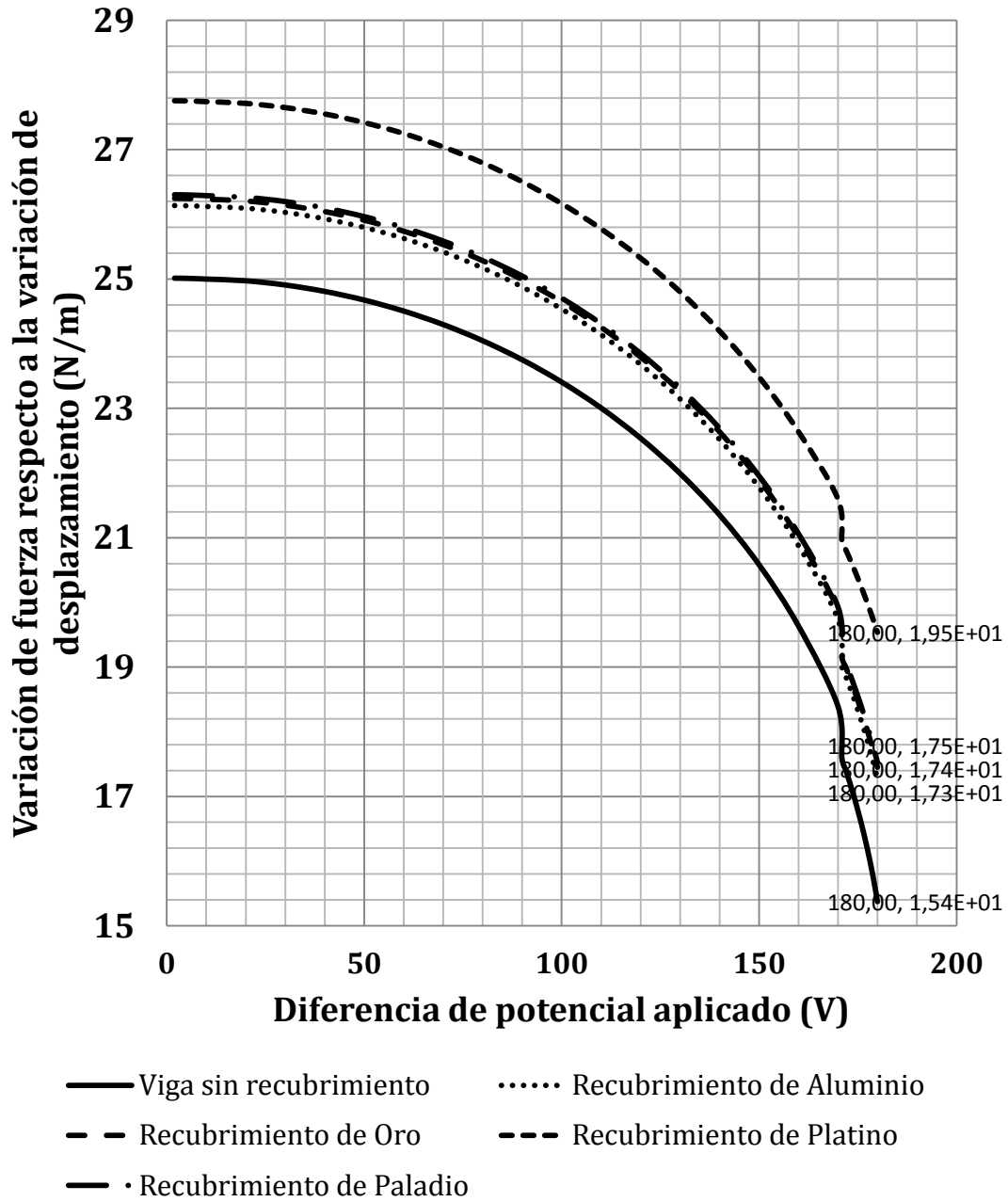


Figura 8.9. Variación de la fuerza respecto a la variación en desplazamiento, en función de la diferencia de potencial viga-electrodo.

