



**UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE CIENCIAS
POSTGRADO EN INSTRUMENTACIÓN**

***DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA
MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)***

**Trabajo de Grado de Maestría presentado ante la
ilustre Universidad Central de Venezuela por el
Ingeniero Luis Waldo Escalona Galvis, para optar al
título de Magister Scientiarum Mención
Instrumentación**

Tutor: Dr. Jesús Pérez

**Caracas – Venezuela
Marzo 2012**

Resumen

Este trabajo presenta el diseño y desarrollo de microvigas en voladizo, con la finalidad de estudiar su comportamiento para su futura aplicación en microscopía de barrido de sonda (SPM), y el caso particular de la microscopía de fuerza atómica (AFM). 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 que la recubre parcialmente. En este sentido, se lleva a cabo el análisis de elementos finitos (FEM) para modelos de viga-electrodo, considerando 4 longitudes comerciales de microvigas y 4 diferentes longitudes de electrodos. En consecuencia, se realizan análisis estáticos, de respuesta temporal y de las frecuencias propias. Seguidamente, se llevan a cabo 3 ensayos experimentales a 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. Los resultados del ensayo de potencial de ruptura llevan al establecimiento de 300V como el límite de la zona segura de actuación de las microvigas. El análisis estático mediante elementos finitos presenta mejor aproximación a los resultados experimentales al considerar 130 GPa como módulo de elasticidad y para los modelos con la máxima longitud de electrodo simulada. Por otro lado, los factores de calidad determinados de las simulaciones difieren de los valores experimentales, evidenciando en todo caso una respuesta subamortiguada. Asimismo, los resultados evidencian 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 la viga entre en contacto con el electrodo y en consecuencia colapse. Por lo tanto, la flexión apalancada resultante de usar electrodos de longitud menor que la viga, ampliará el rango de desplazamiento en la viga y permitirá accionarla a frecuencias cercanas a la de resonancia, siendo una buena opción a evaluar para desarrollos futuros orientados al área de microscopia de barrido, en el caso particular de AFM.

Dedicatoria

A la memoria de mi padre, quien dio todo lo posible para que yo diera los primeros pasos en el camino que hoy sigo.

A mi madre, quien junto a mi padre, ha sido el pilar fundamental de todo lo bueno que la vida me ha dado hasta el momento.

A mis hermanos y familiares por ser el complemento.

A todos aquellos que buscan con esfuerzo el camino de la superación y el progreso.

Agradecimientos

Ante todo agradezco a Dios por ser la fuente de energía y fuerza necesaria para cerrar este ciclo de mi vida que me deja mucho aprendizaje y reflexión.

A mi familia, en especial a mi madre por ser ese apoyo incondicional y sincero sin igual. A mis hermanos por el apoyo prestado durante momentos importantes de la realización de este trabajo.

A Maryana Escalante por su apoyo oportuno y preciso durante el inicio y desarrollo de este trabajo.

Al Dr. Leon Abelmann, por haberme brindado la oportunidad única de trabajar a su lado en el grupo Transducer Science and Technology (TST) del Instituto MESA+ en la Universidad de Twente.

Al Dr. Leon Woldering, por su sincero apoyo e interés en mi trabajo durante el tiempo que tuvimos como compañeros en el grupo TST. Pocas personas he conocido que sean ejemplo de pasión por la academia y la investigación, Leon tu eres una de esas personas.

A mis excompañeros del grupo TST, en especial aquellos que aportaron su grano de arena con la mejor disposición en el desarrollo de este trabajo durante mi tiempo en la Universidad de Twente. Muchas gracias, en especial, a Martin Siekman, Remco Sanders, Henk van Wolferen, Thijs Bolhuis, Karen Wannyn y Susan Janse.

A mis nuevos amigos Alexandre Thebaud, Caty, John Vos, Andreea Niculescu y Christian Muehl, quienes hicieron mi estadía en Holanda una experiencia única, más allá de lo profesional. Siempre les estaré agradecido.

A los Profesores Dr. Emery Dunia, Dr. Jesús Pérez y Dr. Carlos Rojas, por el aporte que han dado a mi trabajo durante su culminación.

A los Profesores Carlos Jiménez, Brizeida Gámez, Paulino Del Pino y Enrique Flores, por su valiosa y sincera colaboración en la presentación del trabajo final escrito.

Por último pero no menos importante, a Karen Zapata, por su siempre oportuna ayuda, disposición y apoyo.

Gracias a todos.

Índice de Contenidos

Índice de tablas	ix
Índice de figuras	xii
Introducción	1
Capítulo I	4
1.1 El Problema	5
1.2 Objetivo General.....	9
1.3 Objetivos Específicos	9
1.4 Justificación	10
1.5 Alcance	10
1.6 Limitaciones	11
Capítulo II	12
Aspectos Teóricos	13
2.1 Electromecánica de Microestructuras.....	13
2.1.1 Análisis Electromecánico	14
2.1.2 Balance de energía en sistemas electromecánicos.....	16
2.1.3 Enfoque Lagrangiano y sus variantes en la Electromecánica.....	18
2.1.4 Electromecánica para el enfoque del condensador de placas paralelas.....	19
2.1.5 Electromecánica y extensión en el rango de movimiento	20
2.1.6 Electromecánica de vigas y placas	21
2.1.7 Flexión por apalancamiento.....	23
2.1.8 Consideraciones en la electromecánica. Descarga eléctrica.....	24
2.1.9 Amortiguación por compresión de película (Squeeze film damping) en MEMS (Sistemas Microelectromecánicos por Microelectromechanical Systems).	28
2.2 Microscopía de fuerza atómica – Aspectos Generales	34
2.2.1 Principio básico de AFM y varios modos de obtención de imágenes	36
2.2.2 AFM de alta velocidad	38
Capítulo III	45
Desarrollo del Trabajo de Investigación.....	46
3.1 Metodología.....	46
3.1.1 Fase 1: Revisión bibliográfica	46
3.1.2 Fase 2: Revisión y estudio de herramientas de simulación	46
3.1.3 Fase 3: Desarrollo de modelos para el análisis de elementos finitos.....	47
3.1.4 Fase 4: Ejecución de las simulaciones mediante el MEF	47
3.1.5 Fase 5: Desarrollo de máscaras para el proceso de Microfabricación.....	48
3.1.6 Fase 6: Desarrollo de pruebas a las muestras obtenidas de Pianoforte y comparación con simulaciones	48
3.2 Desarrollo del trabajo	48

Capítulo IV	58
Desarrollo de modelos para el Método de los Elementos Finitos.....	59
4.1 Generalidades de COMSOL Multiphysics® 3.5a [92].....	59
4.2 Los modos de aplicación en COMSOL Multiphysics® 3.5a [92].....	59
4.3 Análisis y herramientas de solución en COMSOL Multiphysics® [92].....	60
4.4 Desarrollo y análisis de modelos en COMSOL Multiphysics® [92]	63
4.4.1. Selección de los modos de aplicación de acuerdo con el modelo a analizar	63
4.4.2 Definición de la geometría del modelo	65
4.4.3 Ajustes en la física del modelo	66
Ajustes en la física para el análisis paramétrico en 2D.....	68
Ajustes en la física para el análisis de frecuencias de los modos propios en 3D.....	71
Ajustes en la física para el análisis transitorios (dependiente del tiempo) en 2D.....	72
4.4.4. Definición y generación del mallado	76
4.4.5. Cálculo y post-procesamiento de la solución.....	77
Capítulo V	78
Resultados de los análisis aplicados a los modelos Microviga-electrodo mediante Elementos Finitos	79
5.1 Análisis paramétrico estático de la interacción microviga-electrodo	80
5.2 Análisis de los modos de oscilación de las vigas a ensayar.....	89
5.3 Análisis de la respuesta transitoria en las vigas	93
Capítulo VI	105
Desarrollo experimental del trabajo.....	106
6.1 Proceso de fabricación y diseño de las máscaras.....	106
6.2 Desarrollo de las pruebas experimentales para medición de flexión.....	112
6.3 Desarrollo de las pruebas experimentales para medición de potencial de ruptura	121
Capítulo VII	136
Discusión de resultados.....	137
7.1 Límites de flexión	148
7.2 Límites de oscilación	149
7.3 Ruptura dieléctrica	150
Conclusiones	152
Referencias	157
Apéndices	170

Apéndice A	171
Tabla con análisis de convergencia aplicado a los modelos estáticos para el análisis mediante Elementos Finitos.....	171
Apéndice B	179
Gráficos comparativos de Deflexión como función del potencial aplicado para simulaciones Mediante Elementos Finitos y datos experimentales	179
Apéndice C	196
Gráficos de fuerza aplicada versus desplazamiento para las microvigas de acuerdo con la longitud del electrodo	196

Índice de Tablas

Tabla 3.1. Fórmulas de corte, momento, inclinación y deflexión para vigas rectas elásticas. Considerando carga intermedia concentrada (ver figura 3.3(a)). Tomado de [85]	51
Tabla 3.2. Fórmulas de corte, momento, inclinación y deflexión para vigas rectas elásticas. Para una carga distribuida parcialmente (ver figura 3.3(b)). Tomado de [85]	52
Tabla 4.1. Herramientas de solución en COMSOL Multiphysics	61
Tabla 4.2. Modos de aplicación para análisis paramétrico en 2D	68
Tabla 4.3. Ajustes de física para el modo de aplicación Deformación en el plano	69
Tabla 4.4. Ajustes de física para el modo de aplicación de mallado en movimiento	70
Tabla 4.5. Ajustes de física para el modo de aplicación Electroestática	70
Tabla 4.6. Modos de aplicación para análisis de frecuencias propias 3D	71
Tabla 4.7. Ajustes de física para el modo de aplicación Esfuerzo-deformación de Sólidos	72
Tabla 4.8. Modos de aplicación para análisis transitorio en 2D	72
Tabla 4.9. Ajustes de física para el modo de aplicación Deformación en el plano	73
Tabla 4.10. Ajustes de física para el modo de aplicación Mallado en movimiento	74
Tabla 4.11. Ajustes de física para el modo de aplicación Electroestática	74
Tabla 4.12. Ajustes de física para el modo de aplicación de Amortiguación por película	75
Tabla 5.1. Longitudes consideradas en los modelos de accionamiento de microvigas	80
Tabla 5.2. Definición del mallado para el análisis estático paramétrico mediante elementos finitos	81
Tabla 5.3. Definición del mallado para el análisis estático mediante elementos finitos	86
Tabla 5.4. 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	89
Tabla 5.5. 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	90
Tabla 5.6. 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	90
Tabla 5.7. 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	91
Tabla 5.8. Magnitud de los modos de oscilación obtenidos para los valores de módulo de elasticidad considerados en las longitudes de vigas analizadas	93
Tabla 5.9. 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, considerando el módulo de elasticidad de 130GPa	103
Tabla 5.10. 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, considerando el módulo de elasticidad de 169GPa	104

Tabla 6.1. Dimensiones de las máscaras para el accionamiento de microvigas.....	110
Tabla 6.2. Especificaciones de desempeño del vibrómetro para el ensayo de medición de flexión.....	113
Tabla 6.3. Especificaciones de equipos utilizados en la medición de flexión en las microvigas como función del potencial aplicado	114
Tabla 6.4. Tabla comparativa de los resultados experimentales y las simulaciones	117
Tabla 6.5. Factores de calidad obtenidos de los gráficos de magnitud-frecuencia para las vigas de longitud 325 μm y 450 μm , actuadas mediante electrodos de longitud 80 μm , 90 μm y 100 μm	121
Tabla 6.6. Equipos utilizados y ajustes realizados en la inspección óptica de las muestras con los electrodos a ensayar	123
Tabla 6.7. Resultados obtenidos de la determinación de las separaciones entre electrodos luego de procesar las imágenes capturadas	124
Tabla 6.8. Separación entre electrodos utilizados para los ensayos de potencial de ruptura dieléctrica.....	126
Tabla 6.9. Especificaciones de equipos utilizados en la medición de potencial de ruptura	128
Tabla 6.10. Resultados de procesar los gráficos I vs V obtenidos de los ensayos de potencial de ruptura dieléctrica.....	133
Tabla 6.11. Coeficientes aplicados en la ley de Paschen para aire [98].	134

Tabla 7.1. Constantes elásticas equivalentes obtenidas mediante elementos finitos.....	146
---	-----

Tabla A1. Análisis de convergencia de elementos de malla para microviga de longitud 125 μm y electrodo de longitud 70 μm	171
Tabla A.2. Análisis de convergencia de elementos de malla para microviga de longitud 125 μm y electrodo de longitud 80 μm	171
Tabla A.3. Análisis de convergencia de elementos de malla para microviga de longitud 125 μm y electrodo de longitud 90 μm	172
Tabla A.4. Análisis de convergencia de elementos de malla para microviga de longitud 125 μm y electrodo de longitud 100 μm	172
Tabla A.5. Análisis de convergencia de elementos de malla para microviga de longitud 225 μm y electrodo de longitud 70 μm	173
Tabla A.6. Análisis de convergencia de elementos de malla para microviga de longitud 225 μm y electrodo de longitud 80 μm	173
Tabla A.7. Análisis de convergencia de elementos de malla para microviga de longitud 225 μm y electrodo de longitud 90 μm	174
Tabla A.8. Análisis de convergencia de elementos de malla para microviga de longitud 225 μm y electrodo de longitud 100 μm	174
Tabla A.9. Análisis de convergencia de elementos de malla para microviga de longitud 325 μm y electrodo de longitud 70 μm	175
Tabla A.10. Análisis de convergencia de elementos de malla para microviga de longitud 325 μm y electrodo de longitud 80 μm	175

Tabla A.11. Análisis de convergencia de elementos de malla para microviga de longitud 325 μm y electrodo de longitud 90 μm	176
Tabla A.12. Análisis de convergencia de elementos de malla para microviga de longitud 325 μm y electrodo de longitud 100 μm	176
Tabla A.13. Análisis de convergencia de elementos de malla para microviga de longitud 450 μm y electrodo de longitud 70 μm	177
Tabla A.14. Análisis de convergencia de elementos de malla para microviga de longitud 450 μm y electrodo de longitud 80 μm	177
Tabla A.15. Análisis de convergencia de elementos de malla para microviga de longitud 450 μm y electrodo de longitud 90 μm	178
Tabla A.16. Análisis de convergencia de elementos de malla para microviga de longitud 450 μm y electrodo de longitud 100 μm	178
Tabla B.1. Raíces de los errores cuadráticos promedio de los ajustes hechos a los gráficos experimentales y a las simulaciones mediante el FEM.....	179

Índice de Figuras

Figura 1.1. Esquema de un AFM [7].....	7
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. Adaptado de [6]	15
Figura 2.2. Curva de esfuerzo y desplazamiento que muestra la relación entre energía y coenergía. Adaptado de [6].....	18
Figura 2.3. Modelo electromecánico de elementos concentrados para el condensador de placas paralelas. Adaptado de [6].....	19
Figura 2.4. Ilustración del concepto de apalancamiento por flexión para incrementar el rango de movimiento estable. Adaptado de [6].....	24
Figura 2.5. Amortiguación por película comprimida (a) vista de sección transversal; (b) la presión de amortiguación [50].....	32
Figura 2.6. Representación esquemática de un sistema de AFM en modo de contacto intermitente. En el modo de fuerza constante, la excitación del actuador piezoeléctrico a el convertidor RMS -DC son omitidos [8]	38
Figura 2.7. Diagrama de bloques del lazo retroalimentado para el modo de fuerza constante en AFM [68]	41
Figura 3.1. Niveles de diseño abordados en el proyecto	49
Figura 3.2. Viga en voladizo. (a) Con carga intermedia aplicada (b) con carga parcialmente distribuida	50
Figura 3.3. Esquemas utilizados para el accionamiento de vigas empotradas.	51
Figura 3.4. Accionamiento electrostático para el caso estudiado.....	54
Figura 3.5. Accionamiento electrostático con un electrodo.	55
Figura 4.1. Generalidad del caso analizado. (V_i es el potencial eléctrico aplicado).....	64
Figura 4.2. Geometría para los modelos. (a) En 2D. (b) En 3D.....	67
Figura 4.3. Distribución de los contornos para la geometría en 2D.....	68
Figura 5.1. Desplazamiento del extremo libre de la viga de $125\mu\text{m}$ en función del potencial aplicado mediante los electrodos cuyas longitudes se presentan en la figura. ($E = 130 \text{ GPa}$).	82
Figura 5.2. Desplazamiento del extremo libre de la viga de $225\mu\text{m}$ en función del potencial aplicado mediante los electrodos cuyas longitudes se presentan en la figura. ($E = 130 \text{ GPa}$)	82
Figura 5.3. Desplazamiento del extremo libre de la viga de $325\mu\text{m}$ en función del potencial aplicado mediante los electrodos cuyas longitudes se presentan en la figura. ($E = 130 \text{ GPa}$)	83
Figura 5.4. Desplazamiento del extremo libre de la viga de $450\mu\text{m}$ en función del potencial aplicado mediante los electrodos cuyas longitudes se presentan en la figura. ($E = 130 \text{ GPa}$)	83

Figura 5.5. Desplazamiento del extremo libre de la viga de 125 μm en función del potencial aplicado mediante los electrodos cuyas longitudes se presentan en la figura. (E = 169 GPa)	84
Figura 5.6. Desplazamiento del extremo libre de la viga de 225 μm en función del potencial aplicado mediante los electrodos cuyas longitudes se presentan en la figura. (E = 169 GPa)	84
Figura 5.7. Desplazamiento del extremo libre de la viga de 325 μm en función del potencial aplicado mediante los electrodos cuyas longitudes se presentan en la figura. (E = 169 GPa)	85
Figura 5.8. Desplazamiento del extremo libre de la viga de 450 μm en función del potencial aplicado mediante los electrodos cuyas longitudes se presentan en la figura. (E = 169 GPa)	85
Figura 5.9. 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 (mostradas en la leyenda) para E = 130 GPa.	87
Figura 5.10. 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 (mostradas en la leyenda) para E = 169 GPa.	87
Figura 5.11. 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 (mostradas en la leyenda) para E = 130 GPa	88
Figura 5.12. 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 (mostradas en la leyenda) para E = 169 GPa	88
Figura 5.13. Los cuatro primeros modos de oscilación obtenidos para la viga de longitud 125 μm .	91
Figura 5.14. Los cuatro primeros modos de oscilación obtenidos para la viga de longitud 225 μm .	92
Figura 5.15. Los cuatro primeros modos de oscilación obtenidos para la viga de longitud 325 μm .	92
Figura 5.16. Los cuatro primeros modos de oscilación obtenidos para la viga de longitud 325 μm .	93
Figura 5.17. 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). Para E = 130 GPa	94
Figura 5.18. 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). Para E = 130 GPa	95
Figura 5.19. 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). Para E = 130 GPa	96
Figura 5.20. 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). Para E = 130 GPa.	97

Figura 5.21. Desplazamiento del extremo libre de la viga de 125 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). Para $E = 169 \text{ GPa}$	98
Figura 5.22. 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). Para $E = 169 \text{ GPa}$	99
Figura 5.23. 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). Para $E = 169 \text{ GPa}$	100
Figura 5.24. Desplazamiento del extremo libre de la viga de 450 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). Para $E = 169 \text{ GPa}$	101
Figura 5.25. Ejemplo de respuesta subamortiguada y magnitudes asociadas que deben considerar para la determinación de ξ y ω_n	102
Figura 6.1. 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), 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	107
Figura 6.2. Oblea empleada en Pianoforte y dimensiones de la viga de acuerdo con el proceso de fabricación	109
Figura 6.3. Diseño de máscaras para accionamiento de microvigas	110
Figura 6.4. Aspecto final de las máscaras para accionamiento de microvigas.....	111
Figura 6.5. Máscaras para determinación de potencial de ruptura	111
Figura 6.6. Accionamiento de las vigas mediante la señal proveniente del vibrómetro ..	112
Figura 6.7. Arreglo experimental para medición de flexión en las microvigas como función del potencial aplicado	115
Figura 6.8. Gráfico de magnitud vs frecuencia para microvigas de 325 μm accionadas mediante electrodos de longitud 80 μm , 90 μm y 100 μm . Obtenidos del analizador de movimiento (Vibrómetro).....	119
Figura 6.9. Gráfico de magnitud vs frecuencia para microvigas de 450 μm accionadas mediante electrodos de longitud 80 μm , 90 μm y 100 μm . Obtenidos del analizador de movimiento (Vibrómetro).....	120
Figura 6.10. Distribución de puntos para la determinación de la separación entre electrodos	122
Figura 6.11. Imagen de la muestra patrón de calibración del microscopio	125
Figura 6.12. Arreglo experimental utilizado para la medición de potencial de ruptura en electrodos para separaciones comprendidas entre 3 μm y 20 μm	127
Figura 6.13. Gráfico que relaciona la intensidad de corriente y potencial eléctrico aplicado, obtenida del ensayo de medición de potencial de ruptura	129

Figura 6.14. 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.....	130
Figura 6.15. Distribución de magnitudes de la segunda derivada respecto al valor cero..	131
Figura 6.16. Determinación del error asociado al potencial de pre-ruptura VPR.	131
Figura 6.17. Gráfico de Potencial eléctrico de ruptura vs separación de electrodos obtenido luego de procesados los resultados de los ensayos.....	134
Figura 6.18. 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.	135
Figura 7.1. Gráfico comparativo de Potencial de pull-in vs. Longitud de Electrodo, considerando los resultados del análisis mediante elementos finitos y la adaptación de expresiones analíticas. Se considera $E = 130$ GPa.	140
Figura 7.2. Gráfico comparativo de Potencial de pull-in vs. Longitud de Electrodo, considerando los resultados del análisis mediante elementos finitos y la adaptación de expresiones analíticas. Se considera $E = 169$ GPa.	140
Figura 7.3. Gráfico de factores de calidad como función de la longitud de electrodo de accionamiento para vigas de $125\ \mu\text{m}$, $225\ \mu\text{m}$, $325\ \mu\text{m}$ y $450\ \mu\text{m}$ de longitud. Se considera $E = 130$ GPa.....	141
Figura 7.4. Gráfico de factores de calidad como función de la longitud de electrodo de accionamiento para vigas de $125\ \mu\text{m}$, $225\ \mu\text{m}$, $325\ \mu\text{m}$ y $450\ \mu\text{m}$ de longitud. Se considera $E = 169$ GPa.....	141
Figura 7.5. 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 [11].....	143
Figura 7.6. 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.....	144
Figura 7.7. Límites a considerar al actuar la microviga.	151
Figura B.1. Gráficos experimentales y de las simulaciones para microvigas de longitud $125\ \mu\text{m}$ y electrodos de accionamiento de longitud $70\ \mu\text{m}$	180
Figura B.2. Gráficos experimentales y de las simulaciones para microvigas de longitud $125\ \mu\text{m}$ y electrodos de accionamiento de longitud $80\ \mu\text{m}$	181
Figura B.3. Gráficos experimentales y de las simulaciones para microvigas de longitud $125\ \mu\text{m}$ y electrodos de accionamiento de longitud $90\ \mu\text{m}$	182
Figura B.4. Gráficos experimentales y de las simulaciones para microvigas de longitud $125\ \mu\text{m}$ y electrodos de accionamiento de longitud $100\ \mu\text{m}$	183
Figura B.5. Gráficos experimentales y de las simulaciones para microvigas de longitud $225\ \mu\text{m}$ y electrodos de accionamiento de longitud $70\ \mu\text{m}$	184
Figura B.6. Gráficos experimentales y de las simulaciones para microvigas de longitud $225\ \mu\text{m}$ y electrodos de accionamiento de longitud $80\ \mu\text{m}$	185

Figura B.7. Gráficos experimentales y de las simulaciones para microvigas de longitud 225 μm y electrodos de accionamiento de longitud 90 μm	186
Figura B.8. Gráficos experimentales y de las simulaciones para microvigas de longitud 225 μm y electrodos de accionamiento de longitud 100 μm	187
Figura B.9. Gráficos experimentales y de las simulaciones para microvigas de longitud 325 μm y electrodos de accionamiento de longitud 70 μm	188
Figura B.10. Gráficos experimentales y de las simulaciones para microvigas de longitud 325 μm y electrodos de accionamiento de longitud 80 μm	189
Figura B.11. Gráficos experimentales y de las simulaciones para microvigas de longitud 325 μm y electrodos de accionamiento de longitud 90 μm	190
Figura B.12. Gráficos experimentales y de las simulaciones para microvigas de longitud 325 μm y electrodos de accionamiento de longitud 100 μm	191
Figura B.13. Gráficos experimentales y de las simulaciones para microvigas de longitud 450 μm y electrodos de accionamiento de longitud 70 μm	192
Figura B.14. Gráficos experimentales y de las simulaciones para microvigas de longitud 450 μm y electrodos de accionamiento de longitud 80 μm	193
Figura B.15. Gráficos experimentales y de las simulaciones para microvigas de longitud 450 μm y electrodos de accionamiento de longitud 90 μm	194
Figura B.16. Gráficos experimentales y de las simulaciones para microvigas de longitud 450 μm y electrodos de accionamiento de longitud 100 μm	195

Figura C.1. Gráficos de Fuerza vs. Desplazamiento de la punta de la microviga de 125 μm , considerando 4 longitudes de electrodos de accionamiento: (a) 70 μm (b)80 μm (c)90 μm (d)100 μm . Considerando material isótropo con $E=130\text{GPa}$	197
Figura C.2. Gráficos de Fuerza vs. Desplazamiento de la punta de la microviga de 125 μm , considerando 4 longitudes de electrodos de accionamiento: (a) 70 μm (b) 80 μm (c) 90 μm (d) 100 μm . Considerando material isótropo con $E=169\text{GPa}$	198
Figura C.3. Gráficos de Fuerza vs. Desplazamiento de la punta de la microviga de 225 μm , considerando 4 longitudes de electrodos de accionamiento: (a) 70 μm (b) 80 μm (c) 90 μm (d) 100 μm . Considerando material isótropo con $E=130\text{GPa}$	199
Figura C.4. Gráficos de Fuerza vs. Desplazamiento de la punta de la microviga de 225 μm , considerando 4 longitudes de electrodos de accionamiento: (a) 70 μm (b) 80 μm (c) 90 μm (d) 100 μm . Considerando material isótropo con $E=169\text{GPa}$	200
Figura C.5. Gráficos de Fuerza vs. Desplazamiento de la punta de la microviga de 325 μm , considerando 4 longitudes de electrodos de accionamiento: (a) 70 μm (b) 80 μm (c) 90 μm (d) 100 μm . Considerando material isótropo con $E=130\text{GPa}$	201
Figura C.6. Gráficos de Fuerza vs. Desplazamiento de la punta de la microviga de 325 μm , considerando 4 longitudes de electrodos de accionamiento: (a) 70 μm (b) 80 μm (c) 90 μm (d) 100 μm . Considerando material isótropo con $E=169\text{GPa}$	202
Figura C.7. Gráficos de Fuerza vs. Desplazamiento de la punta de la microviga de 450 μm , considerando 4 longitudes de electrodos de accionamiento: (a) 70 μm (b) 80 μm (c) 90 μm	

(d) 100 μm . Considerando material isótropo con $E=130\text{GPa}$203

Figura C.8. Gráficos de Fuerza vs. Desplazamiento de la punta de la microviga de $450\mu\text{m}$, considerando 4 longitudes de electrodos de accionamiento: (a) $70\mu\text{m}$ (b) $80\mu\text{m}$ (c) $90\mu\text{m}$

(d) 100 μm . Considerando material isótropo con $E=169\text{GPa}$204

Introducción

Introducción

Los microscopios de sonda de barrido (SPM) y sus variantes, como son los microscopios de fuerza atómica (AFM), se basan en barrer la superficie de una muestra mediante una sonda, la cual está constituida en una microviga en voladizo con una fina punta en su extremo libre. El objetivo de estos microscopios es obtener el perfil “topográfico” de las muestras, que son barridas en su superficie. Para ello es necesario realizar, entre otras acciones, el desplazamiento de la microviga en dirección perpendicular a la superficie de la muestra mediante un movimiento oscilatorio, que la lleva a frecuencias cercanas a la de resonancia.

En este orden de ideas, 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 convencionalmente empleado para el posicionamiento de las vigas ya mencionado, al barrer las muestras. 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.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Introducción

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 máscaras con las que inicia el proceso de fabricación. Estas máscaras corresponden al diseño de los “moldes” que utiliza el proceso de microfabricación llamado Pianoforte, con el que se construyen las microvigas. Finalmente, se realiza el diseño de las máscaras y, una vez culminado el proceso de fabricación, se obtuvieron las muestras sometidas a ensayos para evaluar la respuesta “estática” de las microvigas y la respuesta dinámica. Asimismo, se lleva a cabo un ensayo con el cual se determina el potencial de ruptura a las pequeñas separaciones presentes en las muestras.

Los resultados obtenidos de las simulaciones en elementos finitos son utilizados para ser comparados con las pruebas experimentales y además para llegar a lineamientos y recomendaciones de diseño para futuras experiencias relacionadas con microvigas accionadas mediante campos eléctricos, pensando en futuros desarrollos para SPM y AFM.

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

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo I

El Problema

1.1 El Problema

La Microscopia de Barrido (SPM por Scanning Probe Microscopy) comprende un amplio grupo de instrumentos empleados para la obtención de imágenes y la medición de propiedades de superficies de materiales, químicas y biológicas. En la SPM se obtienen imágenes al desplazar una sonda a lo largo de la superficie a muestrear mientras se hace seguimiento de las interacciones presentes entre la sonda y la superficie. SPM presenta dos formas primarias que corresponden con el Microscopio de Efecto Túnel (STM por sus siglas en inglés de Scanning Tunneling Microscopy) creado en 1981 por Binnig y Roher (galardonados con el Premio Nobel de Física 1986) y el Microscopio de Fuerza Atómica (AFM por sus siglas en inglés de Atomic Force Microscope) creado en 1986 [1].

Aunque la efectividad del STM en la obtención de imágenes y mediciones morfológicas de la superficie de los materiales con resolución atómica ha sido demostrada, su rango de aplicación se limita a buenos conductores eléctricos. Esta restricción existente en el STM dio paso al desarrollo del AFM, con el cual fue posible la detección de características a escala atómica en una amplia gama de superficies no conductoras o semiconductoras, siendo útil en áreas como Ciencia de los Materiales, Química, Biología, Física y el campo especializado de los semiconductores [1].

El análisis de superficies mediante el AFM se efectúa al hacer pasar una microviga en voladizo que contiene una punta en su extremo. La punta se aproxima a la superficie de la muestra mientras ésta es barrida por un escáner piezoeléctrico, de esta manera es posible obtener información acerca de la superficie en tres dimensiones. En el AFM, la punta de la viga puede hacer contacto con la superficie mientras la analiza (operando en Modo de Contacto) o también puede aproximarse la punta a la superficie a muestrear sin existencia de contacto (operando en modo Sin Contacto). Cuando el AFM opera en Modo de Contacto, la punta se traslada a lo largo de la muestra (existiendo contacto) mientras un sistema de control mantiene la flexión de la viga constante o cercana a un valor de referencia. Aunque el Modo de Contacto ha resultado efectivo, presenta como desventaja el hecho que la punta

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo I

El Problema

ejerce fuerza sobre la muestra analizada provocando daños o alteraciones en superficies suaves (polímeros y muestras biológicas) y hasta en superficies duras como en el Silicio. Adicionalmente, al analizarse partículas biológicas de reducido tamaño como ADN (ácido desoxirribonucleico) y células, es necesario ubicar éstas en sustratos para obtener sus imágenes lo que restringe su disponibilidad posterior [1].

En el modo Sin Contacto del AFM, la viga oscila a un valor igual o superior al de su frecuencia de resonancia y al acercarse a la muestra ocurren cambios de amplitud y frecuencia en la oscilación por efecto de fuerzas como las de Van der Waals que se hacen apreciables dada la proximidad. De esta manera es posible obtener información acerca de la muestra, al detectar los cambios en la frecuencia de resonancia (modulación de frecuencia) y también imágenes al detectar los cambios en la amplitud (modulación de amplitud) [2-5]. Una variante del AFM en Modo Sin Contacto donde se realiza modulación de amplitud se conoce como Modo Intermitente, y en éste también se detectan los cambios de amplitud para la obtención de imágenes de la muestra. Para este modo, las amplitudes son 10 veces mayores que las manejadas convencionalmente en el modo sin contacto [1]. Un ejemplo de AFM en modo intermitente se muestra en la figura 1.1, donde, como se observa, el escáner opera a nivel de la muestra por ser de pequeño tamaño [6].

De acuerdo con lo antes descrito, es evidente que el elemento más importante de un AFM es la microviga y la punta en su extremo. Esto ha motivado diversos estudios que utilizan modelos analíticos así como también métodos numéricos como el Método de los Elementos Finitos (MEF o FEM por sus siglas en inglés de Finite Element Method) con la finalidad de obtener modelos dinámicos de la estructura (viga o viga-punta) que contribuyan al aporte de mejoras en el diseño en las estructuras utilizadas en el AFM para así mejorar el análisis realizado sobre las superficies muestreadas, así como también los tiempos de respuesta en el barrido de las superficies examinadas [7].

Conjuntamente con el desarrollo de modelos dinámicos, se han realizado estudios para incrementar la rapidez de barrido en AFM y así mejorar el tiempo de respuesta del

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo I

El Problema

dispositivo, y como la frecuencia de resonancia de la viga es esencial para la determinación de la característica de la superficie [8], entonces constituye un factor determinante para lograr altas velocidades de barrido. Debe recordarse además que la frecuencia de resonancia de la viga depende de su geometría y del material de construcción.

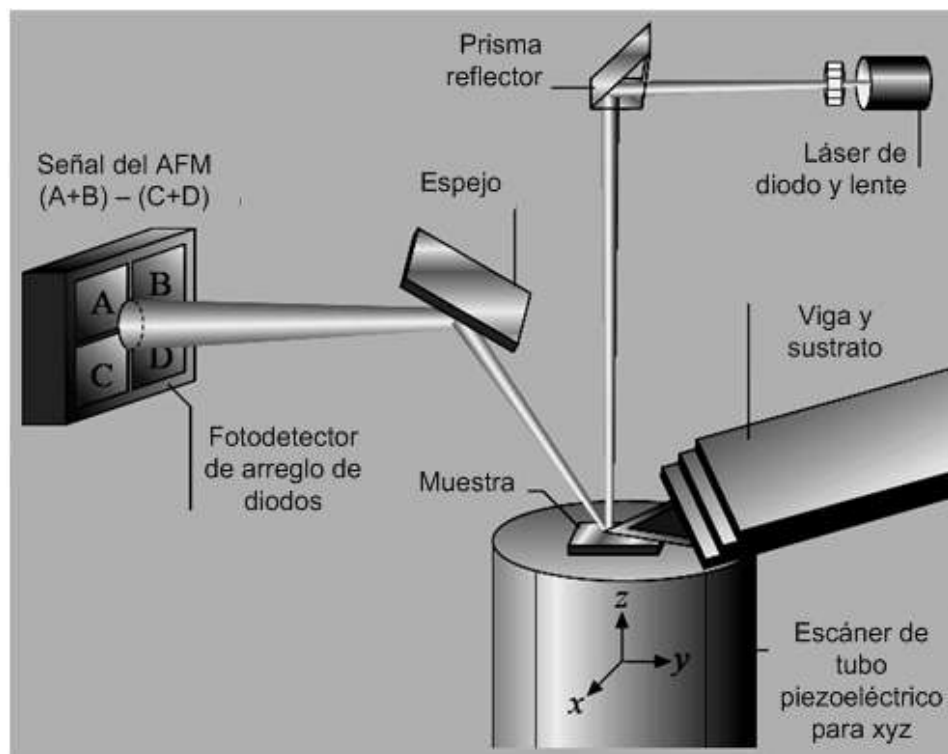


Figura 1.1. Esquema de un AFM para pequeñas muestras [6]

En el ámbito de los sistemas existentes para el Microscopio de Fuerza Atómica, el incremento de la frecuencia de oscilación de la viga también exige el aumento del ancho de banda del escáner que la acciona. Generalmente el accionamiento de las vigas se realiza mediante dispositivos piezoeléctricos, sin embargo, el desempeño de estos se encuentra limitado a frecuencias de aproximadamente 500 kHz. Aunque el accionamiento debido a dispositivos piezoeléctricos en vigas de dimensiones reducidas puede incrementar su frecuencia de resonancia, su construcción es limitada [8].

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo I

El Problema

Por otro lado, existen investigaciones que describen el accionamiento directo de vigas recubiertas o adheridas a materiales ferromagnéticos, utilizando campos magnéticos [9,10]. Desafortunadamente, el recubrimiento magnético hace más rígida la viga y la adherencia de materiales magnéticos reduce su frecuencia de resonancia. Además, es difícil producir un generador de campos magnéticos de altas frecuencias y elevado ancho de banda.

En otro orden de ideas, existe otro método conocido como Presión por Radiación Acústica (ARP por Acoustic Radiation Pressure) con el cual es posible lograr el accionamiento con un transductor que opera en el rango de 100-300 MHz [11], para ello, este método requiere de un arreglo especial [12,13] que evite su efecto sobre la muestra ya que se aplican fuerzas sobre ella y además es muy probable que ocasione incrementos en su temperatura.

Otro de los métodos de accionamiento de microestructuras como las vigas es el electrostático, que se basa fundamentalmente en la aplicación de una diferencia de potencial eléctrico entre dos estructuras, una de ellas es un electrodo fijo y la otra uno móvil. Este tipo de estructuras ha sido utilizada en el desarrollo de sensores de presión, acelerómetros, giroscopios, resonadores, microbombas, espejos ópticos, obturadores ópticos (actuadores ópticos variables), e interruptores de corriente continua y de radio frecuencia [14-17].

En el caso de AFM, se han desarrollado algunos métodos de accionamiento que emplean accionamientos electrostáticos de tipo comb-drive [18,19]. Con este tipo de diseño se ha logrado el accionamiento de vigas para aplicaciones de AFM en modo de fuerza constante, haciendo uso de un sistema de detección de deflexión de tipo óptico [18]. Así también, se han diseñado sistemas de accionamiento de sondas en plano mediante comb-drive, donde la deflexión es sensada por medios capacitivos, y además es posible ajustar la rigidez del sistema usando resortes ajustados mediante embragues accionados electrostáticamente [19].

Sin embargo, el uso de accionamiento electrostático basado en actuadores de tipo comb-drive de sondas para SPM en aplicaciones como AFM en modo dinámico (donde debe hacerse oscilar la sonda a su frecuencia de resonancia) impondría de forma directa una

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo I

El Problema

limitación importante como es la reducción en la frecuencia de resonancia de la sonda debido al necesario incremento en el tamaño de la estructura (longitud) sin contar el incremento en la complejidad para la construcción y operación del sistema obtenido.

En este sentido se plantea la necesidad de desarrollar microvigas para AFM, considerando accionamientos como el electrostático, que contribuyan al mejoramiento en la velocidad de respuesta del sistema de barrido y a su vez con la simplificación del proceso de fabricación del conjunto viga-punta.

1.2 Objetivo General

Desarrollar microvigas para la prueba de micropuntas a ser empleadas en microscopía de barrido de sonda (SPM).

1.3 Objetivos Específicos

1. Determinar los parámetros de diseño de las microvigas y su accionamiento para la generación de modelos que permitan su análisis numérico.
2. Diseñar los modelos de microvigas y electrodos para la evaluación de su desempeño mediante el Método de los Elementos Finitos.
3. Diseñar las máscaras para el proceso de microfabricación de las microvigas y arreglos relacionados, de acuerdo con los parámetros de diseño establecidos.
4. Realizar las pruebas de desempeño de las microvigas y demás arreglos diseñados, para analizar su respuesta.
5. Comparar los resultados obtenidos de las simulaciones usando el Método de los Elementos Finitos (MEF) con las experiencias prácticas, para establecer

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo I

El Problema

consideraciones preliminares en el futuro desarrollo de microvigas para SPM.

1.4 Justificación

La presente investigación abarcará el estudio del AFM desde un enfoque técnico, en el cual se hará un aporte para el desarrollo tecnológico de este tipo de microscopía, empleada en instituciones científicas venezolanas en el análisis de muestras. Entonces el trabajo propuesto posee alta pertinencia científica.

Como se mencionó anteriormente, los sistemas de microscopía de barrido y en especial los AFM poseen un rango amplio de aplicaciones. Sin embargo, un aspecto a mejorar es la velocidad de barrido de las muestras. Por lo tanto, el presente trabajo permitirá establecer alternativas para el diseño de microvigas (elemento de importancia en un AFM) así como también su accionamiento, lo que en consecuencia aportará información útil en la búsqueda de mejoras en el tiempo de respuesta del sistema de un AFM.

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 vigas cuyo accionamiento es de tipo eléctrico.

Asimismo, la aplicación del MEF en sistemas microelectromecánicos, constituye una aplicación del mencionado método en el análisis de dispositivos microelectromecánicos, donde se toma en consideración la interacción entre la electrostática y la mecánica estructural en dispositivos de reducida escala geométrica, lo que constituye una alternativa en la aplicación del MEF, convencionalmente aplicado a sistema de mayor tamaño en áreas de ingeniería eléctrica y mecánica.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo I

El Problema

1.5 Alcance

La investigación contempla el diseño y evaluación de microvigas de silicio resultantes 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 microscopía de fuerza atómica. No se llevan a cabo pruebas de las estructuras directamente sobre un sistema de AFM.

El proyecto contará con la estrecha cooperación de expertos en el área, quienes prestarán asistencia en la fabricación.

1.6 Limitaciones

El desarrollo del presente trabajo está contemplado en un período de seis (6) meses en las instalaciones de la Universidad Twente, Holanda. Este es el tiempo máximo disponible para llevar a cabo las fases experimentales de la investigación donde se contará con la disponibilidad de los laboratorios y personal capacitado en el área de Sistemas Micromecánicos y Microfabricación.

Capítulo II
Aspectos Teóricos

Aspectos Teóricos

2.1 Electromecánica de Microestructuras

La electromecánica, que consiste en la combinación de la electrostática con la mecánica, es quizá el enfoque de acoplamiento comúnmente 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 [6].

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 [6].

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo II.

Aspectos Teóricos.

La electrostática aplicada en el accionamiento de estructuras ha sido utilizada en interruptores y microrelés [15,20,21], acelerómetros [22,23], microbombas [24,25] y microespejos [17,26-32]. 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 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.

2.1.1 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 [6]. 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 [6]. 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.

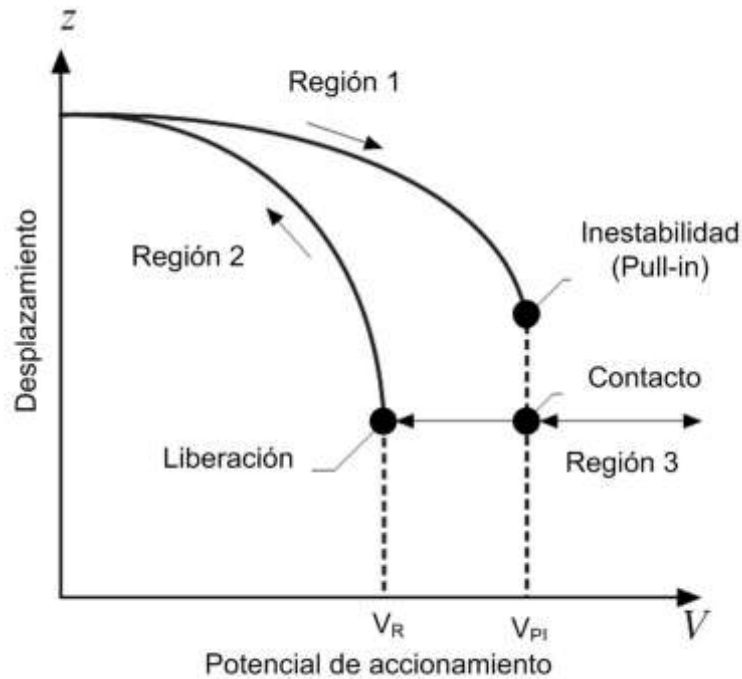


Figura 2.1. Curva característica de histéresis electromecánica que muestra los potenciales donde ocurre inestabilidad (pull-in), el contacto y la liberación entre los electrodos. Adaptado de [6]

El segundo nivel de complejidad, es un análisis que considera elementos estructurales continuos sometidos a cargas electrostáticas distribuidas [6]. 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 [6]. Para ello se utilizan aproximaciones por diferencias finitas, elementos finitos y elementos de contornos.

La electromecánica y su acoplamiento pueden ser descritos de manera simple mediante un par de conductores, uno de ellos se encuentra fijo y otro es una estructura elástica,

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo II.

Aspectos Teóricos.

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 [6]. 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.

2.1.2 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 que será desarrollado a continuación [33]. 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

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo II.

Aspectos Teóricos.

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 coenergía 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.

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.

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

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

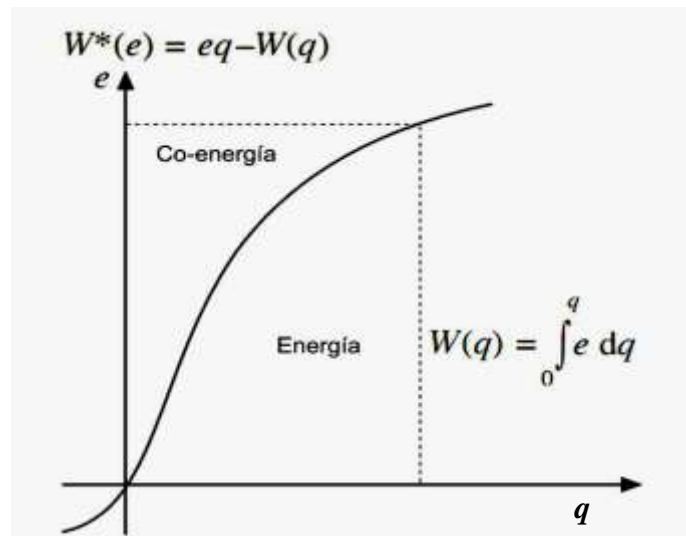


Figura 2.2. Curva de esfuerzo y desplazamiento que muestra la relación entre energía y coenergía. Adaptado de [6]

2.1.3 Enfoque Lagrangiano y sus variantes en la Electromecánica

Este enfoque ha sido propuesto por Li y Aluru [34] y Aluru y White [35] 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 [36]. 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 [37].

2.1.4 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_0 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 y . 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 “ y ”, el espacio entre placas disminuye. Los detalles del comportamiento de este simple modelo se encuentran en diversas fuentes bibliográficas [33,38].

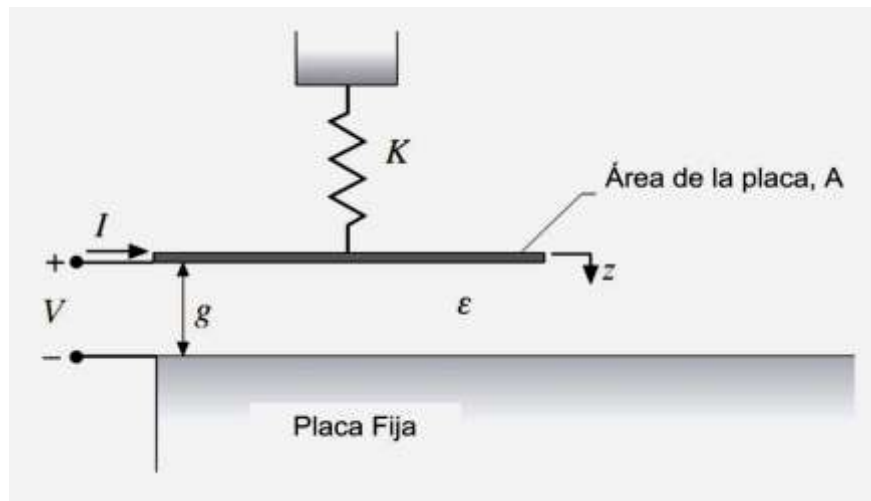


Figura 2.3. Modelo electromecánico de elementos concentrados para el condensador de placas paralelas. Adaptado de [6]

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:

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

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.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo II.

Aspectos Teóricos.

La fuerza electrostática en las placas del condensador viene dada por 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.

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

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

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:

$$g = g_0 - y = g_0 - \frac{\varepsilon AV^2}{2Kg^2} \quad (2.12)$$

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.

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

2.1.5 Electromecánica y extensión en el rango de movimiento

Los sistemas electromecánicos poseen dos características casi inherentes: no linealidad e inestabilidad [6]. Cuando se desea un funcionamiento en modo todo-nada o con

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo II.

Aspectos Teóricos.

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 la inestabilidad, ha sido ampliado mediante la adición de un condensador eléctrico pero no ha mejorado el problema de inestabilidad. Investigadores como Toshiyoshi y colaboradores [26], 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.

2.1.6 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 [6].

O'Brien y colaboradores [40] así como Choi y Lovell [41] 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

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo II.

Aspectos Teóricos.

(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 .

$$V_3 = \frac{11}{25r_1^2} \sqrt{\frac{77ET^3 Z_0^3}{25\varepsilon_0 \left[\frac{11(r_1-r_0)}{r_1 - \frac{11r_0}{23}} - 14 \ln \left[\frac{25r_1 - 11r_0}{14r_1} \right] \right]}} \quad (2.18)$$

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

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).

2.1.7 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 [6]. Este concepto, referido como flexión por apalancamiento (o leveraged bending en inglés) [42,43] 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 [42,43].

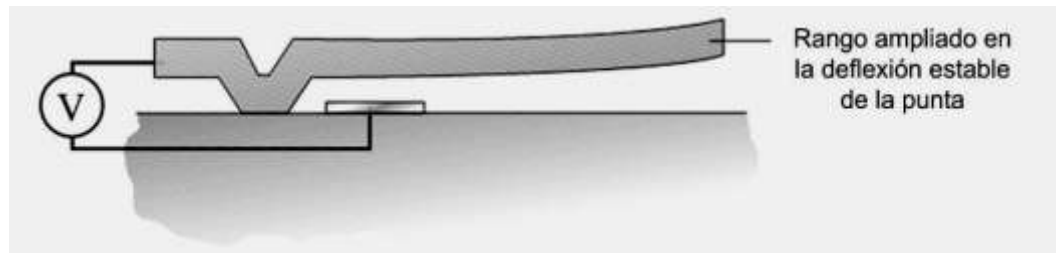


Figura 2.4. Ilustración del concepto de apalancamiento por flexión para incrementar el rango de movimiento estable. Adaptado de [6]

2.1.8 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 $10\mu\text{m}$ por aire. Sin embargo, para los actuadores electrostáticos, es deseable reducir la separación para, en consecuencia, minimizar el voltaje requerido para accionamiento [6].

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 $50\mu\text{m}$), en aire y otras condiciones ambientales. Slade y Taylor [44] han demostrado que la ruptura dieléctrica entre contactos (metálicos), para aire, ocurre a pequeñas separaciones ubicadas en tres regímenes: menores que $4\mu\text{m}$, comprendidas entre $4\mu\text{m}$ y $6\mu\text{m}$, y mayor que $6\mu\text{m}$. 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 ($4\text{-}6\mu\text{m}$) 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 [45] observaron una desviación respecto de la curva de Paschen para separaciones menores que $4\mu\text{m}$.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo II.

Aspectos Teóricos.

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 [44]. 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 65-110V/ μm .

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 determina del 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 [44,46]. 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.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo II.

Aspectos Teóricos.

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 es:

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

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 [47].

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/m^2 , 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-Nordheim 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 .

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

$$\beta = \frac{-2,303 \cdot m}{6,83 \cdot 10^9 \phi^{3/2} t_g v(y)} \quad (2.25)$$

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo II.

Aspectos Teóricos.

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-Norheim (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: $\gamma \exp(\alpha \cdot t_g)$ 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 [44].

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 [45], 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 [48] 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.

2.1.9 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 [49]. 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

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo II.

Aspectos Teóricos.

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 [50], 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 [51], análisis mediante elementos finitos [52], así como la caracterización experimental en estructuras donde el efecto de este tipo de amortiguación es de importancia [53].

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

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo II.

Aspectos Teóricos.

en años recientes (4) la necesidad de realizar cálculo numérico del efecto amortiguador para un diseño preciso una vez establecidos los modelos básicos [49].

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 [54]. 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 [55]:

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

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.

En 1962, Langlois [54] derivó la forma general de la ecuación de Reynolds basada en las ecuaciones de Navier-Stokes y las ecuaciones generales de la hidrodinámica viscosa [56]. 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.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo II.

Aspectos Teóricos.

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 e.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.

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

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 resistiva 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 que causa la compresión de la película de aire. La componente de la fuerza asociada al flujo viscoso se conoce como la fuerza de

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo II.

Aspectos Teóricos.

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.

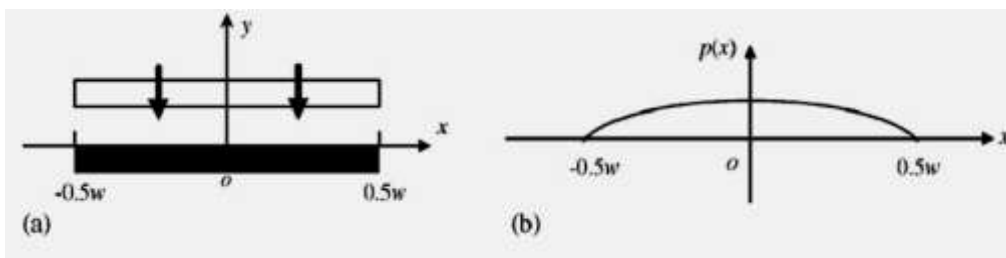


Figura 2.5. Amortiguación por película comprimida (a) vista de sección transversal; (b) la presión de amortiguación [50]

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) [52,57-62]. Aunque, en principio es posible obtener resultados bien precisos, su uso puede verse restringido en muchos casos debido a geometrías

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo II.

Aspectos Teóricos.

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 [60-64].

Con la finalidad de considerar la amortiguación por película comprimida en modelos donde se presentan placas perforadas, Bao y colaboradores [65] 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 [66] 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 [67]. 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

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo II.

Aspectos Teóricos.

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 este factor de flujo es la correlación obtenida de Fukui y colaboradores [67]:

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

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).

2.2 Microscopía de fuerza atómica – Aspectos Generales

El Microscopio de Fuerza Atómica (AFM) fue inventado en 1986 por Binnig y colaboradores [1], y con él es posible la observación de materiales aislantes y rasgos de escala nanométrica en líquidos. En el AFM original y sus mejoras posteriores, una punta aguda ubicada al final de una microviga, barre la muestra con ayuda de un escáner piezoeléctrico, proporcionando información tridimensional acerca de la superficie barrida. El AFM dinámico es empleado cuando se aleja ligeramente la viga de la superficie de la muestra mientras se hace oscilar (la viga) a una frecuencia igual o cercana a su frecuencia de resonancia. Información topográfica de la muestra así como información de la interacción entre la interacción punta-muestra puede extraerse al medir la desviación de frecuencia respecto a la de resonancia debido a las interacciones con la muestra [2-5].

El AFM se fundamenta en la microviga y la punta, que interactúan con la muestra. Por lo tanto, es indispensable contar con modelos analíticos o numéricos que puedan simular la dinámica de manera comprensible para la caracterización de las propiedades de la superficie. Por lo tanto se hace énfasis en el problema de la respuesta para altas frecuencias de las vigas en AFM [7].

Muchos investigadores se han interesado en el campo de la respuesta en frecuencia de vigas para AFM y existen diversas publicaciones que contienen varios modelos y

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo II.

Aspectos Teóricos.

simulaciones para la operación de microvigas. Varios modelos de masas puntuales han sido empleados en la investigación de la dinámica de las vigas [68-76].

Rabe y colaboradores [71] han examinado la amplitud y frecuencia de la vibración en flexión de vigas para AFM en estado libre o acoplado a la superficie. Se ha estudiado la respuesta para altas frecuencias de vigas para AFM por Turner y colaboradores [72] considerando los efectos amortiguadores entre la punta y la muestra. Turner y Wiehn [73] se enfocaron en la sensibilidad de los modos de vibración de vigas para AFM ante la rigidez presente en vibraciones a flexión y a torsión.

En las publicaciones mencionadas, se asume que la viga se encuentra en paralelo con la muestra por razones de simplicidad, mientras que en AFM comerciales se emplea una viga inclinada, lo que complica su análisis. Chang [74] analiza la sensibilidad de los modos de vibración a flexión de la viga para AFM al tomar en consideración el ángulo entre la viga y la superficie, incluyendo fuerzas de interacción vertical y lateral, sin embargo se ha despreciado la amortiguación producto de la interacción punta-muestra. Esos efectos amortiguadores han sido considerados por Rabe y colaboradores [75], los cuales han sido examinados en el modelo de viga elástica, y comparados con soluciones del modelo de masa puntual. Además de la amortiguación en la punta, la amortiguación de las vigas es ocasionada por dos efectos muy diferentes. Amortiguación del sistema, ocasionada por pérdidas internas en la viga y el aire alrededor, que afecta todo los elementos de la viga de la misma manera. Mahdavi y colaboradores [76] han examinado la respuesta en altas frecuencias de vigas para AFM empleando el modelo de viga elástica y tres modelos de parámetros generales que consideran la amortiguación de la viga.

Dada la habilidad de AFM para realizar mediciones en líquidos, ha existido un creciente interés por parte de los investigadores de ciencias biológicas ya que las biomoléculas muestran actividad vital en soluciones acuosas. Pese a la capacidad de AFM y su uso en el estudio de muestras biológicas, aun existen muchas interrogantes “biológicas”.

Una de las características esenciales de los sistemas biológicos está en su dinámica. Las funciones de los sistemas biológicos se producen a través de procesos dinámicos que

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo II.

Aspectos Teóricos.

ocurren en biopolímeros, biosupramoléculas, organelas y células. Por lo tanto, lo que se requiere de AFM para las ciencias biológicas es la capacidad de adquirir imágenes consecutivas de alta resolución de biomoléculas individuales funcionando. Esto se debe a que este tipo de imágenes consecutivas es imposible obtenerlas mediante otras técnicas. Sin embargo, la capacidad de captura de imágenes de microscopios AFM convencionales es muy baja para observar el comportamiento dinámico de moléculas activas. Se espera entonces que el dotar al AFM con capacidad para alta velocidad de captura de imágenes pueda tener un impacto revolucionario en el campo de las ciencias biológicas [8].

Entre los AFM de alta velocidad más avanzados se encuentran aquellos capaces de capturar imágenes en el rango de 30-60ms/marco sobre un rango de barrido de aproximadamente 250nm con aproximadamente 100 líneas. Además se ha reducido la interacción entre la punta y la muestra sin sacrificar la tasa de imágenes, de manera tal que no se interrumpen de forma significativa la débil interacción entre las macromoléculas biológicas [8].

2.2.1 Principio básico de AFM y varios modos de obtención de imágenes

Un arreglo típico de AFM en modo de contacto intermitente se presenta en la figura 2.6. El AFM es una clase de microscopio de “palpación”. Forma una imagen al tocar la superficie de la muestra con una fina punta unida al extremo libre de una viga suave mientras que un portamuestras es barrido horizontalmente en 2D. Al tocar la muestra, la viga deflece. Entre varios métodos para sensar esta deflexión, el sensado por deflexión del haz de luz (OBD por optical beam deflection) es con frecuencia empleado debido a su simplicidad; un haz colimado de láser se enfoca sobre la viga y es reflejado en un arreglo de fotodiodos muy cercanos entre sí (un fotodetector sensible a la posición o PSPD por position-sensitive photo detector), cuyas fotocorrientes son alimentadas a un amplificador diferencial. La salida del amplificador diferencial es proporcional a la deflexión de la viga. Durante el barrido del portamuestras, la deflexión detectada se compara con un valor objetivo (deflexión de referencia), y el portamuestras se mueve en dirección del eje z para minimizar la señal de error (la diferencia entre la deflexión detectada y la de referencia). Esta operación en lazo cerrado puede mantener la

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo II.

Aspectos Teóricos.

deflexión en la viga (por lo tanto, la fuerza de interacción entre la punta y la muestra) en el valor de referencia. El movimiento 3D resultante del portamuestras traza aproximadamente la superficie de la muestra, y por ende, una imagen topográfica puede construirse mediante el uso de un computador, usualmente de las señales eléctricas empleadas para accionar el escáner del portamuestras que se desplaza en dirección del eje z. Algunas veces, la imagen topográfica se construye de valores resultantes de sumar las señales eléctricas usadas para accionar el escáner (z) y las señales de error con una función apropiada de asignación de pesos. Este método puede proporcionar una imagen topográfica más precisa que el método anterior. En el modo de operación de fuerza constante; uno de los modos DC o modos de contacto, la punta en la viga, que siempre se encuentra en contacto con la muestra, ejerce fuerzas laterales de relativa magnitud a la muestra porque la constante elástica equivalente es considerable en dirección lateral.

Para evitar el problema antes mencionado, se inventó el modo de contacto intermitente [77] (uno de los modos dinámicos), en el cual se hace oscilar la viga en dirección del eje z (ver figura 2.6) a una frecuencia igual o cercana a la de resonancia. La amplitud de la oscilación se ve reducida por la interacción repulsiva entre la punta y la muestra. Por lo tanto, este modo también se conoce como modulación de amplitud (AM). La señal que produce la amplitud se genera con frecuencia mediante un convertidor RMS a DC y se mantiene a un nivel constante (amplitud de referencia) mediante retroalimentación.

En el AFM por modulación de amplitud, la oscilación de la viga disminuye no solo por la disipación de energía debido a la interacción punta-muestra sino también por el cambio en la frecuencia de resonancia ocasionado por la interacción [78-80]. Como el valor de la frecuencia de excitación se fija cercano o igual a la frecuencia de resonancia, este cambio de frecuencia produce un desfase de la oscilación, relativo a la señal de excitación. Cuando este desfase se mantiene mediante retroalimentación y se obtiene una imagen de las señales eléctricas empleadas para accionar el escáner de posicionamiento en z, este modo de obtención de imagen se conoce como de modulación de fase (o PM). Alternativamente, es posible construir una imagen de fase y contraste de la señal usada para mantener la fase, al mantener la amplitud en un nivel constante mediante retroalimentación. En lugar de emplear una frecuencia fija, es posible ajustar la frecuencia automáticamente a la frecuencia de resonancia variable de

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo II.

Aspectos Teóricos.

la viga empleando un circuito con auto-oscilación [81-82]. Para este caso, la fase de la oscilación de la viga relativa a la señal de excitación siempre se mantiene a -90° , y el cambio en la frecuencia de resonancia se mantiene en un nivel constante mediante retroalimentación. Este modo se conoce como modo por modulación de frecuencia (FM).

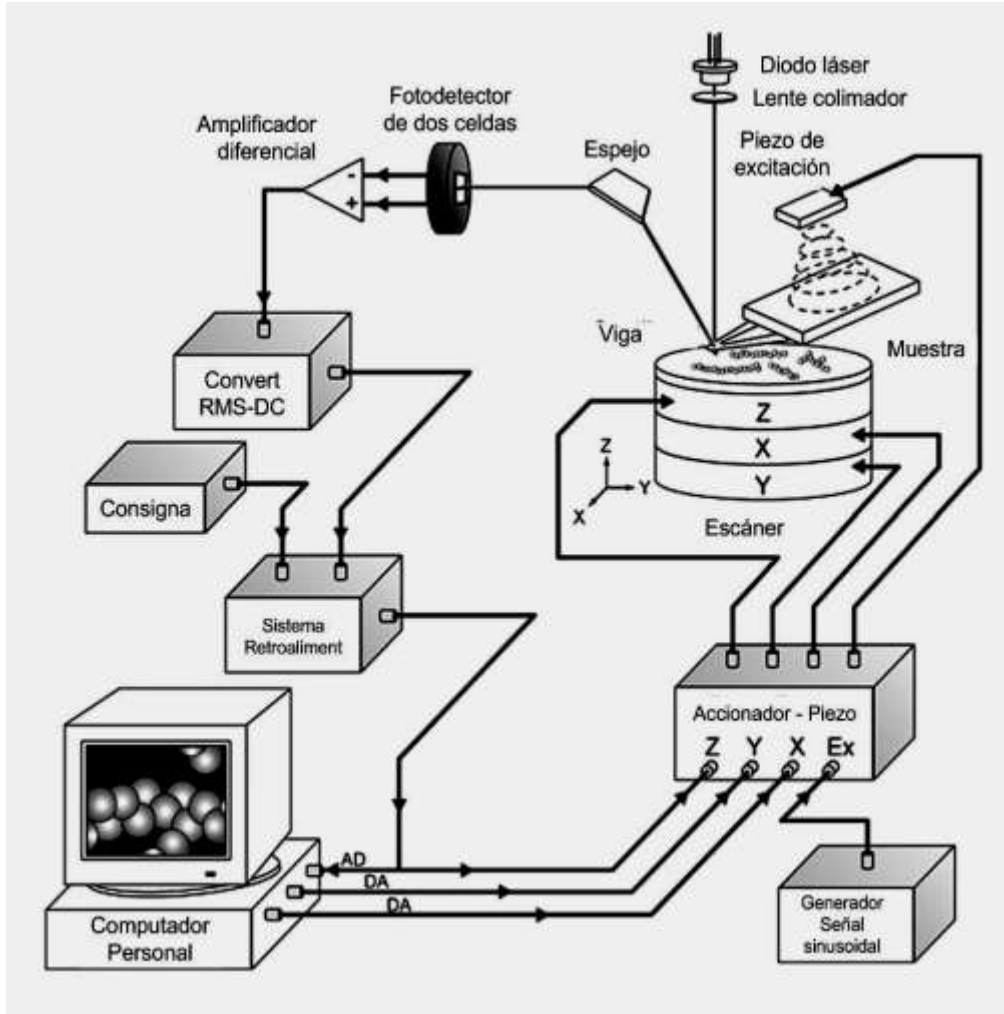


Figura 2.6. Representación esquemática de un sistema de AFM en modo de contacto intermitente. Em el modo de fuerza constante, la excitación del actuador piezoeléctrico a el convertidor RMS -DC son omitidos [8]

2.2.2 AFM de alta velocidad

Una microscopía AFM de mayor velocidad pone alta demanda en la detección de la interacción entre la muestra y el sensor de la viga. Así como con todos los sensores, la rapidez en el desempeño del sensor se encuentra limitada por su ancho de banda. Para un sensor basado en una estructura de viga en voladizo, la máxima velocidad de barrido viene dada por la constante elástica, la masa efectiva de la viga, la amortiguación de la

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo II.

Aspectos Teóricos.

viga en el medio que la rodea, y la rigidez de la muestra. Las máximas tasas de barrido vienen dadas por 2.35 o 2.36.

$$v \ll \frac{\lambda \cdot D}{2 \cdot m} \quad (2.35)$$

$$v \ll \frac{\lambda}{2} \sqrt{\frac{k+S}{m} - \frac{D^2}{2m^2}} \quad (2.36)$$

Donde v es la máxima velocidad a obtener, λ la periodicidad de los rasgos de la superficie, D es el amortiguamiento, k la constante elástica, m la masa efectiva de la viga, S la elasticidad de la superficie, para los casos de baja y alta amortiguación [83]. De las ecuaciones 2.35 y 2.36 parece claro que la máxima velocidad obtenible aumenta en la medida que el tamaño de las vigas disminuye, lo que también reduce el ruido para un ancho de banda dado en la medición de la viga [84].

En el desarrollo de equipos para AFM de alta velocidad, es importante contar con lineamientos prácticos que puedan indicar de manera cuantitativa el efecto de cada elemento del sistema sobre la velocidad de barrido y la tasa de imágenes.

Suponiendo que la imagen se toma en períodos T sobre una rango de barrido de $W_x W$ con N líneas de barrido, entonces la velocidad de barrido V_s en la dirección de “ x ” viene dada por $V_s = 2WN/T$. Suponiendo que la muestra posee una forma sinusoidal con periodicidad λ , la velocidad de barrido requiere la acción de retroalimentación a una frecuencia $f = V_s/\lambda$ para mantener fija la distancia entre la punta y la muestra. El ancho de banda asociado a la retroalimentación debería ser igual o superior a f y puede expresarse de acuerdo con 2.37.

$$f_B \geq \frac{2WN}{\lambda T} \quad (2.37)$$

Para determinar cómo el retardo de fase en lazo abierto se relaciona con el retardo de fase en lazo cerrado, puede considerarse un simple lazo cerrado para AFM en fuerza constante (ver figura 2.7). La variación de la altura de la muestra respecto a la punta de la viga, $u_{in}(t)$, introducida por el barrido en dirección x de la superficie barrida se considera como la señal de entrada a este sistema, y el desplazamiento del escáner en dirección z , $u_{out}(t)$, se considera como la señal de salida. La dependencia en el tiempo de

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo II.

Aspectos Teóricos.

la relación entrada-salida en lazo cerrado viene representada por la función $K(s)$ expresada como:

$$K(s) = \frac{-T(s)}{1+T(s)} \quad (2.38)$$

Donde $T(s)$ es la función en lazo abierto dada por $C(s)A(s)H(s)G(s)$. La dependencia en frecuencia de $T(s)$ viene dada por $T_0(\omega)\exp[-i\varphi(\omega)]$, donde $T_0(\omega)$ y $\varphi(\omega)$ son la ganancia y la fase, respectivamente. Por lo tanto, la dependencia en frecuencia de $K(s)$ se expresa como:

$$K(i\omega) = \frac{-(T_0\cos\varphi(\omega)+T_0^2)+iT_0\sin\varphi(\omega)}{1+2T_0\cos\varphi(\omega)+T_0^2} \quad (2.39)$$

Así entonces, la fase en el lazo cerrado $\Phi(\omega)$ y la ganancia $K_0(\omega)$ vienen dadas, respectivamente por:

$$\tan\Phi(\omega) = \frac{-\sin\varphi(\omega)}{T_0(\omega)+\cos\varphi(\omega)} \quad (2.40)$$

y

$$K_0(\omega) = \frac{T_0}{\sqrt{1+2T_0\cos\varphi(\omega)+T_0^2}} \quad (2.41)$$

Cuando el desempeño del lazo cerrado es satisfactorio y la ganancia en retroalimentación $K_0(\omega)$ se mantiene cercana a la unidad, la ganancia en lazo abierto es aproximadamente igual a $T_0(\omega)=-1/[2\cos\varphi(\omega)]$. Al substituir esta relación en la ecuación 2.40, se obtiene la relación $\Phi(\omega)=\pi-2\varphi(\omega)$. En este caso, la diferencia de fase “ π ” aparece porque la dirección del escáner en “z” es opuesta a las variaciones en la altura de la muestra. De esta manera, puede concluirse que la fase en lazo cerrado es aproximadamente el doble de la fase en lazo abierto, bajo la condición de que la ganancia en lazo cerrado se mantenga igual a la unidad [8]. Esto también es cierto para AFM en modo de contacto intermitente.

De acuerdo con lo antes mencionado, el retardo en el control retroalimentado en lazo cerrado puede estimarse mediante la suma de los retardos asociados a los dispositivos involucrados en el lazo de control. En el AFM con modo de contacto intermitente, los

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo II.

Aspectos Teóricos.

principales retardos son el tiempo de lectura de la amplitud de la oscilación de la viga (τ_d), el tiempo de respuesta de la viga (τ_c), el tiempo de respuesta (τ_s) del escáner (z), el tiempo de integración (τ_I) de las señales de error en el controlador por retroalimentación, y el tiempo de “caída” (τ_p). El tiempo de “caída” viene dado cuando la punta de la viga se separa de la superficie de la muestra en una región abruptamente inclinada de la muestra, y a partir de entonces, transcurre un tiempo hasta que cae sobre la superficie nuevamente. Medir la amplitud de una viga que oscila a su frecuencia de resonancia f_c toma al menos un tiempo de $1/(2f_c)$. El tiempo de respuesta de un sistema resonante de segundo orden como es el caso de las vigas y los piezoactuadores viene expresado como $Q/(\pi f_0)$, donde Q y f_0 son el factor de calidad y la frecuencia de resonancia, respectivamente. El ancho de banda por retroalimentación generalmente viene definido por la frecuencia de retroalimentación que resulta para una fase de $\pi/4$. Sobre la base de esta definición, el ancho de banda por retroalimentación f_B se expresa de manera aproximada en 2.42.

$$f_B = \alpha \frac{f_c}{8} \frac{1}{\left(1 + \frac{2Q_c}{\pi} + \frac{2Q_c f_c}{\pi f_s} + 2f_c(\tau_p + \tau_I + \delta)\right)} \quad (2.42)$$

Donde f_s es la frecuencia de resonancia del escáner (z); Q_c y Q_s son los factores de calidad de la viga y del escáner respectivamente. δ representa la suma de otros retardos y α el factor relacionado al efecto de compensación en la fase dado por la componente derivativa en el control por retroalimentación de tipo PID u otro compensador de fase adicional. Con el grupo de ecuaciones desde 2.37 hasta 2.42 es posible estimar la máxima tasa de imágenes para un modo de contacto intermitente en un AFM al examinar el retardo en lazo abierto $\Delta\tau$. Sin embargo, esta estimación debe modificarse de acuerdo con la muestra que se desea examinar, debido a que el máximo retardo permitido en la fase depende de la resistencia o fragilidad de la muestra [8].

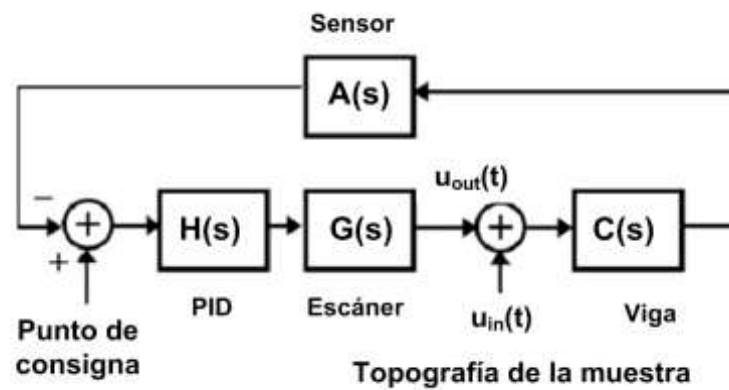


Figura 2.7. Diagrama de bloques del lazo retroalimentado para el modo de fuerza constante en AFM [68]

Los siguientes puntos conforman un resumen de lineamientos necesarios [8] para lograr AFM con una alta rapidez en su capacidad de obtener imágenes:

- 1.- Todas las componentes asociadas con tiempo de retardo en el ancho de banda de retroalimentación deben ser similares. Aún cuando una componente posea un retardo considerable en comparación con las otras componentes, el ancho de banda de la retroalimentación estará gobernado por la componente más lenta.
- 2.- Debido a que la frecuencia de resonancia de la viga está relacionada en componentes del retardo como el tiempo de integración, tiempo de caída y el mismo tiempo de respuesta de la viga, se convierte entonces en el elemento más importante para lograr capacidad de barrido con altas velocidades.
- 3.- Los factores de calidad de la viga y del escáner (z) deben disminuirse.
- 4.- La frecuencia de resonancia del escáner (z) debe ser alta (idealmente, al mismo nivel que la viga).
- 5.- La acción derivativa del controlador PID o algún compensador de fase adicional puede compensar el retardo por retroalimentación. Para hacer esta operación efectiva, debe disminuirse la ganancia de los picos de resonancia del escáner (z) para altas frecuencias. De lo contrario, la operación derivativa produce vibraciones mecánicas de importancia y por lo tanto no puede emplearse.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo II.

Aspectos Teóricos.

6.- La amplitud entre pico y pico de la oscilación libre de la viga debería ser mayor que la máxima altura presente en la muestra en algunos órdenes de magnitud. Sin embargo, debe existir un compromiso entre esta condición y el reducir la fuerza ejercida por la punta sobre la muestra en el modo de contacto intermitente.

7.- Como la caída de la punta reduce el ancho de banda de la retroalimentación de forma significativa, deben desarrollarse métodos que reduzcan el tiempo de caída o eviten la caída. Esto puede evitarse estableciendo un pequeño valor de referencia.

8.- Todos los componentes electrónicos deben contar con los mayores anchos de banda posibles.

9.- Debe tenerse en cuenta que las técnicas de control no mejoran de forma significativa la velocidad de barrido, mientras que el escáner y las vigas tienen el mayor peso en este sentido y por lo tanto poseen la mayor prioridad.

Como es conocido, la frecuencia de resonancia f_c y la constante elástica k_c de una viga con sección rectangular de grosor d , ancho w , y longitud L vienen expresadas de acuerdo con 2.43 y 2.44.

$$f_c = 0,56 \frac{d}{L^2} \sqrt{\frac{E}{12\rho}} \quad (2.43)$$

$$k_c = \frac{w \cdot d^3}{4L^3} E \quad (2.44)$$

Donde E y ρ son el módulo de Young y la densidad del material empleado, respectivamente. Para alcanzar una alta frecuencia de resonancia y una baja constante elástica simultáneamente, deben fabricarse vigas de dimensiones reducidas.

Adicionalmente a las ventajas de lograr una alta tasa de imágenes, las vigas de reducido tamaño poseen otras ventajas. Para una constante elástica dada, la frecuencia de resonancia aumenta al disminuir la masa de la viga. El ruido térmico total depende solo de la constante elástica y la temperatura y viene dado por $(k_B T / k_c)^{1/2}$, donde k_B es la

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo II.

Aspectos Teóricos.

constante de Boltzmann y T la temperatura en Kelvin. Por lo tanto, una viga con una mayor frecuencia de resonancia cuenta con una menor densidad de ruido y es menos afectada por este. En el modo de contacto intermitente, la región de frecuencia empleada para obtener imágenes es aproximadamente el ancho de banda para las imágenes (su máximo es la frecuencia de retroalimentación) centrado en la frecuencia de resonancia. Adicionalmente, las vigas cortas poseen una mayor sensibilidad en la detección óptica de la deflexión de la viga, debido a que la sensibilidad viene dada de acuerdo con $\Delta\phi/\Delta z = 3/2L$, donde Δz es el desplazamiento y $\Delta\phi$ es la variación en el ángulo de inclinación del extremo libre de la viga. Una alta frecuencia de resonancia y una baja constante elástica resultan en una alta relación (f_c/k_c), lo cual proporciona a la viga mayor sensibilidad al gradiente (k) de fuerza ejercido entre la sonda y la muestra. El gradiente de fuerza desplaza la frecuencia de resonancia en aproximadamente $-0,5k.f_c/k_c$. Por lo tanto, pequeñas vigas con grandes valores de f_c/k_c son útiles para obtención de imágenes en contraste de fase y FM-AFM.

Capítulo III
Desarrollo del Trabajo de Investigación

Desarrollo del Trabajo de Investigación

3.1 Metodología

El presente trabajo fue enmarcado dentro de lo que se conoce como una investigación científica, ya que formó 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 [19].

También se maneja la investigación experimental ya que se basa en someter a un objeto a determinadas condiciones o estímulos (variable independiente), para observar los efectos o reacciones que se producen (variable dependiente) [19].

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

3.1.1 Fase 1: Revisión bibliográfica

Contempló la obtención de documentación (referencias impresas y electrónicas) acerca del principio de funcionamiento, criterios de diseño y construcción de dispositivos actuados mediante medios electrostáticos, así como también AFM. Adicionalmente se realizó el estudio del estado del arte, es decir; el desarrollo actual de la tecnología en el área científica.

3.1.2 Fase 2: Revisión y estudio de herramientas de simulación

En esta fase se estudió la herramienta de simulación basada en el MEF llamada COMSOL Multiphysics utilizada por el grupo de investigación Transducers Science and Technology (TST) del instituto MESA+ de la Universidad de Twente.

Se llevó a cabo el adiestramiento, basado en la revisión y estudio de manuales de usuario y consulta con expertos en el uso de la herramienta. No se trabajó con el MEF a nivel de programación ya que COMSOL cuenta con las herramientas gráficas y

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo III

Desarrollo del Trabajo de Investigación

analíticas que ofrecen recursos suficientes para llevar a cabo los análisis de la investigación.

3.1.3 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 llamado Pianoforte (nombre dado por TST), se establecieron las restricciones geométricas de las estructuras a evaluar. Pianoforte es un proceso de fabricación que emplea el grabado en obleas compuestas de una capa de Silicio sobre otra de dióxido de Silicio denominadas SOI (por sus siglas en inglés de Silicon On Insulator). El proceso de fabricación se basa en la técnica de Grabado Profundo mediante Iones Reactivos o DRIE (por sus siglas en inglés de Deep Reactive Ion Etching).

Al mismo tiempo se planificaron los ensayos experimentales para las estructuras, ya que estos delimitan las características de las estructuras a diseñar por existir en todo momento restricciones físicas que en la medida de lo posible, deben ser consideradas en los modelos a analizar.

De esta forma se diseñaron los modelos para su análisis mediante el MEF. Estos modelos se basan en geometrías bidimensionales y tridimensionales de vigas, incluyendo en los casos requeridos, electrodos de accionamiento.

3.1.4 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 llevó a cabo las corridas de los distintos análisis que ofrece la aplicación COMSOL Multiphysics sobre los modelos planteados.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo III

Desarrollo del Trabajo de Investigación

Los resultados obtenidos sirven como apoyo para el diseño de las máscaras empleadas como punto de partida del proceso de fabricación de prototipos que fueron sometidos a pruebas experimentales.

3.1.5 Fase 5: Desarrollo de máscaras para el proceso de Microfabricación

Una vez establecidas las restricciones de diseño y luego de obtener los primeros resultados de los análisis estáticos de las microvigas mediante el MEF, se desarrollaron las máscaras empleando la herramienta Clewin, desarrollada en el Instituto MESA+ de la Universidad de Twente. Clewin permite el uso de líneas de comandos (scripts) de C y Matlab. De esta forma se elaboraron los archivos de diseño requeridos por el proceso de fabricación (Pianoforte).

3.1.6 Fase 6: Desarrollo de pruebas a las muestras obtenidas de Pianoforte y comparación con simulaciones

Una vez obtenidas las primeras muestras del proceso Pianoforte, que corresponden a estructuras grabadas sobre silicio, las muestras fueron sometidas a pruebas experimentales con la finalidad de comparar sus resultados con aquellos alcanzados mediante el MEF.

Las pruebas experimentales arrojaron un conjunto de datos e información que debió ser procesada para su posterior análisis y discusión.

3.2 Desarrollo del trabajo

En general, el estudio de las microvigas y su accionamiento un diseño por etapas, como el seguido para sistemas microelectromecánicos en general [38]. Para ello se consideran 4 niveles: (1) Sistema, (2) Dispositivo, (3) Físico y (4) Proceso. Estos niveles se ilustran en la figura 3.1.

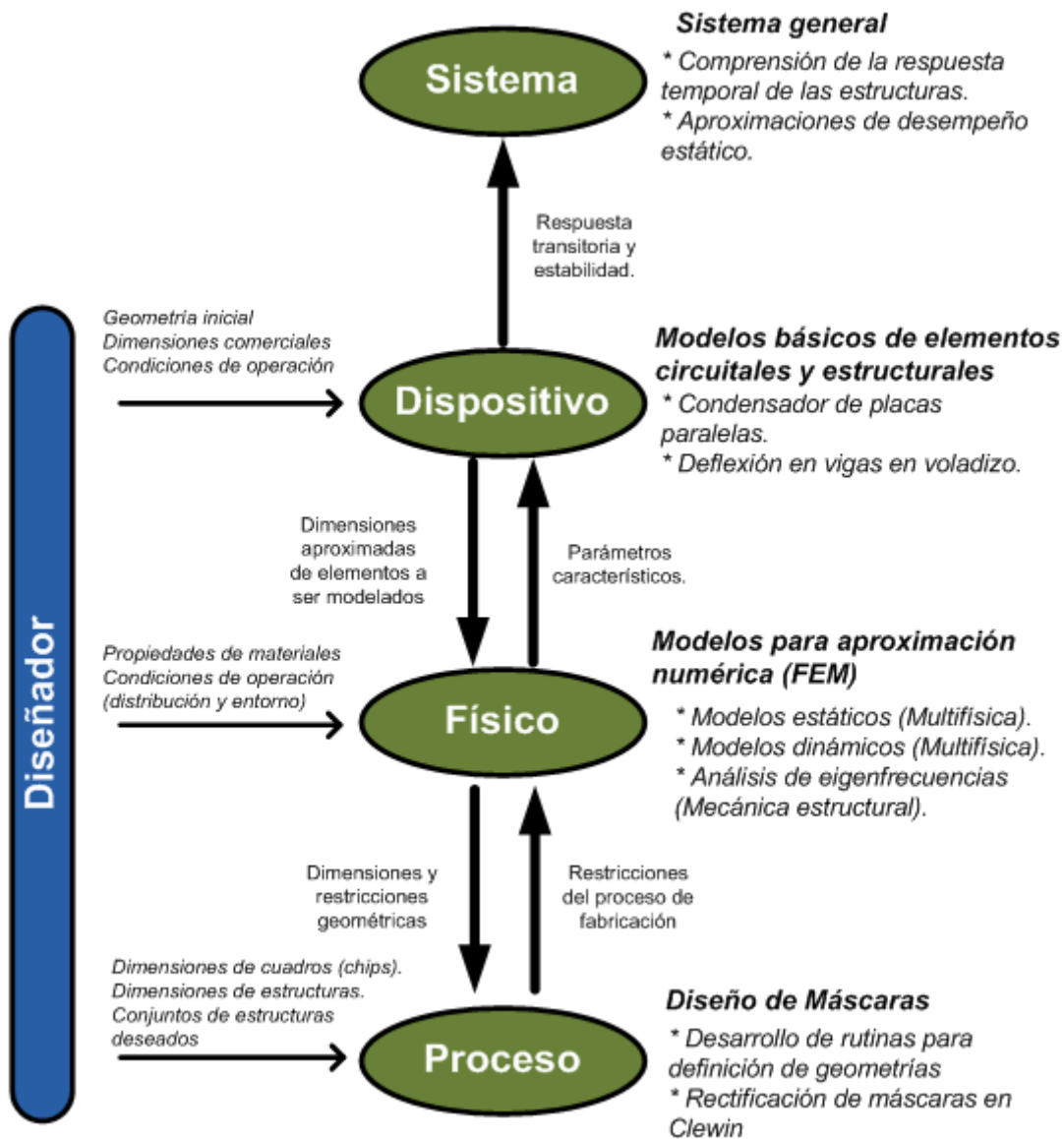


Figura 3.1. Niveles de diseño abordados en el proyecto

El nivel de dispositivo, mostrado en la figura 3.1, 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.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo III

Desarrollo del Trabajo de Investigación

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 3.2(b)). Igualmente, se plantea el caso de una viga sometida a una carga intermedia concentrada (ver figura 3.2(a)). Para ello, se recurre a la literatura de la teoría de vigas y placas [38,85].

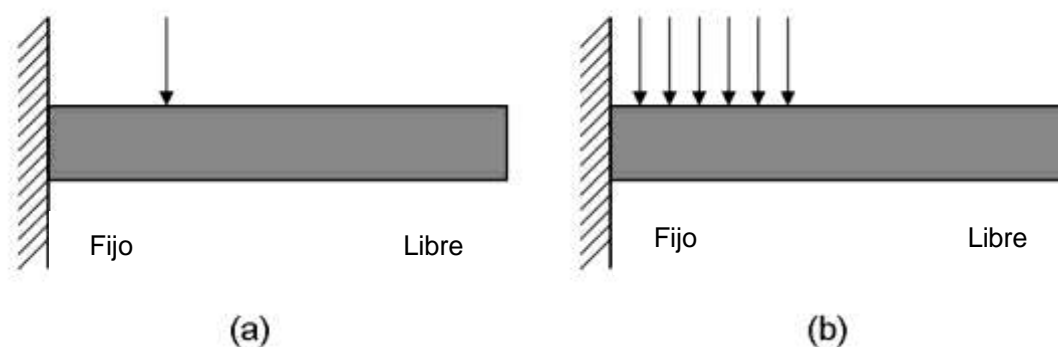


Figura 3.2. Viga en voladizo. (a) Con carga intermedia aplicada (b) con carga parcialmente distribuida

La tabla 3.1 presenta las expresiones del momento cortante transversal, el momento flector, la pendiente y la deflexión para vigas elásticas y rectas de acuerdo con la literatura revisada [85]. Estas expresiones aportan soluciones para los casos planteados en la figura 3.3 de acuerdo con la literatura revisada [85].

En las tablas 3.1, 3.2 y en la figura 3.3 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 3.3. 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 [85].

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo III

Desarrollo del Trabajo de Investigación

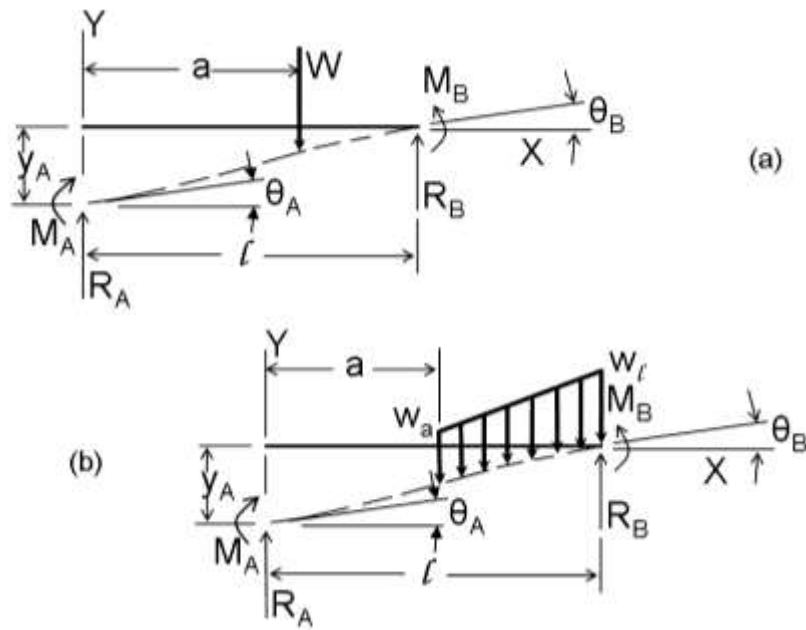


Figura 3.3. Esquemas utilizados para el accionamiento de vigas empotradas.
(a) Con carga intermedia concentrada (b) con carga parcialmente distribuida. Adaptado de [85]

Tabla 3.1. Fórmulas de corte, momento, inclinación y deflexión para vigas rectas elásticas.
Considerando carga intermedia concentrada (ver figura 3.3(a)). Tomado de [85]

Corte transversal	$V = R_A - W \langle x - a \rangle^0$	(3.1)
Momento flector	$M = M_A + R_A x - W \langle x - a \rangle$	(3.2)
Inclinación	$\theta = \theta_A + \frac{M_A x}{EI} + \frac{R_A x^2}{2EI} - \frac{W}{2EI} \langle x - a \rangle^2$	(3.3)
Deflexión	$y = y_A + \theta_A x + \frac{M_A x^2}{2EI} + \frac{R_A x^3}{6EI} - \frac{W}{6EI} \langle x - a \rangle^3$	(3.4)
Valores de frontera	$R_A = 0 \quad M_A = 0 \quad \theta_A = \frac{W(l-a)^2}{2EI} \quad y_A = \frac{-W}{6EI} (2l^3 - 3l^2a + a^3)$ $R_B = W \quad M_B = -W(l-a) \quad \theta_B = 0 \quad y_B = 0$	

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

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo III

Desarrollo del Trabajo de Investigación

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 3.2. Fórmulas de corte, momento, inclinación y deflexión para vigas rectas elásticas. Para una carga distribuida parcialmente (ver figura 3.3(b)). Tomado de [85]

Corte transversal	$V = R_A - w_a \langle x-a \rangle - \frac{w_l - w_a}{2(l-a)} \langle x-a \rangle^2 \quad (3.5)$
Momento flector	$M = M_A + R_A x - \frac{w_a}{2} \langle x-a \rangle^2 - \frac{w_l - w_a}{6(l-a)} \langle x-a \rangle^3 \quad (3.6)$
Inclinación	$\theta = \theta_A + \frac{M_A x}{EI} + \frac{R_A x^2}{2EI} - \frac{w_a}{6EI} \langle x-a \rangle^3 - \frac{w_l - w_a}{24EI(l-a)} \langle x-a \rangle^4 \quad (3.7)$
Deflexión	$y = y_A + \theta_A x + \frac{M_A x^2}{2EI} + \frac{R_A x^3}{6EI} - \frac{w_a}{24EI} \langle x-a \rangle^4 - \frac{w_l - w_a}{120EI(l-a)} \langle x-a \rangle^5 \quad (3.8)$
Valores de frontera	$R_A = 0 \quad M_A = 0 \quad \theta_A = \frac{w_a}{6EI} (l-a)^3 + \frac{w_l - w_a}{24EI} (l-a)^3$ $y_A = \frac{-w_a}{24EI} (l-a)^3 (3l+a) - \frac{w_l - w_a}{120EI} (l-a)^3 (4l+a)$ $R_B = \frac{w_a + w_l}{2} (l-a) \quad M_B = -\frac{w_a}{2} (l-a)^2 - \frac{w_l - w_a}{6} (l-a)^2 \quad \theta_B = 0 \quad y_B = 0$

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 [85]. Este término se conoce generalmente como el módulo de placa [85] 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 $w < 5t$ [86].