Para una viga en voladizo que opera en modo resonante mediante un accionamiento de tipo eléctrico como el planteado en el presente trabajo, tener alguna noción del efecto que tiene el accionamiento de la viga sobre su oscilación de acuerdo a lo comentado previamente (viga precargada).

Si del análisis mediante el MEF se obtiene la fuerza total aplicada sobre la viga y se relaciona con el desplazamiento vertical que describe el extremo de la viga, es posible tener cierta idea del efecto que sobre la rigidez del conjunto, cada valor de potencial eléctrico evaluado tendrá. La figura 8.9 presenta el gráfico de la variación de fuerza aplicada de la viga respecto a la variación de desplazamiento para el rango de potenciales eléctricos evaluados en las vigas con recubrimiento.

Si la rigidez de una viga en voladizo es planteada como el cociente entre la fuerza aplicada sobre su extremo libre y el desplazamiento de este extremo, entonces con la derivada de la fuerza total aplicada sobre la viga y el desplazamiento que su extremo libre describe es posible tener conocimiento del efecto sobre frecuencia de oscilación de la viga cuando es operada en modo resonante en vista que la viga oscilará como resultado de un potencial eléctrico constante (de desplazamiento) y una señal oscilatoria de potencial eléctrico cuya frecuencia se aproxime a la de resonancia de la microestructura.

De la figura 8.9 puede decirse que las vigas son menos rígidas en la medida que se incrementa el potencial eléctrico de desplazamiento. Esto pudiera significar que es posible desplazar la frecuencia de resonancia con el arreglo viga-electrodo con la finalidad de realizar ajustes que mejoren la selectividad hacia algún gas a detectar.

Cómo puede observarse, el accionamiento basado en campo eléctrico, al igual que el aire, pueden influir en el valor de frecuencia de resonancia de la viga sin embargo, queda abierta la posibilidad de poder controlar el efecto del primero gracias a que la señal de potencial eléctrico aplicado puede ser controlada.

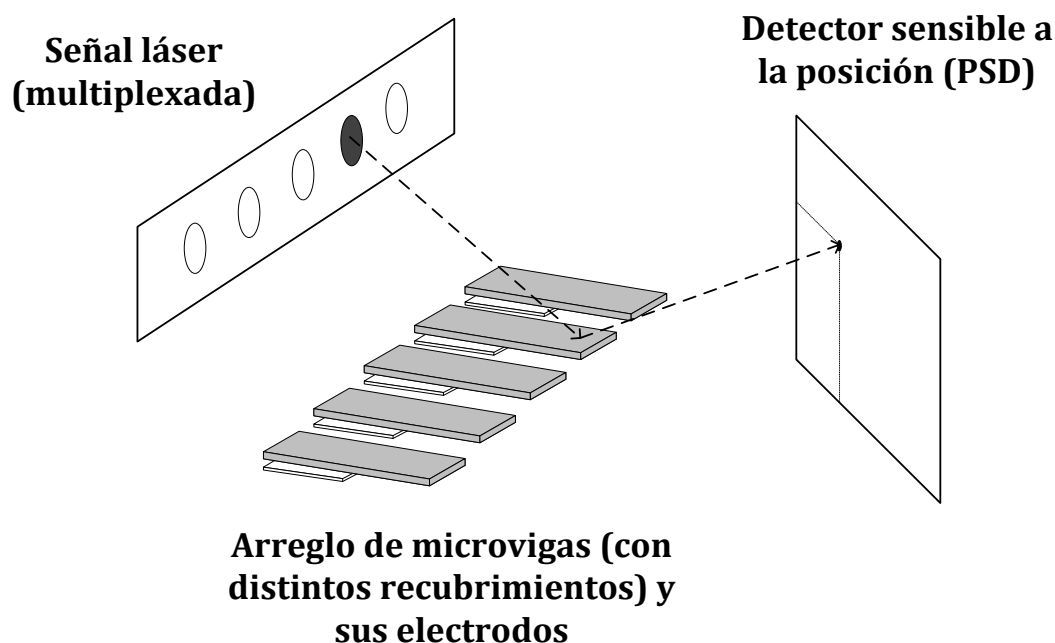


Figura 8.10. Detección de posición en microvigas accionadas eléctricamente en un arreglo de nariz electrónica.

El caso de las microvigas en voladizo operando en modo estático o en modo resonante, la detección del desplazamiento es posible mediante métodos ópticos como el mostrado en la figura 8.10 donde un haz de láser proyectado de forma multiplexada hacia una viga agrupada junto a otras con distintos recubrimientos. De esta manera el haz se refleja en la viga flectada por el potencial eléctrico aplicado y luego es captado por un detector sensible a la posición con el cual es posible determinar el grado de desplazamiento ocurrido en la viga. La microviga entonces forma parte de un conjunto de microestructuras en las que se emplean distintos recubrimientos con los cuales se busca selectividad hacia varios gases en lo que se conoce como una nariz electrónica.

Con base a las experiencias reportadas en el presente trabajo a continuación se plantean algunas consideraciones e implicaciones relacionadas con el uso del

accionamiento electrostático de microvigas en voladizo si se desea continuar su estudio con fines de sensado para gases.

Al utilizar el accionamiento electrostático, es posible variar la condición de resonancia. Por ello, con base a las pruebas realizadas, para un rango de potencial eléctrico comprendido entre 0 y 200 V el efecto de la flexión sobre la frecuencia de oscilación de la viga será menos evidente para el primer tercio del rango (de potencial eléctrico) para el cual además, la flexión de la viga es menor.

Sin embargo, este efecto puede ser considerado al momento de la calibración del cero del sistema de medición de desplazamiento ya que en la señal de potencial eléctrico, su componente en DC es de mucha mayor magnitud que la componente en AC lo que permite a la viga operar alrededor de un punto de operación.

El efecto de la deflexión sobre la condición de resonancia puede ser empleado a favor en los casos donde algunas zonas del recubrimiento interactúen parcialmente con el compuesto sensado de forma irreversible. Cuando esto ocurre, la frecuencia de resonancia equivalente del arreglo disminuirá por lo que resulta interesante estudiar para cuál nuevo valor de potencial eléctrico debería operar la viga.

Para vigas de sección rectangular, es posible no obtener valores altos de factor de calidad con este método de accionamiento por lo que algún ajuste de la geometría de las microestructuras sería necesario. Sin embargo, esto implica plantear un nuevo proceso de microfabricación.

El potencial de ruptura dieléctrica para pequeñas separaciones depende del tipo de gas presente. Por lo tanto, para un sensor basado en microvigas actuadas mediante un campo electrostático, será necesario realizar pruebas de ruptura dieléctrica para distintos gases con la finalidad de revisar los límites de operación en lo que a potencial eléctrico se refiere.

Para aumentar el área de contacto entre el gas y el recubrimiento de la microviga, puede emplearse vigas de mayor longitud. Esto tiene como ventaja que si se utiliza un electrodo de accionamiento de 100 μm , es posible medir mayores variaciones en la deflexión pero a menores frecuencias cuando se trabaja en modo resonante.

Conclusiones

Una vez llevadas a cabo las etapas de diseño de un Sistema Microelectromecánico, para el estudio de microvigas en voladizo actuadas mediante campo eléctrico para ser utilizadas como sensores de gases se plantea el cierre del presente trabajo de investigación, como se describe a continuación.

En el diseño de las microvigas y los electrodos para su actuado, los parámetros de diseño más importantes fueron: las propiedades del material con el cual se fabrican la viga y el electrodo, las dimensiones (largo, ancho y grosor) de las estructuras y la ubicación relativa viga-electrodo. Todos ellos pudieron aproximarse, utilizando expresiones analíticas derivadas de la teoría clásica de vigas y placas, así como la aplicación del análisis aproximado, basado en modelos como el condensador de placas paralelas.