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo III

Desarrollo del Trabajo de Investigación

En otro orden de ideas, en lo que al accionamiento electrostático se refiere, se tiene el caso ilustrado en la figura 3.4. 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 3.9. 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.

$$F = \frac{\epsilon AV^2}{2g^2} \quad (3.9)$$

La expresión 3.9 puede expresarse en función de la deflexión en la viga $y(x)$ y la separación inicial como se muestra en la expresión 3.10. De ella puede observarse que mientras la deflexión aumenta, la separación inicial disminuye y en consecuencia la fuerza electrostática aumenta.

$$F = \frac{\epsilon AV^2}{2(g - y(x))^2} \quad (3.10)$$

Al utilizar la expresión 3.10, se determina la fuerza electrostática debida a la separación inicial. De esta manera, si se substituye esta fuerza (o su equivalente) en las expresiones 3.4 y 3.8, es posible estimar la deflexión en la viga despreciando el incremento en la fuerza existente por efecto del aumento de la separación (ver figura 3.5). Se determina así un resultado aproximado para la deflexión, inferior al esperado en la realidad.

Además de conocer aproximaciones de la deflexión en las vigas, también es importante conocer frecuencias de resonancia asociadas, considerando el hecho de que la aplicación de una microviga en AFM (algunos de los modos existentes de AFM), requiere que sea sometida a oscilaciones sostenidas, cercanas a su frecuencia de resonancia.

En el caso de vigas rectangulares como las planteadas, las frecuencias naturales dependen de propiedades del material y de su geometría [87]. En general, para una viga

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo III

Desarrollo del Trabajo de Investigación

rectangular de longitud “L” y grosor “T”, las frecuencias no amortiguadas vienen dadas, de forma aproximada, por la expresión 3.11.

$$\omega_n^{vac} = \frac{\alpha_n^2 T}{L^2} \sqrt{\frac{E}{12\rho_B}}, \quad n=1,2,\dots \quad (3.11)$$

Donde E es el módulo de Young; ρ_B la densidad del material de la viga y α_n es un factor que depende del modo de oscilación. Se observa de 3.11 que las frecuencias dependen de la masa de las vigas, de su longitud y grosor. Sin embargo, dado que la expresión 3.11 aplica para geometrías regulares como el caso de vigas de sección rectangular, la inclusión de la punta en el extremo libre como ocurre en las vigas de AFM, ocasionará una leve alteración de la geometría, la masa total y en consecuencia de la frecuencia de resonancia [87]. Todo esto sin considerar el efecto adicional que implica la interacción de la punta agregada cuando entra en contacto con moléculas externas, como ocurren en el caso de muestras analizadas en un AFM. A pesar de lo mencionado, como el estudio se centra en el actuado de la viga, además la punta aporta un incremento despreciable en la geometría y masa final, así como también se sale del alcance del proceso de fabricación planteado, entonces se excluye la punta de los análisis y experiencias realizados.

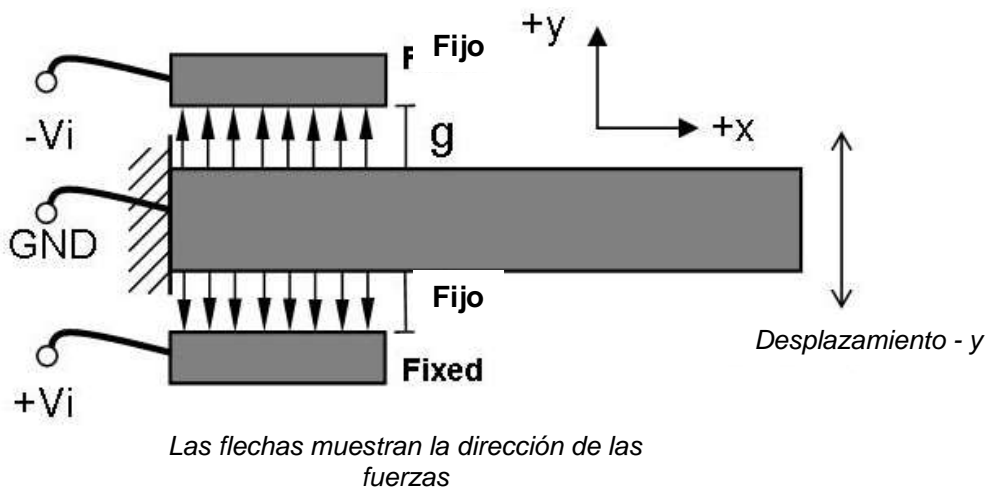


Figura 3.4. Accionamiento electrostático para el caso estudiado

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo III

Desarrollo del Trabajo de Investigación

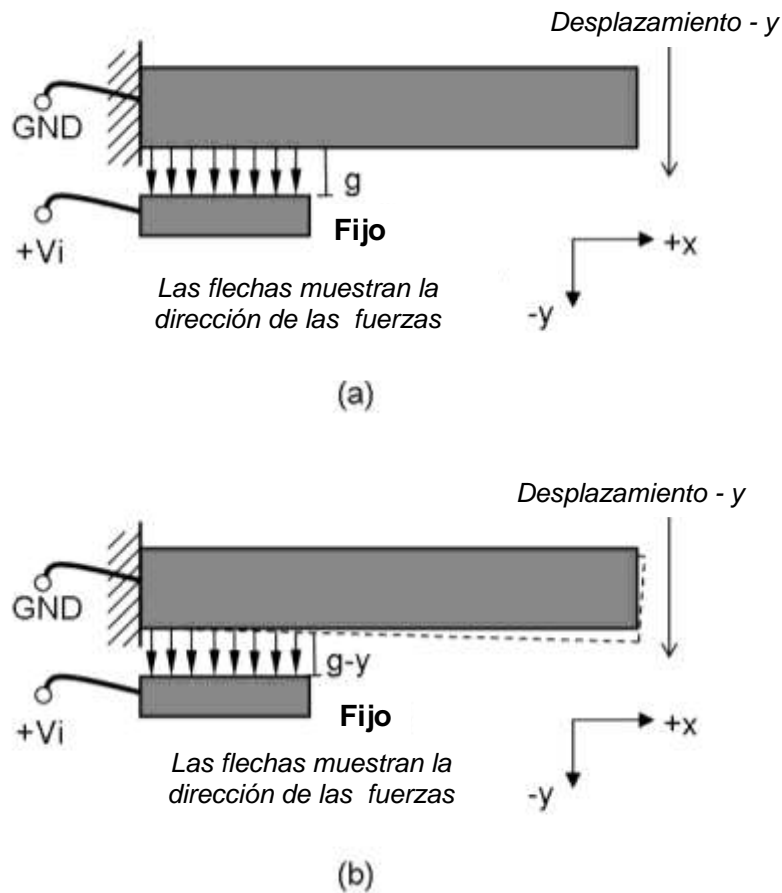


Figura 3.5. Accionamiento electrostático con un electrodo.
(a) Para la separación inicial (b) con separación reducida debida a la deflexión

Por lo tanto, desde el punto de vista de un nivel de diseño de dispositivo, utilizando expresiones como 3.4, 3.9 y 3.11, y considerando valores de longitud encontrados en microvigas comerciales correspondientes a $125\ \mu\text{m}$, $225\ \mu\text{m}$, $325\ \mu\text{m}$ y $450\ \mu\text{m}$, se llegó a las siguientes premisas:

- Asumiendo un grosor menor a $10\ \mu\text{m}$, para las longitudes dadas es posible alcanzar frecuencias de resonancia en el orden de aplicaciones de AFM existentes.
- Considerando una separación inicial de $3\ \mu\text{m}$, es posible obtener deflexiones medibles (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 $100\ \text{V}$. Estas magnitudes de potencial eléctrico serán efectivas para longitudes de electrodos alrededor de $100\ \mu\text{m}$, y con un ancho

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo III

Desarrollo del Trabajo de Investigación

mayor de 30 μm tanto en la viga como el electrodo que la acciona (los anchos deben ser iguales).

Asimismo, en el nivel físico de diseño (ver figura 3.1) se plantean análisis basados en el método de los elementos finitos mediante COMSOL Multiphysics® [88]. Y de esta manera, con ayuda del Método de los Elementos Finitos (MEF) se elaboran y evalúan diseños de microvigas tomando en cuenta las restricciones obtenidas del nivel de diseño del dispositivo. Los análisis planteados son:

- Análisis paramétrico estático. Con el cual se determina 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.

Los resultados obtenidos en el nivel físico de diseño son empleados en la definición de los parámetros de construcción de las máscaras con las cuales se inicia el proceso de fabricación de las microestructuras para su prueba mediante ensayos de laboratorio, es decir, lo correspondiente al nivel de Proceso.

Las muestras obtenidas del proceso de fabricación, son sometidas a las siguientes pruebas experimentales:

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo III

Desarrollo del Trabajo de Investigación

- 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, también se presentan, en mayor detalle a lo largo de las próximas secciones.

Capítulo IV

Desarrollo de modelos para el Método de los Elementos Finitos

Desarrollo de modelos para el Método de los Elementos Finitos

En esta sección se describe los aspectos cubiertos en el desarrollo de modelos para el análisis en elementos finitos realizado mediante COMSOL Multiphysics 3.5a.

4.1 Generalidades de COMSOL Multiphysics® 3.5a [88]

COMSOL Multiphysics® es un entorno para modelación y solución de problemas científicos y de ingeniería basados en ecuaciones diferenciales parciales (EDP). Permite la extensión de modelos convencionales que poseen un solo tipo de física en modelos de multifísica que resuelven fenómenos donde se acoplan diversos principios físicos de forma simultánea. Incorpora la mayoría de las ecuaciones que rigen los fenómenos físicos, siendo solo necesaria (en la mayoría de los casos) la definición de cantidades físicas en lugar de ecuaciones. De esta manera es capaz de compilar internamente el conjunto de ecuaciones diferenciales que representan el modelo completo. Esto se logra mediante el uso de una interfaz gráfica para el usuario o mediante el desarrollo de código programado en MATLAB®.

COMSOL Multiphysics® dispone de modos de aplicación con los cuales se realizan diversos tipos de análisis sobre los modelos definidos. En la resolución de los modelos, se emplea el método de los elementos finitos (MEF). En este sentido, se ejecuta el análisis de elementos finitos junto a un mallado adaptable y control de error mediante una variedad de herramientas de solución numérica.

4.2 Los modos de aplicación en COMSOL Multiphysics® 3.5a [88]

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. Algunos de estos modos se agrupan de acuerdo con lo siguiente:

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo IV

Desarrollo de Modelos para el MEF

1. Acústica.
2. Difusión. Formado por: (a) Convección con difusión y (b) difusión solamente.
3. Electromagnetismo. Formado por: (a) Electromagnetismo con potencia en AC, (b) Medios conductivos en DC, (c) Electrostática y (d) Magnetostática.
4. Transferencia de calor. Formado por: (a) Convección y conducción, y solo (b) conducción.
5. Dinámica de fluidos. Que contempla el uso de Navier-Stokes para fluidos incompresibles.
6. Mecánica estructural. Formado por: (a) Deformación en el plano, (b) esfuerzos en el plano, (c) simetría axial / esfuerzo-deformación y (d) esfuerzo-deformación en sólidos.
7. Mallado deformado. Formado por: (a) Mallado en movimiento (ALE) y (b) geometría parametrizada.

Existen grupos de modos de aplicación optimizados y disponibles para disciplinas específicas. Estos son módulos identificados de acuerdo con lo siguiente:

1. Módulo AC/DC.
2. Módulo de Acústica.
3. Módulo de Ingeniería Química.
4. Módulo de Ciencias de la Tierra.
5. Módulo de Transferencia de Calor.
6. Módulo de Sistemas Microelectromecánicos (MEMS).
7. Módulo de Mecánica Estructural.

4.3 Análisis y herramientas de solución en COMSOL Multiphysics® [88]

COMSOL cuenta con un número de diferentes herramientas de solución para problemas basados en ecuaciones con derivadas parciales (EDP). La tabla 4.1 presenta de manera resumida los tipos disponibles.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo IV

Desarrollo de Modelos para el MEF

Tabla 4.1. Herramientas de solución en COMSOL Multiphysics

<i>Tipo de herramienta</i>	<i>Uso</i>
Estacionaria (Stationary)	Para problemas con EDP estacionarias.
Dependiente del tiempo (Time dependent)	Para problemas con EDP dependientes del tiempo.
Valor propio (Eigenvalue)	Para problemas de EDP con valores propios.
Paramétrico	Para conjuntos parametrizados de problemas con EDP estacionarias.
Estacionario segregado	Para problemas con EDP de multifísica, estacionarios.
Paramétrico segregado	Para conjuntos parametrizados de problemas con EDP de multifísica, estacionarios.
Dependiente del tiempo segregado	Para problemas con EDP de multifísica, dependientes del tiempo.
Adaptado	Para problemas con EDP estacionarias o lineales de valores propios, empleando refinamiento de mallado adaptado.
Sensibilidad	Para análisis de sensibilidad de problemas con EDP estacionarias.
Optimizado	Para optimizar problemas con EDP estacionarias.

Para la mayoría de los modelos, no es necesaria la selección de la herramienta de solución, en su lugar, se escoge un tipo de análisis, el cual depende del área de aplicación. Entre los análisis típicos se encuentran: estacionario, frecuencias de modos propios, transitorio o dependiente del tiempo y paramétrico. El tipo de análisis establece varias ecuaciones para el modo de aplicación y sugiere una herramienta de solución por defecto.

Por la naturaleza de los casos que abarca la investigación, correspondient a estructuras mecánicas sometidas a esfuerzos debidos a campos eléctricos, se hizo necesario emplear el modo de aplicación de Mecánica Estructural para estudiar el modelo que también requiere el acoplamiento del 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

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo IV

Desarrollo de Modelos para el MEF

Mallado Deformado (ALE), 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 soportan los tres primeros análisis indicados en la tabla 4.1. 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 4.1.

$$-\nabla \cdot \sigma = F \quad (4.1)$$

Donde σ es el tensor de esfuerzo. Al sustituir las relaciones esfuerzo-deformación y deformación-desplazamiento en 4.1 se obtiene la ecuación de Navier (4.2) considerada en la solución para análisis estáticos.

$$-\nabla \cdot (c \nabla u) = F \quad (4.2)$$

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 4.3.

$$-\lambda d_a u - \nabla \cdot c_{sta} \nabla u = 0 \quad (4.3)$$

Donde la frecuencia propia se relaciona con el valor propio λ de acuerdo con la expresión 4.4. Y la densidad aparece en d_a .

$$f = \frac{\sqrt{\lambda}}{2\pi} \quad (4.4)$$

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo IV

Desarrollo de Modelos para el MEF

Un problema dependiente del tiempo o transitorio requiere la introducción de la Segunda Ley de Newton, reflejada en la expresión 4.5.

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \nabla \cdot c \nabla u = F \quad (4.5)$$

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 4.6.

$$F_{freq} = F(f) \cdot \cos\left(2\pi f t + F_{ph}(f) \cdot \frac{\pi}{180}\right) \quad (4.6)$$

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

4.4 Desarrollo y análisis de modelos en COMSOL Multiphysics® [88]

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 4.1 ilustra el caso de un electrodo actuando sobre la viga.

El desarrollo de un modelo mediante la herramienta COMSOL Multiphysics 3.5a puede resumirse en los pasos descritos a continuación, 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.

4.4.1 Selección de los modos de aplicación de acuerdo con el modelo a analizar

En la figura 4.1, 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

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo IV

Desarrollo de Modelos para el MEF

eléctrico en el 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.

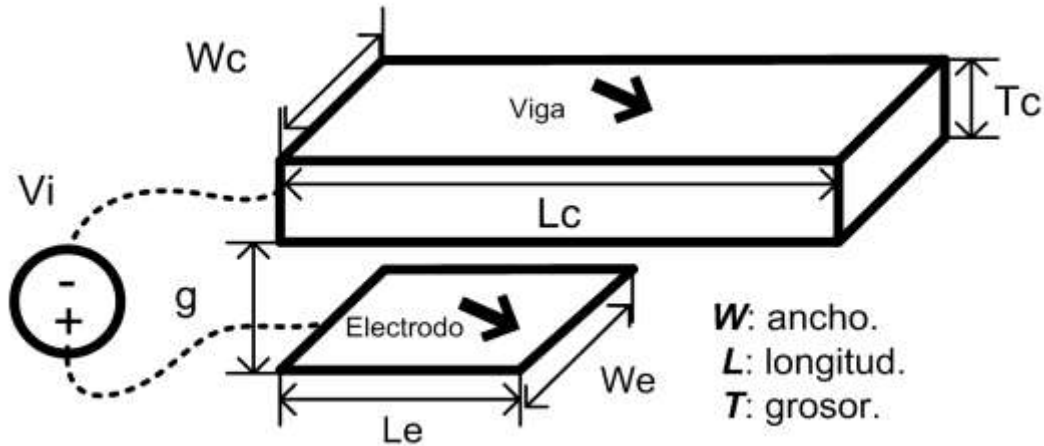


Figura 4.1. Generalidad del caso analizado. (V_i es el potencial eléctrico aplicado)

El campo electrostático en el medio (aire) y la viga viene gobernado por la ecuación de electrostática 4.7.

$$-\nabla \cdot (\epsilon \nabla V) = 0 \quad (4.7)$$

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

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo IV

Desarrollo de Modelos para el MEF

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 4.8.

$$F_{es} = -\frac{1}{2}(E \cdot D)n + (n \cdot E)D^T \quad (4.8)$$

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.

4.4.2 Definición de la geometría del modelo

En 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

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo IV

Desarrollo de Modelos para el MEF

ciertas frecuencias. Las geometrías de los modelos en 2D y 3D se presentan en la figura 4.2.

4.4.3 Ajustes en la física del modelo

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 4.2 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 4.3 presenta los contornos considerados en el modelo 2D presentado en la figura 4.2 utilizado para todos los análisis de 2D.

Por ejemplo, de acuerdo con la figura 4.3, 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 4.2b).

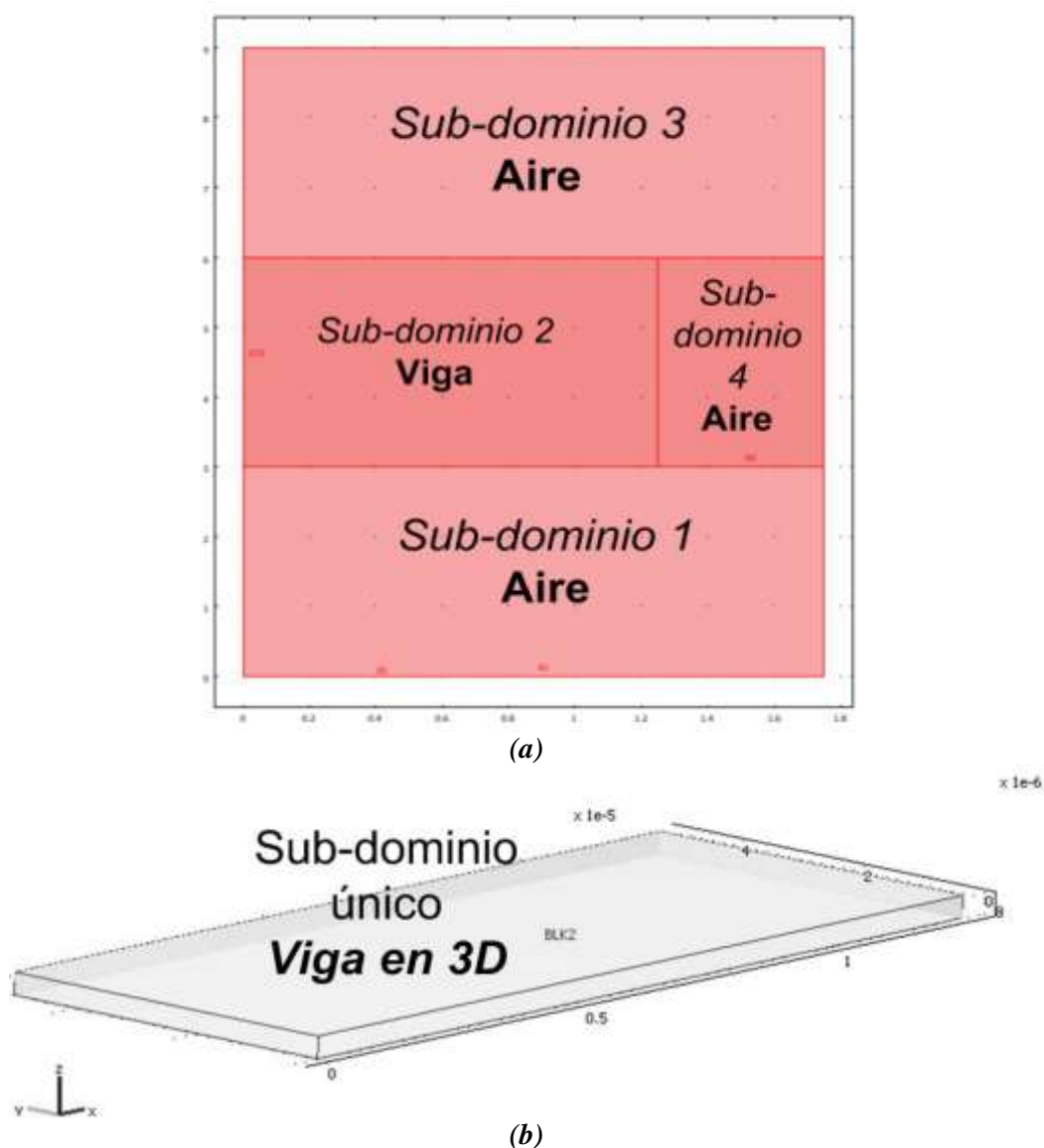


Figura 4.2. Geometría para los modelos. (a) En 2D. (b) En 3D

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.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo IV

Desarrollo de Modelos para el MEF

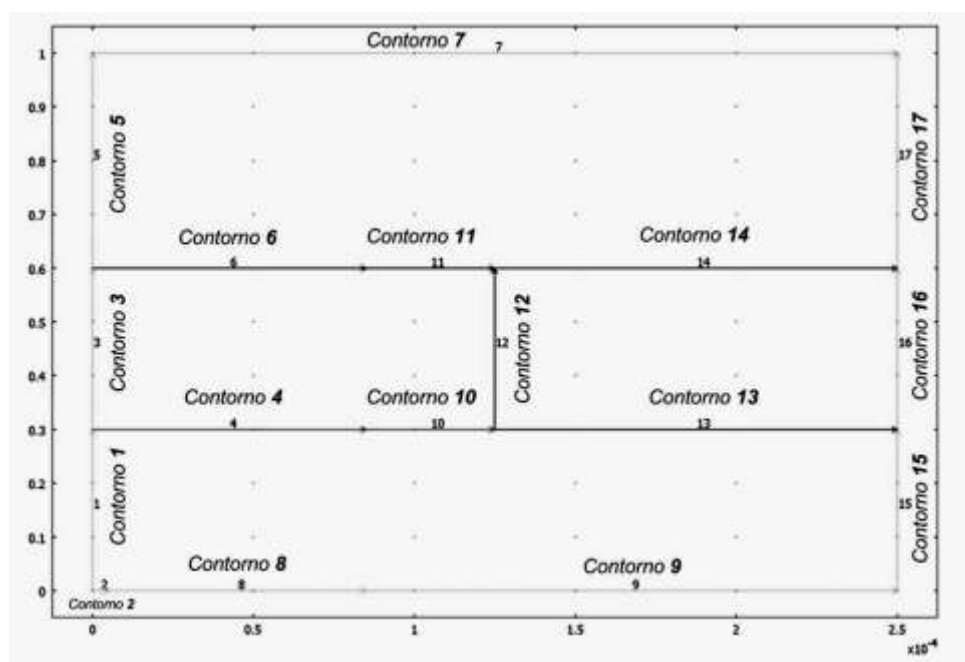


Figura 4.3. Distribución de los contornos para la geometría en 2D

Ajustes en la física para el análisis paramétrico en 2D

Este análisis emplea los modos de aplicación configurados de acuerdo con lo presentado en la tabla 4.2. Para cada modo de aplicación, se ajustan las propiedades de los sub-dominios y contornos tal y como se muestra en las tablas 4.3, 4.4 y 4.5.

Tabla 4.2. Modos de aplicación para análisis paramétrico en 2D

<i>Propiedad</i>	<i>Modo de Aplicación</i>		
	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

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo IV

Desarrollo de Modelos para el MEF

Tabla 4.3. 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.	<p>* Material Modelo: Isótropo. Módulo de Young: 169GPa, también se considera 130GPa Coeficiente de Poisson: 0,28 Densidad: 2330 kg/m³ Grosor: 50x10⁻⁶</p> <p>* Restricciones Condición: libre</p> <p>* Carga Carga nula en X e Y. La carga del cuerpo se define como fuerza/volumen empleando el ancho.</p> <p>* Amortiguación Sin amortiguación.</p> <p>* El resto de las propiedades se dejan por defecto.</p>
CN N° 1,2,5-9,11-17	<p>* Restricción Condición: Libre.</p> <p>* Carga Tipo de carga: distribuida. Cargas en el borde en X e Y ajustada a cero N/m².</p>
CN N° 3	<p>* Restricción Condición: Fija.</p> <p>* Carga Tipo de carga: distribuida. Cargas en el borde en X e Y ajustada a cero N/m².</p>
CN N° 4 y 10	<p>* Restricción Condición: Libre.</p> <p>* 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)</p>

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

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo IV

Desarrollo de Modelos para el MEF

Tabla 4.4. Ajustes de física para el modo de aplicación de mallado en movimiento

<i>Sub-dominio (SD) o contorno (CN)</i>	<i>Características</i>
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 4.5. Ajustes de física para el modo de aplicación Electroestática

<i>Sub-dominio (SD) o contorno (CN)</i>	<i>Características</i>
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 $\rho=0 C/m^3$ - 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 $\rho=0 C/m^3$ - Permitividad relativa $\epsilon_r=11,7$ * Fuerzas Variable para fuerza electromagnética: Fes * El resto de las propiedades por defecto.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo IV

Desarrollo de Modelos para el MEF

Tabla 4.5 (Continuación). Ajustes de física para el modo de aplicación Electrostática

<i>Sub-dominio (SD) o contorno (CN)</i>	<i>Características</i>
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.

Ajustes en la física para el análisis de frecuencias de los modos propios en 3D

Este análisis emplea los modos de aplicación configurados de acuerdo con lo presentado en la tabla 4.6. Este análisis emplea un 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 4.7.

Tabla 4.6. Modos de aplicación para análisis de frecuencias de los modos propios 3D

<i>Propiedad</i>	<i>Modo de Aplicación</i>
	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

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo IV

Desarrollo de Modelos para el MEF

Tabla 4.7. Ajustes de física para el modo de aplicación Esfuerzo-deformación de Sólidos

<i>Sub-dominio (SD) o contorno (CN)</i>	<i>Características</i>
SD único	<p>* Material Modelo: Isótropo. Módulo de Young: 169GPa, también se considera 130GPa Coeficiente de Poisson: 0,28 Densidad: 2330 kg/m³</p> <p>* Restricciones Condición: libre</p> <p>* Carga Cargas nula en X, Y y Z. Carga definida como fuerza/volumen .</p> <p>* Amortiguación Sin amortiguación.</p> <p>* El resto de las propiedades se dejan por defecto.</p>
Contornos	<p>* Restricción Condición para el soporte de la viga: Fija. Condición para el resto de las superficies: Libre.</p> <p>* Carga (para todos los contornos) Tipo de carga: distribuida. En los bordes en X, Y y Z es cero N/m².</p>

Ajustes en la física para el análisis transitorios (dependiente del tiempo) en 2D

Este análisis emplea los modos de aplicación configurados de acuerdo con lo presentado en la tabla 4.8.

Tabla 4.8. Modos de aplicación para análisis transitorio en 2D

<i>Propiedad</i>	<i>Modo de Aplicación</i>			
	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

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo IV

Desarrollo de Modelos para el MEF

Tabla 4.8 (Continuación). Modos de aplicación para análisis transitorio en 2D

<i>Propiedad</i>	<i>Modo de Aplicación</i>			
	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 4.9, 4.10, 4.11 y 4.12.

Tabla 4.9. Ajustes de física para el modo de aplicación Deformación en el plano

<i>Sub-dominio (SD) o contorno (CN)</i>	<i>Características</i>
SD N° 1, 3 y 4.	Desactivados.
SD N° 2.	<ul style="list-style-type: none"> * Material Modelo: Isótropo. Módulo de Young: 169GPa, también se considera 130GPa Coeficiente de Poisson: 0,28 Densidad: 2330 kg/m³ Grosor: 50x10⁻⁶ * 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 N° 1,2,5,7-9,13-17	<ul style="list-style-type: none"> * Restricción Condición: Libre. * Carga Tipo de carga: distribuida. Cargas Fx y Fy ajustadas a cero N/m².
CN N° 4,6,10,11	<ul style="list-style-type: none"> * Restricción Condición: Libre. * Carga Tipo de carga: distribuida. Carga Fx = F_x_mmfd+Fes_nTx_emes [N/m²] Carga Fy = F_y_mmfd+Fes_nTy_emes [N/m²]
CN N° 3	<ul style="list-style-type: none"> * Restricción Condición: Fija. * Carga Tipo de carga: distribuida. Cargas Fx y Fy ajustadas a cero N/m².

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo IV

Desarrollo de Modelos para el MEF

Tabla 4.9 (Continuación). Ajustes de física para el modo Deformación en el plano

<i>Sub-dominio (SD) o contorno (CN)</i>	<i>Características</i>
CN N° 12	<p>* Restricción Condición: Libre.</p> <p>* Carga Tipo de carga: distribuida. Cargas Fx y Fy ajustadas a cero N/m².</p>

En la tabla 4.9 Fes_nTx_emes y Fes_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 4.10. Ajustes de física para el modo de aplicación Mallado en movimiento

<i>Sub-dominio (SD) o contorno (CN)</i>	<i>Características</i>
SD N° 1, 3 y 4.	<p>* Malla Desplazamiento de malla: desplazamiento libre. * El resto de los elementos quedan ajustados por defecto.</p>
SD N° 2.	<p>* 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.</p>
CN N° 1,2,5,7-9,15-17	<p>* Malla Desplazamiento de la malla: ajustados en dx=0m, dy=0m. * El resto de las propiedades quedan ajustadas por defecto.</p>
CN N° 3,13,14	<p>* Malla Desplazamiento de la malla: dx y dy desactivados. * El resto de las propiedades quedan ajustadas por defecto.</p>
CN N° 4,6,10,11	<p>* Malla Desplazamiento de la malla: ajustados en dx= u [m], dy= v [m]. * El resto de las propiedades quedan ajustadas por defecto.</p>

Tabla 4.11. Ajustes de física para el modo de aplicación Electroestática

<i>Sub-dominio (SD) o contorno (CN)</i>	<i>Características</i>
SD N° 1, 3 y 4.	<p>Ecuación: $-\nabla \cdot d\varepsilon_0\varepsilon_r \nabla V = d\rho$</p> <p>* Física Propiedades del material y fuentes: - Relacion constitutiva: $D = \varepsilon_0\varepsilon_r E$ - Grosor $d=1m$ - Densidad de carga espacial $\rho=0 C/m^3$ - Permitividad relativa $\varepsilon_r=1$ * El resto de las propiedades por defecto.</p>

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo IV

Desarrollo de Modelos para el MEF

Tabla 4.11. (Continuación). Ajustes de física para el modo de aplicación Electroestática

<i>Sub-dominio (SD) o contorno (CN)</i>	<i>Características</i>
SD N° 2.	<p>Ecuación: $-\nabla \cdot d\epsilon_0\epsilon_r\nabla V = d\rho$</p> <p>* 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 $\epsilon_r = 11,7$</p> <p>* Fuerzas Variable para fuerza electromagnética: Fes * El resto de las propiedades por defecto.</p>
CN N° 1-3,5,7-9,15-17	<p>* Ecuación $n \cdot D = 0$</p> <p>* Condiciones Condición de Contorno: Cero carga / Simetría. El resto por defecto.</p>
CN N° 4,10	<p>* Ecuación $V = 0$</p> <p>* Condiciones Condición de Contorno: Tierra (referencia). El resto por defecto.</p>
CN N° 6,11-14	<p>* Ecuación $n \cdot (D_1 - D_2) = 0$</p> <p>* Condiciones Condición de Contorno: Continuidad. El resto por defecto.</p>
CN N° 8	<p>* Ecuación $V = V_0$</p> <p>* Condiciones Condición de Contorno: Potencial eléctrico. $V_0 = V_{in} [\text{V}]$. V_{in} es el parámetro del análisis. El resto por defecto.</p>

Tabla 4.12. Ajustes de física para el modo de aplicación de Amortiguación por película.

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

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo IV

Desarrollo de Modelos para el MEF

Tabla 4.12 (Continuación). Ajustes de física para el modo de aplicación de Amortiguación por película.

<i>Sub-dominio (SD) o contorno (CN)</i>	<i>Características</i>
CN N° 10,11	<p>* Ajustes</p> <p>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.</p>

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 [89]. 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 [90]. Aunque se han obtenido valores de TMAC cercanos a cero en aire para microcanales con baja relación de aspecto [91], 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.

4.4.4 Definición y generación del mallado

La generación del mallado corresponde con un paso importante 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

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo IV

Desarrollo de Modelos para el MEF

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) [92]. 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 [92].

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.

4.4.5 Cálculo y 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 V
Resultados de aplicar el MEF

Resultados de los análisis aplicados a los modelos Microviga-electrodo mediante Elementos Finitos

Luego de efectuada la configuración de los modelos de acuerdo con lo planteado en el capítulo IV, el siguiente paso consiste en la determinación de la cantidad apropiada de elementos que conformarán el mallado de los modelos a analizar para en consecuencia llevar a cabo la corrida que permita generar resultados.

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 conformarán 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 despreciable.

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 μ m, el grosor de las microvigas es

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo V

Resultados de aplicar el MEF

3 μ m. Mientras que las longitudes de los electrodos y las microvigas son las mostradas en la tabla 5.1.

Tabla 5.1. Longitudes consideradas en los modelos de accionamiento de microvigas

Longitudes de electrodos (μ m)	Longitudes de microvigas (μ m)	Separación viga-electrodo (μ m)	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
<i>Total de modelos</i>			16

5.1 Análisis paramétrico estático de la interacción microviga-electrodo

De acuerdo con la definición de los dominios y los contornos de los modelos presentados en el capítulo IV, 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 5.1 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. En el apéndice A se presentan los resultados de analizar los 16 modelos en las tablas comprendidas desde la A.1 hasta la A.16. El análisis paramétrico se realiza considerando dos valores típicos de módulo de elasticidad que son 130GPa y 169GPa, sin embargo para el análisis de mallado, solo se tomó 130 GPa como el módulo de elasticidad, considerando entonces los resultados, como referencia para el módulo de 169 GPa. La tabla 5.2 muestra un resumen con la cantidad de elementos seleccionada en el mallado de los modelos.

Tabla 5.2. 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 5.1 y 5.8. La tabla 5.3 presenta los desplazamientos obtenidos en los extremos libres de las vigas para los modelos diseñados considerando los dos valores de módulo de elasticidad antes referidos. 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.

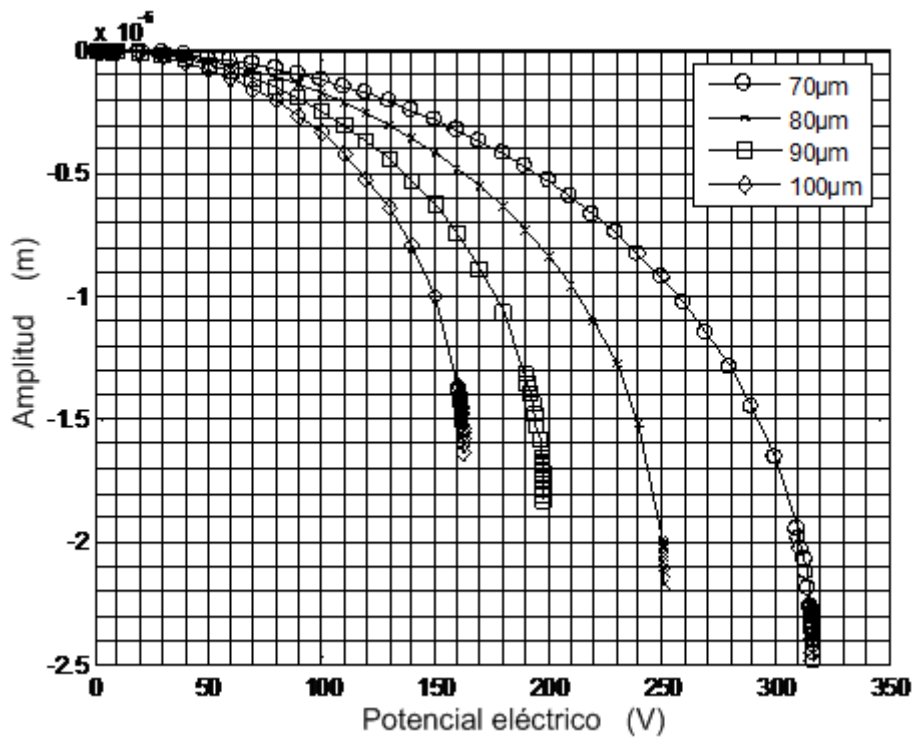


Figura 5.1. Desplazamiento del extremo libre de la viga de 125µm en función del potencial aplicado mediante los electrodos cuyas longitudes se presentan en la figura. ($E = 130 \text{ GPa}$).

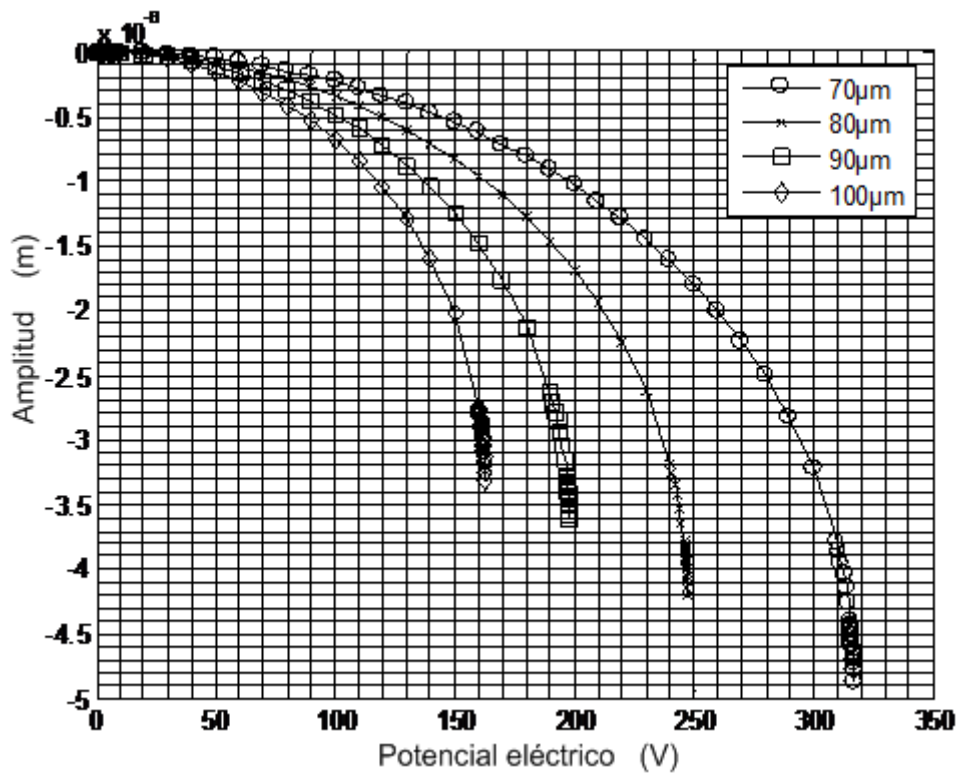


Figura 5.2. Desplazamiento del extremo libre de la viga de 225µm en función del potencial aplicado mediante los electrodos cuyas longitudes se presentan en la figura. ($E = 130 \text{ GPa}$).