En este sentido, con el uso de ecuaciones analíticas o “formas cerradas”, se realizó el dimensionamiento de las microestructuras que fueron sometidas a ensayos, y fueron la referencia en el desarrollo de modelos más complejos y en el planteamiento de análisis más completos, como es el caso del método de los elementos finitos.

El uso de los análisis paramétrico (estático en 2D), en el dominio temporal (en 2D) y de frecuencia de modos propios (en 3D), mediante elementos finitos aportó información adicional en el conocimiento del desempeño de las microestructuras. Con el análisis paramétrico se obtuvo la aproximación de la máxima deflexión de la viga en cada arreglo de microestructuras, así como los límites de potencial eléctrico debido a pull-in. Con el análisis temporal se determinaron los factores de calidad en cada arreglo, considerándose, por lo tanto el efecto amortiguador del aire, siguiendo la formulación en elementos finitos. Por otro lado, el análisis de frecuencias de modos propios, además de aportar las magnitudes de las frecuencias como tal, también arrojó el efecto de

los seis primeros modos de oscilación sobre la microviga, con lo cual se afirma que la viga trabajara en de flexión en su primer modo de oscilación, y en su cuarto modo aparece torsión. Estos modos asociados a los armónicos de orden superior pueden ser aprovechados para mejorar la selectividad en el sensado.

La similitud entre los resultados de las ecuaciones analíticas y las simulaciones mediante el método de los elementos finitos, se debió al hecho que las geometrías planteadas se basaron en casos ya estudiados por la teoría de vigas y placas. Sin embargo, al momento de llevar a cabo un procedimiento de optimización de la geometría de la viga, será necesario alterar sus dimensiones de tal forma que no se tendrán sólidos regulares y en consecuencia, solamente los modelos basados en elementos finitos aportarán información comparable con experiencias prácticas.

Con base al proceso de fabricación del cual se obtuvieron las microestructuras ensayadas es posible afirmar que rango seguro para potencial eléctrico de accionamiento estará comprendido entre 0 y 200 V pero es necesario realizar más estudios en otros gases para considerar la variabilidad de los compuestos a detectar.

La deflexión obtenida de una microviga, al ser actuada por un electrodo, dependerá de la relación de longitudes $L_{\text{viga}}/L_{\text{electrodo}}$. La máxima deflexión aumentará en la medida que la relación de longitudes aumenta, siendo el límite el impuesto por el potencial presente entre la viga y el electrodo, que no debe exceder el potencial de pull-in y el potencial de ruptura.

Las microestructuras presentan un factor de calidad igual a 10, lo que exige mejoras en el diseño del arreglo viga-electrodo para garantizar un desempeño favorable en vigas operando en modo resonante. Sin embargo, queda abierta la posibilidad de aprovechar la posibilidad que implica poder controlar la deflexión

de la viga mediante el potencial eléctrico de accionamiento para buscar el diseño de un sensor que opere con un nuevo enfoque en modo estático.

Los arreglos microviga-electrodo evaluados, ofrecen deflexiones superiores a 1 μm , lo que permite la medición de esta variable con detectores existentes para una eventual aplicación de sensado de gases. Asimismo, las vigas de mayor longitud alcanzaron picos de resonancia alrededor de 34 kHz (325 μm) y 18,5 kHz (450 μm).

Es importante tener en cuenta que el presente trabajo llevó a cabo la medición sobre vigas en movimiento en un solo plano. Esto no se cumplirá al momento de aplicar vigas para sensado de gases.

El uso del método de los elementos finitos ofrece una herramienta útil en la estimación del desempeño de las vigas y a pesar de no arrojar resultados muy cercanos al comportamiento real de los dispositivos, permite establecer comparaciones entre alternativas de diseño con las cuales se forma un criterio en lo referente a ajustes geométricos así como también, la valoración acerca del efecto de los materiales en el desempeño de microestructuras.

Referencias

- Aluru N.R y White J. (1999). A multilevel Newton method for mixed-energy domain simulation of MEMS. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 8(3), 299–308.
- Ando T.; Uchihashi T. y Fukuma T. (2008). High-speed atomic force microscopy for nano-visualization of dynamic biomolecular processes. *Progress in Surface Science*, 83, 337-437.
- Arecco, D. (2003). *Analysis and preliminary characterization of a MEMS cantilever-type chemical sensor*. Tesis de maestría. Worcester Polytechnic Institute, Massachusetts, Estados Unidos.
- Arias, F.(2004). El Proyecto de Investigación. Introducción a la metodología científica. Venezuela. Editorial Episteme.
- Arkilic E.; Breuer K. y Schmidt M. (2001). Mass flow and tangential momentum accommodation in silicon micromachined channels. *Journal of Fluids Mechanics*, 437, 29-43.
- Bao M. y Yang H. (2007). Squeeze film air damping in MEMS. *Sensors and Actuators A: Physical*, 136(1), 3-27.
- Bao M., Yang H., Sun Y. y French P. (2003). Modified Reynolds' equation and analytical analysis of squeeze-film air damping of perforated structures. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 13(6).
- Buck, R; Lindner, E; Kutner, W; Inzelt, G. (2004) Piezoelectric Chemical Sensors (IUPAC Technical Report). IUPAC, Pure and Applied Chemistry. Vol. 76. No.6, pp.1139-1160.
- Bushan B. (2007). *Springer Handbook of Nanotechnology*. Springer. Segunda Edición. Nueva York.
- Chang, C.; Wang, S.; Chen, R.; Yeh, J. y Hou M. (2002). A Comb-Drive Actuator Drive by Capacitively-Coupled-Power. *Sensors*, 12, 10881-10889.

- Chen, C.; Yeh, J y Wang PJ. (2006). Electrical breakdown phenomena for devices with micron separations. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 16, 1366-1373.
- Choi B. y Lovell E.G. (1997). Improved analysis of microbeams under mechanical and electrostatic loads. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 7(1), 24-29.
- Chou C.-C., Lee C.-W. y Yang M.-H. (2007). Simulation of an Atomic Force Microscopy's Probe Considering Damping Effect. *Proceedings of the COMSOL Users Conference 2007*. Tapei.
- Davies D.K. y Biondi M.F. (1966). Vacuum breakdown between plane-parallel copper plates. *Journal of Applied Physics*, 37(8), 2969-2977.
- Gimzewski, J.; Gerber, C.; Meyer, E. y Schlittler, R. (1993). Observation of a chemical reaction using a micromechanical sensor. *Chemical Physics Letters*, 217 (5-6), 589.
- Goeders, K.; Colton, J. y Bottomley, L. (2008). Microcantilevers: Sensing Chemical Interaction via Mechanical Motion. *Chemical Reviews*, 108 (2).
- Gross W.A., Matsch L.A., Castelli V., Eshel A., Vohr M. y Wildmann M. (1980). *Fluid Film Lubrication*. John Wiley & Sons. New York.
- Hierlemann, A; Brand, O; Hagleitner, C y Baltes, H. (2003). Microfabrication Techniques for Chemical/Biosensors. *Proceedings of the IEEE*, 91(6), 839-863.
- Ho, C; Itamura, M; Kelley, M y Hughes, R. (2001). *Review of Chemical Sensors for In-Situ Monitoring of Volatile Contaminants*. Sandia National Laboratories. California E.E.U.U.
- Hopcroft, M.; Nix W. y Kenny T. (2010). What is the Young's Modulus of Silicon?. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 19 (2), 229-238.
- Huang C., Christophorou C., Najafi K., Naguib A. y Nagib H.M. (2002). An electrostatic microactuator system for application in high-speed jets. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 11(3), 222-235.