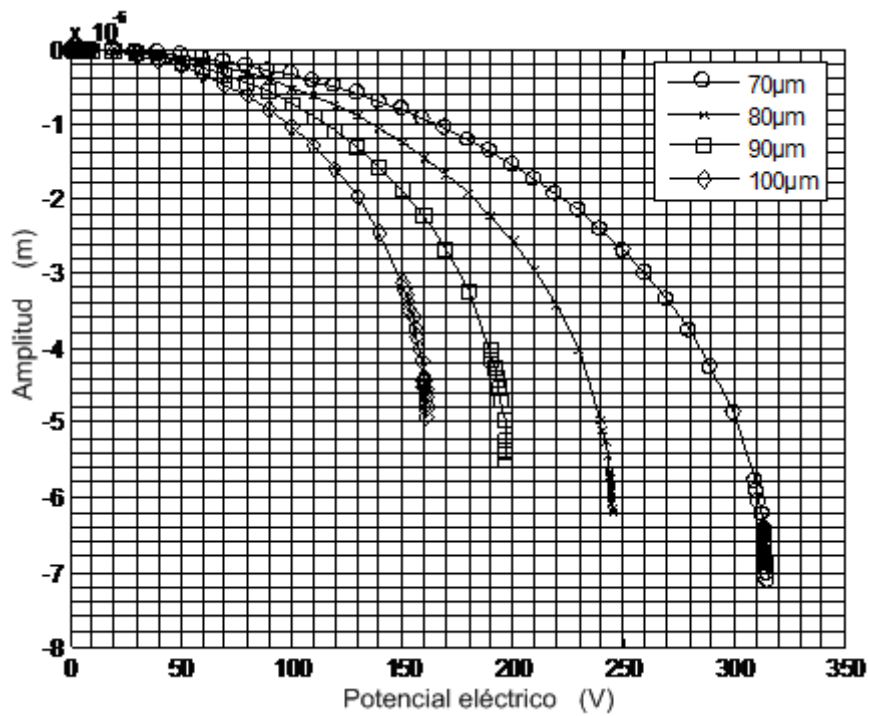


Figura 5.3. Desplazamiento del extremo libre de la viga de 325µm en función del potencial aplicado mediante los electrodos cuyas longitudes se presentan en la figura. ($E = 130$ GPa)

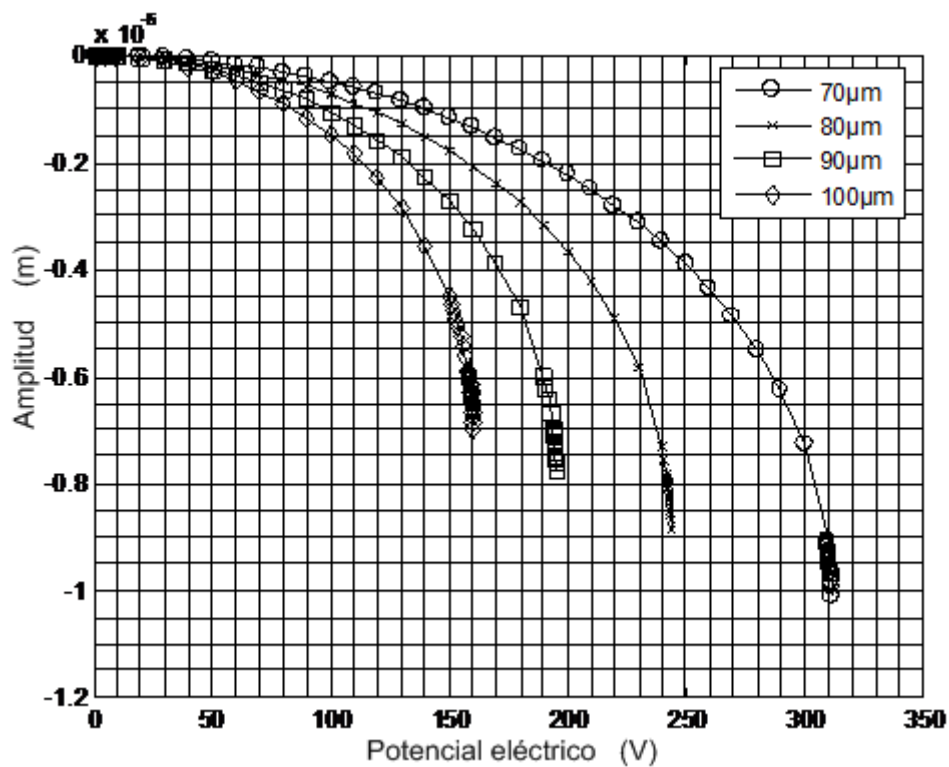


Figura 5.4. Desplazamiento del extremo libre de la viga de 450µm en función del potencial aplicado mediante los electrodos cuyas longitudes se presentan en la figura. ($E = 130$ GPa)

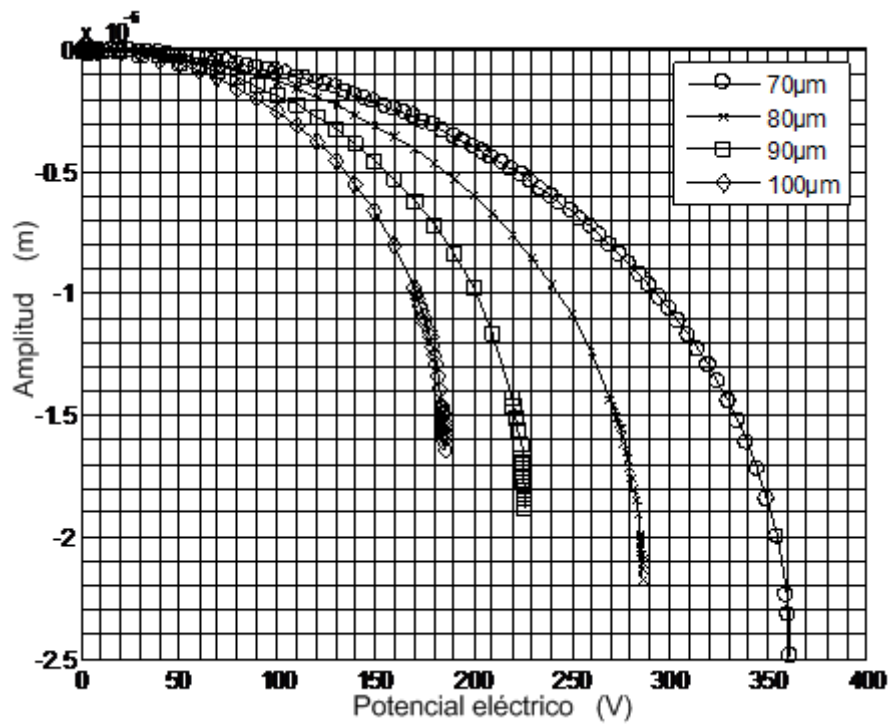


Figura 5.5. Desplazamiento del extremo libre de la viga de 125µm en función del potencial aplicado mediante los electrodos cuyas longitudes se presentan en la figura. ($E = 169$ GPa)

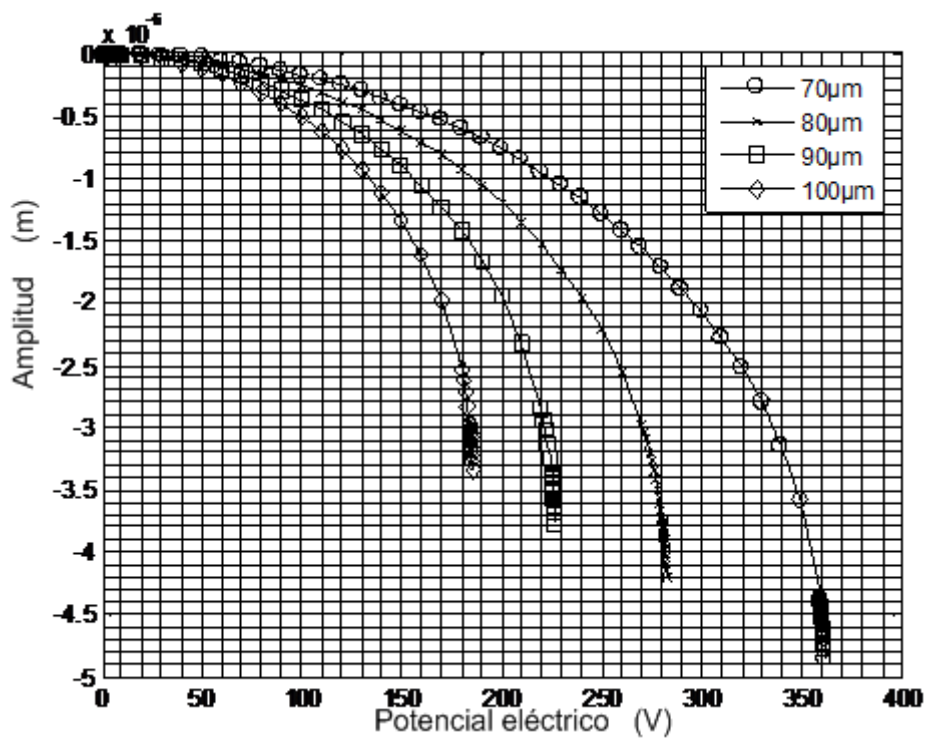


Figura 5.6. Desplazamiento del extremo libre de la viga de 225µm en función del potencial aplicado mediante los electrodos cuyas longitudes se presentan en la figura. ($E = 169$ GPa)

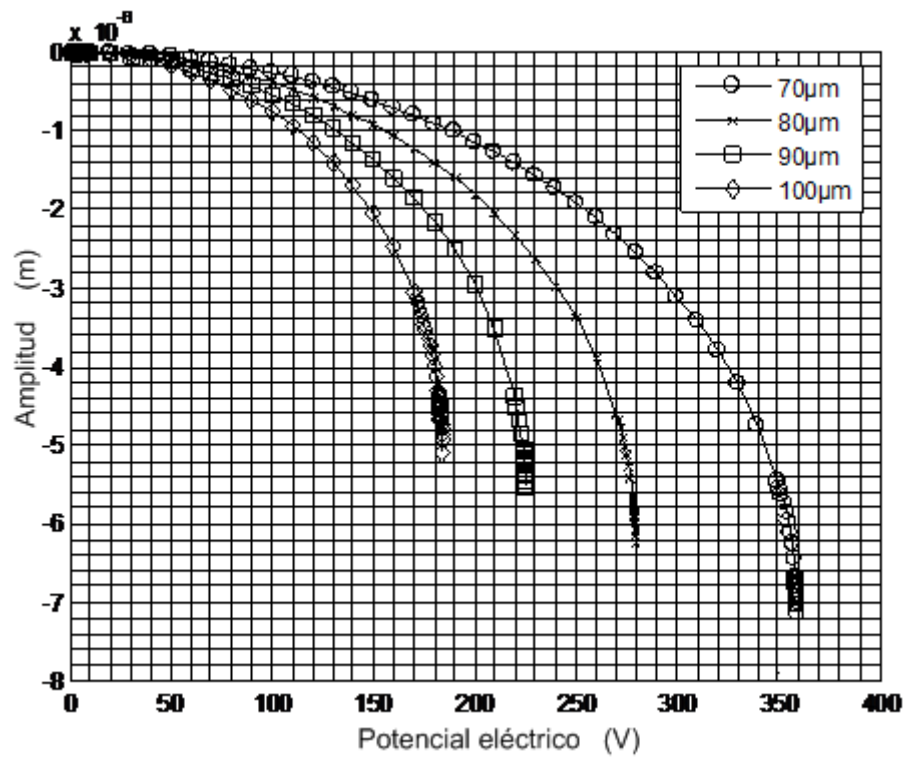


Figura 5.7. Desplazamiento del extremo libre de la viga de 325µm en función del potencial aplicado mediante los electrodos cuyas longitudes se presentan en la figura. ($E = 169$ GPa)

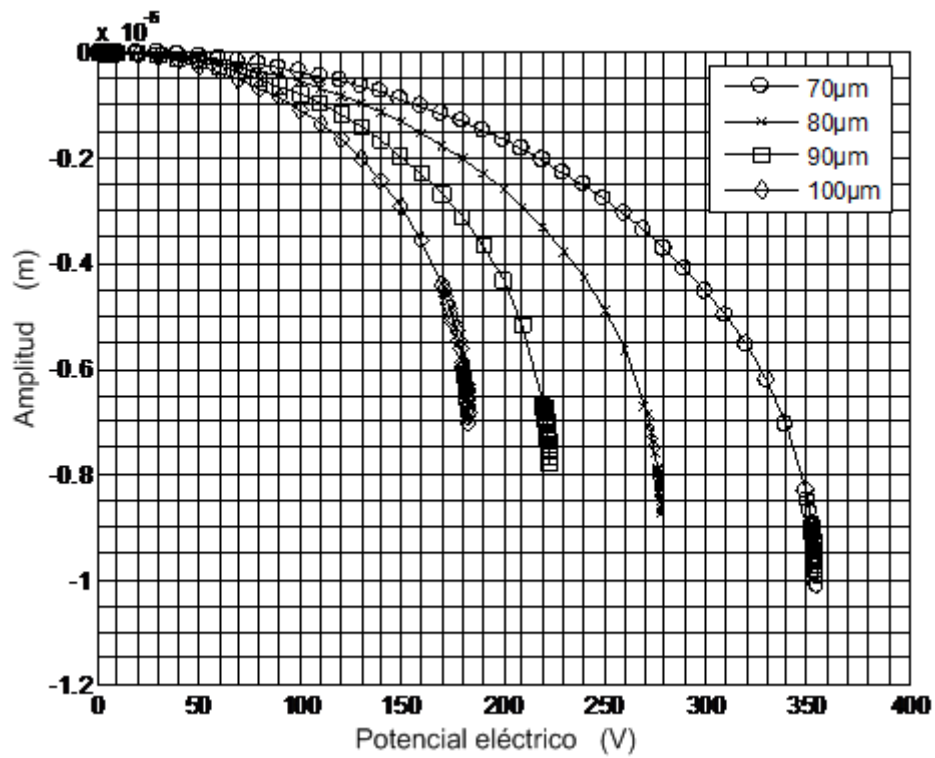


Figura 5.8. Desplazamiento del extremo libre de la viga de 450µm en función del potencial aplicado mediante los electrodos cuyas longitudes se presentan en la figura. ($E = 169$ GPa)

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo V

Resultados de aplicar el MEF

Otro resultado obtenido de la simulación y mostrado en la tabla 5.3, corresponde al potencial de “pull-in” para el cual teóricamente 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 las figuras 5.9 y 5.10.

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 las figuras 5.11 y 5.12 de 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 5.3. Definición del mallado para el análisis estático mediante elementos finitos

Longitud de la viga (μm)	Longitud de electrodo (μm)	Resultado MEF (E=130GPa) Máximo Despl. Vert. (μm)	Resultado MEF (E=169GPa) Máximo Despl. Vert. (μm)
125	70	-1,41	-0,99
	80	-1,19	-0,84
	90	-1,21	-0,82
	100	-1,21	-0,78
225	70	-2,76	-1,94
	80	-2,40	-1,70
	90	-2,42	-1,63
	100	-2,45	-1,56
325	70	-4,16	-2,93
	80	-3,66	-2,58
	90	-3,67	-2,46
	100	-2,95	-2,06
450	70	-5,11	-3,65
	80	-5,28	-3,69
	90	-5,45	-3,57
	100	-3,51	-2,44

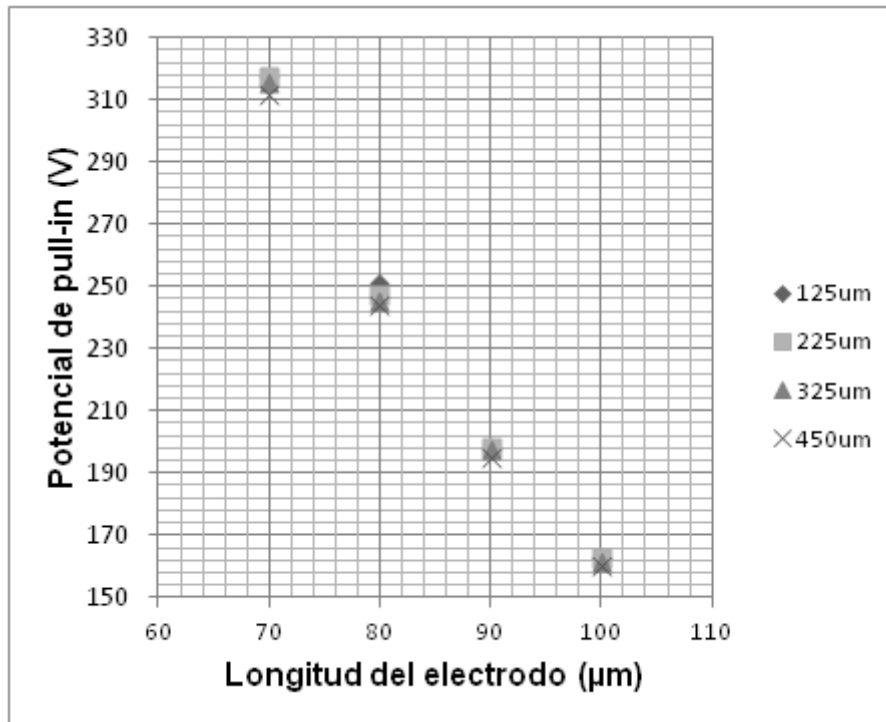


Figura 5.9. Potencial de pull-in en relación a la longitud del electrodo de accionamiento para las longitudes de vigas de 125 μm , 225 μm , 325 μm y 450 μm (mostradas en la leyenda) para $E = 130$ GPa

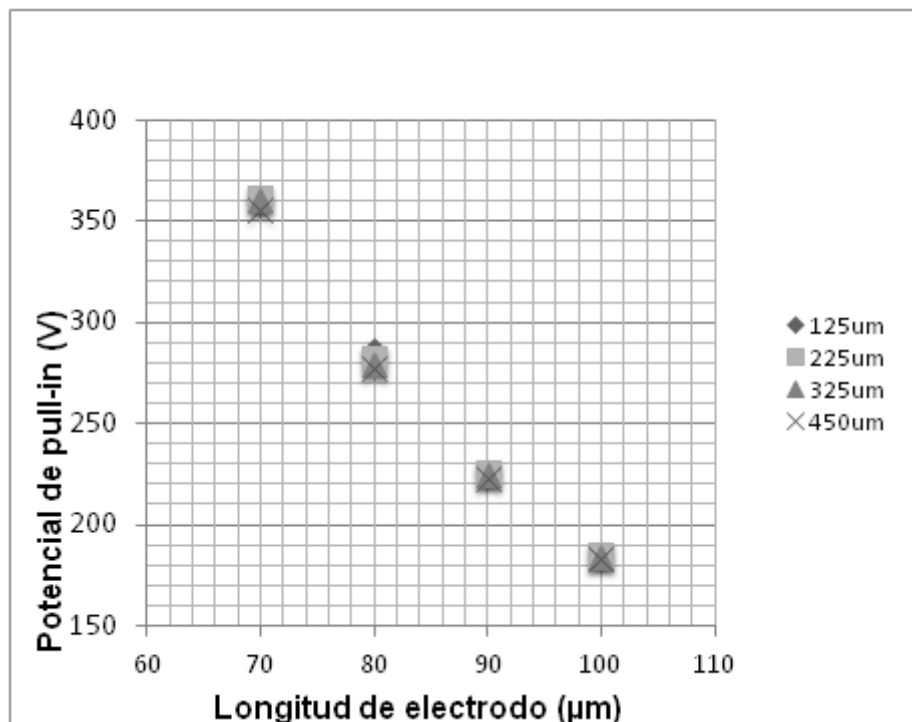


Figura 5.10. Potencial de pull-in en relación a la longitud del electrodo de accionamiento para las longitudes de vigas de 125 μm , 225 μm , 325 μm y 450 μm (mostradas en la leyenda) para $E = 169$ GPa

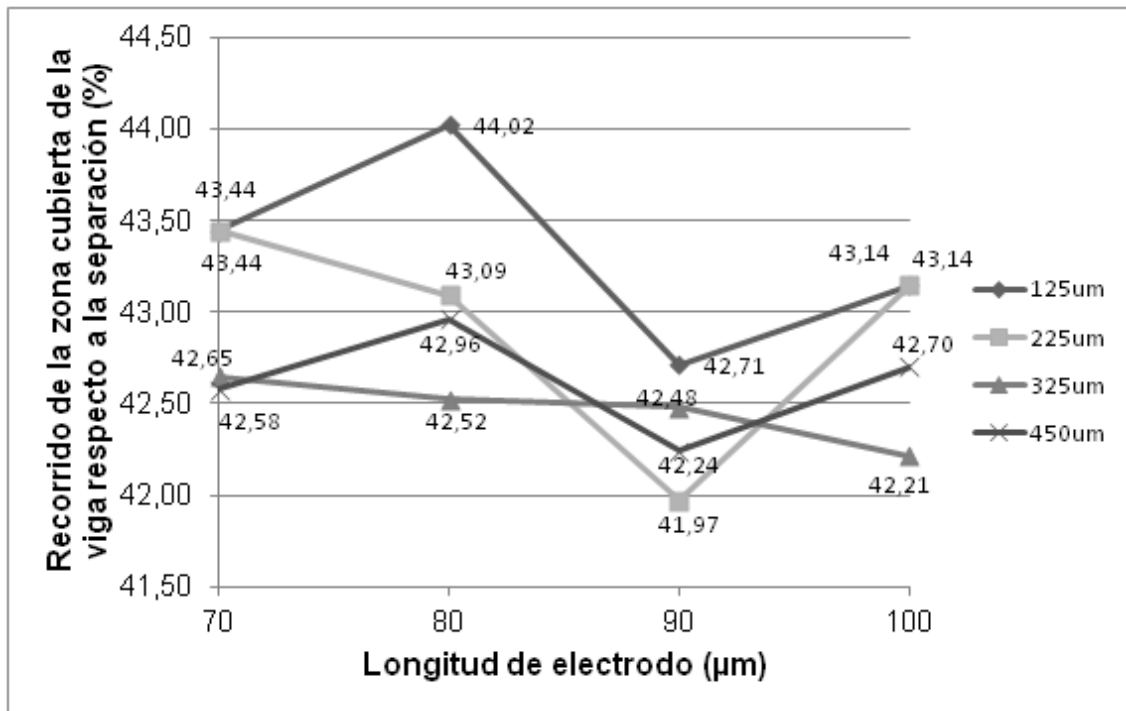


Figura 5.11. Máximo recorrido de la viga en la sección cubierta por el electrodo. Para las longitudes de vigas de 125μm, 225μm, 325μm y 450μm (mostradas en la leyenda) para E = 130 GPa

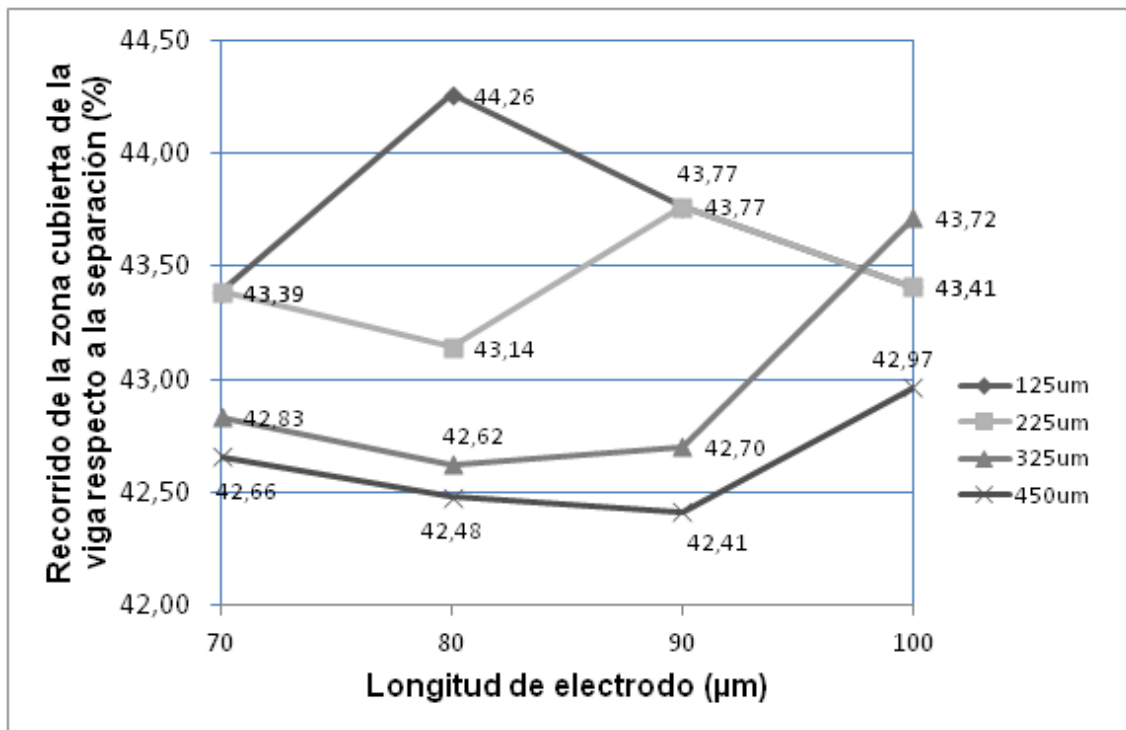


Figura 5.12. Máximo recorrido de la viga en la sección cubierta por el electrodo. Para las longitudes de vigas de 125μm, 225μm, 325μm y 450μm (mostradas en la leyenda) para E = 169 GPa

5.2 Análisis de los modos de oscilación de las vigas a ensayar

Como ya fue mencionado, en aplicaciones de AFM en modo dinámico, las microvigas deben oscilar a frecuencias cercanas a la de resonancia. 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 5.4, 5.5, 5.6 y 5.7. 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 130 GPa para el módulo de Young.

Tabla 5.4. 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

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo V

Resultados de aplicar el MEF

Tabla 5.5. 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	84.856,75	-	562.619,30	-	1.744.689	-	3.183.346	-
328	83.113,15	-2,10	525.701,60	-7,02	1.499.408	-16,36	2.841.419	-12,03
638	82.854,60	-0,31	519.625,50	-1,17	1.466.358	-2,25	2.782.169	-2,13
1176	82.750,82	-0,13	517.509,60	-0,41	1.454.706	-0,80	2.758.150	-0,87
1734	82.720,26	-0,04	516.946,20	-0,11	1.450.337	-0,30	2.749.704	-0,31
2484	82.689,82	-0,04	516.618,10	-0,06	1.448.651	-0,12	2.746.758	-0,11
3487	82.678,61	-0,01	516.473,60	-0,03	1.447.834	-0,06	2.744.997	-0,06
5075	82.672,87	-0,01	516.389,50	-0,02	1.447.354	-0,03	2.743.865	-0,04
7200	82.662,26	-0,01	516.301,40	-0,02	1.446.981	-0,03	2.743.155	-0,03

Tabla 5.6. 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	-	$2,60\cdot 10^5$	-	$5,53\cdot 10^5$	-	$6,44\cdot 10^5$	-
487	39.775,79	-1,59	$2,56\cdot 10^5$	-1,80	$5,14\cdot 10^5$	-7,77	$6,42\cdot 10^5$	-0,46
787	39.531,68	-0,62	$2,48\cdot 10^5$	-3,02	$5,08\cdot 10^5$	-1,04	$6,41\cdot 10^5$	-0,02
1.689	39.463,75	-0,17	$2,47\cdot 10^5$	-0,36	$5,05\cdot 10^5$	-0,56	$6,41\cdot 10^5$	-0,05
2.459	39.456,06	-0,02	$2,47\cdot 10^5$	-0,07	$5,04\cdot 10^5$	-0,20	$6,41\cdot 10^5$	-0,01
3.415	39.444,79	-0,03	$2,47\cdot 10^5$	-0,05	$5,04\cdot 10^5$	-0,05	$6,41\cdot 10^5$	-0,01
5.038	39.433,89	-0,03	$2,47\cdot 10^5$	-0,03	$5,03\cdot 10^5$	-0,21	$6,41\cdot 10^5$	-0,01
7.312	39.432,98	0,00	$2,47\cdot 10^5$	-0,01	$5,03\cdot 10^5$	-0,09	$6,41\cdot 10^5$	-0,01
10.680	39.425,60	-0,02	$2,47\cdot 10^5$	-0,02	$5,02\cdot 10^5$	-0,10	$6,41\cdot 10^5$	-0,01

La tabla 5.8 presentan los resultados de aplicar el análisis de frecuencias propias a las vigas con las 4 longitudes ya establecidas considerando como valores de módulo de elasticidad 130 GPa y 169 GPa. Asimismo, las figuras 5.13, 5.14, 5.15 y 5.16 presentan de forma cualitativa la deformación que ocurre en las vigas para los cuatro primeros modos de oscilación. Estas figuras aplican para las vigas sin distinción de módulo de elasticidad.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo V

Resultados de aplicar el MEF

Tabla 5.7. 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	-2,59	131.824,20	-4,10	337.286,50	-0,24	366.698,10	-5,97
1.029	20.548,73	-0,57	128.913,40	-2,26	337.090,30	-0,06	362.037,80	-1,29
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

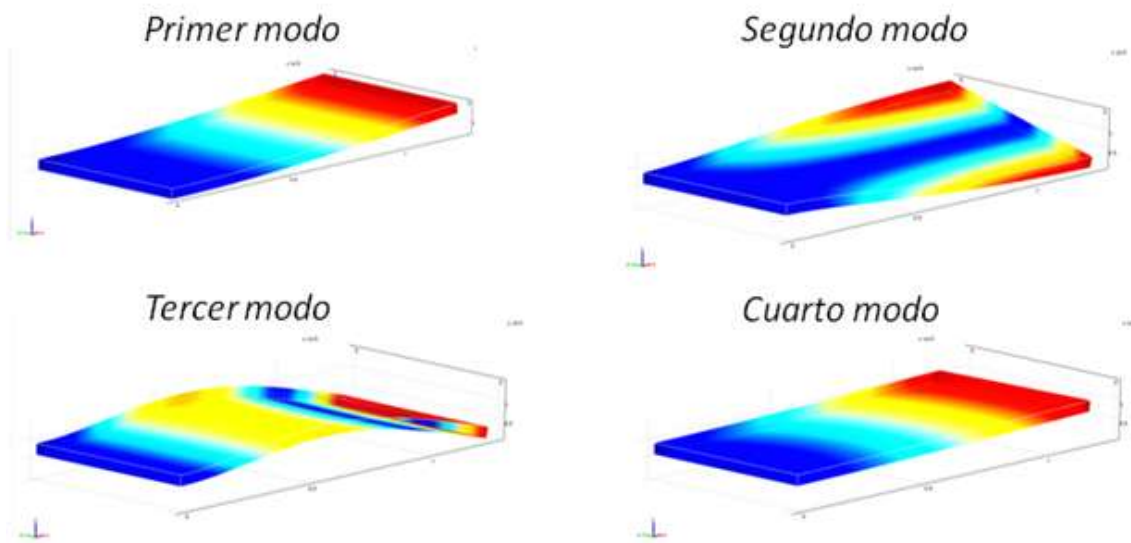


Figura 5.13. Los cuatro primeros modos de oscilación obtenidos para la viga de longitud $125\mu\text{m}$

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPÍA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo V

Resultados de aplicar el MEF

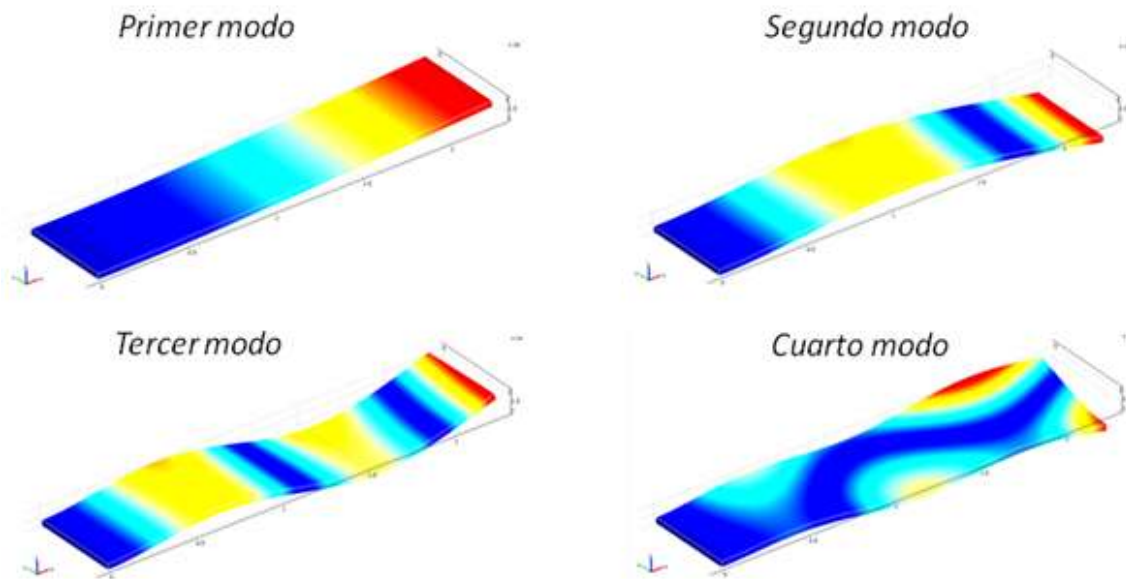


Figura 5.14. Los cuatro primeros modos de oscilación obtenidos para la viga de longitud $225\mu\text{m}$

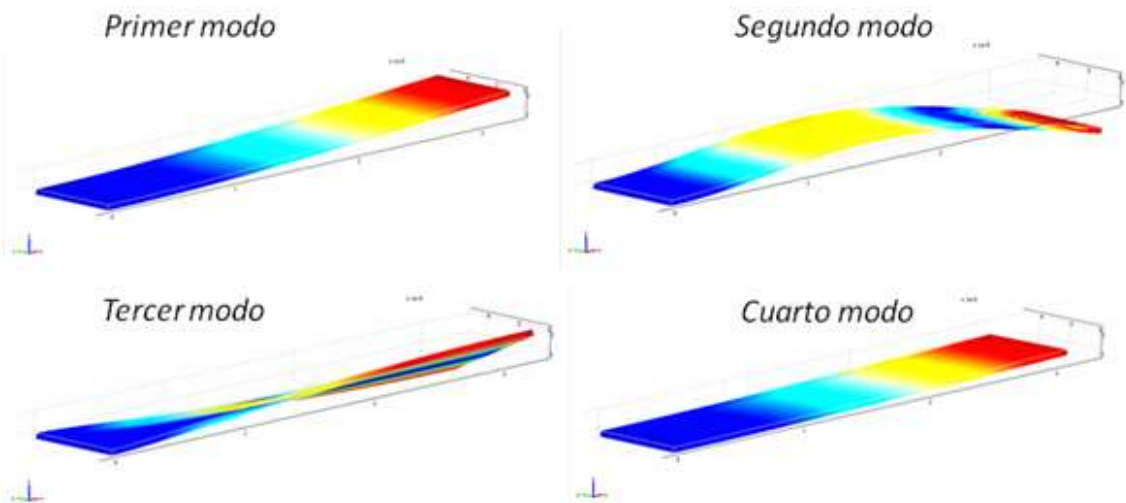


Figura 5.15. Los cuatro primeros modos de oscilación obtenidos para la viga de longitud $325\mu\text{m}$

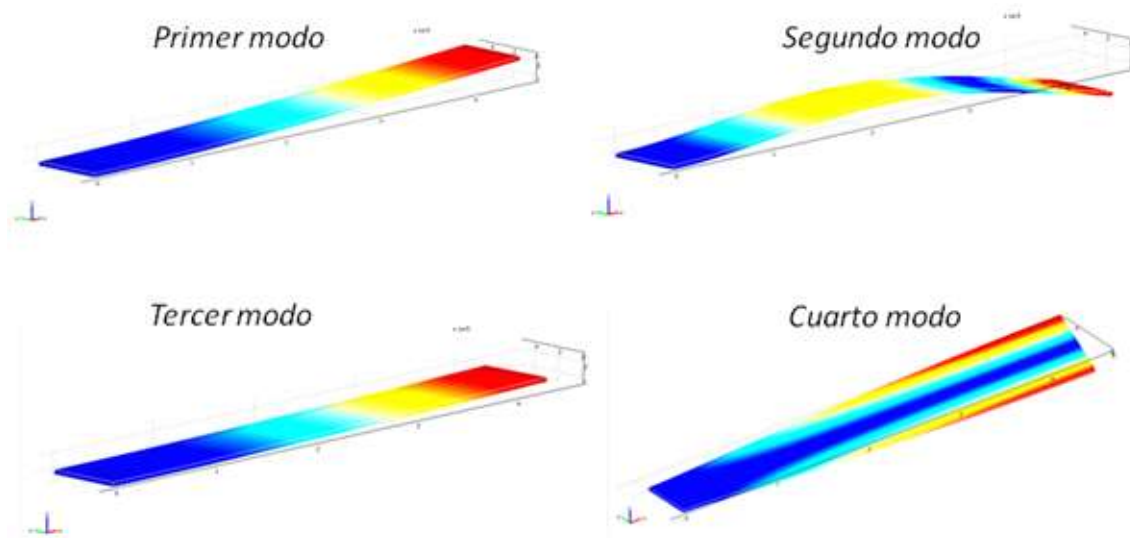


Figura 5.16. Los cuatro primeros modos de oscilación obtenidos para la viga de longitud $450\mu\text{m}$

Tabla 5.8. 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 (μm)	Primer Modo (Hz)	Segundo modo (Hz)	Tercer modo (Hz)	Cuarto modo (Hz)
130	125	236.350,6	1.230.267	1.473.698	3.482.415
	225	72.513,94	452.977,3	1.269.834	2.407.521
	325	34.585,81	216.569,4	441.233,6	562.129,8
	450	18.001,51	112.768,1	295.569,4	315.359,3
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

5.3 Análisis de la respuesta transitoria en las vigas

Para conocer la respuesta dinámica de las vigas como 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 en consideración las 4 longitudes consideradas para las vigas y las 4 longitudes de electrodos de accionamiento. Los gráficos resultantes se presentan en las figuras desde 5.17 hasta 5.24.

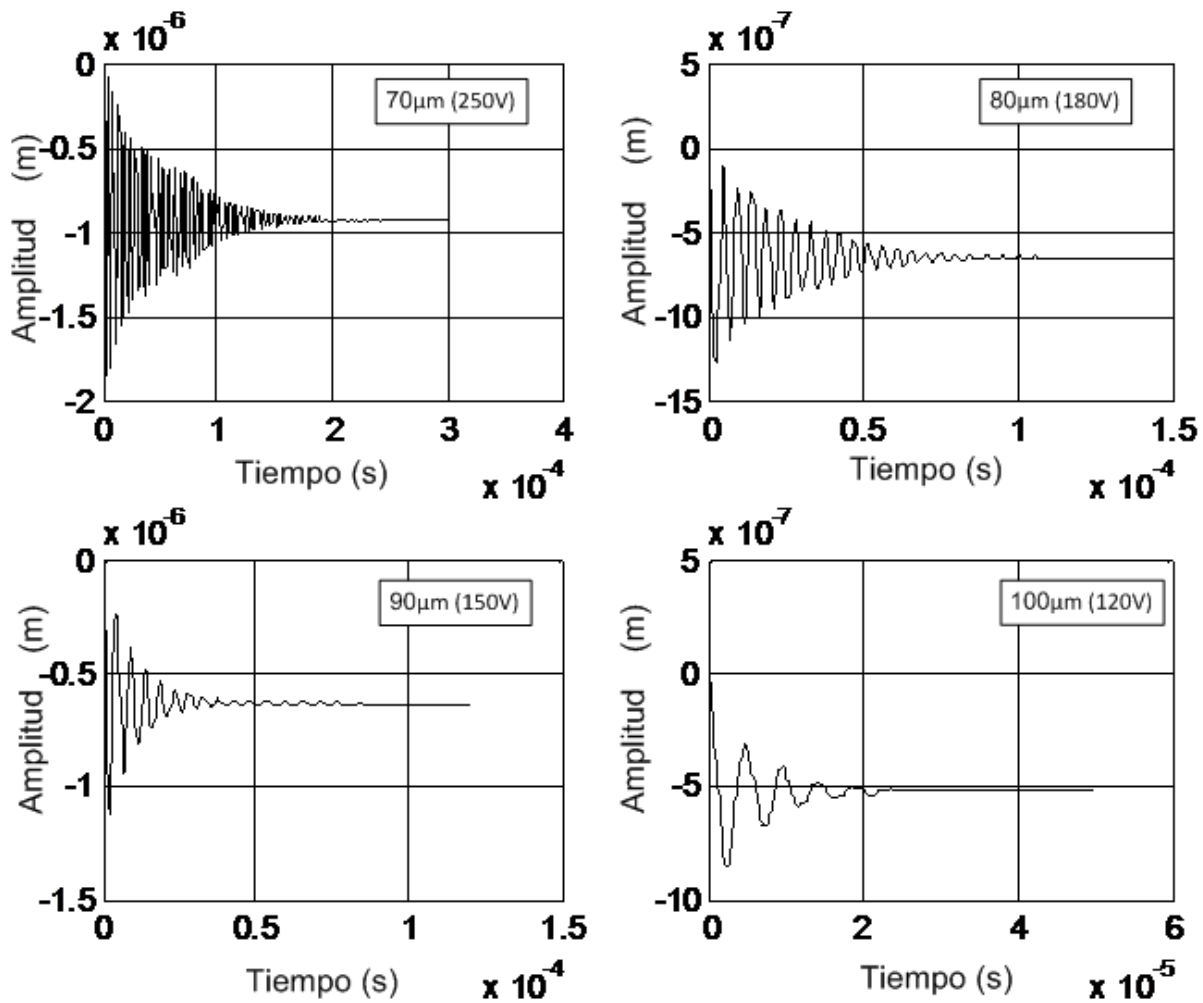


Figura 5.17. Desplazamiento del extremo libre de la viga de 125 μm como respuesta a una señal de potencial eléctrico de tipo escalón aplicada a los electrodos cuyas longitudes se presentan en la figura (y el potencial correspondiente entre paréntesis). Para $E = 130 \text{ GPa}$

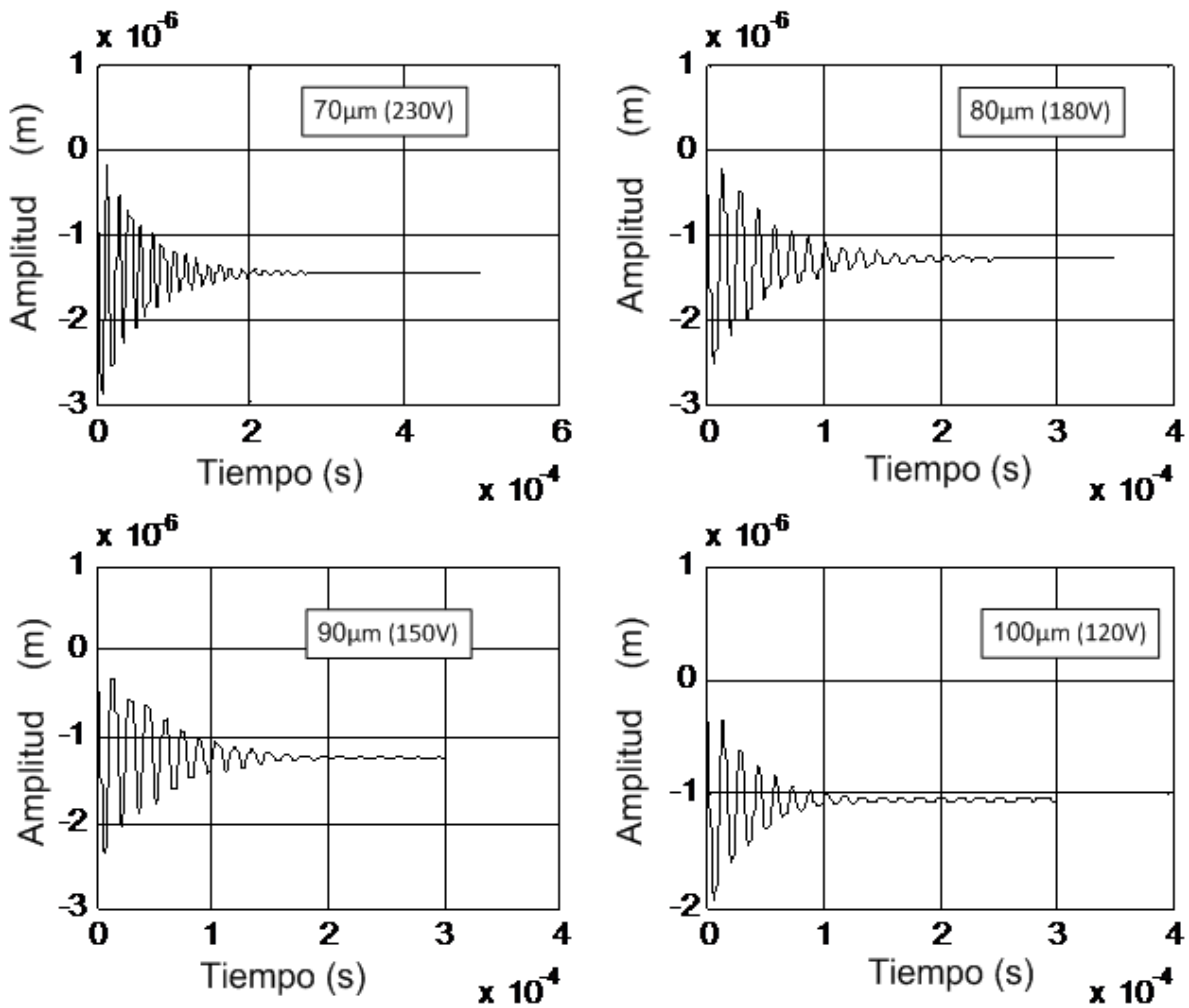


Figura 5.18. Desplazamiento del extremo libre de la viga de 225 μm al aplicar una señal de potencial eléctrico de tipo escalón a los electrodos de accionamiento correspondiente (ver longitud en leyenda y potencial entre paréntesis). Para $E = 130 \text{ GPa}$

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo V

Resultados de aplicar el MEF

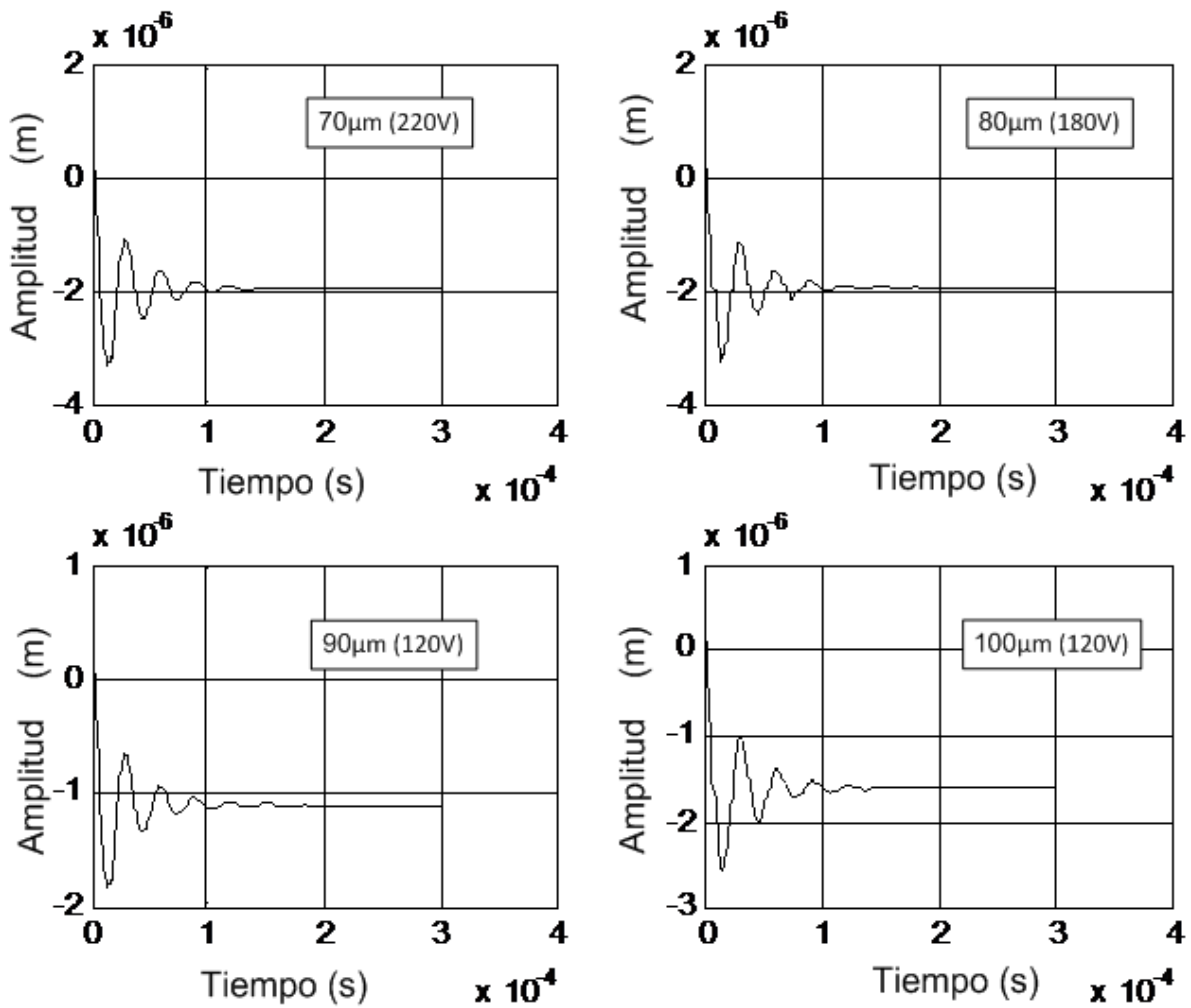


Figura 5.19. Desplazamiento del extremo libre de la viga de 325 μm al aplicar una señal de potencial eléctrico de tipo escalón a los electrodos de accionamiento correspondiente (ver longitud en leyenda y potencial entre paréntesis). Para E = 130 GPa