- Hung, E. y Senturia S. (1999). Extending the Travel Range of Analog-Tuned Electrostatic Actuators. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 8(4).
- Hung E. y Senturia S. (1999). Generating efficient dynamical models for microelectromechanical systems from a few finite-element simulation runs. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 8(3), 280–289.
- Janata, J. (2009). *Principles of Chemical Sensors*. (2ª Edición). Nueva York: Springer.
- Jang J.; Zhao Y. y Wereley S. (2003). Pressure distributions and TMAC measurements in near unity aspect ratio, anodically bonded microchannels. *The Sixteenth Annual International Conference on Micro Electro Mechanical Systems 2003*, 287-290.
- Jiménez J.E. (2000). El proceso de investigación. Valencia Venezuela. El viaje del pez.
- Joshi, S.; Hung, S y Vengallatore S. (2014). Design strategies for controlling damping in micromechanical and nanomechanical resonators. *EPJ Techniques and Instrumentation*, 1(5).
- Khoei A., Anahid M. y Shahim K. (2008). An extended arbitrary Lagrangian–Eulerian finite element method for large deformation of solid mechanics. *Finite Elements in Analysis and Design*, 44 (6-7), 401-416.
- Kim E.-S., Cho Y.-H. y Kim M.-U. (1999). Effect of holes and edges on the squeeze film damping of perforated micromechanical structures. *Twelfth IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 1999. MEMS '99*, 296-301.
- Kim, B., Prins, F.; Kern, D.; Raible, S. y Weimar, U. (2001). Multicomponent analysis and prediction with a cantilever array based gas sensor. *Sensors and Actuators B*, 78 (1-3), 12.

- Kumar A. y Pratap R. (2004). Coupled nonlinear effects of surface roughness and rarefaction on squeeze film damping in MEMS structures. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 14, 1430-1437.
- Lang, H.P.; Berger, R.; Battiston, F.; Ramseyer, J.-P.; Meyer, E.; Andreoli, C.; Brugger, J.; Vettiger, P.; Despont, M.; Mezzacasa, T.; Scandella, L.; Güntherodt, H.-J.; Gerber, C y Gimzewski, J.K. (1998). A chemical sensor based on a micromechanical cantilever array for the identification of gases and vapors. *Applied Physics A*, 66(1), 61-64.
- Lang H, Hegner M. y Gerber C. (2005). Cantilever array sensors. *Materials Today*, 8(4), 30-36.
- Langlois W.E. (1962). Isothermal squeeze films. *Quarterly of Applied Mathematics XX*, 2, 131-150.
- Lee H.-L. y Chang W.-J. (2009). Effects of Damping on the Vibration Frequency of Atomic Force Microscope Cantilevers Using the Timoshenko Beam Model. *Japanese Journal of Applied Physics*, 48, 1-4.
- Lendraitis, V.; Seniūnas, G.; Smitka, V. y Mizriene, V. (2005). Investigation of microelectromechanical gas sensor response. *Mechanika*, 52(2).
- Li G. y Aluru N.R.(2002). A Lagrangian approach for electrostatics analysis of deformable conductors. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 11(3), 245-254.
- Liu, X; Cheng, S; Liu, H; Hu, Sha, Zhang, D y Ning, H. (2012). A Survey on Gas Sensing Technology. *Sensors*, 12, 9635-9665.
- Liu Q.B y Quek S.S. (2003). *The Finite Element Method: A Practical Course*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- McCarthy B., Adams G.G., McGruer N.E. y Potter D. (2002). A dynamic model, including contact bounce, of an electrostatically actuated microswitch. *Journal of Microelectromechanical Systems*. Vol. 11. Nº 3. pp. 276-283.

- Nemirovsky Y. y Bochobza-Degani O. (2001). Methodology and model for the pull-in parameters of electrostatic actuators. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 10(4), 601–615.
- Newell WE. (1968). Miniaturization of tuning forks. *Science*, 161,1320–1326.
- Nouria H., Foltête E., Hirsinger L. y Ballandras S. (2007). Investigation of the effects of air on the dynamic behavior of a small cantilever beam. *Journal of Sound and Vibration*, 305, 243-260.
- O'Brien G.J., Monk D.J. y Lin L. (2000). Electrostatic latch and release; a theoretical and empirical study. *Proceedings of Micro-Electro-Mechanical Systems. (MEMS) 2000. MEMS – Vol.2. The 2000 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Orlando. Nueva York: ASME*, 19–26.
- Ono T., Sim D.Y. y Esashi M. (2000). Micro-discharge and electric breakdown in a micro-gap. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 10(3), 445–451.
- Osterberg P. y Senturia S. (1997). M-TEST: A Test Chip for MEMS Material Property Measurement Using Electrostatically Actuated Test Structures. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 6 (2).
- Pandey, A.K., Venkatesh K.P y Pratap R. (2009). Effect of metal coating and residual stress on the resonant frequency of MEMS resonators. *Sadhana*, 34(4).
- Ping H., RongJun N. y Hu H. (2008). A new numerical method to solve modified Reynolds equation for magnetic head/disk working in ultra-thin gas films. *Science in China Series E: Technological Sciences. Springer*, 51(4), 424-434.
- Rodríguez J., Bonilla S. y Ávila A. Electrostatic Breakdown Measurements in Micro Gaps. *rev.ing. [online]. Jan./June 2009, 29* [citado el 27 de Diciembre de 2010], (7-15). Disponible en línea en: <http://www.scielo.unal.edu.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-49932009000100002&lng=en&nrm=iso>. ISSN 0121-4993.
- Schrag G. y Wachutka G. (2004). Accurate system-level damping model for highly perforated micromechanical devices. *Sensors and Actuators A: Physical*, 111(2-3), 222-228.

- Senturia S.D. (2001). *Microsystems Design*. Dordrecht: Kluwer Academic.
- Slade P.G. y Taylor E.D. (2001). Electrical breakdown in atmospheric air between closely spaced (0.2 μ m–40 μ m) electrical contacts. *Proceedings of the 47th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Montreal 2001*. IEEE, Piscataway, 245–250.
- Subrahmanyam, G.; Atanu, M. y Anindya C. (2006). Cantilever beam electrostatic MEMS actuators beyond pull-in. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 16, 1800-1810.
- Torres J.-M. y Dhariwal R.S. (1999). Electric field breakdown at micrometre separations in air and vacuum. *Microsystem Technologies*, 6, 6-10.
- Toshiyoshi H. y Fujita H. (1996). Electrostatic microtorsion mirrors for optical switch matrix. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 5(4), 231-237.
- Toshiyoshi H., Piyawattanametha W. Chan C.-T y Wu M.C. (2001). Linearization of electrostatically actuated surface micromachined 2-D optical scanner. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 10(2), 205–214.
- Vaz, A.D.; Salvadori, M.C. y Catlani M. (2004). Young Modulus Measurement of Nanostructured Metallic thin films. *Journal of Metastable and Nanocrystalline Materials*, 20-21, 758-762.
- Wang P. (2010). Modeling material responses by arbitrary Lagrangian Eulerian formulation and adaptive mesh refinement method. *Journal of Computational Physics*. Vol. 229. Nº 5. pp. 1573-1599.
- Yappert, Y. (1996). A tutorial on fiber-optic chemical sensors. *The Chemical Educator*. Vol.1, No.6. pp.1-10
- Young W. y Budynas R. (2002). *Roark's Formulas for Stress and Strain*. (7^a Edición). Nueva York: McGraw-Hill.
- Zhang F, He X, Shi Z y Zhou W. (2009). Structure Design and Fabrication of Silicon Resonant Micro-accelerometer Based on Electrostatic Rigidity. *Proceedings of the World Congress on Engineering 2009*. Vol I WCE 2009. London, U.K.

- Zhang W.-M., Meng G., Zhou J.-B. y Chen J.-Y. (2009). Nonlinear Dynamics and Chaos of Microcantilever-Based TM-AFMs with squeeze film damping effects. *Sensors*, 9, 3854-3874.