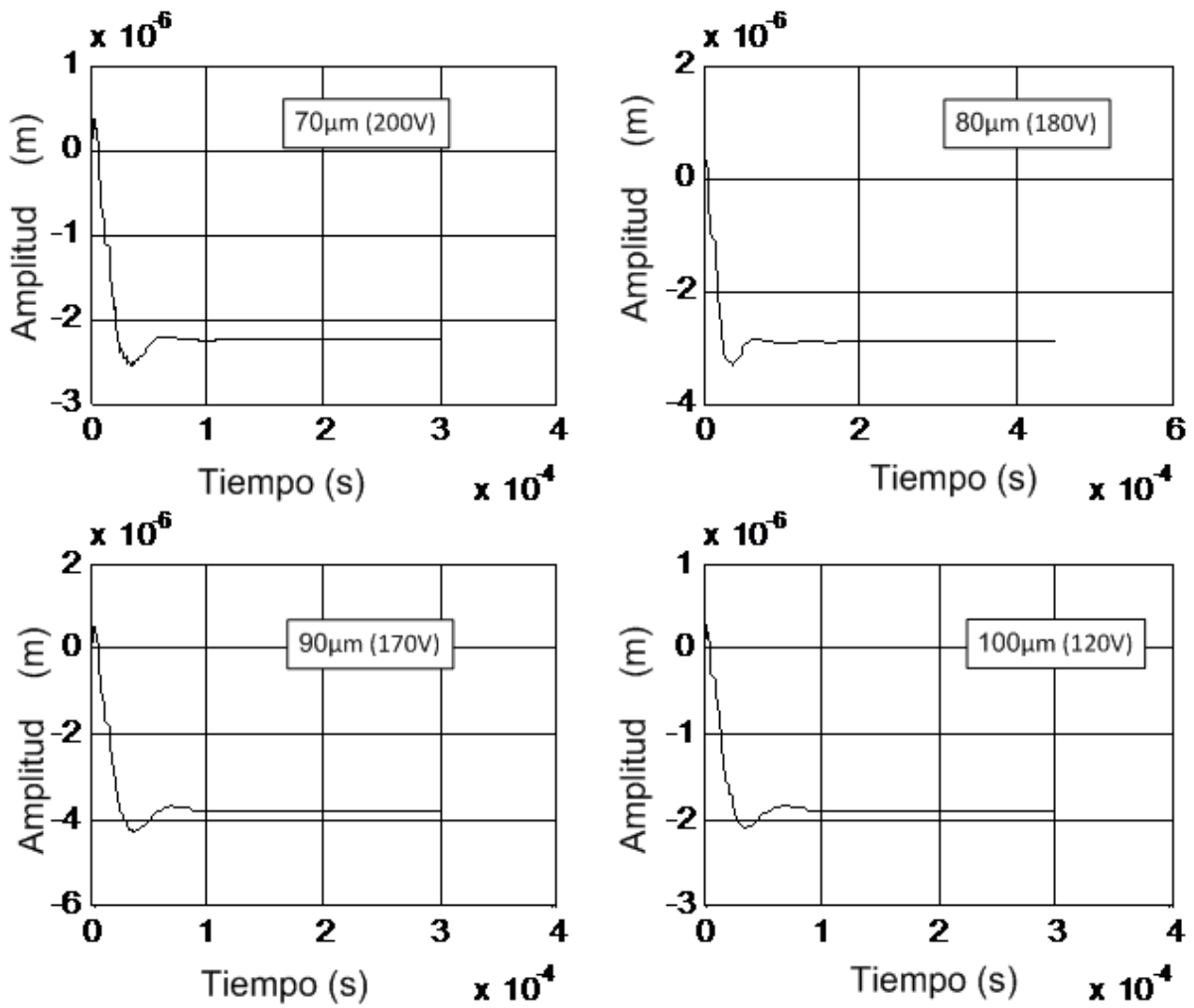


Figura 5.20. Desplazamiento del extremo libre de la viga de 450 μm como respuesta a una señal de potencial eléctrico de tipo escalón aplicada a los electrodos cuyas longitudes se presentan en la figura (y el potencial correspondiente entre paréntesis). Para $E = 130 \text{ GPa}$

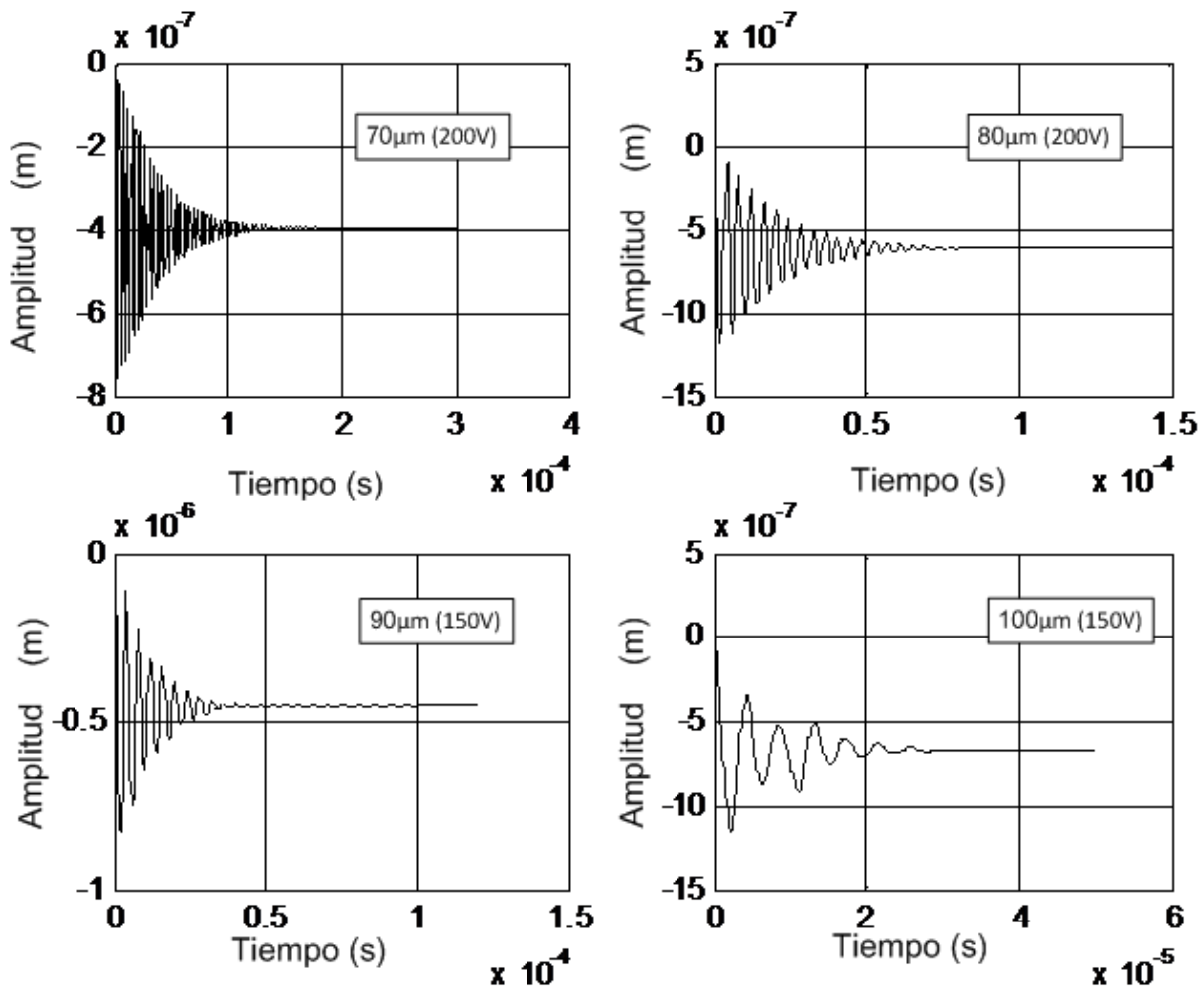


Figura 5.21. Desplazamiento del extremo libre de la viga de 125 μm al aplicar una señal de potencial eléctrico de tipo escalón a los electrodos de accionamiento correspondiente (ver longitud en leyenda y potencial entre paréntesis). Para $E = 169 \text{ GPa}$

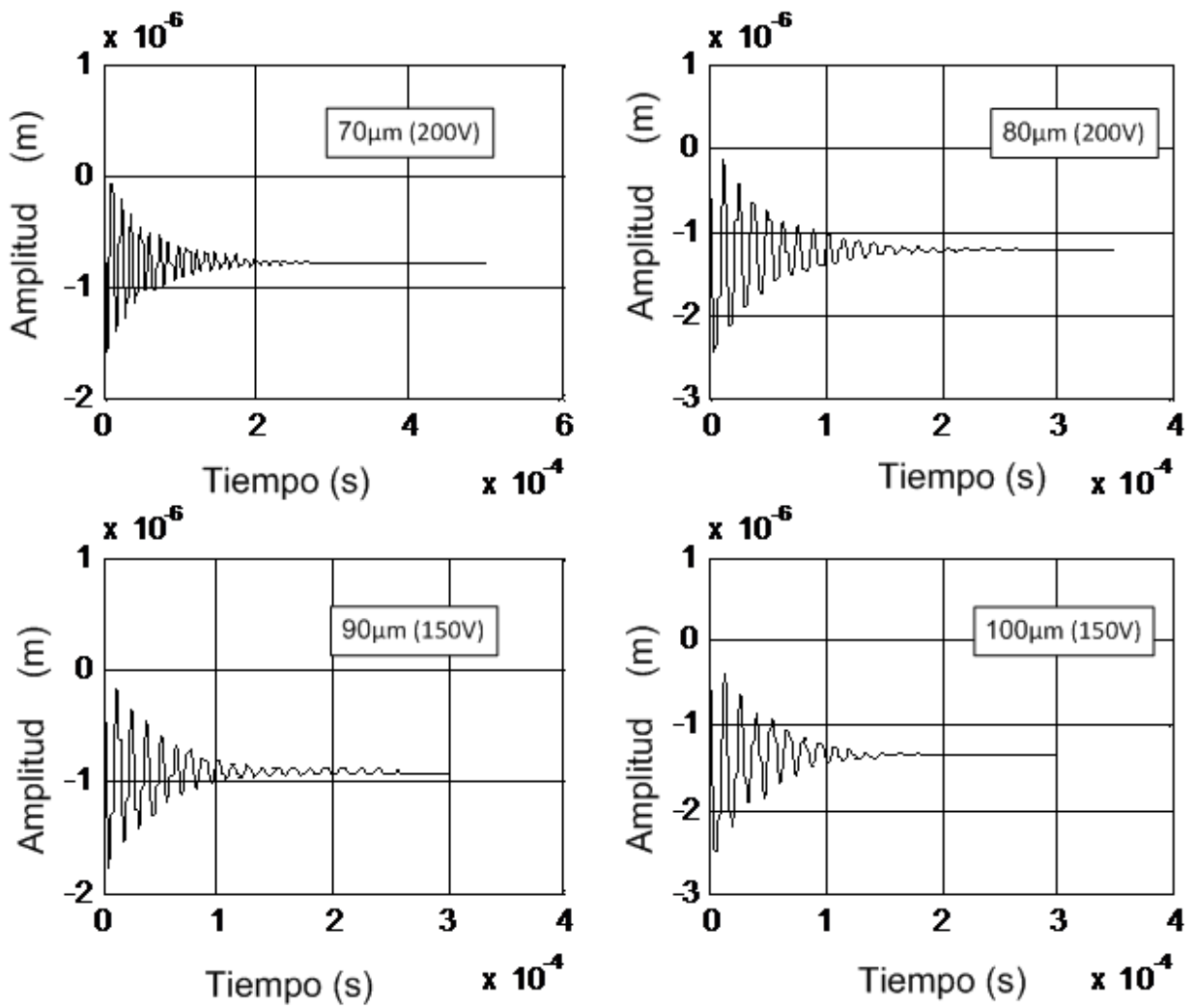


Figura 5.22. Desplazamiento del extremo libre de la viga de 225 μm al aplicar una señal de potencial eléctrico de tipo escalón a los electrodos de accionamiento correspondiente (ver longitud en leyenda y potencial entre paréntesis). Para $E = 169 \text{ GPa}$

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPÍA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo V

Resultados de aplicar el MEF

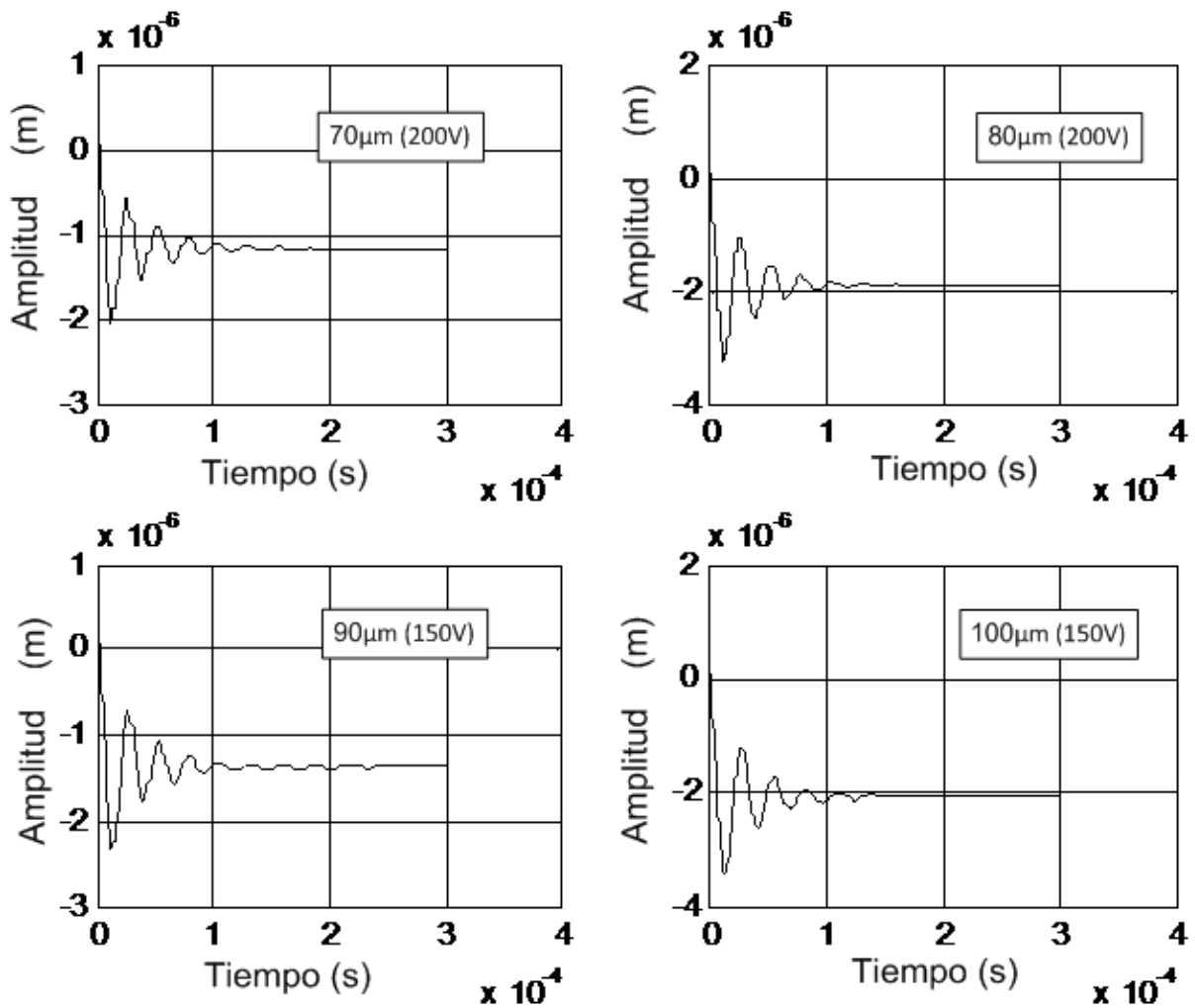


Figura 5.23. Desplazamiento del extremo libre de la viga de 325 μm al aplicar una señal de potencial eléctrico de tipo escalón a los electrodos de accionamiento correspondiente (ver longitud en leyenda y potencial entre paréntesis). Para $E = 169$ GPa

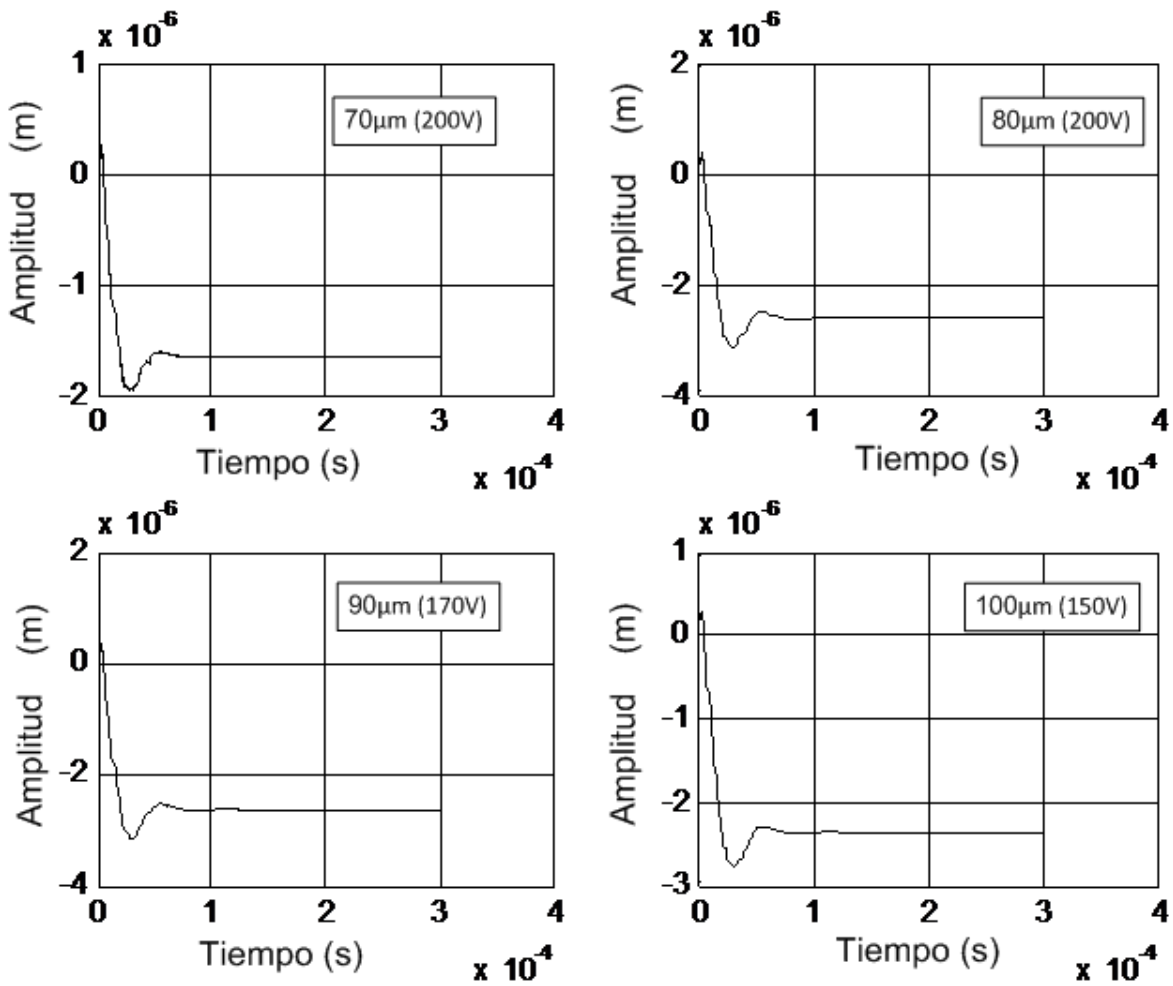


Figura 5.24. Desplazamiento del extremo libre de la viga de 450 μm al aplicar una señal de potencial eléctrico de tipo escalón a los electrodos de accionamiento correspondiente (ver longitud en leyenda y potencial entre paréntesis). Para $E = 169$ GPa

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 μm. 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 5.25 ilustra la información a obtener de los gráficos de las respuestas.

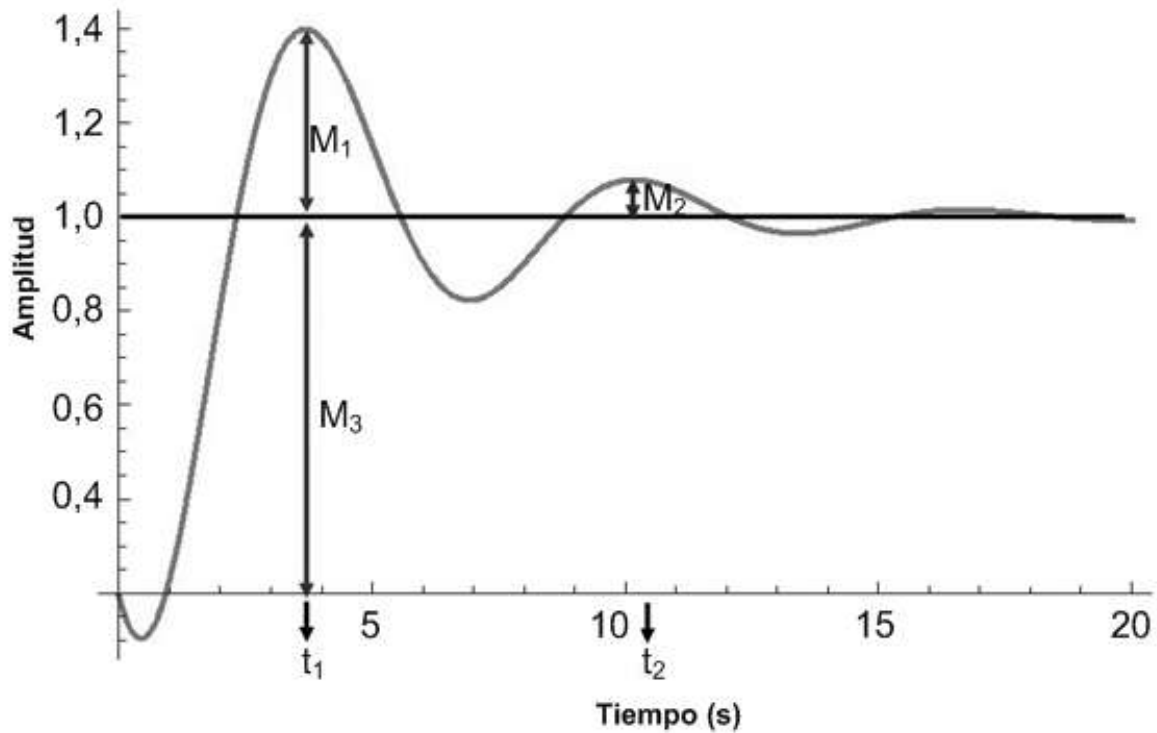


Figura 5.25. Ejemplo de respuesta subamortiguada y magnitudes asociadas que deben considerar para la determinación de ζ y ω_n

Con base a la figura 5.25, 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 ζ y ω_n se obtienen de las expresiones analíticas 5.1, 5.2 y 5.3.

$$\tau_p = \frac{2\pi}{\omega_p} \quad (5.1)$$

$$\omega_p = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (5.2)$$

$$\frac{M_2}{M_1} = e^{\frac{-2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \quad (5.3)$$

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo V

Resultados de aplicar el MEF

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 5.4.

$$Q = \frac{1}{2\xi} \quad (5.4)$$

Los resultados de inspeccionar los gráficos de respuesta transitoria se presentan en las tablas 5.9 y 5.10.

Tabla 5.9. 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, considerando el módulo de elasticidad de 130GPa

Longitud de viga (μm)	Longitud de electrodo (μm)	Frecuencia natural no amortiguada ωn (rad/s)	Frecuencia natural no amortiguada fn (Hz)	Coefficiente de amortiguamiento ξ	Factor de calidad Q
125	70	1.336.861,17	212.767,566	0,0039	128,60
	80	1.351.434,94	215.087,048	0,0176	28,42
	90	1.343.376,10	213.804,447	0,0348	14,38
	100	1.308.479,79	208.250,54	0,0622	8,04
225	70	435.728,14	69.348,1252	0,0201	24,94
	80	428.836,86	68.251,3464	0,0245	20,41
	90	423.054,27	67.331,0208	0,0298	16,77
	100	420.151,93	66.869,1001	0,0377	13,27
325	70	210.889,50	33.564,0279	0,0777	6,43
	80	207.326,31	32.996,9299	0,0798	6,27
	90	214.031,12	34.064,0311	0,0869	5,75
	100	203.990,45	32.466,0125	0,0724	6,90
450	70	103.342,86	16.447,4885	0,2764	1,81
	80	103.093,69	16.407,832	0,2773	1,80
	90	97.347,49	15.493,298	0,2742	1,82
	100	97.737,02	15.555,2935	0,2843	1,76

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo V

Resultados de aplicar el MEF

Tabla 5.10. 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, considerando el módulo de elasticidad de 169GPa

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

Capítulo VI
Desarrollo experimental del trabajo

Desarrollo experimental del trabajo

En esta sección se tratan los aspectos relacionados con las pruebas experimentales. Se realiza una breve explicación del proceso de fabricación llevado a cabo para la elaboración de las muestras así como también del diseño de las máscaras requerido de acuerdo con las restricciones propias del proceso de fabricación. Seguidamente se describen los ensayos realizados para finalmente presentar los resultados obtenidos.

6.1 Proceso de fabricación y diseño de las máscaras

La descripción del proceso de fabricación presentada a continuación se basa en información proporcionada por el Dr. Léon Woldering quien en conjunto con el Ing. Johnny Sanderink, el MSc. Jöel Geerlings y el Msc. Johan Engelen, formaron parte del equipo de trabajo del instituto MESA+ de la Universidad de Twente, y que estuvo a cargo del proceso de construcción de las muestras a ensayar.

El proceso de fabricación empleado para obtener los dispositivos de las obleas de Pianoforte 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. En este sentido, el proceso fue empleado, para fabricar, además de los arreglos planteados el presente trabajo, otra variedad de dispositivos, entre los que se encuentran diversos tipos de sensores y estructuras tipo “comb-drive”, en arreglos micromecánicos capaces de generar notas musicales”. Estos otros dispositivos forman parte de otros trabajos de investigación.

El proceso puede describirse en 5 fases generales que se ilustran en la figura 6.1 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 HF.
5. Separación de las secciones cortadas.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo VI

Desarrollo experimental del trabajo

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.

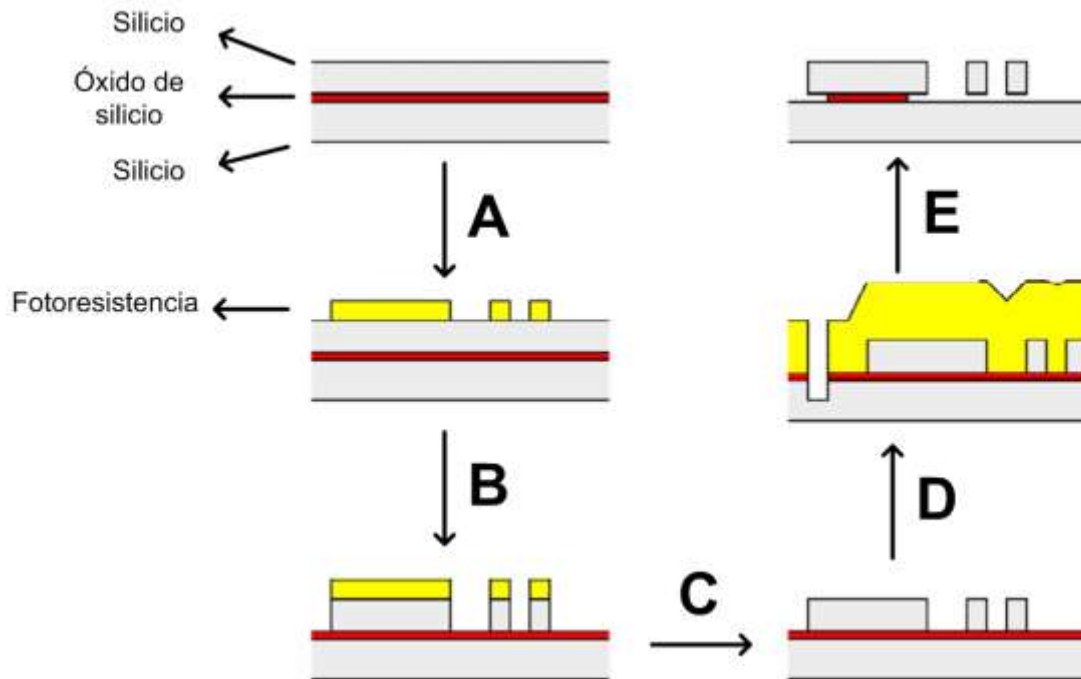


Figura 6.1. Esquema resumido del proceso Pianoforte. Una oblea adecuada es seleccionada y cubierta con fotorresistencia. En la fotorresistencia se establecen los patrones con los diseños de cada muestra para que actúe como máscara de grabado (A). Se transfiere el patrón de la máscara de grabado al silicio 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 denominado Pianoforte, se apoyaron en aproximaciones analíticas y en las simulaciones efectuadas mediante el software basado en el MEF.

Pianoforte 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:

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo VI

Desarrollo experimental del trabajo

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

Las dimensiones de las “vigas” a las que hace referencia Pianoforte se presentan en la figura 6.2, 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 espesor de la viga en la oblea sea 50 μ m aproximadamente (impuesto por el grosor de la capa de silicio).

Debido a la orientación que tendrá la viga en el sustrato, es importante aclarar lo referente a las dimensiones. El grosor definido por Pianoforte en 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 Pianoforte refiere corresponde al grosor de la viga como estructura.

Dos aspectos generales son de interés al momento de inspeccionar el funcionamiento de microvigas que son accionadas mediante potencial eléctrico. El primero de ellos, corresponde al máximo potencial de accionamiento al que pueden someterse sin que ocurra ruptura dieléctrica del aire como resultado de las pequeñas separaciones (3 μ m). El segundo aspecto tiene que ver con el accionamiento propiamente dicho donde se

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPÍA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo VI

Desarrollo experimental del trabajo

mide la flexión ocurrida en la viga ante una señal de potencial amplitud variable en condiciones estacionarias régimen estático y cuando oscila a una frecuencia cercana al valor de resonancia de la estructura.

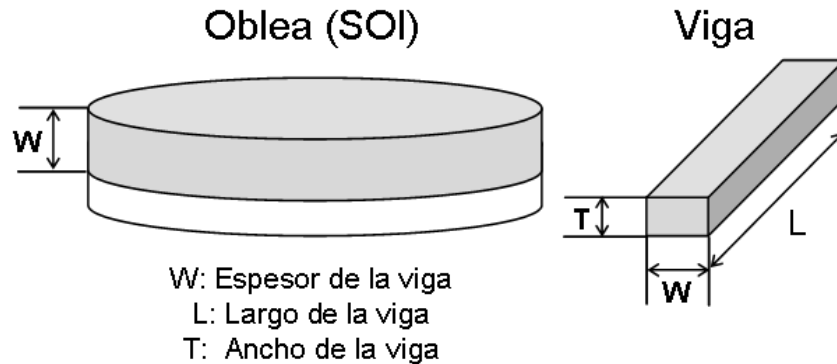


Figura 6.2. Oblea empleada en Pianoforte y dimensiones de la viga de acuerdo con el proceso de fabricación

En este sentido, los diseños de máscara desarrollados para Pianoforte, son los siguientes:

1. Vigas ubicadas entre electrodos de accionamiento de tipo plano.
2. Par de electrodos separados a una distancia determinada, para determinación de 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 6.3, 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 6.3 se presentan en la tabla 6.1.

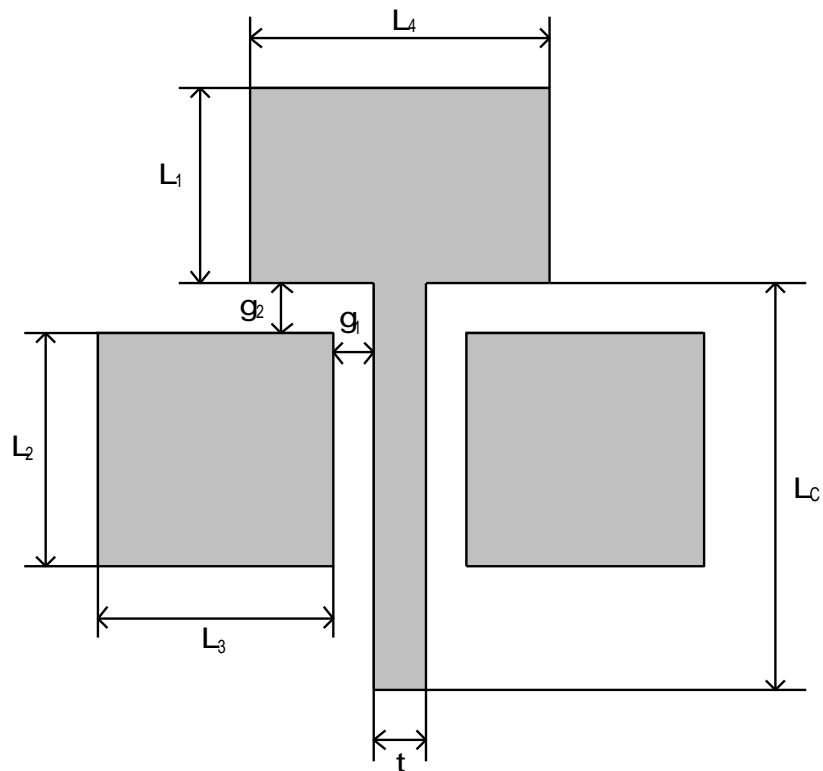


Figura 6.3. Diseño de máscaras para accionamiento de microvigas

Tabla 6.1. 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

Las dimensiones de la tabla 6.1 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 6.3 muestra el aspecto final de la máscara para una viga de longitud dada.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo VI

Desarrollo experimental del trabajo

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 6.5 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 $1\mu\text{m}$.

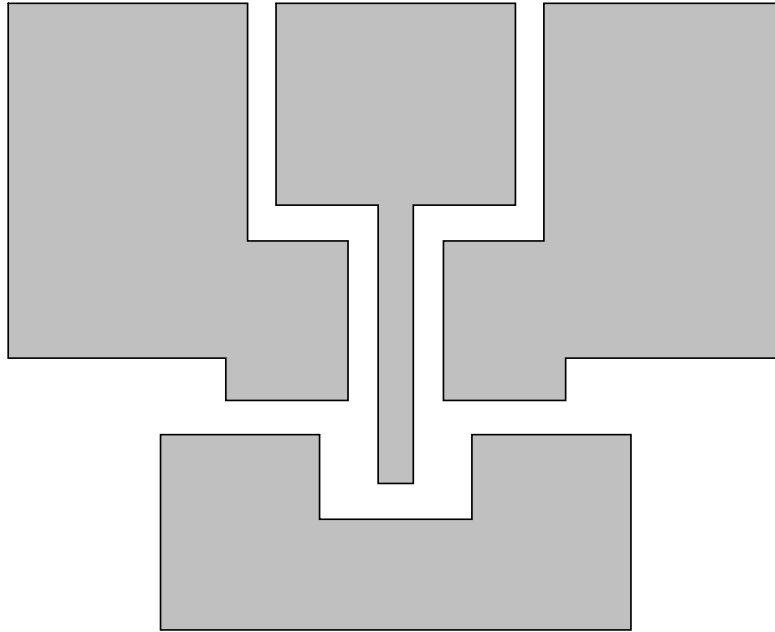


Figura 6.4. Aspecto final de las máscaras para accionamiento de microvigas

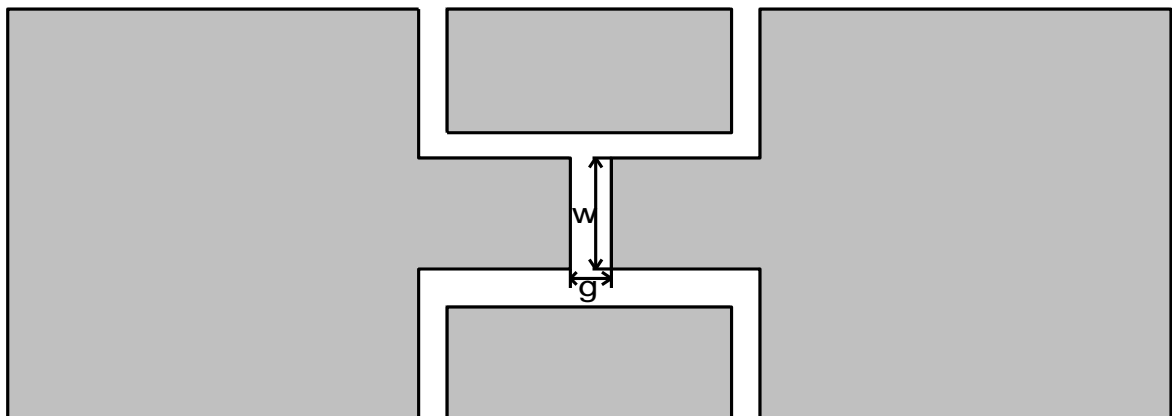


Figura 6.5. Máscaras para determinación de potencial de ruptura

6.2 Desarrollo de las pruebas experimentales para medición de flexión

Las vigas obtenidas del proceso de fabricación Pianoforte 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 equipo denominado 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 6.6). 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.

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.

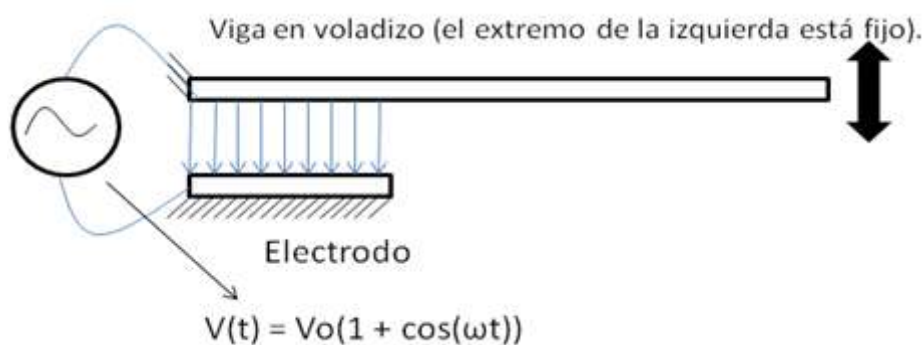


Figura 6.6. Accionamiento de las vigas mediante la señal proveniente del vibrómetro

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

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPÍA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo VI

Desarrollo experimental del trabajo

(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.

La figura 6.7 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 6.2. Asimismo, la descripción de los equipos empleados en las pruebas experimentales se presenta en la tabla 6.3.

Tabla 6.2. Especificaciones de desempeño del vibrómetro para el ensayo de medición de flexión

<i>Característica</i>	<i>Descripción</i>
<i>Tipo de medición</i>	En el plano
<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 μ m
<i>Resolución para los desplazamientos</i>	1 nm
<i>Resolución temporal</i>	100ns (tiempo de exposición estroboscópica).

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPÍA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo VI

Desarrollo experimental del trabajo

Tabla 6.3. 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>	<ul style="list-style-type: none"> • 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>	<ul style="list-style-type: none"> • 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>	<ul style="list-style-type: none"> • 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 Eléctrico	<i>Unidad compacta</i>	P 265 High Voltage Amplifier. Módulo 107. Ganancia = -100.

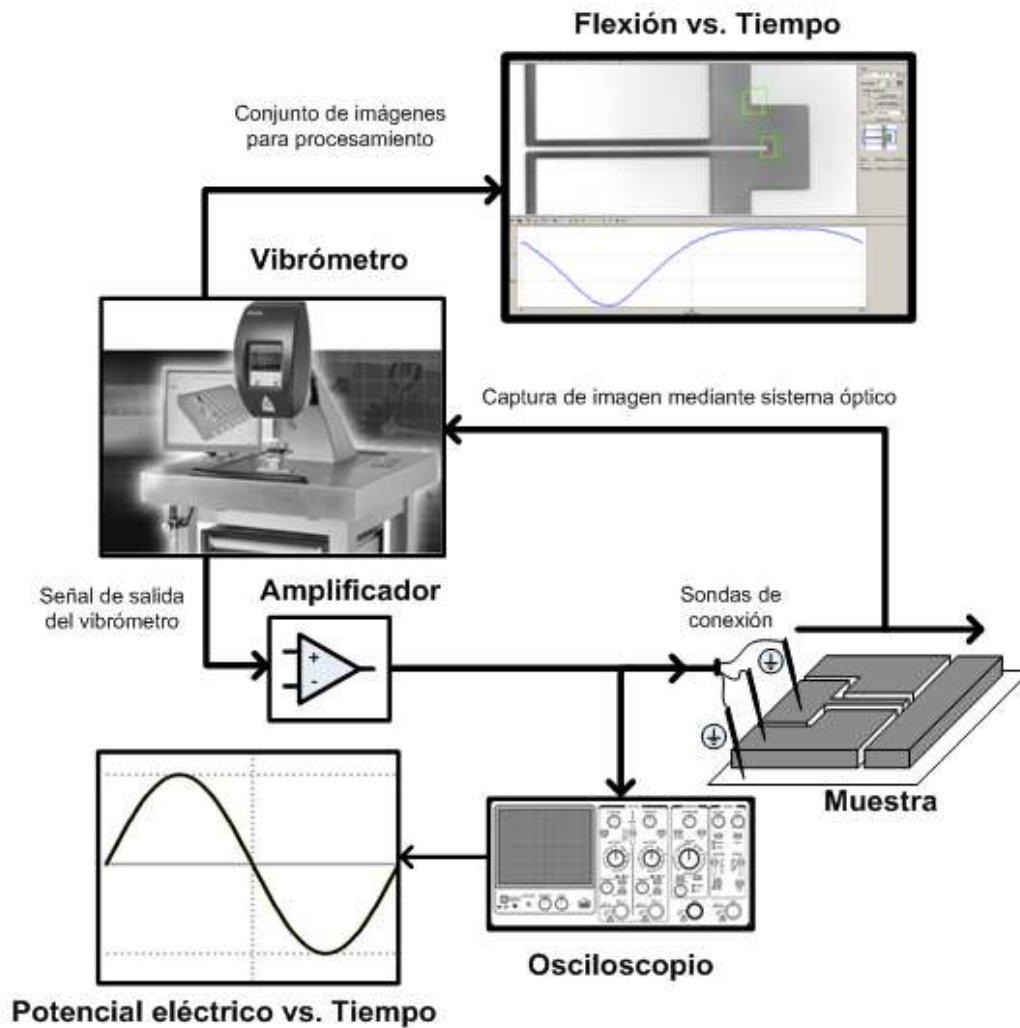


Figura 6.7. Arreglo experimental para medición de flexión en las microvigas como función del potencial aplicado

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 6.7, 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.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo VI

Desarrollo experimental del trabajo

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 6.7). 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.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo VI

Desarrollo experimental del trabajo

Los máximos desplazamientos obtenidos, luego de analizar los datos experimentales, se comparan con aquellos de las simulaciones (ver tabla 6.4). Para ello se efectúa un ajuste de los gráficos de las simulaciones mediante MATLAB ®. El apéndice B presenta los gráficos comparativos.

Tabla 6.4. 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 (m)	FEM (E=130GPa) (m)	FEM (E=169GPa) (m)
125	70	291	$2,32 \cdot 10^{-6}$	$1,41 \cdot 10^{-6}$	$9,90 \cdot 10^{-7}$
125	80	226,5	$1,56 \cdot 10^{-6}$	$1,19 \cdot 10^{-6}$	$8,40 \cdot 10^{-7}$
125	90	187,13	$1,42 \cdot 10^{-6}$	$1,21 \cdot 10^{-6}$	$8,17 \cdot 10^{-7}$
125	100	157,51	$1,37 \cdot 10^{-6}$	$1,21 \cdot 10^{-6}$	$7,82 \cdot 10^{-7}$
225	70	291	$4,37 \cdot 10^{-6}$	$2,76 \cdot 10^{-6}$	$1,94 \cdot 10^{-6}$
225	80	226,5	$3,34 \cdot 10^{-6}$	$2,40 \cdot 10^{-6}$	$1,70 \cdot 10^{-6}$
225	90	187,13	$2,90 \cdot 10^{-6}$	$2,42 \cdot 10^{-6}$	$1,63 \cdot 10^{-6}$
225	100	157,51	$2,73 \cdot 10^{-6}$	$2,45 \cdot 10^{-6}$	$1,56 \cdot 10^{-6}$
325	70	291	$6,23 \cdot 10^{-6}$	$4,16 \cdot 10^{-6}$	$2,93 \cdot 10^{-6}$
325	80	226,5	$4,68 \cdot 10^{-6}$	$3,66 \cdot 10^{-6}$	$2,58 \cdot 10^{-6}$
325	90	187,13	$4,96 \cdot 10^{-6}$	$3,67 \cdot 10^{-6}$	$2,46 \cdot 10^{-6}$
325	100	148,33	$3,47 \cdot 10^{-6}$	$2,95 \cdot 10^{-6}$	$2,06 \cdot 10^{-6}$
450	70	274,8	$6,50 \cdot 10^{-6}$	$5,11 \cdot 10^{-6}$	$3,65 \cdot 10^{-6}$
450	80	226,5	$6,47 \cdot 10^{-6}$	$5,28 \cdot 10^{-6}$	$3,69 \cdot 10^{-6}$
450	90	187,13	$6,11 \cdot 10^{-6}$	$5,45 \cdot 10^{-6}$	$3,57 \cdot 10^{-6}$
450	100	138,78	$3,35 \cdot 10^{-6}$	$3,51 \cdot 10^{-6}$	$2,44 \cdot 10^{-6}$

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.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPÍA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo VI

Desarrollo experimental del trabajo

El arreglo experimental para el ensayo de frecuencia de resonancia es similar al mostrado en la figura 6.7 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 las microvigas de 325 μm y 450 μm solamente.

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 , 90 μm y 100 μm para las microvigas de 325 μm y 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 figuras 6.8 y 6.9.

De los gráficos mostrados en las figuras 6.8 y 6.9, 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 6.5.

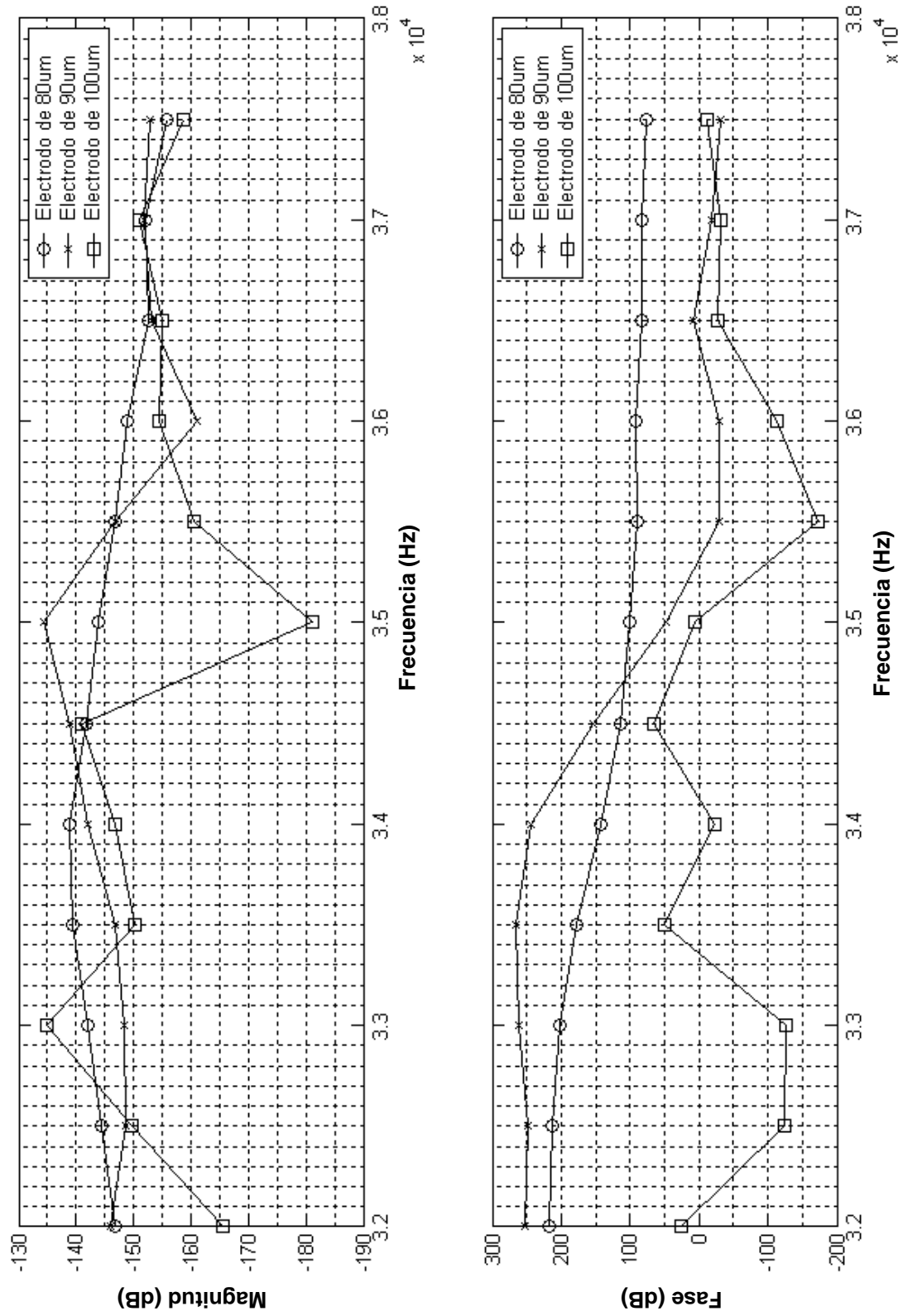


Figura 6.8. Gráfico de magnitud y fase para las microvigas de 325 μm accionadas mediante electrodos de longitud 80 μm , 90 μm y 100 μm .
Obtenidos del analizador de movimiento (vibrómetro).

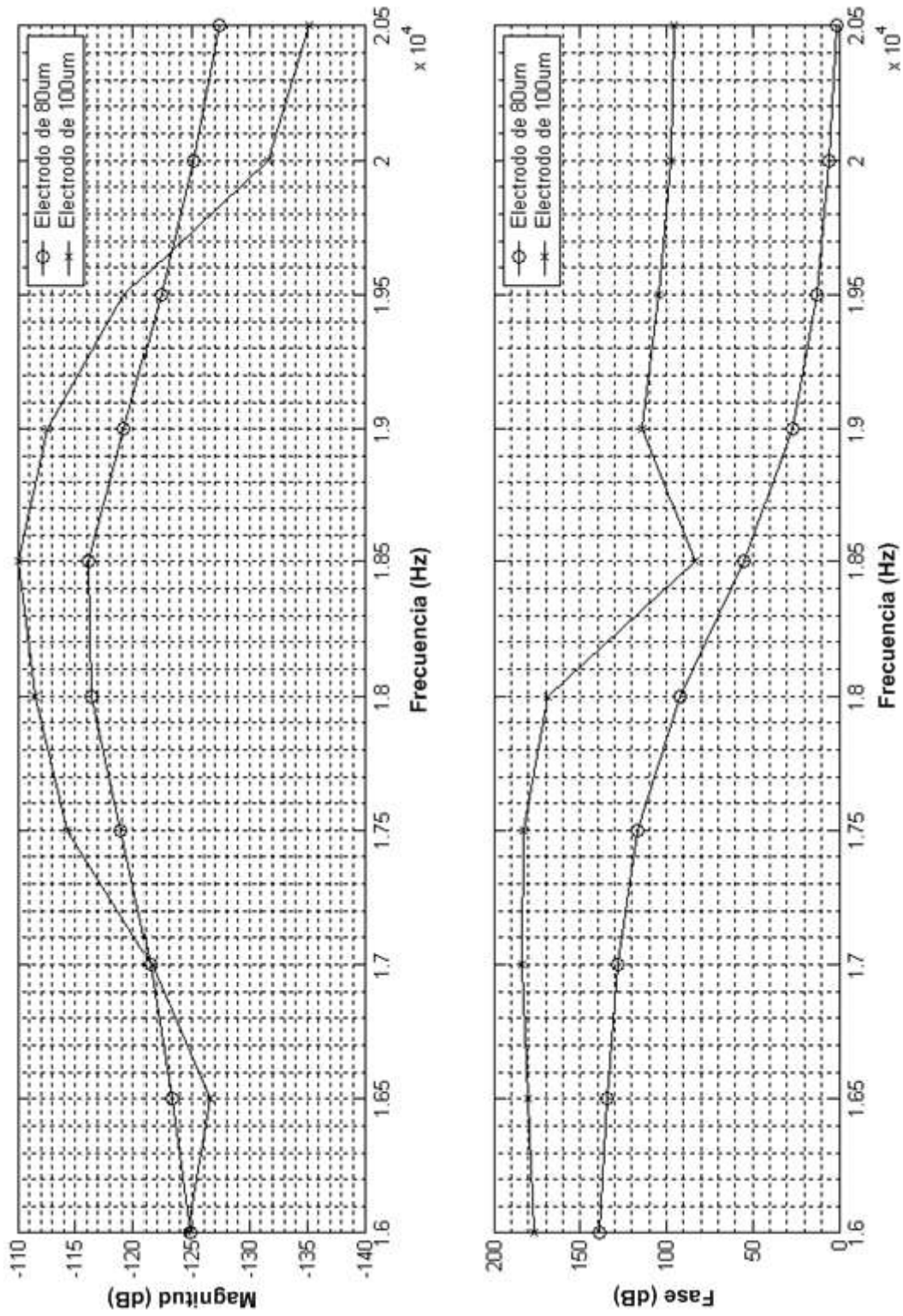


Figura 6.9. Gráfico de magnitud y fase para las microvigas de 450 µm accionadas mediante electrodos de longitud 80 µm, y 100 µm. Obtenidos del analizador de movimiento (vibrómetro).

Tabla 6.5. Factores de calidad obtenidos de los gráficos de magnitud-frecuencia para las vigas de longitud 325 μm y 450 μm , actuadas mediante electrodos de longitud 80 μm , 90 μm y 100 μm .

Longitud de viga (μm)	Longitud de electrodo (μm)	Frecuencia amortiguada (Hz)	Factor Q
325	80	34.000	21,65
	90	35.000	79,54
	100	33.000	165
450	80	18.250	11,77
	100	18.250	13,52

La forma de los gráficos de magnitud y fase para la viga de 325 μm y electrodos de 90 μm y 100 μm , no presenta cambios graduales para el intervalo de frecuencias considerados, lo que dificulta determinar con propiedad la información deseada. A pesar de ello, se ha determinado el factor de calidad considerando, como frecuencia de resonancia, el promedio entre la frecuencia del mayor pico en el gráfico y la frecuencia inmediatamente inferior. Sin embargo, en la tabla 6.5 puede observarse que los valores de factor de calidad en el caso de la viga de 325 μm difieren en 300% para el caso de las longitudes de 80 μm y 90 μm , y en un 200% entre las longitudes de 90 μm y 100 μm . No ocurre lo mismo para las vigas de 450 μm .

6.3 Desarrollo de las pruebas experimentales para medición de potencial de ruptura

Los electrodos diseñados para la medición de potenciales de ruptura, obtenidos de Pianoforte, 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.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPÍA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo VI

Desarrollo experimental del trabajo

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 6.5.

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 6.5) tal y como se ilustra en la figura 6.10. Además de determinar la separación promedio (\bar{g}), se calcula la incertidumbre asociada obtenida de la desviación estándar s_g (véanse las expresiones 6.1 y 6.2).

$$\bar{g} = \frac{\sum_{i=1}^n g_i}{n} \quad (6.1)$$

$$(s_g)^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (g_i - \bar{g})^2}{n-1} \quad (6.2)$$

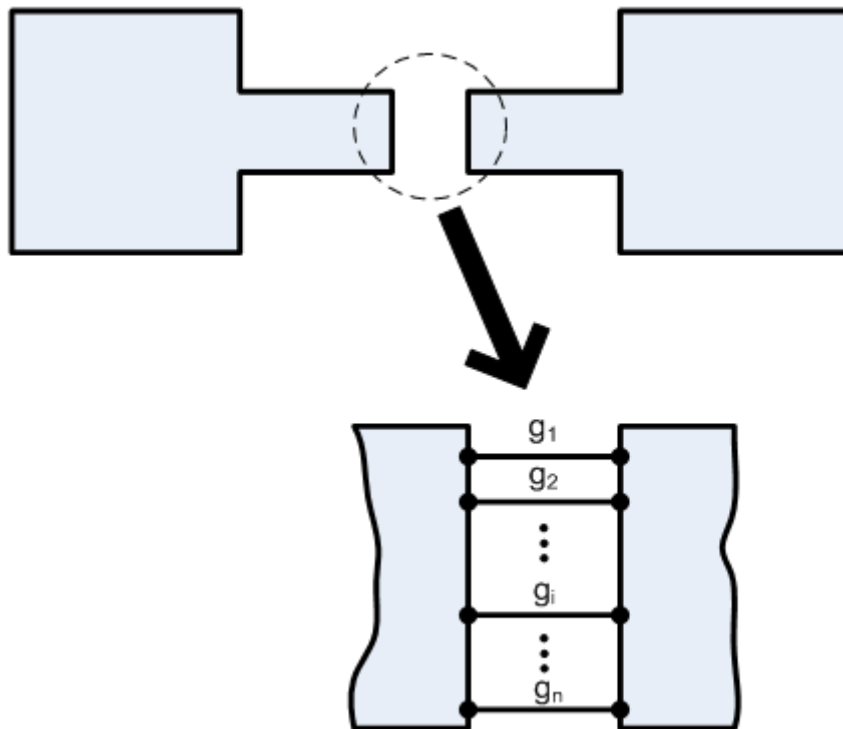


Figura 6.10. Distribución de puntos para la determinación de la separación entre electrodos

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo VI

Desarrollo experimental del trabajo

La determinación de las distancias entre las caras de los electrodos se realizó mediante la inspección de las imágenes capturadas para cada par de electrodo con una cámara integrada a un microscopio óptico (las especificaciones de estos equipos se presentan en la tabla 6.6). Para ello también se contó con una interfaz de visualización y manipulación conectada a la cámara (identificada en la tabla 6.6), con la cual se almacenó la imagen capturada con una resolución de 2500_x1290 píxel.

Tabla 6.6. Equipos utilizados y ajustes realizados en la inspección óptica de las muestras con los electrodos a ensayar

<i>Nombre de equipo</i>	<i>Descripción/Ajuste</i>
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 6.7.

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 6.11 y en la esquina inferior derecha se encuentra la escala ajustada con la interfaz de visualización (10 x 10 μm).

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo VI

Desarrollo experimental del trabajo

Tabla 6.7. Resultados obtenidos de la determinación de las separaciones entre electrodos luego de procesar las imágenes capturadas

<i>Muestra</i>	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

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo VI

Desarrollo experimental del trabajo

En la imagen de la figura 6.11 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).

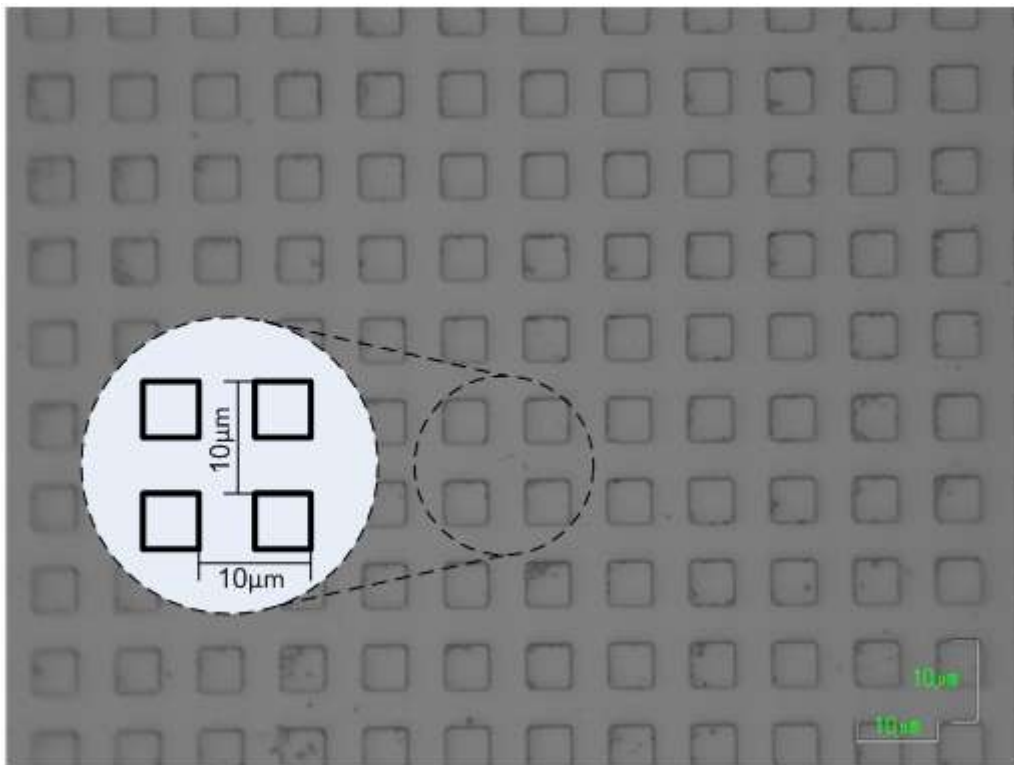


Figura 6.11. Imagen de la muestra patrón de calibración del microscopio

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 6.8.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo VI

Desarrollo experimental del trabajo

Tabla 6.8. Separación entre electrodos utilizados para los ensayos de potencial de ruptura dieléctrica

Incertidumbre en patrón por filas $s_{ph} (\mu m)$	0,03
Incertidumbre en patrón por columnas $s_{pv} (\mu m)$	0,05
Incertidumbre combinada $s_E (\mu m)$	0,06
Muestra	Medida $\bar{g} \pm (s_E + s_g)$
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

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo VI

Desarrollo experimental del trabajo

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 6.12. La descripción de los equipos empleados se presenta en la tabla 6.9.

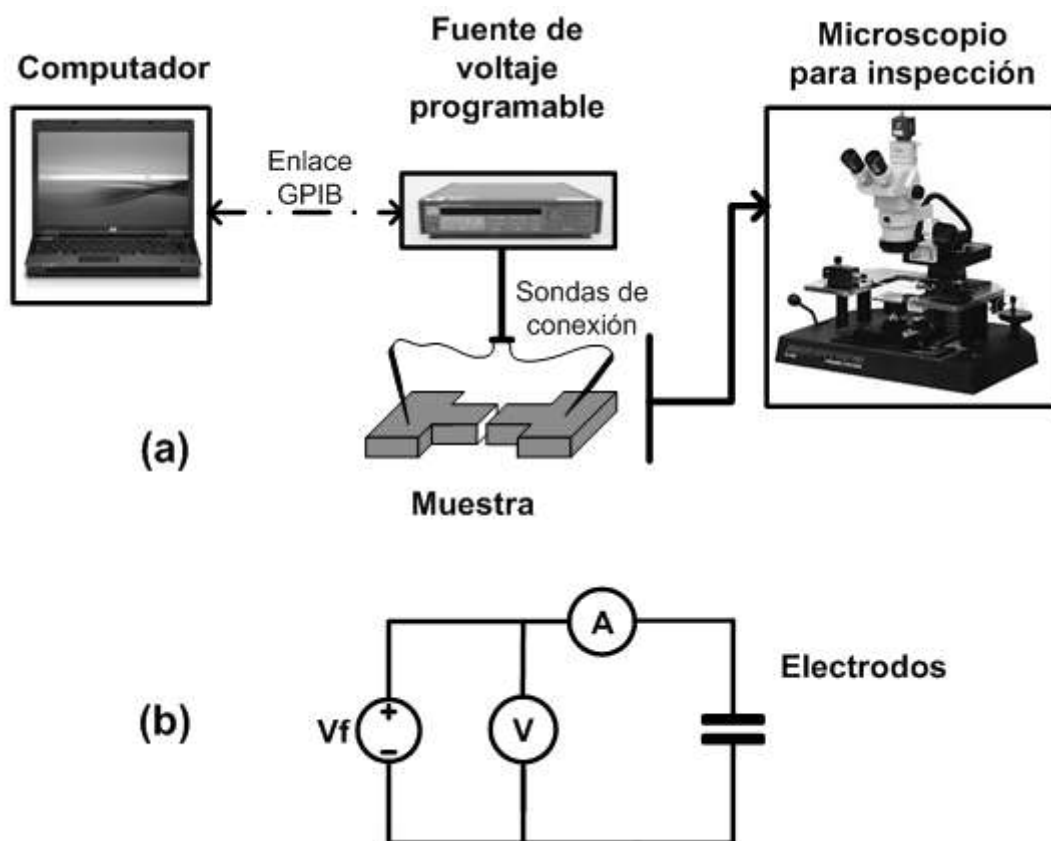


Figura 6.12. Arreglo experimental utilizado para la medición de potencial de ruptura en electrodos para separaciones comprendidas entre $3 \mu\text{m}$ y $20 \mu\text{m}$.
(a) Diagrama general. (b) Circuito eléctrico equivalente

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo VI

Desarrollo experimental del trabajo

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 6.13, 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 6.9. 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) $\pm (0,04 \% + 240$ mV). <i>Mediciones voltimétricas</i> Máximo Rango $\pm 1.100,0$ V. Resolución 10 mV Exactitud (1 año, 18° - 28°C) $\pm (0,035 \% + 100$ mV). <i>Mediciones amperimétricas</i> Máxima corriente ± 10 mA Resolución 100 fA Exactitud (1 año, 18° - 28°C) $\pm (0,3 \% + 1$ 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 6.13) 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 6.13). De la figura 6.13 resulta evidente que

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPÍA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo VI

Desarrollo experimental del trabajo

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 una sistema microelectromecánico.

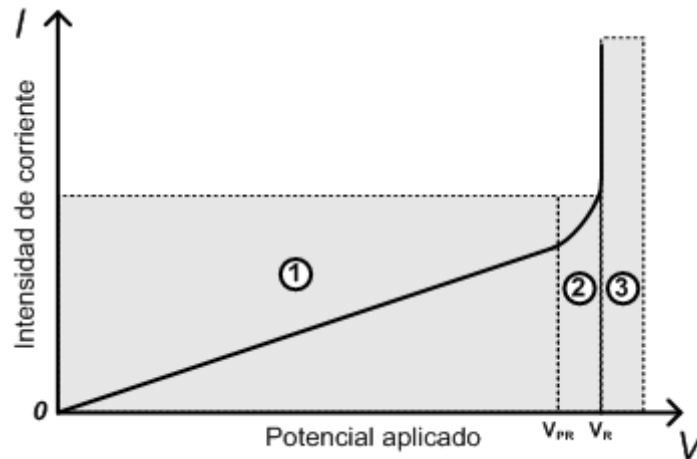


Figura 6.13. Gráfico que relaciona la intensidad de corriente y potencial eléctrico aplicado, obtenida del ensayo de medición de potencial de ruptura

Como en la región 1 (ver figura 6.13), 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 6.14 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

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo VI

Desarrollo experimental del trabajo

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 6.15 ilustra la forma de la distribución de datos de la segunda derivada sobre la estimación de V_{PR} .

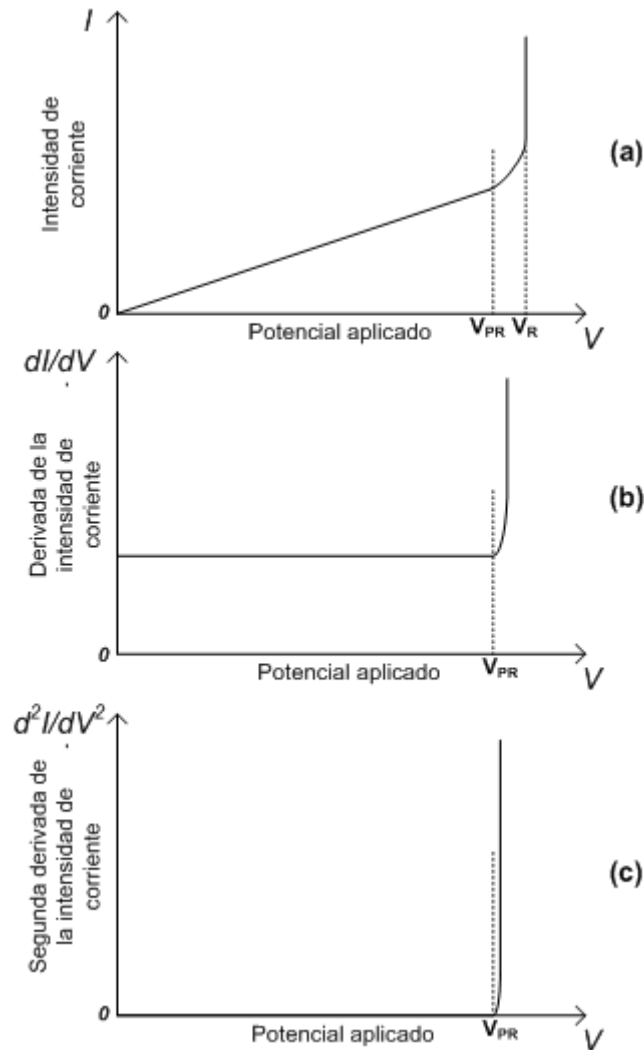


Figura 6.14. Gráficos asociados al ensayo de determinación de potencial de ruptura dieléctrica. (a) Gráfico I vs V general (b) Primera Derivada al gráfico I vs V y (c) Segunda Derivada al gráfico I vs V .

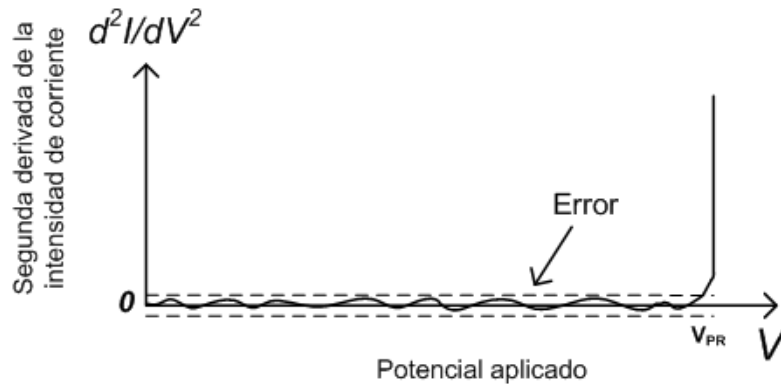


Figura 6.15. Distribución de magnitudes de la segunda derivada respecto al valor cero.

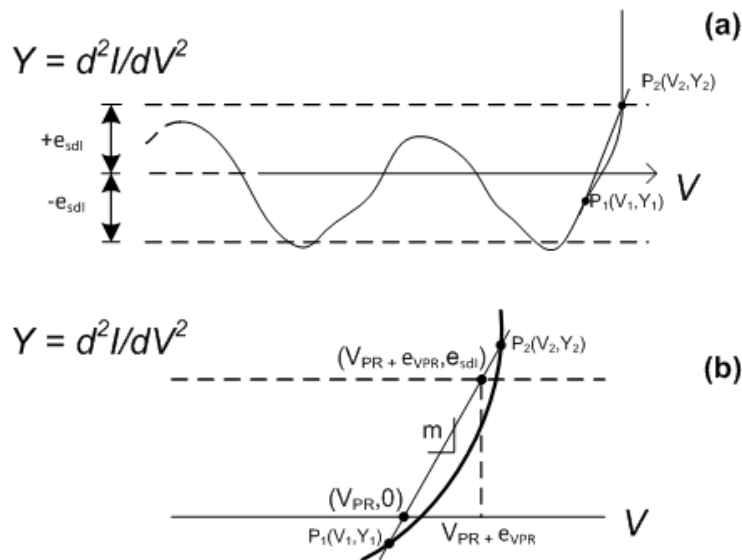


Figura 6.16. Determinación del error asociado al potencial de pre-ruptura V_{PR} .
 (a) Error en la distribución de los datos de segunda derivada y puntos de referencia P_1 y P_2 para determinar V_{PR} y su error asociado. Detalle de P_1 y P_2 para la determinación de V_{PR} y su error.

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 V_{PR} . 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 6.3, 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 e_{sdl} .

$$RMSE(t) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - t)^2} \quad (6.3)$$

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 6.14(c).

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 e_{sdl} (véase la figura 6.16(a)). Estos dos puntos definen una recta que intercepta las rectas paralelas $y = 0$ e $y = e_{sdl}$. De esta intersección resultan dos puntos con los cuales es posible tener V_{PR} y una desviación, dependiente de e_{sdl} , que se identifica como e_{VPR} . La tabla 6.9 presenta los puntos obtenidos para cada grupo de datos, los errores e_{sdl} y e_{VPR} .

La figura 6.17 presenta el gráfico V (potencial eléctrico) vs g (separación entre electrodos) que resume los resultados plasmados en las tablas 6.8 y 6.10. Resulta interesante comparar la ley de Paschen con los datos obtenidos y mostrados en la figura 6.17. La expresión 6.4 describe la relación entre el potencial eléctrico de ruptura Vb y la separación entre electrodos d (sometidos a una diferencia de potencial) de acuerdo con Paschen, para condiciones de presión de trabajo dada [93].

$$Vb = \frac{B \times p \times d}{\ln\left(\frac{A \times p \times d}{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}\right)} \quad (6.4)$$

Donde γ se conoce como el coeficiente secundario de ionización, cuyo valor generalmente se desconoce. Los valores de los coeficientes (γ incluido) de las expresión 6.4 para aire, se presentan en la tabla 6.11.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo VI

Desarrollo experimental del trabajo

Tabla 6.10. 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 _{sdI} (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

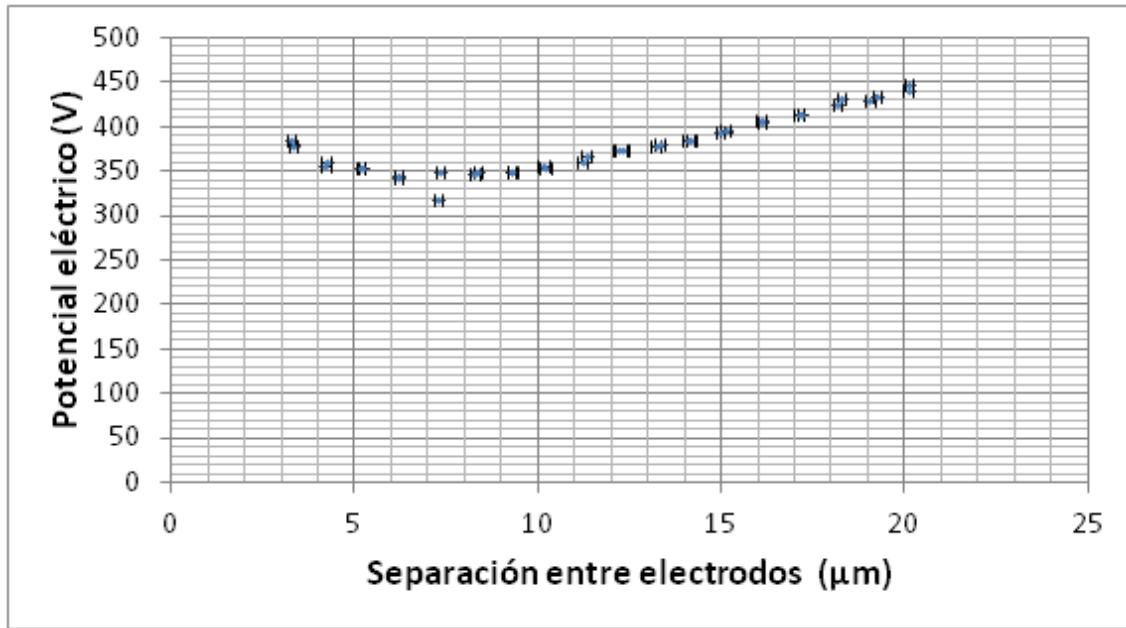


Figura 6.17. Gráfico de Potencial eléctrico de ruptura vs separación de electrodos obtenido luego de procesados los resultados de los ensayos.

Tabla 6.11. Coeficientes aplicados en la ley de Paschen para aire [93].

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

La figura 6.18 presenta los gráficos de una serie de datos de potencial de ruptura obtenidos experimentalmente (tabla 6.9) y otra de potenciales eléctricos resultantes de aplicar la expresión 6.2, en función del producto $p_x d$ para $p=1$ atm y d comprendida entre 5 μm y 20 μm . Se ha obviado los valores de incertidumbre determinados en los valores experimentales y solo se ha 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 6.2.

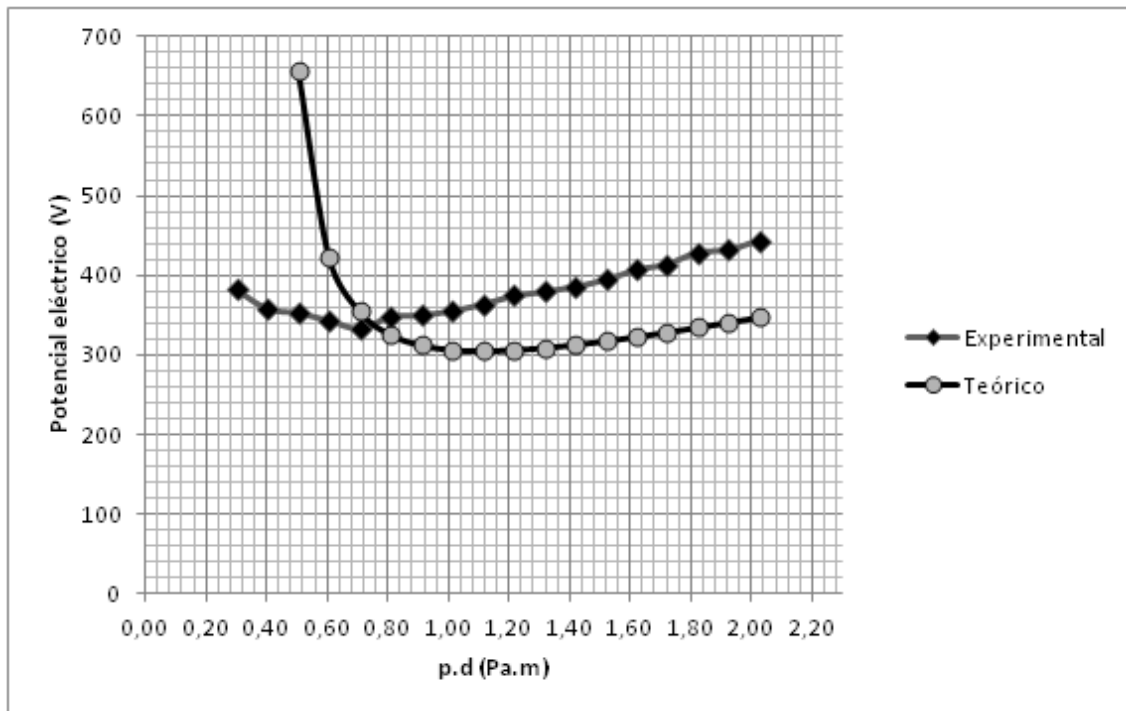


Figura 6.18. Gráficos de Potencial de ruptura contra $p \cdot d$, para aire a una atmósfera. Considerando datos experimentales y la evaluación de la expresión de la ley de Paschen.

Capítulo VII
Discusión de Resultados

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo VII.

Discusión de Resultados.

Discusión de resultados

Como ya fue mencionado, para verificar la confiabilidad de los resultados al utilizar el método de los elementos finitos, se llevó a cabo un análisis de convergencia. Este análisis se planteó, para el estudio de los casos estáticos aplicados a todos los arreglos viga-electrodo, tomando un solo valor de potencial y solo uno de los módulos de elasticidad y también se aplicó en el análisis de frecuencias de modos propios.

En el análisis estático, los errores obtenidos en los esfuerzos y desplazamientos fueron típicamente inferiores del 3 % y 2 % respectivamente, para un número de elementos superior entre 950 y 990. En general los errores fueron inferiores al 5 %. Por lo tanto, teniendo en cuenta que el análisis mediante el método de elementos finitos es una aproximación de diseño considerada para la construcción de los arreglos, estos errores son aceptables. Sobre la base de estos resultados, en los que se realizó la discretización de los modelos en elementos cuadráticos, se llevo a cabo finalmente el análisis paramétrico.

En el caso de los análisis de las respuestas transitorias, no fue posible realizar un análisis de convergencia de los modelos, debido al consumo de recursos y tiempo (aproximadamente 30 min) que implica efectuar una corrida por modelo, para un número de nodos dados. En el caso de estos modelos, se plantearon geometrías discretizadas con 950 o más elementos.

Por otro lado, al analizar los modelos en 3D para la determinación de las frecuencias de modos propios, se observó que para geometrías discretizadas entre 1.500 y 22.000 elementos, no existe una desviación entre los resultados superior al 0,5 %.

Los modelos electromecánicos basados en elementos finitos arrojan resultados que como es de esperarse, difieren de las aproximaciones basadas en expresiones analíticas ya conocidas. Esto se debe al hecho que, a pesar de que las propiedades consideradas en el planteamiento de los modelos de elementos finitos son las mismas que en las expresiones analíticas, el primero considera, por ejemplo, el incremento en la capacitancia que ocurre cuando la viga empieza a deformarse como consecuencia de la fuerza electrostática resultante al aplicar el potencial eléctrico. En consecuencia, es

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo VII.

Discusión de Resultados.

razonable que del análisis mediante elementos finitos, se obtengan magnitudes de deflexión superiores a las que pudiera arrojar la evaluación de ecuaciones de flexión en vigas sometidas a fuerzas puntuales o distribuidas, debidas a campos electrostáticos.

En los resultados del análisis paramétrico mediante elementos finitos, se evidencia un desplazamiento vertical máximo de la microviga, superior al 40% de la separación inicial viga-electrodo, en la sección cubierta por el electrodo de accionamiento. Esto concuerda con los resultados de trabajos como el de O'Brien y colaboradores [40] y el de Choi y Lovell [41], 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 del "pull-in".

En el mismo orden de ideas, destaca el hecho de la flexión por apalancamiento asociada al accionamiento planteado [42,43]. En este sentido, los resultados de los modelos analizados mediante elementos finitos muestran que en el extremo libre de las vigas en voladizo ocurren desplazamientos verticales que en todo momento superan un tercio de la separación inicial entre el electrodo y la viga, así como también el 45% ya comentado. Es de notar que la máxima deflexión en una microviga (antes de presentarse pull-in) ocurre con el electrodo de menor longitud, a expensas por supuesto, de un mayor potencial eléctrico aplicado.

Así como los resultados de las simulaciones permiten observar que los máximos desplazamientos del extremo libre de la viga, se presentan para el electrodo de menor longitud, también se evidencia que los potenciales de pull-in dependen principalmente de la sección cubierta por el electrodo. Esto puede verificarse también si se evalúa la expresión analítica que aproxima el potencial de pull-in, según O'Brien y Choi [40,41], introduciendo la longitud del electrodo, en lugar de la longitud de la viga. Las figuras 7.1 y 7.2 presentan los gráficos de potencial de pull-in en función de la longitud del electrodo, tomando los valores de módulo de elasticidad de 130 GPa y 169 GPa respectivamente. En estos gráficos, se presentan los dos enfoques analíticos antes mencionados y el análisis mediante elementos finitos. En la curva correspondiente al análisis de elementos finitos se presenta, para cada electrodo, el promedio de los potenciales obtenidos para las 4 longitudes de vigas consideradas. Como se puede

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo VII.

Discusión de Resultados.

observar de los gráficos 7.1 y 7.2, la curva del análisis de elementos finitos guarda mayor conformidad con la curva del enfoque analítico 2, independientemente del módulo de elasticidad considerado.

Es necesario destacar el uso de la formulación ALE (Langraniana-Euleriana arbitraria) en el análisis paramétrico en elementos finitos, para la determinación aproximada de un potencial de pull-in. Esta formulación, utilizada para plantear el movimiento (deformación) del mallado dentro de los dominios para optimizar la forma de los elementos, permite llegar a un valor de potencial de pull-in cuando el método deja de converger para un valor de potencial dado.

De esta manera, fue posible simular la flexión de la microviga, teniendo en cuenta la aparición de pull-in. Al utilizar la formulación ALE, la simulación se encuentra restringida a un rango acotado de valores de potencial eléctrico de accionamiento, por encima del cual el método no converge al darse pull-in. En caso de no haber utilizado la formulación ALE, entonces no hubiera sido posible estimar un potencial aproximado de pull-in como límite a considerar en las pruebas experimentales.

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. Esto resulta adecuado, considerando que es necesario efectuar el sensado del desplazamiento del extremo libre de la microviga, mientras esta oscila a una frecuencia muy cercana a resonancia. 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 que 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

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo VII.

Discusión de Resultados.

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 las figuras 7.3 y 7.4.

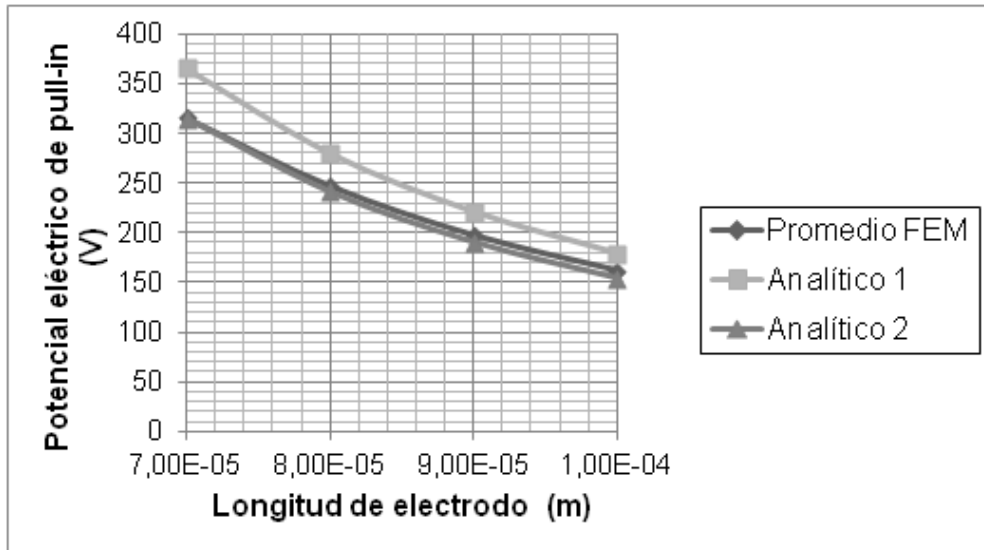


Figura 7.1. Gráfico comparativo de Potencial de pull-in vs. Longitud de Electrodo, considerando los resultados del análisis mediante elementos finitos y la adaptación de expresiones analíticas. Se considera $E = 130 \text{ GPa}$.

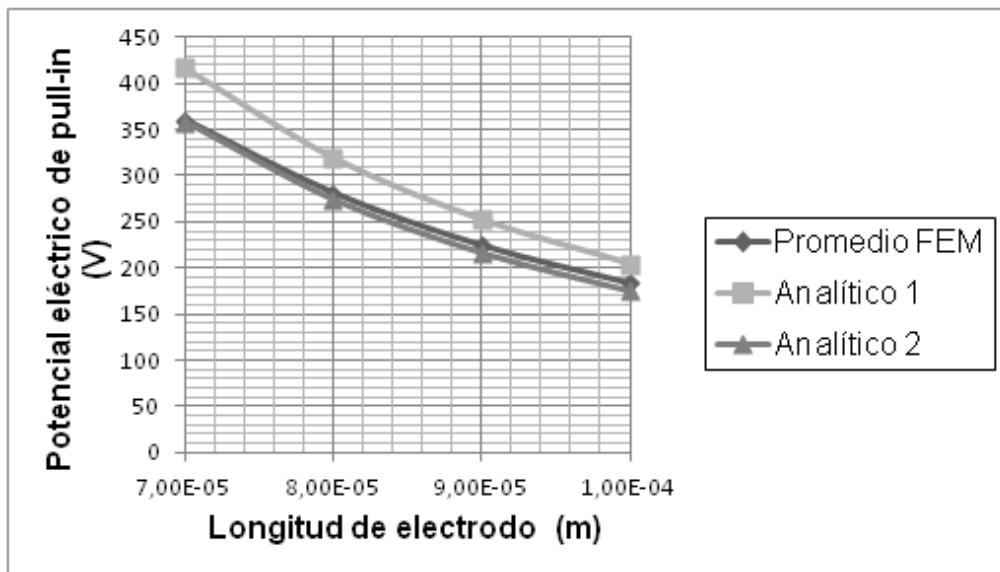


Figura 7.2. Gráfico comparativo de Potencial de pull-in vs. Longitud de Electrodo, considerando los resultados del análisis mediante elementos finitos y la adaptación de expresiones analíticas. Se considera $E = 169 \text{ GPa}$.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo VII.

Discusión de Resultados.

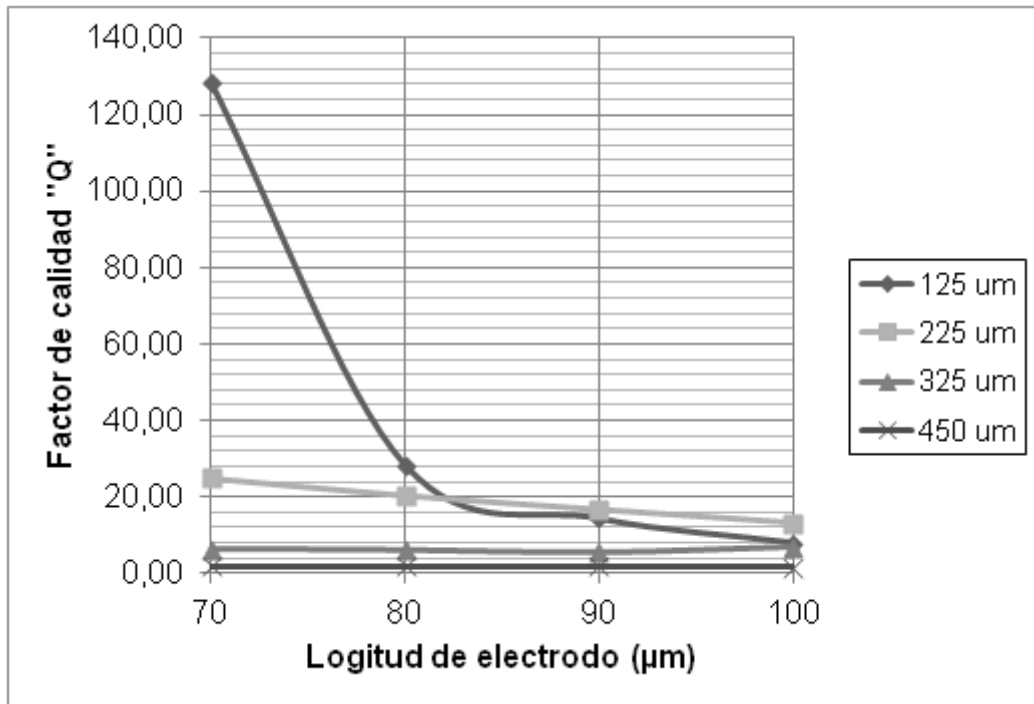


Figura 7.3. Gráfico de factores de calidad como función de la longitud de electrodo de accionamiento para vigas de 125 µm, 225 µm, 325 µm y 450 µm de longitud. Se considera $E = 130 \text{ GPa}$.

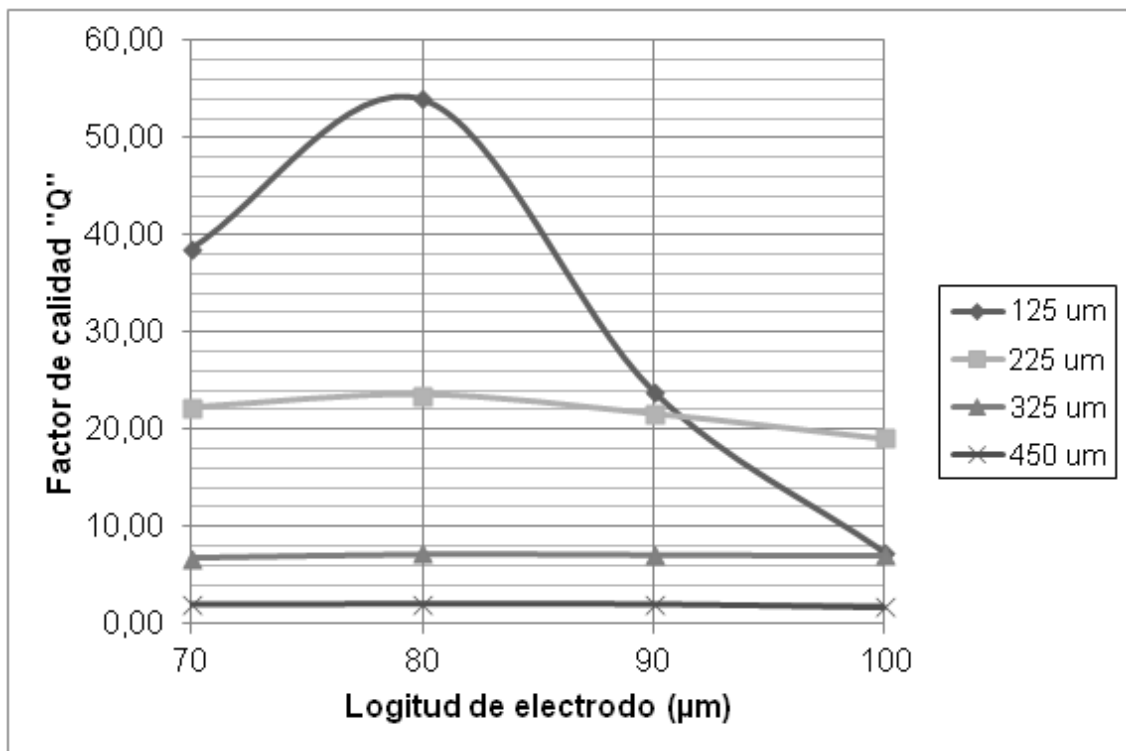


Figura 7.4. Gráfico de factores de calidad como función de la longitud de electrodo de accionamiento para vigas de 125 µm, 225 µm, 325 µm y 450 µm de longitud. Se considera $E = 169 \text{ GPa}$.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo VII.

Discusión de Resultados.

Como se ilustra en las figuras 7.3 y 7.4, 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 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. Asimismo, en todo momento los factores de calidad son mayores que la unidad, aumentando en inversa proporción con el incremento de la longitud del electrodo, lo que corrobora que a mayor superficie, mayor amortiguamiento.

En el mismo orden de ideas, los factores de calidad obtenidos de las simulaciones, para las microvigas de 225 μm , se encuentran cercanos al rango obtenido en microvigas para aplicaciones de AFM de alta velocidad en aire, comprendido entre 13 y 21 [94]. Por otro lado, en las microvigas de 325 μm y 450 μm , los factores de calidad se asemejan a los valores obtenidos en microvigas con su punta incorporada [8], aplicado a muestras biológicas (en fase acuosa). Esto significa que los resultados de las simulaciones se aproximan a valores experimentales obtenidos en experiencias reales, bajo condiciones distintas, como lo son el medio presente y el método de accionamiento.

Todos los resultados ya mencionados, obtenidos de las simulaciones, provienen de modelos basados en las reglas de fabricación descritas en el capítulo VI. 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, que se presentan en el apéndice

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo VII.

Discusión de Resultados.

B, muestran una clara cercanía entre los resultados experimentales y las simulaciones hechas mediante elementos finitos, considerando un módulo de elasticidad de 130 GPa. Con respecto a las consideraciones de módulo de elasticidad, 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 7.5.

En el mismo orden de ideas, y considerando las características del proceso de fabricación Pianoforte, 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 7.5). En este sentido, el valor de módulo de elasticidad a considerar (considerando al material isótropo) debe ser 169 GPa [95].

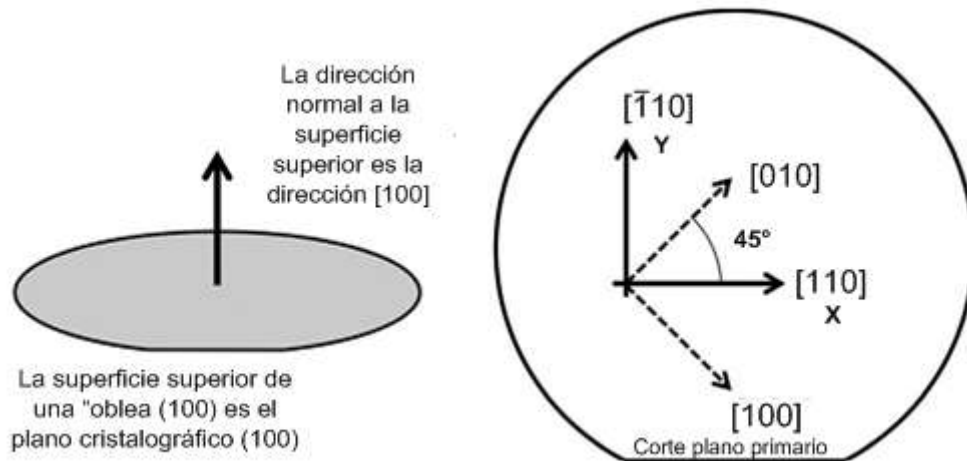


Figura 7.5. Orientación cristalográfica en obleas de silicio. Los ejes X e Y se encuentran en las direcciones $\langle 110 \rangle$. (a) Orientación de una oblea (100). (b) Direcciones y ejes en una oblea (100). Adaptado de [95]

Al considerar 169 GPa como el módulo de elasticidad en la obtención de los gráficos deflexión-potencial eléctrico, se observa que la discrepancia existente con los gráficos experimentales es mayor que la correspondiente al emplear un módulo de 130 GPa. Las discrepancias, sin embargo, 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.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo VII.

Discusión de Resultados.

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 7.6).

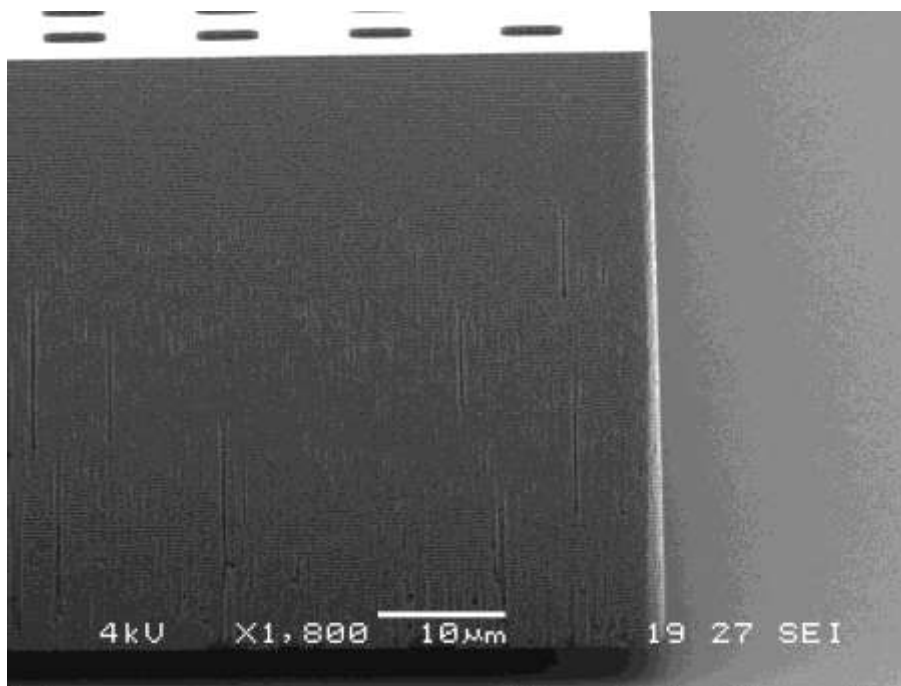


Figura 7.6. Vista de una muestra del proceso de fabricación Pianoforte, donde se evidencia el acabado superficial. Obtenido mediante un Microscopio SEM. Tomado por Dr. Léon Woldering, Universidad de Twente.

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. Mientras que para las microvigas de 325 μm , se obtiene información útil para solo una longitud de electrodo.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo VII.

Discusión de Resultados.

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 evaluadas, 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 un menor efecto de la amortiguación por película comprimida, que el presentado por 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) en un AFM, 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 (situación común en un AFM), 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. En este sentido, para analizar el posible efecto de la deflexión sobre la oscilación de la viga, en el apéndice C se presentan los gráficos de fuerza aplicada contra desplazamiento (del extremo libre de la viga), resultantes al integrar la presión ejercida por el campo eléctrico sobre la superficie actuada, considerando los modelos basados en elementos finitos.

De los gráficos fuerza contra desplazamiento, se determina una “rigidez” o constante elástica equivalente para la viga, en una posición de flexión dada. En los gráficos, comprendidos desde C.1 hasta C.8, se observa que la relación entre las variables involucradas es no lineal. Si se define como constante elástica equivalente a la derivada

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo VII.

Discusión de Resultados.

en cualquier punto del gráfico de fuerza, con respecto al desplazamiento, entonces puede afirmarse que dicha constante elástica en todos los modelos se comporta de forma no lineal y adicionalmente aumenta (y de forma más significativa), a medida que se emplean electrodos de mayor longitud. Esto pudiera interpretarse como que, mientras mayor es la longitud del electrodo, mayor es el valor de frecuencia a la que se debe someter la viga para alcanzar la condición de resonancia. En pocas palabras, la viga flectada se hace más “rígida”.

En el mismo orden de ideas, si se aproximan los gráficos de fuerza contra desplazamiento del apéndice C a modelos lineales, entonces se obtienen constantes elásticas equivalentes bajas, en los órdenes mostrados en la tabla 7.1. Estas constantes contrastan con aquellos valores obtenidos teóricamente mediante expresiones analíticas, y por lo tanto es necesario recomendar que estos valores sean considerados solamente como elemento de valoración del efecto del accionamiento sobre la respuesta de las vigas al ser sometidas a movimientos oscilatorios.

Tabla 7.1. Constantes elásticas equivalentes obtenidas mediante elementos finitos.

Longitud Viga (μm)	Longitud Electrodo (μm)	Constante equivalente (N/m)	
		E = 130 GPa	E = 169 GPa
125	70	$8,5 \cdot 10^{-3}$	$6,2 \cdot 10^{-3}$
	80	$10,4 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$
	90	$12,7 \cdot 10^{-3}$	$9,8 \cdot 10^{-3}$
	100	$15,1 \cdot 10^{-3}$	$11,5 \cdot 10^{-3}$
225	70	$16,6 \cdot 10^{-3}$	$12,8 \cdot 10^{-3}$
	80	$20,8 \cdot 10^{-3}$	$16 \cdot 10^{-3}$
	90	$25,4 \cdot 10^{-3}$	$19,7 \cdot 10^{-3}$
	100	$30,6 \cdot 10^{-3}$	$23,6 \cdot 10^{-3}$
325	70	$24,8 \cdot 10^{-3}$	$19 \cdot 10^{-3}$
	80	$31,4 \cdot 10^{-3}$	$24,1 \cdot 10^{-3}$
	90	$38,1 \cdot 10^{-3}$	$29,6 \cdot 10^{-3}$
	100	$46,2 \cdot 10^{-3}$	$35,6 \cdot 10^{-3}$
450	70	$35,6 \cdot 10^{-3}$	$27,3 \cdot 10^{-3}$
	80	$44,9 \cdot 10^{-3}$	$34,4 \cdot 10^{-3}$
	90	$55,1 \cdot 10^{-3}$	$42,5 \cdot 10^{-3}$
	100	$66 \cdot 10^{-3}$	$50,8 \cdot 10^{-3}$

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo VII.

Discusión de Resultados.

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 $7 \mu\text{m}$. Para separaciones inferiores a $7 \mu\text{m}$, el gráfico resultante (figura 6.17), describe una tendencia creciente del potencial con el decremento del producto $p.d$, mientras que para separaciones superiores a $7 \mu\text{m}$, existe una tendencia creciente con el incremento de $p.d$.

El gráfico 6.17 se asemeja al obtenido por Chen y colaboradores [96] 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 6.18). 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.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo VII.

Discusión de Resultados.

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, la zona segura de accionamiento de las microvigas cortará una mayor región de potencial eléctrico en la medida que se trabajen con electrodos de menor tamaño, como es el caso del electrodo de 70 μm de longitud.

Sobre la base de los resultados de las experiencias discutidas, es importante hacer una síntesis de consideraciones a seguir al momento de llevar a cabo diseños de microvigas parcialmente accionadas mediante una diferencia de potencial, en su estudio para posibles y futuras aplicaciones de AFM. Las consideraciones se explican a continuación.

7.1 Límites de flexión

Es de notar que la máxima deflexión desarrollada en la microviga como consecuencia del potencial de actuación influye sobre el máximo desplazamiento que puede describir la punta de la viga al recorrer el perfil de una muestra.

De acuerdo con lo planteado en el presente trabajo, puede manejarse tres planteamientos para el accionamiento de la viga: en el primero (accionamiento superior) se ubica un electrodo de accionamiento por encima de la viga, en el segundo (accionamiento inferior), el electrodo se ubica por debajo de la viga y en el tercero (doble accionamiento), se emplean dos electrodos. Cada caso, así como sus características, se muestran en la figura 7.7.

En los casos de accionamiento mediante un electrodo, en principio se cuenta con una forma sencilla de flectar la viga, pero hay que tener en cuenta que la viga es deformada solo por una fuerza de atracción que la atrae hacia el electrodo, y para que sea flectada en sentido contrario, debe inhibirse la fuerza de atracción, quedando solo el efecto de la fuerza elástica de reposición asociada a la rigidez de la viga, sobre la que no se tiene control. Esto puede ser un inconveniente en el caso cuando sobre la viga existan fuerzas de magnitud considerables como consecuencia de la interacción punta-muestra.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo VII.

Discusión de Resultados.

En el caso del accionamiento mediante dos electrodos, existe mayor complejidad pues es requerida la conmutación de señal al no ser posible operar ambos electrodos a la vez. En consecuencia, lograr un accionamiento efectivo en casos como el modo dinámico puede ser un inconveniente. Esto hace necesario establecer restricciones en el modo de operación del accionamiento, lo que se traduciría en la reducción del alcance en la flexión.

A pesar de lo antes mencionado, como en el presente trabajo no ha sido propósito profundizar en los detalles electrónicos asociados con el accionamiento, en una primera etapa es necesario tener en cuenta los aspectos mostrados en la figura 7.7, los cuales apoyados con las ecuaciones 2.17 y 2.18, permitirán llevar a cabo el planteamiento del modelo a analizar mediante elementos finitos.

Con el modelo en elementos finitos, es posible establecer premisas asociadas al accionamiento, como por ejemplo: límites de potencial eléctrico y límites de flexión. Estas premisas son de importancia al momento de efectuar pruebas de las muestras en laboratorio.

Además es importante hacer la acotación que el análisis en elementos finitos se convierte en una herramienta bastante útil en los casos que se establezcan modificaciones en la geometría de las vigas, producto de un proceso de optimización, que resulte en geometrías complejas que salgan de las formas básicas que normalmente contemplan los modelos analíticos.

7.2 Límites de oscilación

Para el caso de una viga que oscilará de forma permanente a una frecuencia dada, en su diseño es necesario tener conocimiento de los modos de oscilación de la viga.

Para tener una primera estimación de los modos de oscilación, es recomendable hacer uso de la ecuación 3.11. Luego, es necesario llevar a cabo un análisis de frecuencias de los modos propios mediante el método de los elementos finitos para conocer la forma

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo VII.

Discusión de Resultados.

que adquiere la viga en sus modos propios, ya que esto puede influir sobre la calidad del sensado de la punta de la viga.

En el mismo orden de ideas, como la viga debe operar en un medio que produce amortiguación sobre su cuerpo en movimiento, es necesario estimar el factor de calidad, producto de la interacción de la viga con el electrodo que la actúa y con el medio que la rodea. Para llevar a cabo la estimación, el planteamiento de un análisis transitorio en el dominio temporal basado en elementos finitos, permite obtener información relacionada con el amortiguamiento (frecuencia amortiguada y factor de amortiguamiento), obteniéndose en consecuencia valores aproximados de Q . Y por lo tanto, estimar el factor de calidad permite la rectificación del diseño de las microestructuras, como paso previo al diseño de máscaras y su posterior construcción.

Sin embargo, partiendo del hecho que el análisis mediante elementos finitos arroja premisas para el diseño, también es primordial llevar a cabo experiencias en laboratorio con las cuales sea posible tener una mejor idea del comportamiento de la viga en ciertos medios como aire o vacío.

7.3 Ruptura dieléctrica

Finalmente, luego de las etapas preliminares de diseño, pero durante la definición de las máscaras, es importante considerar la inclusión de muestras con las cuales sea posible llevar a cabo ensayos para determinación de potenciales de rupturas que permitan el planteamiento de potenciales de operación seguros o zonas seguras de trabajo en las estructuras.

Asimismo, es necesario tener en consideración el efecto que puede tener, la aplicación de potenciales eléctricos en las vigas y electrodos de actuado, sobre una posible muestra que sea analizada por la microviga en movimiento.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Capítulo VII.

Discusión de Resultados.

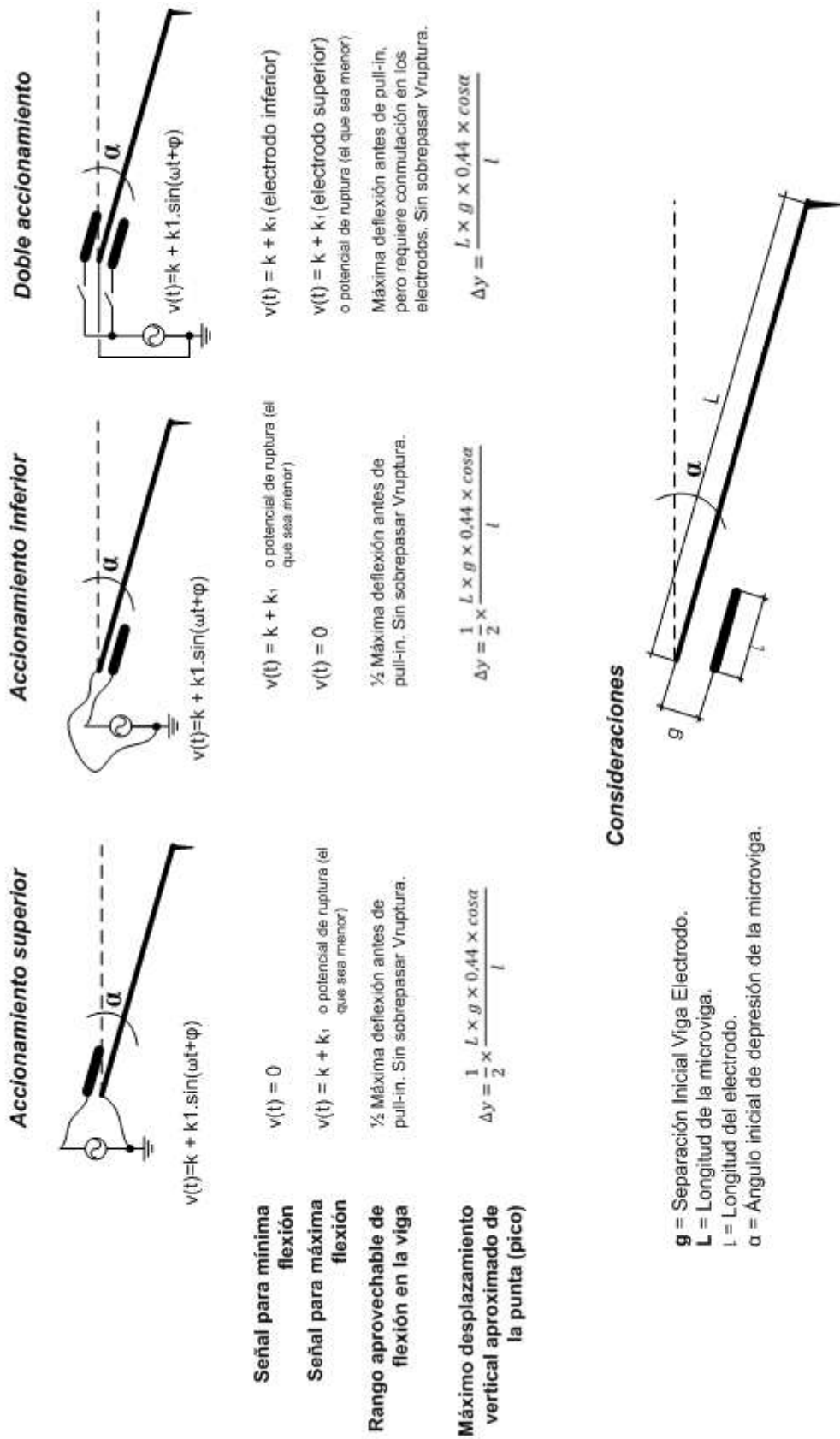


Figura 7.7. Límites a considerar al actuar la microviga.

Conclusiones

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Conclusiones

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 su consideración en Microscopía de Barrido de sonda (SPM), 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, con el cual es posible hacer estudios que consideren el efecto entre la punta (sonda) en el extremo libre de la viga, y la muestra barrida.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Conclusiones

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.

Las máscaras diseñadas se basaron en los modelos simulados mediante el método de los elementos finitos. Asimismo, estas máscaras fueron aplicadas en el proceso de fabricación Pianoforte, el cual arrojó como resultado, una serie de muestras que luego de ser sometidas a los ensayos experimentales, llevan a las siguientes afirmaciones:

- El potencial eléctrico máximo recomendado entre dos estructuras que se enfrentan no debe ser superior a 300 V. Este es un límite a considerar para la operación del arreglo viga-electrodo, pero que muy bien pudiera cambiar al trabajar cercano a una muestra analizada.
- Las microvigas, por efecto de la amortiguación por película comprimida de aire (Squeeze film damping), presentan valores de factor de calidad (Q), superiores a 10, que no alcanzan altos valores como 100, y por lo tanto no proporcionan mejoras potenciales en la sensibilidad de la respuesta de un AFM.
- 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.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Conclusiones

- En todo caso las vigas diseñadas y actuadas mediante una diferencia de potencial eléctrico, alcanzaron flexiones superiores a 1 μm , correspondiente a un tercio de la separación inicial existente entre la viga y el electrodo.
- Las vigas de longitudes de 325 μm y 450 μm , presentaron picos de resonancia, para valores de frecuencias amortiguadas, comprendidos alrededor de 34 kHz y 18,5 kHz respectivamente.
- Se logra el accionamiento de microvigas construidas en “el plano”, que se caracterizan por contar con una fase de diseño simple

En el mismo orden de ideas, una vez obtenidos los resultados de los ensayos experimentales, y al compararlos con las simulaciones en elementos finitos, es válido afirmar lo siguiente:

- El análisis paramétrico mediante elementos finitos, arroja los valores de flexión en la viga más cercanos a los obtenidos experimentalmente, al plantear la isotropía del material con un módulo de elasticidad de 130 GPa.
- El análisis de frecuencias propias, arroja resultados, para las frecuencias de primer modo de oscilación, que se aproximan mejor a las frecuencias amortiguadas determinadas experimentalmente, tomando como referencia las experiencias para las microvigas de 325 μm y 450 μm , solamente.
- El análisis transitorio basado en elementos finitos, arroja información valiosa que permite estimar el tipo de respuesta en el tiempo que se obtendrá en la estructura (sobreamortiguada, subamortiguada, críticamente amortiguada). Sin embargo, dado que el tipo de respuesta esperada normalmente es del tipo subamortiguada, entonces, este análisis solamente arrojó estimaciones del factor de calidad muy inferiores a los obtenidos experimentalmente. Por lo tanto, es recomendable una mejor definición del modelo en lo que respecta a consideraciones de amortiguación.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Conclusiones

Es por ello que el presente trabajo, plantea una serie de experiencias y deja algunos lineamientos a considerar al momento de plantearse el diseño de microvigas actuadas por un potencial eléctrico. Sin embargo, es necesario hacer mayor énfasis en los ensayos donde se someta a oscilaciones las vigas, con la finalidad de obtener mayor información del comportamiento dinámico de las mismas. Asimismo, el planteamiento de nuevos diseños optimizados, será esencial en la obtención de microvigas que pueda operar a frecuencias de resonancia superiores sin que esto represente una merma considerable en la capacidad del método de actuado.

Finalmente, para desarrollos futuros de microvigas, orientados hacia eventuales aplicaciones de SPM y/o AFM, es necesario tener en cuenta los resultados obtenidos en el presente trabajo. Es importante también trabajar en la construcción de las puntas ubicadas en el extremo libre de la microviga para tener una valoración más precisa del desempeño de la microviga.

Referencias

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Referencias

Referencias

- 1.- Blanchard C. (1996). Atomic Force Microscopy. The Chemical Educator. Springer-Verlag New York, Inc. Vol. 1. N° 5. pp.1-8.
- 2.- Lin S., Chen J.-L., Huang L.-S. y Lin H.-W. (2005). Measurements of the Forces in Protein Interactions with Atomic Force Microscopy. Current Proteomics. Vol. 2. N° 1. pp. 55-81.
- 3.- Fung R.-F. y Huang S.-C. (2001). Dynamic Modeling and Vibration Analysis of the Atomic Force Microscope. Journal of Vibration and Acoustics. Vol. 123. N° 4. p.502.
- 4.- Colton R. (2004). Nanoscale measurement and manipulation. Journal of Vacuum Science and Technology B. Vol. 22. N° 4. pp.1609-1635.
- 5.- Nader JaliliN. y Laxminarayana K. (2004). A review of atomic force microscopy imaging systems: application to molecular metrology and biological sciences. Mechatronics. Vol. 14. N° 8. pp.907-945.
- 6.- Bushan B. (2007). Springer Handbook of Nanotechnology. Springer. Segunda Edición. Nueva York.
- 7.- Mahdavi M.H., Farshidianfar A., Tahani M., Mahdavi S. y Dalir H. (2008). A more comprehensive modeling of atomic force microscope cantilever. Ultramicroscopy. Vol. 109. pp. 54-60.
- 8.- Ando T., Uchihashi T. y Fukuma T. (2008). High-speed atomic force microscopy for nano-visualization of dynamic biomolecular processes. Progress in Surface Science. Vol. 83. pp. 337-437.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Referencias

- 9.- Han W., Lindsay S y Jing T. (1996). A magnetically driven oscillating probe microscope for operation in liquids. *Applied Physics Letters*. Vol. 69. pp.4111-4113.

- 10.- Jayanth G., Jeong Y y Menq C.-H. (2006). Direct tip-position control using magnetic actuation for achieving fast scanning in tapping mode atomic force microscopy. *Review of Scientific Instruments*. Vol. 77.

- 11.- Degertekin F., Hadimioglu B., Sulchek T y Quate C. (2001). Actuation and characterization of atomic force microscope cantilevers in fluids by acoustic radiation pressure. *Applied Physics Letters*. Vol. 78. pp.1628-1630.

- 12.- Onaran A., Degertekin F y Hadimioglu B. (2002). Tapping mode and elasticity imaging in liquids using an atomic force microscope actuated by acoustic radiation pressure. *Applied Physics Letters*. Vol. 80. pp.4063-4065.

- 13.- Onaran A y Degertekin F. (2005). A fluid cell with integrated acoustic radiation pressure actuator for atomic force microscopy. *Review of Scientific Instruments*. Vol. 76. p.103703.

- 14.- 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. N° 3. pp. 276-283.

- 15.- Lee H.-S, Leung C.H., Shi J., Chang S.-C., Lorincz S. y Nedelescu L. (2002). Integrated microrelays: concept and initial results. *Journal of Microelectromechanical Systems*. Vol. 11. N° 2. pp. 147-153.

- 16.- Toshiyoshi H. y Fujita H. (1996). Electrostatic microtorsion mirrors for optical switch matrix. *Journal of Microelectromechanical Systems*. Vol. 5. N° 4. pp. 231-237.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Referencias

- 17.- Fischer M., Giousouf M., Schaepperle D., Eichner M., Weinmann M., von Münch W y Assmus F. (1998). Electrostatically deflectable polysilicon micromirrors – dynamic behaviour and comparison with the results from FEM modeling with Ansys. *Sensors and Actuators A*. Vol. 67. N° 1-3. pp. 89-95.
- 18.- Akiyama T., Staufer U. y de Rooij N. (2000). Atomic force microscopy using an integrated comb-shape electrostatic actuator for high-speed feedback motion. *Applied Physics Letters*. Vol. 76. N° 21.
- 19.- Arias, F.(2004). *El Proyecto de Investigación. Introducción a la metodología científica*. Venezuela. Editorial Episteme.
- 20.- Yao Z., Chen S., Eshelman S., Denniston D. y Goldsmith C. (1999). Micromachined low-loss microwave switches. *Journal of Microelectromechanical Systems*. Vol. 8. N° 2. pp. 129-134.
- 21.- 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. N° 3. pp. 276-283.
- 22.- 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.
- 23.- Spangler L. y Kemp C.J. (1995). ISAAC: Integrated Silicon Automotive Accelerometer. *Solid-State Sensors and Actuators*, 1995. Vol. 1. pp. 585-588.
- 24.- Saif M.T.A., Alaca B.E. y Sehitoglu H. (1999). Analytical modeling of electrostatic membrane actuator for micro pumps. *Journal of Microelectromechanical Systems*. Vol. 8. N° 3. pp. 335-345.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Referencias

- 25.- 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*. Vol. 11. N° 3. pp. 222-235.
- 26.- Toshiyoshi H. y Fujita H. (1996). Electrostatic microtorsion mirrors for optical switch matrix. *Journal of Microelectromechanical Systems*. Vol. 5. N° 4. pp. 231-237.
- 27.- 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*. Vol. 10. N° 2. pp. 205–214.
- 28.- Wang P.K.C., Gutierrez R.C. y Bartman R.K. (1996). A method for designing electrostatic-actuator electrode pattern in micromachined deformable mirrors. *Sensors and Actuators A*. Vol. 55. N° 2-3. pp. 211-217.
- 29.- Wang, P.K.C. y Hadaegh, F.Y. (1996). Computation of static shapes and voltages for micromachined deformable mirrors with nonlinear electrostatic actuators. *Journal of Microelectromechanical Systems*. Vol. 5. N° 3. pp.205 – 220.
- 30.- Buhler J., Funk J., Korvink J.G., Steiner F.-P., Sarro P.M. y Baltes H. (1997). Electrostatic aluminum micromirrors using double-pass metallization. Vol. 6. N° 2. pp. 126 – 135.
- 31.- Fischer M., H. Graef H. y von Münch W. (2001). Electrostatically deflectable polysilicon torsional mirrors. *Sensors and Actuators A: Physical*. Vol. 44. N° 1. p.p. 83-89.
- 32.- Schenk H., Durr P., Kunze D., Lakner H. y Kuck H. (2000). An electrostatically excited 2D-micro-scanning-mirror with an in-plane configuration of the driving electrodes. *The Thirteenth Annual International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2000. MEMS 2000*. p.p.473–478.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Referencias

- 33.- Nemirovsky Y. y Bochobza-Degani O. (2001). Methodology and model for the pull-in parameters of electrostatic actuators. *Journal of Microelectromechanical Systems*. Vol. 10. N° 4. pp. 601–615.
- 34.- Li G. y Aluru N.R.(2002). A Lagrangian approach for electrostatics analysis of deformable conductors. *Journal of Microelectromechanical Systems*. Vol. 11. N° 3. pp. 245–254.
- 35.- Aluru N.R y White J. (1999). A multilevel Newton method for mixed-energy domain simulation of MEMS. *Journal of Microelectromechanical Systems*. Vol. 8. N° 3. pp. 299–308.
- 36.- 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*. Vol. 44, N° 6-7. pp. 401-416.
- 37.- Wang P. (2010). Modeling material responses by arbitrary Lagrangian Eulerian formulation and adaptive mesh refinement method. *Journal of Computational Physics*. Vol. 229. N° 5. pp. 1573-1599.
- 38.- Senturia S.D. (2001). *Microsystems Design*. Kluwer Academic. Dordrecht.
- 39.- Nadal-Guardia R., Dehe A., Aigner R. y Castaner L.M. (2002). Current drive methods to extend the range of travel of electrostatic microactuators beyond the voltage pull-in point. *Journal of Microelectromechanical Systems*. Vol. 11. N° 3. pp. 255–263.
- 40.- 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. ASME, NewYork. pp.19–26.*

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Referencias

- 41.- Choi B. y Lovell E.G. (1997). Improved analysis of microbeams under mechanical and electrostatic loads. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. Vol. 7. N° 1. pp. 24–29.
- 42.- Hung E.S y Senturia S.D. (1999). Generating efficient dynamical models for microelectromechanical systems from a few finite-element simulation runs. *Journal of Microelectromechanical Systems*. Vol 8. N° 3. pp. 280–289.
- 43.- Hung E.S. Senturia S.D. (1999). Extending the Travel Range of Analog-Tuned Electrostatic Actuators. *Journal of Microelectromechanical Systems*. Vol. 8. N° 4.
- 44.- 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. *Proceeding of the 47th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Montreal 2001*. IEEE, Piscataway. pp.245–250.
- 45.- Torres J.-M. y Dhariwal R.S. (1999). Electric field breakdown at micrometre separations in air and vacuum. *Microsystem Technologies*. Vol. 6. pp.6-10.
- 46.- Longwitz R., van Lintel H., Carr R., Hollenstein C. y Renaud P. (2001). Study of gas ionization schemes for microdevices. *Proceedings of Transducers '01, Eurosensors XV, The 11th International Conference of Solid-State Sensors and Actuators*. Munich. Springer, Berlin Heidelberg. NewYork. pp.1258–1261.
- 47.- Davies D.K. y Biondi M.F. (1966). Vacuum breakdown between plane-parallel copper plates. *Journal of Applied Physics*. Vol. 37. N° 8. pp.2969–2977.
- 48.- Ono T., Sim D.Y. y Esashi M. (2000). Micro-discharge and electric breakdown in a micro-gap. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. Vol. 10. N° 3. pp.445–451.
- 49.- Bao M. y Yang H. (2007). Squeeze film air damping in MEMS. *Sensors and Actuators A: Physical*. Vol. 136. N° 1. pp.3-27.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPÍA DE BARRIDO (SPM)

Referencias

- 50.- 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*. Vol. 48. pp.1-4.
- 51.- 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*. Vol. 9. pp.3854-3874.
- 52.- 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.
- 53.- Nouira 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*. Vol. 305. pp.243-260.
- 54.- Langlois W.E. (1962). Isothermal squeeze films. *Quarterly of Applied Mathematics* XX. Vol. 2. pp.131-150.
- 55.- Gross W.A., Matsch L.A., Castelli V., Eshel A., Vohr M. y Wildmann M. (1980). *Fluid Film Lubrication*. John Wiley & Sons. New York.
- 56.- White F.M. (1974). *Viscous Fluid Flow*. McGraw-Hill. New York.
- 57.- Veijola T., Pursula A. y Raback P. (2005). Extending the validity of existing squeeze film damper models with elongations of surface dimensions. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. Vol. 15. N° 9. p.1264.
- 58.- Hall N., Okandan M., Littrell R., Bicen B. y Levent F. (2008). Simulation of Thin-Film Damping and Thermal Mechanical Noise Spectra for Advanced Micromachined

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Referencias

Microphone Structures. Journal of Microelectromechanical Systems. Vol. 17. N° 3. pp.688-697.

59.- Mohite S., Sonti V. y Pratap R. (2008). A Compact Squeeze-Film Model Including Inertia, Compressibility, and Rarefaction Effects for Perforated 3-D MEMS Structures. Journal of Microelectromechanical Systems. Vol. 17. N° 3. pp.709-723.

60.- Voigt P., Schrag G., König E.-R. Y Wachutka G. (1998). Modeling Strategies for Microsystems. Technical Proceedings of the 1998 International Conference on Modeling and Simulation of Microsystems. pp.517-521.

61.- Voigt P., Schrag G. y Wachutka G. (1998). Microfluidic system modeling using VHDL-AMS and circuit simulation. Microelectronics Journal. Vol. 29. N° 11. pp.791-797.

62.- Schrag G. y Wachutka G. (2001). Squeeze film damping in arbitrary shaped microdevices modeled by an accurate mixed level scheme. Proceedings of the Fourth International Conference on Modeling and Simulation of Microsystems (MSM 2001). Hilton Fead Island. pp.92-95.

63.- Schrag G. y Wachutka G. (2002). Physically based modeling of squeeze film damping by mixed-level system simulation. Sensors and Actuators A: Physical. Vol. 97-98. pp.193-200.

64.- Schrag G. y Wachutka G. (2004). Accurate system-level damping model for highly perforated micromechanical devices. Sensors and Actuators A: Physical. Vol. 111. N°2-3. pp.222-228.

65.- 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. Vol. 13. N° 6.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Referencias

- 66.- 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. pp.296-301.
- 67.- 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. Vol. 51. N° 4. pp.424-434.
- 68.- Sader J., Chon J. y Mulvaney P. (1999). Calibration of rectangular atomic force microscope cantilevers. Review of Scientific Instruments. Vol. 70. N° 10. p.3967.
- 69.- Nader N., Mohsen D. y Dawson D. (2004). A Fresh Insight Into the Microcantilever-Sample Interaction Problem in Non-Contact Atomic Force Microscopy. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. Vol. 126. N° 2. p. 327.
- 70.- Ashhab M., Salapaka M.V., Dahleh M. y Mezic I. (1999). Dynamical analysis and control of microcantilevers. Automatica. Vol. 35. N° 10. pp. 1663-1670.
- 71.- Rabe U., Janser K. y Arnold W. (1996). Vibrations of free and surface-coupled atomic force microscope cantilevers: Theory and experiment. Review of Scientific Instruments. Vol. 67. N° 9. pp.3281-3293.
- 72.- Turner J., Hirsekorn S., Rabe U. y Arnold W. (1997). High-frequency response of atomic-force microscope cantilevers. Journal of Applied Physics. Vol. 82. N° 3. p.967.
- 73.- Turner J. y Wiehn J. (2001). Sensitivity of flexural and torsional vibration modes of atomic force microscope cantilevers to surface stiffness variations. Nanotechnology. Vol. 12. N° 3. p.322.
- 74.- Chang W.-J. (2002). Sensitivity of vibration modes of atomic force microscope cantilevers in continuous surface contact. Nanotechnology. Vol. 13. N° 4. p.510.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Referencias

- 75.- Rabe U., Turner J. y Arnold W. (1998). Analysis of the high- frequency response of atomic force microscope cantilevers. *Journal of Applied Physics A*. Vol. 66. pp.277-282.
- 76.- Mahdavi M.H., Farshidianfar A. y Dalir H. (2006). High frequency analysis of a non-contact atomic force microscopy micro-cantilever. *Proceedings of the 14th Annual International Conference of Mechanical Engineering*. Vol. 5. Isfahan, Iran. pp.1-11.
- 77.- Zhonga Q., Innissa D., Kjollerb K. y Elings V.B. (1993). Fractured polymer/silica fiber surface studied by tapping mode atomic force microscopy. *Surface Science*. Vol. 290. N° 1-2. pp. L688-L692.
- 78.- Tamayo J. y García R. (1996). Deformation, Contact Time, and Phase Contrast in Tapping Mode Scanning Force Microscopy. *Langmuir*. Vol. 12. N° 18. pp.4430-4435.
- 79.- Cleveland J.P., Anczykowski B., Schmid A.E. Y Elings V.B. (1998). Energy dissipation in tapping-mode atomic force microscopy. *Applied Physics Letters*. Vol. 72. N° 20. pp,2613-2615.
- 80.- Bar G., Thomann Y., Brandsch R. y H.-J. Cantow. (1997). Factors Affecting the Height and Phase Images in Tapping Mode Atomic Force Microscopy. Study of Phase-Separated Polymer Blends of Poly(ethene-co-styrene) and Poly(2,6-dimethyl-1,4-phenylene oxide). *Langmuir*. Vol. 13. pp.3807-3812.
- 81.- Albrecht T.R., Grütter P., Horne D. y Rugar D. (1991). Frequency modulation detection using high-Q cantilevers for enhanced force microscope sensitivity. *Journal of Applied Physics*. Vol. 69. N° 2. pp. 668-673.
- 82.- Giessibl F. (1995). Atomic Resolution of the Silicon (111)-(7x7) Surface by Atomic Force Microscopy. *Science*. Vol. 267. N° 5194. pp.68-71.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Referencias

- 83.- Butt H.-J., Siedle P., Seifert K., Fendler K., Seeger T., Bamberg E., Weisenhorn A.L., Goldie K. y Engel A. (1993). Scan speed limit in atomic force microscopy. *Journal of Microscopy*. Vol. 169. pp.75-84.
- 84.- Viani M., Schäffer T., Chand A., Rief M., Gaub H. y Hansma P. (1999). Small cantilevers for force spectroscopy of single molecules. *Journal of Applied Physics*. Vol. 86. N° 4. pp.2258-2262.
- 85.- Young W. y Budynas R. (2002). *Roark's Formulas for Stress and Strain*. Seventh Edition. McGraw-Hill. pp6, 8-12, 125, 169-170, 189, 191.
- 86.- 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*, Vol. 6, No. 2.
- 87.- Elmer F y Dreier M. (1997). Eigenfrequencies of a rectangular atomic force microscope cantilever in a medium. *Journal of Applied Physics*. Vol. 81. No. 12. pp.7709-7714.
- 88.- COMSOL Multiphysics ® (2008). *COMSOL Multiphysics Modeling Guide*.
- 89.- Kumar A. and Pratap R. (2004). Coupled nonlinear effects of surface roughness and rarefaction on squeeze film damping in MEMS structures. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 14. pp1430-1437.
- 90.- Arkilic E., Breuer K. and Schmidt M. (2001). Mass flow and tangential momentum accommodation in silicon micromachined channels. *Journal of Fluids Mechanics*. Vol. 437, pp.29-43.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Referencias

- 91.- Jang J, Zhao Y. and 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. pp.287-290.
- 92.- Liu Q.B and Quek S.S. (2003). The Finite Element Method: A Practical Course. Butterworth-Heinemann. pp.5-6.
- 93.- Rodríguez J., Bonilla S. y Ávila A. Electrostatic Breakdown Measurements in Micro Gaps. *rev.ing.* [online]. Jan./June 2009, no.29 [citado el 27 de Diciembre de 2010], p.07-15. 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.
- 94.- Fantner G., Georg Schitter G., Kindt J., Ivanov T., Ivanova K., Patel R., Holten-Andersen N., Adams J., Thurner P., Rangelow I. y Hansma P. (2006). Components for high speed atomic force microscopy. *Ultramicroscopy*. Vol. 106. Pp. 881-887.
- 95.- Hopcroft M., Nix W. y Kenny T. (2010). What is the Young's Modulus of Silicon?. *Journal of Microelectromechanical Systems*. Vol. 19. N° 2. pp 229-238.
- 96.- Chen C., Yeh J y Wang PJ. (2006). Electrical breakdown phenomena for devices with micron separations. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. N°16. pp.1366-1373.

Apéndices

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Apéndice A.

Apéndice A**Tabla con análisis de convergencia aplicado a los modelos estáticos para el análisis mediante Elementos Finitos****Tabla A1. Análisis de convergencia de elementos de malla para microviga de longitud 125µm y electrodo de longitud 70 µm**

Longitud de Microviga (µm)	125			
Longitud de Electrodo (µm)	70			
Elementos	Esfuerzo Von Misses (Pa)	Desplazamiento (m)	Error en esfuerzo (%)	Error en desplazamiento (%)
95	4.918.582,00	1,4455E-07	-	-
133	5.406.391,50	1,3890E-07	9,02	-4,07
190	5.675.459,50	1,3376E-07	4,74	-3,84
209	5.829.239,00	1,2955E-07	2,64	-3,25
323	6.183.744,00	1,2581E-07	5,73	-2,97
399	6.258.157,00	1,2358E-07	1,19	-1,80
551	6.335.637,00	1,2140E-07	1,22	-1,80
950	6.453.036,00	1,2020E-07	1,82	-0,99
1900	6.765.606,00	1,1968E-07	4,62	-0,43

Tabla A.2. Análisis de convergencia de elementos de malla para microviga de longitud 125µm y electrodo de longitud 80 µm

Longitud de Microviga (µm)	125			
Longitud de Electrodo (µm)	80			
Elementos	Esfuerzo Von Misses (Pa)	Desplazamiento (m)	Error en esfuerzo (%)	Error en desplazamiento (%)
76	5.351.098,50	2,0102E-07	-	-
133	7.159.740,50	1,9499E-07	25,26	-3,10
190	7.456.438,00	1,8796E-07	3,98	-3,74
228	7.780.660,00	1,8741E-07	4,17	-0,29
304	8.013.159,50	1,8158E-07	2,90	-3,21
380	8.118.778,50	1,7786E-07	1,30	-2,09
532	8.301.120,50	1,7669E-07	2,20	-0,66
950	8.429.977,00	1,7404E-07	1,53	-1,53
1900	8.828.346,00	1,7336E-07	4,51	-0,39

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)
 Apéndice A.

Tabla A.3. Análisis de convergencia de elementos de malla para microviga de longitud 125 μ m y electrodo de longitud 90 μ m

Longitud de Microviga (μ m)	125			
Longitud de Electrodo (μ m)	90			
Elementos	Esfuerzo Von Misses (Pa)	Desplazamiento (m)	Error en esfuerzo (%)	Error en desplazamiento (%)
95	9.153.391,00	2,9438E-07	-	-
133	9.287.615,00	2,6615E-07	1,45	-10,61
171	9.758.828,00	2,6289E-07	4,83	-1,24
228	9.964.047,00	2,5646E-07	2,06	-2,51
323	10.426.497,00	2,5121E-07	4,44	-2,09
380	10.501.484,00	2,5006E-07	0,71	-0,46
532	10.651.614,00	2,4705E-07	1,41	-1,22
950	10.806.669,00	2,4405E-07	1,43	-1,23
1900	11.305.679,00	2,4317E-07	4,41	-0,36

Tabla A.4. Análisis de convergencia de elementos de malla para microviga de longitud 125 μ m y electrodo de longitud 100 μ m

Longitud de Microviga (μ m)	125			
Longitud de Electrodo (μ m)	100			
Elementos	Esfuerzo Von Misses (Pa)	Desplazamiento (m)	Error en esfuerzo (%)	Error en desplazamiento (%)
95	11.615.868,00	3,8670E-07	-	-
114	11.048.733,00	3,6478E-07	-5,13	-6,01
190	12.608.831,00	3,5990E-07	12,37	-1,36
209	12.868.096,00	3,5321E-07	2,01	-1,89
304	13.183.068,00	3,4568E-07	2,39	-2,18
380	13.467.425,00	3,4551E-07	2,11	-0,05
532	13.555.430,00	3,3947E-07	0,65	-1,78
950	13.736.175,00	3,3601E-07	1,32	-1,03
1900	14.355.737,00	3,3482E-07	4,32	-0,35

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Apéndice A.

Tabla A.5. Análisis de convergencia de elementos de malla para microviga de longitud 225 μ m y electrodo de longitud 70 μ m

Longitud de Microviga (μm)	225			
Longitud de Electrodo (μm)	70			
Elementos	Esfuerzo Von Misses (Pa)	Desplazamiento (m)	Error en esfuerzo (%)	Error en desplazamiento (%)
133	5.076.428,50	2,8286E-07	-	-
190	5.679.824,50	2,6366E-07	10,62	-7,28
209	5.750.622,50	2,5664E-07	1,23	-2,74
323	6.152.703,50	2,4777E-07	6,54	-3,58
399	6.258.618,50	2,4219E-07	1,69	-2,31
551	6.334.004,50	2,3677E-07	1,19	-2,29
950	6.453.036,00	2,3349E-07	1,84	-1,40
1900	6.765.606,00	2,3239E-07	4,62	-0,47

Tabla A.6. Análisis de convergencia de elementos de malla para microviga de longitud 225 μ m y electrodo de longitud 80 μ m

Longitud de Microviga (μm)	225			
Longitud de Electrodo (μm)	80			
Elementos	Esfuerzo Von Misses (Pa)	Desplazamiento (m)	Error en esfuerzo (%)	Error en desplazamiento (%)
76	5.101.693,50	4,6820E-07	-	-
133	6.756.895,50	3,9855E-07	24,50	-17,48
190	7.465.676,00	3,7493E-07	9,49	-6,30
228	7.805.554,50	3,7126E-07	4,35	-0,99
304	8.002.414,00	3,6015E-07	2,46	-3,09
380	8.118.782,50	3,5049E-07	1,43	-2,75
532	8.304.686,50	3,4820E-07	2,24	-0,66
950	8.429.977,00	3,4209E-07	1,49	-1,79
1900	8.828.346,00	3,4063E-07	4,51	-0,43

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)
 Apéndice A.

Tabla A.7. Análisis de convergencia de elementos de malla para microviga de longitud 225µm y electrodo de longitud 90 µm

Longitud de Microviga (µm)	225			
Longitud de Electrodo (µm)	90			
Elementos	Esfuerzo Von Misses (Pa)	Desplazamiento (m)	Error en esfuerzo (%)	Error en desplazamiento (%)
133	8.689.297,00	5,4535E-07	-	-
171	9.485.730,00	5,3558E-07	8,40	-1,82
228	9.970.945,00	5,1440E-07	4,87	-4,12
323	10.393.423,00	5,0691E-07	4,06	-1,48
380	10.490.596,00	4,9900E-07	0,93	-1,58
532	10.651.491,00	4,9291E-07	1,51	-1,24
950	10.804.676,00	4,8568E-07	1,42	-1,49
1900	11.305.138,00	4,8373E-07	4,43	-0,40

Tabla A.8. Análisis de convergencia de elementos de malla para microviga de longitud 225µm y electrodo de longitud 100 µm

Longitud de Microviga (µm)	225			
Longitud de Electrodo (µm)	100			
Elementos	Esfuerzo Von Misses (Pa)	Desplazamiento (m)	Error en esfuerzo (%)	Error en desplazamiento (%)
114	11.076.920,00	7,9116E-07	-	-
190	12.712.379,00	7,4295E-07	12,87	-6,49
209	12.701.082,00	7,2054E-07	-0,09	-3,11
304	13.199.894,00	7,0466E-07	3,78	-2,25
380	13.471.838,00	6,9925E-07	2,02	-0,77
532	13.563.213,00	6,8632E-07	0,67	-1,88
950	13.736.175,00	6,7767E-07	1,26	-1,28
1900	14.355.737,00	6,7499E-07	4,32	-0,40

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Apéndice A.

Tabla A.9. Análisis de convergencia de elementos de malla para microviga de longitud 325 μ m y electrodo de longitud 70 μ m

Longitud de Microviga (μm)	325			
Longitud de Electrodo (μm)	70			
Elementos	Esfuerzo Von Misses (Pa)	Desplazamiento (m)	Error en esfuerzo (%)	Error en desplazamiento (%)
114	3.926.572,50	4,8288E-07	-	-
190	5.088.053,00	4,1520E-07	22,83	-16,30
209	5.214.141,50	4,0184E-07	2,42	-3,32
304	5.684.900,50	3,8121E-07	8,28	-5,41
380	5.977.504,50	3,7262E-07	4,90	-2,31
551	6.256.763,50	3,6086E-07	4,46	-3,26
969	6.377.750,50	3,4868E-07	1,90	-3,49
1919	6.578.597,50	3,4600E-07	3,05	-0,77

Tabla A.10. Análisis de convergencia de elementos de malla para microviga de longitud 325 μ m y electrodo de longitud 80 μ m

Longitud de Microviga (μm)	325			
Longitud de Electrodo (μm)	80			
Elementos	Esfuerzo Von Misses (Pa)	Desplazamiento (m)	Error en esfuerzo (%)	Error en desplazamiento (%)
133	6.201.167,00	6,8970E-07	-	-
171	6.610.619,00	6,1211E-07	6,19	-12,68
228	7.288.459,00	5,8412E-07	9,30	-4,79
323	7.786.477,50	5,5214E-07	6,40	-5,79
399	8.016.696,00	5,4076E-07	2,87	-2,10
551	8.232.419,00	5,3043E-07	2,62	-1,95
969	8.376.509,50	5,1580E-07	1,72	-2,84
1919	7.548.648,50	5,0936E-07	-10,97	-1,27

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)
 Apéndice A.

Tabla A.11. Análisis de convergencia de elementos de malla para microviga de longitud 325µm y electrodo de longitud 90 µm

Longitud de Microviga (µm)	325			
Longitud de Electrodo (µm)	90			
Elementos	Esfuerzo Von Misses (Pa)	Desplazamiento (m)	Error en esfuerzo (%)	Error en desplazamiento (%)
133	8.155.849,00	9,4160E-07	-	-
190	9.245.817,00	8,6504E-07	11,79	-8,85
228	9.459.747,00	8,1440E-07	2,26	-6,22
304	9.882.336,00	7,8953E-07	4,28	-3,15
380	10.218.720,00	7,7043E-07	3,29	-2,48
551	10.626.906,00	7,5677E-07	3,84	-1,80
969	10.711.875,00	7,3154E-07	0,79	-3,45
1919	11.008.904,00	7,2675E-07	2,70	-0,66

Tabla A.12. Análisis de convergencia de elementos de malla para microviga de longitud 325µm y electrodo de longitud 100 µm

Longitud de Microviga (µm)	325			
Longitud de Electrodo (µm)	100			
Elementos	Esfuerzo Von Misses (Pa)	Desplazamiento (m)	Error en esfuerzo (%)	Error en desplazamiento (%)
133	10.694.136,00	1,2867E-06	-	-
190	11.930.028,00	1,1856E-06	10,36	-8,54
209	12.057.914,00	1,1497E-06	1,06	-3,12
323	13.030.328,00	1,0952E-06	7,46	-4,97
399	13.240.460,00	1,0681E-06	1,59	-2,53
551	13.417.927,00	1,0427E-06	1,32	-2,44
969	13.688.295,00	1,0311E-06	1,98	-1,13
1919	13.990.442,00	1,0190E-06	2,16	-1,19

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Apéndice A.

Tabla A.13. Análisis de convergencia de elementos de malla para microviga de longitud 450µm y electrodo de longitud 70 µm

Longitud de Microviga (µm)	450			
Longitud de Electrodo (µm)	70			
Elementos	Esfuerzo Von Misses (Pa)	Desplazamiento (m)	Error en esfuerzo (%)	Error en desplazamiento (%)
190	4.639.434,00	6,6426E-07	-	-
228	4.894.297,00	6,0849E-07	5,21	-9,16
323	5.540.735,00	5,6800E-07	11,67	-7,13
380	5.690.344,00	5,4357E-07	2,63	-4,49
551	6.131.620,00	5,3129E-07	7,20	-2,31
988	6.354.334,50	5,0091E-07	3,50	-6,06
1938	6.492.451,00	4,9009E-07	2,13	-2,21

Tabla A.14. Análisis de convergencia de elementos de malla para microviga de longitud 450µm y electrodo de longitud 80 µm

Longitud de Microviga (µm)	450			
Longitud de Electrodo (µm)	80			
Elementos	Esfuerzo Von Misses (Pa)	Desplazamiento (m)	Error en esfuerzo (%)	Error en desplazamiento (%)
190	6.230.500,00	9,3053E-07	-	-
228	6.576.383,50	8,6759E-07	5,26	-7,25
323	7.321.794,00	8,1399E-07	10,18	-6,59
399	7.711.417,00	7,9698E-07	5,05	-2,13
551	7.987.910,50	7,6497E-07	3,46	-4,18
988	8.313.885,00	7,3612E-07	3,92	-3,92
1938	8.472.483,00	7,2184E-07	1,87	-1,98

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Apéndice A.

Tabla A.15. Análisis de convergencia de elementos de malla para microviga de longitud 450µm y electrodo de longitud 90 µm

Longitud de Microviga (µm)	450			
Longitud de Electrodo (µm)	90			
Elementos	Esfuerzo Von Mises (Pa)	Desplazamiento (m)	Error en esfuerzo (%)	Error en desplazamiento (%)
114	6.329.982,50	1,5468E-06	-	-
190	8.228.032,50	1,2872E-06	23,07	-20,17
209	8.452.750,00	1,2436E-06	2,66	-3,50
304	9.422.747,00	1,1578E-06	10,29	-7,41
380	9.899.709,00	1,1299E-06	4,82	-2,47
551	10.410.311,00	1,0995E-06	4,90	-2,77
969	10.689.956,00	1,0535E-06	2,62	-4,36
1919	10.862.916,00	1,0338E-06	1,59	-1,91

Tabla A.16. Análisis de convergencia de elementos de malla para microviga de longitud 450µm y electrodo de longitud 100 µm

Longitud de Microviga (µm)	450			
Longitud de Electrodo (µm)	100			
Elementos	Esfuerzo Von Mises (Pa)	Desplazamiento (m)	Error en esfuerzo (%)	Error en desplazamiento (%)
190	10.803.035,00	1,7740E-06	-	-
228	11.746.028,00	1,7573E-06	8,03	-0,95
323	12.556.315,00	1,6315E-06	6,45	-7,71
380	12.661.954,00	1,5613E-06	0,83	-4,50
551	13.220.682,00	1,5210E-06	4,23	-2,65
969	13.618.248,00	1,4782E-06	2,92	-2,90
1938	13.847.374,00	1,4565E-06	1,65	-1,50

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPÍA DE BARRIDO (SPM)

Apéndice B.

Apéndice B

Gráficos comparativos de Deflexión como función del potencial aplicado para simulaciones Mediante Elementos Finitos y datos experimentales,

Este apéndice presenta los gráficos de Deflexión vs Potencial Eléctrico aplicado en los arreglos de microviga-electrodo, Se comparan gráficamente los resultados experimentales y las simulaciones mediante FEM. Las figuras desde B.1 hasta B.16 presentan los gráficos para su comparación. Asimismo, la tabla B.1 contiene el RMSE de aplicar ajuste a los datos cuando se aproximan a polinomios de 8° grado.

Tabla B.1. Raíces de los errores cuadráticos promedio de los ajustes hechos a los gráficos experimentales y a las simulaciones mediante el FEM.

Longitud de microviga (μm)	Longitud de electrodo (μm)	RMSE Gráfico FEM E=130GPa (m)	RMSE Gráfico FEM E=169GPa (m)	RMSE Gráfico Experimental (m)
125	70	2,4633e-008	1,645e-008	2,3771e-008
	80	1,7986e-008	2,1868e-008	1,0078e-008
	90	1,5329e-008	1,9064e-008	9,8689e-009
	100	1,4754e-008	1,6174e-008	1,9557e-008
225	70	4,8518e-008	4,5425e-008	2,4121e-008
	80	3,876e-008	4,0462e-008	3,0255e-008
	90	2,5625e-008	3,8647e-008	1,7283e-008
	100	3,0373e-008	3,2346e-008	1,8358e-008
325	70	6,6134e-008	6,5291e-008	3,2237e-008
	80	5,6272e-008	5,6703e-008	3,1864e-008
	90	4,4664e-008	5,0049e-008	8,8739e-008
	100	4,331e-008	6,0644e-008	2,0299e-008
450	70	9,6552e-008	1,0782e-007	3,5593e-008
	80	9,1603e-008	7,9166e-008	3,4612e-008
	90	6,6702e-008	7,4364e-008	3,6854e-008
	100	6,7018e-008	7,0801e-008	3,606e-008

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Apéndice B.

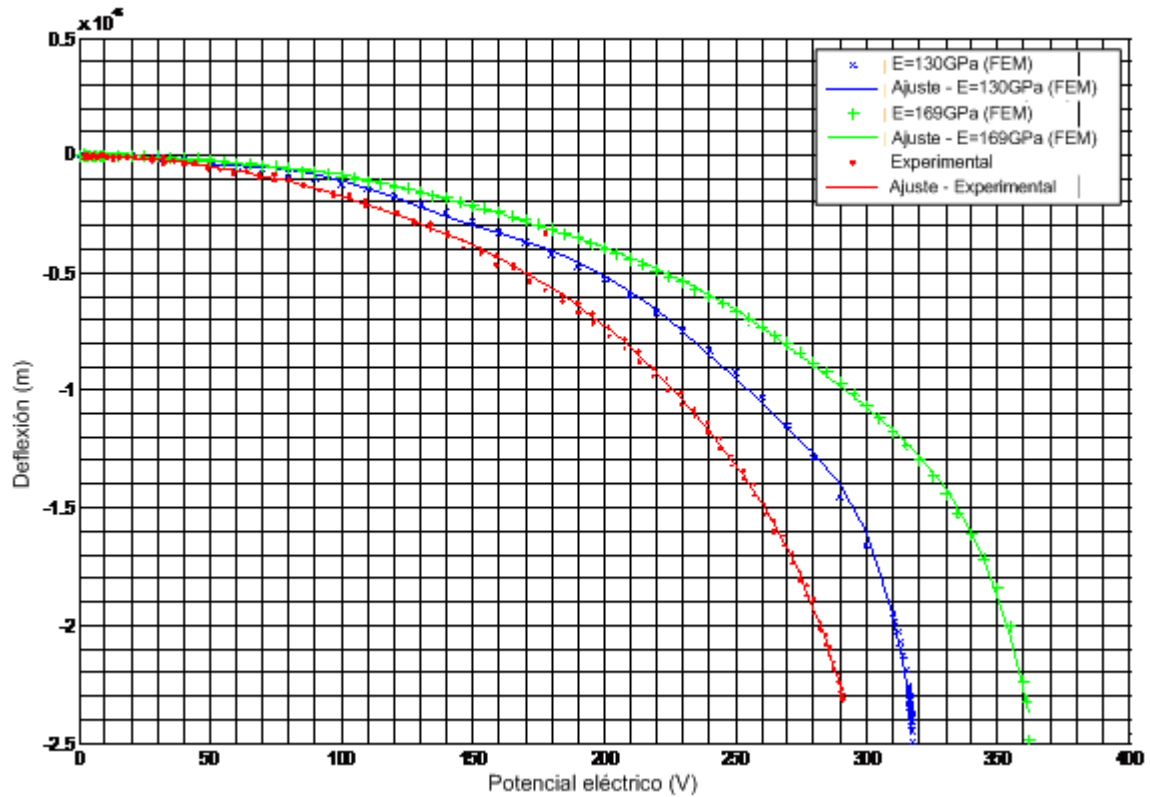


Figura B.1. Gráficos experimentales y de las simulaciones para microvigas de longitud $125 \mu\text{m}$ y electrodos de accionamiento de longitud $70 \mu\text{m}$.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Apéndice B.

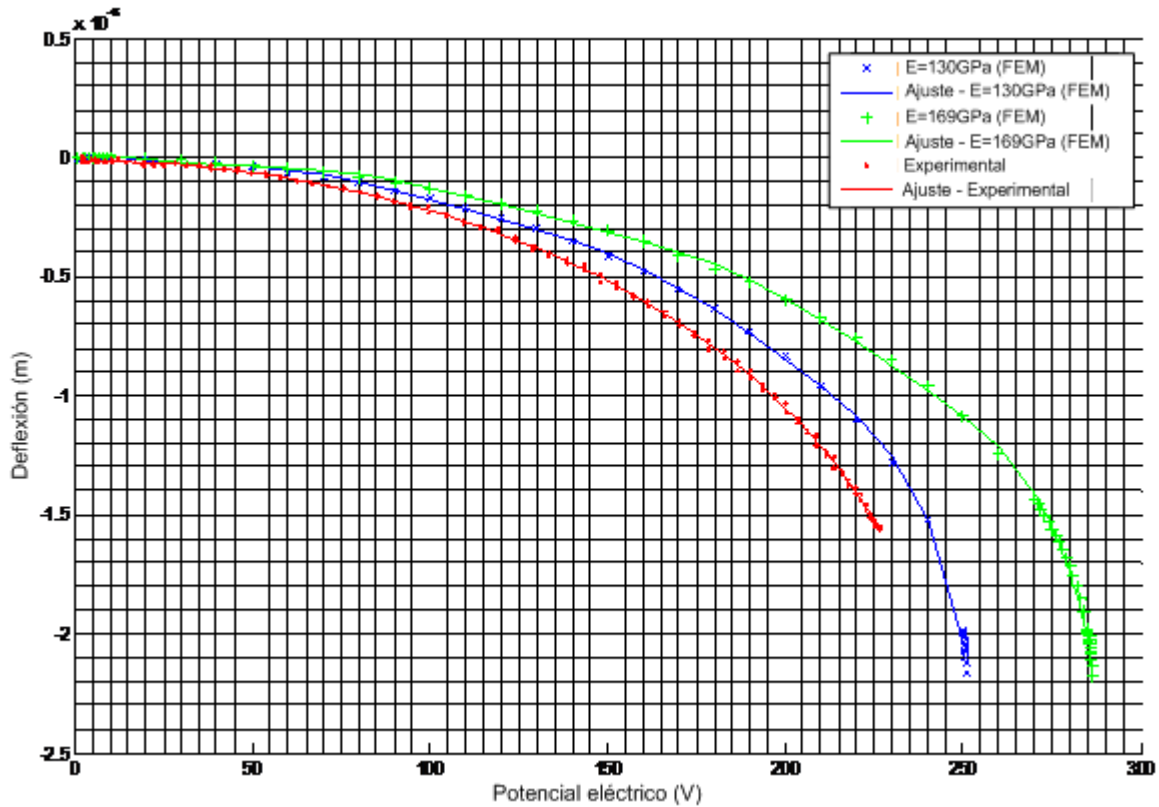


Figura B.2. Gráficos experimentales y de las simulaciones para microvigas de longitud $125 \mu\text{m}$ y electrodos de accionamiento de longitud $80 \mu\text{m}$.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Apéndice B.

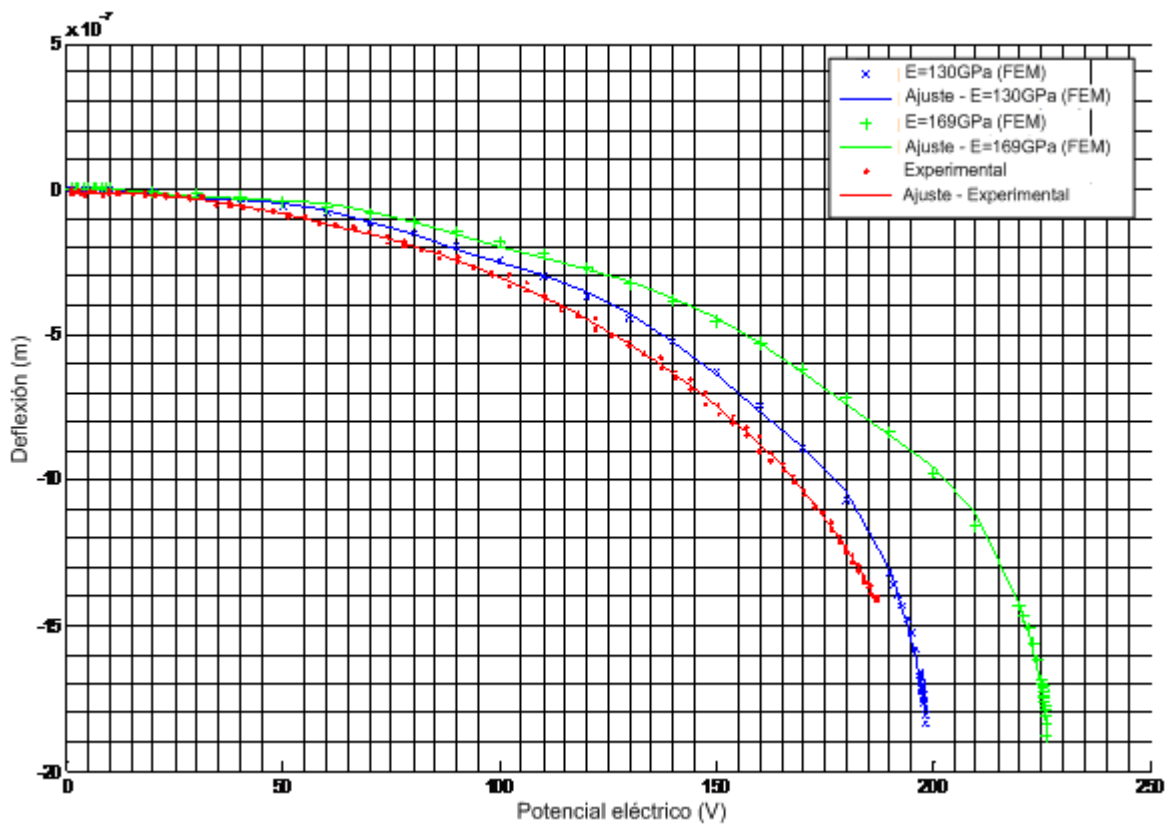


Figura B.3. Gráficos experimentales y de las simulaciones para microvigas de longitud $125 \mu\text{m}$ y electrodos de accionamiento de longitud $90 \mu\text{m}$.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Apéndice B.

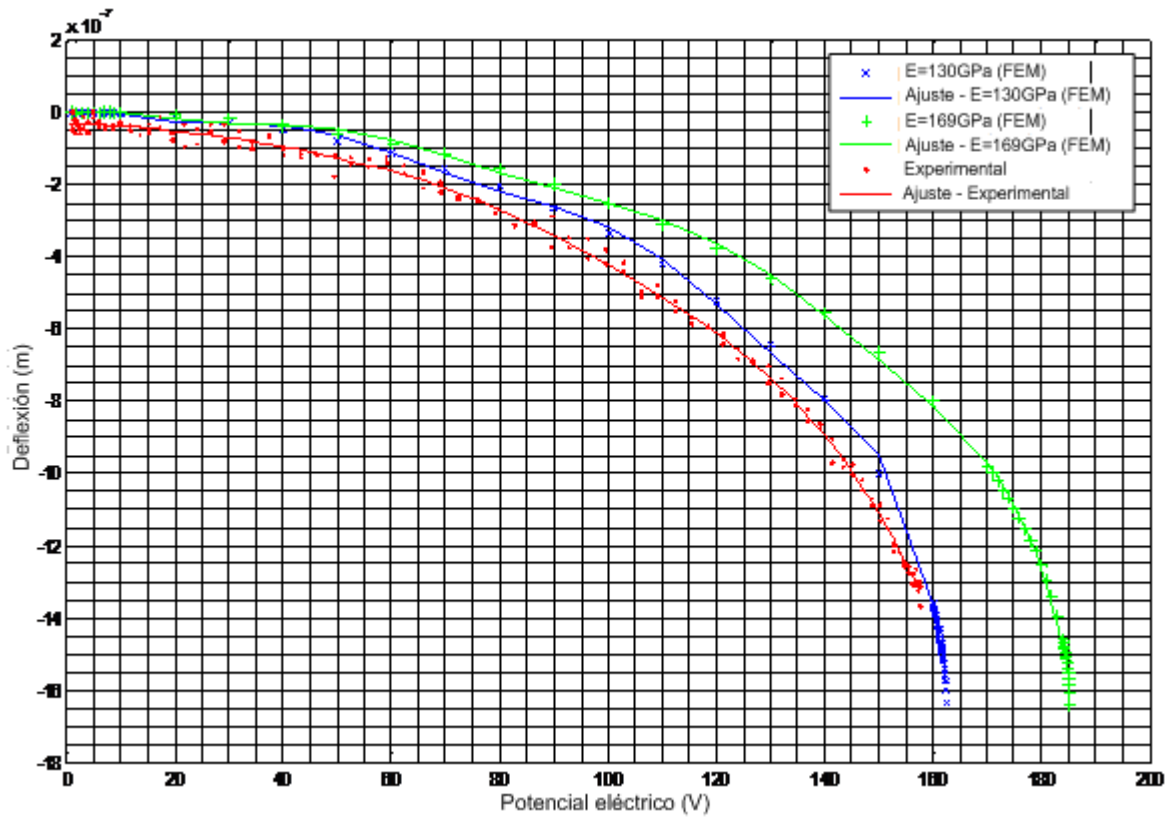


Figura B.4. Gráficos experimentales y de las simulaciones para microvigas de longitud $125 \mu\text{m}$ y electrodos de accionamiento de longitud $100 \mu\text{m}$.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Apéndice B.

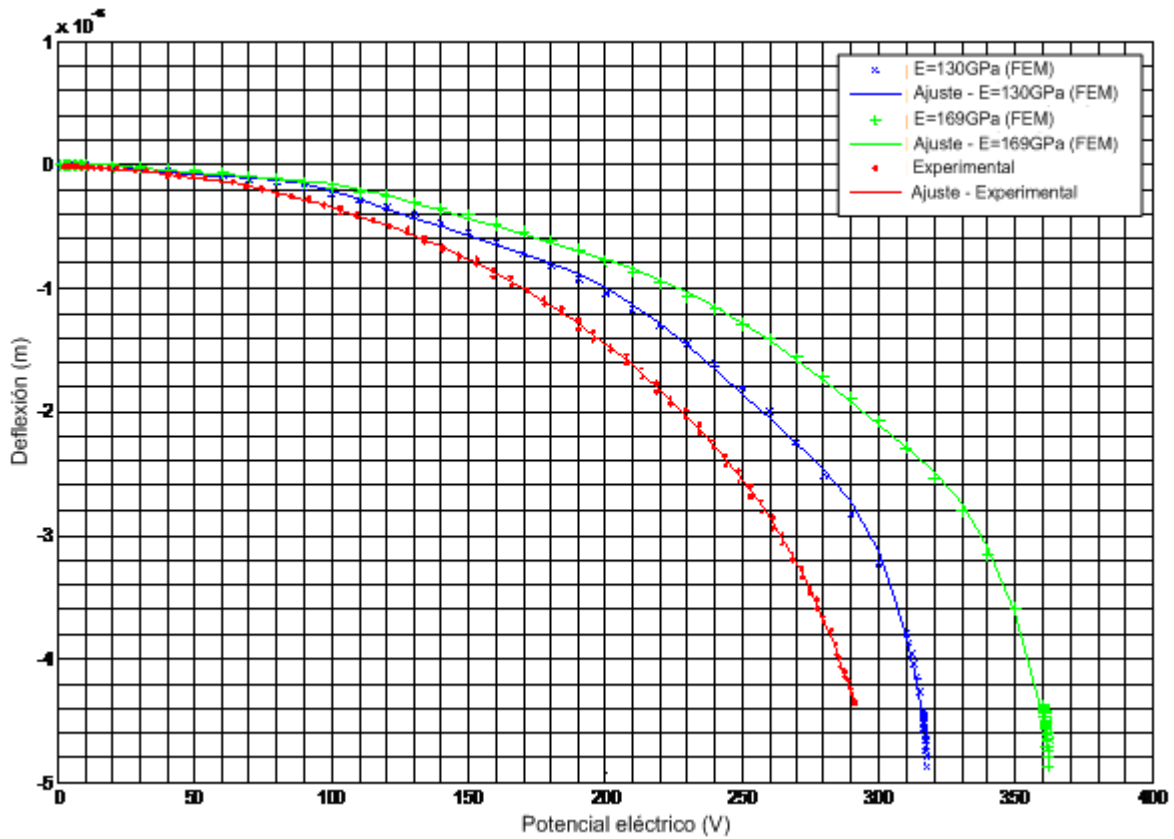


Figura B.5. Gráficos experimentales y de las simulaciones para microvigas de longitud $225 \mu\text{m}$ y electrodos de accionamiento de longitud $70 \mu\text{m}$.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPÍA DE BARRIDO (SPM)

Apéndice B.

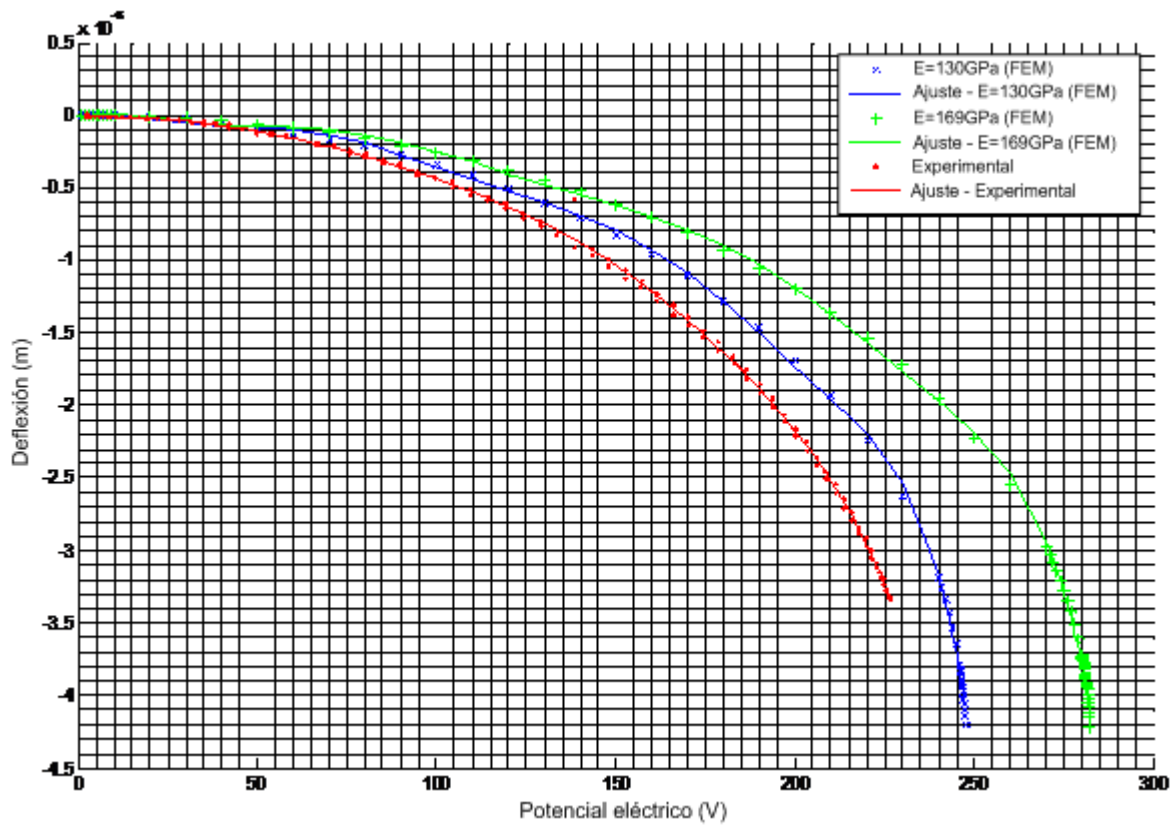


Figura B.6. Gráficos experimentales y de las simulaciones para microvigas de longitud $225 \mu\text{m}$ y electrodos de accionamiento de longitud $80 \mu\text{m}$.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Apéndice B.

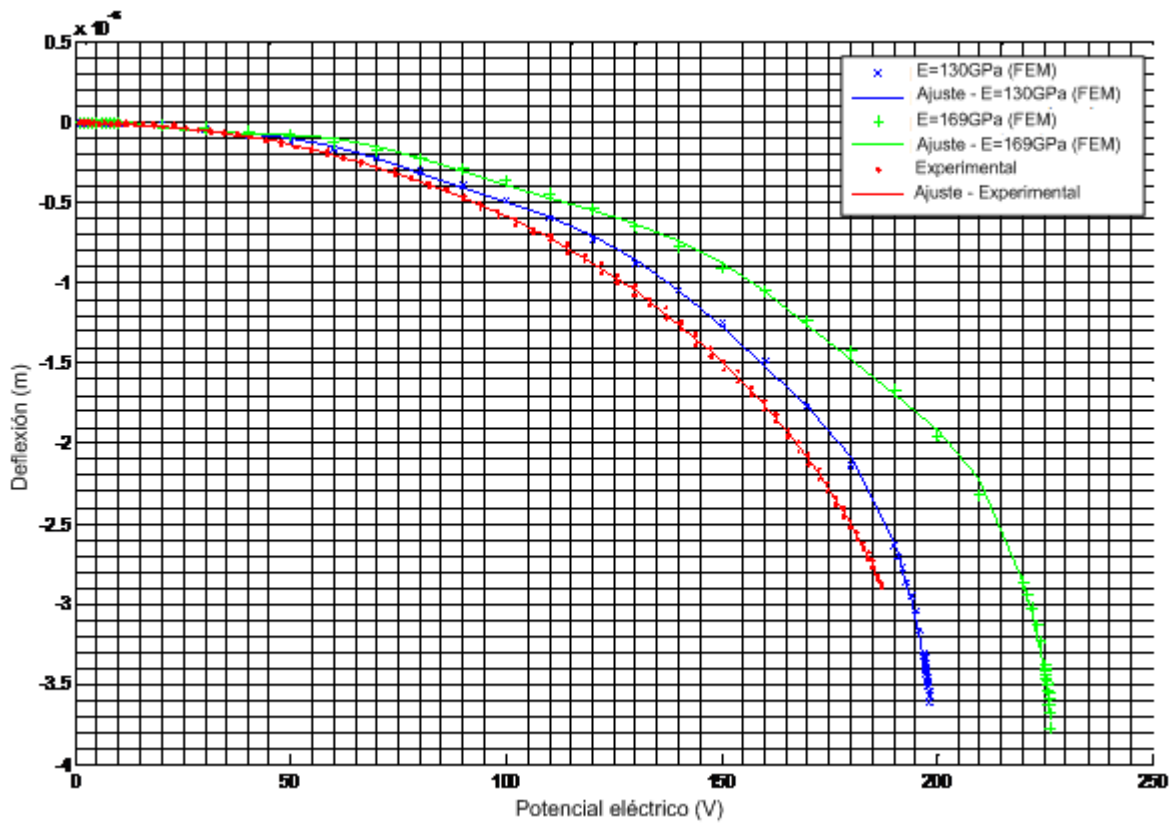


Figura B.7. Gráficos experimentales y de las simulaciones para microvigas de longitud $225\ \mu\text{m}$ y electrodos de accionamiento de longitud $90\ \mu\text{m}$.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Apéndice B.

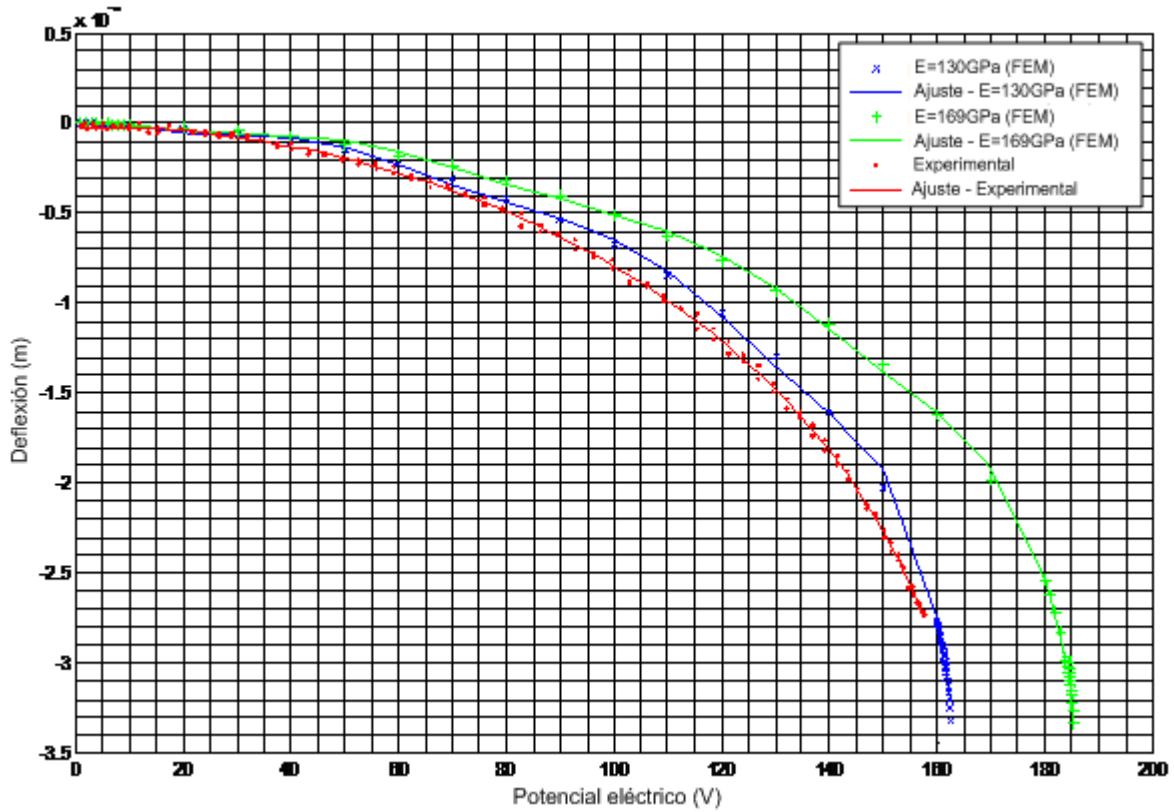


Figura B.8. Gráficos experimentales y de las simulaciones para microvigas de longitud $225 \mu\text{m}$ y electrodos de accionamiento de longitud $100 \mu\text{m}$.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Apéndice B.

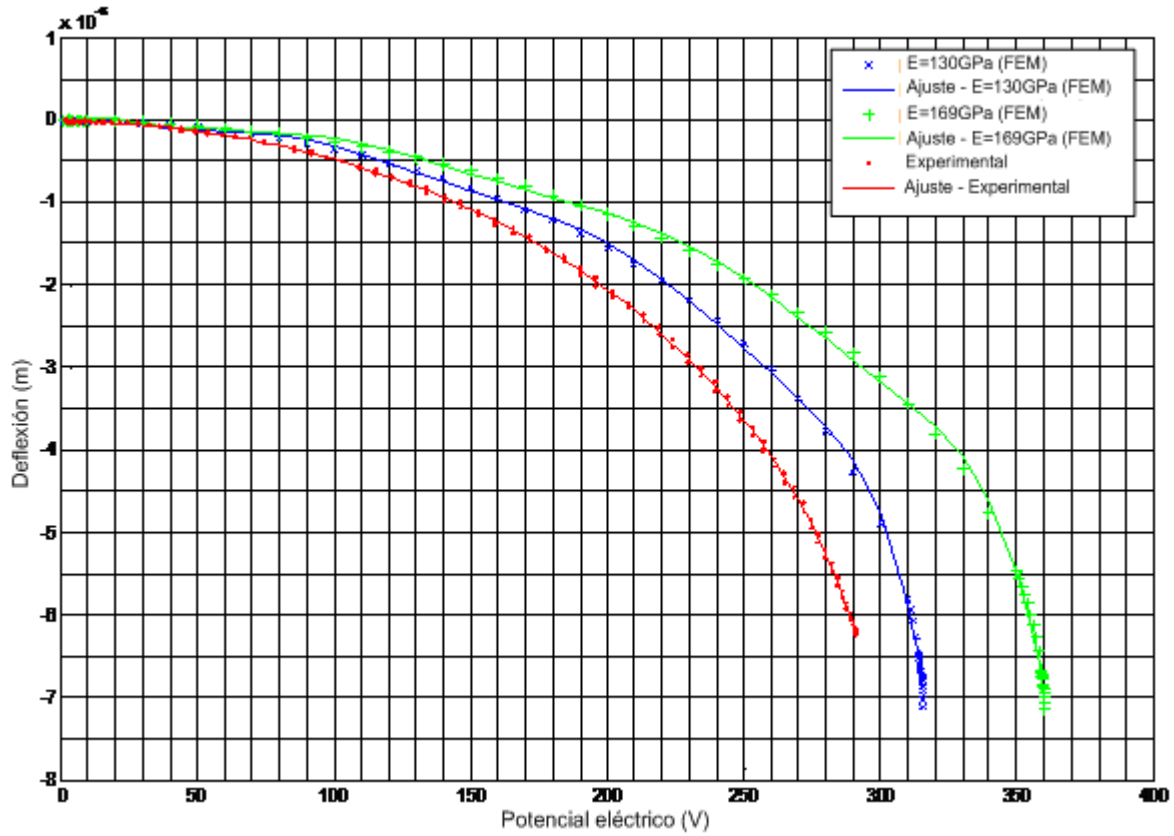


Figura B.9. Gráficos experimentales y de las simulaciones para microvigas de longitud $325 \mu\text{m}$ y electrodos de accionamiento de longitud $70 \mu\text{m}$.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPÍA DE BARRIDO (SPM)

Apéndice B.

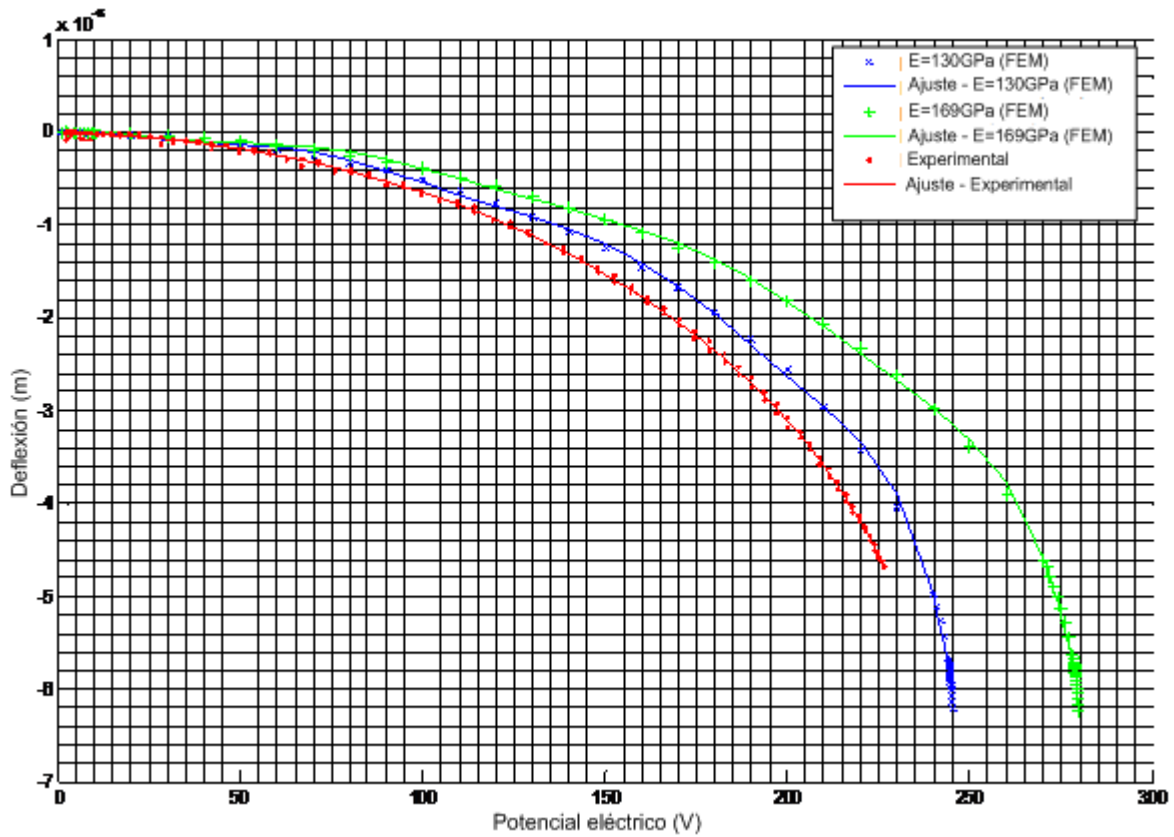


Figura B.10. Gráficos experimentales y de las simulaciones para microvigas de longitud $325 \mu\text{m}$ y electrodos de accionamiento de longitud $80 \mu\text{m}$.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPÍA DE BARRIDO (SPM)

Apéndice B.

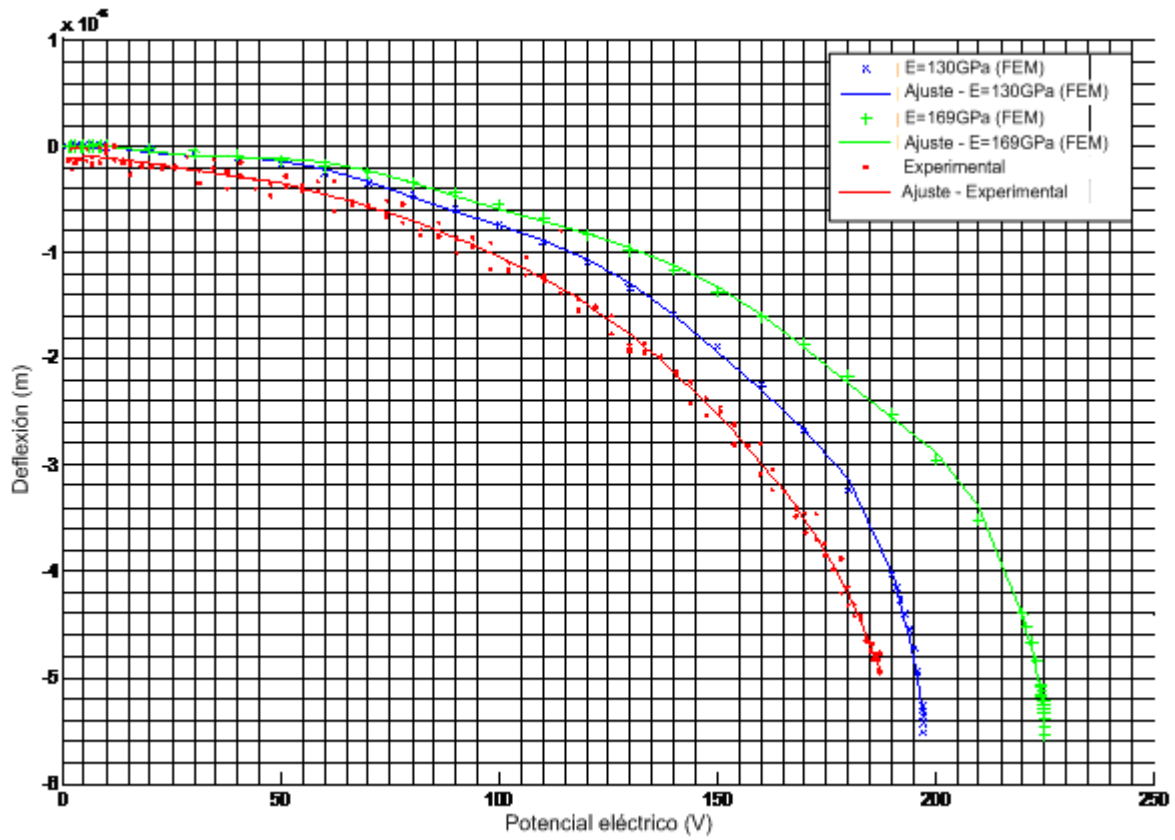


Figura B.11. Gráficos experimentales y de las simulaciones para microvigas de longitud $325 \mu\text{m}$ y electrodos de accionamiento de longitud $90 \mu\text{m}$.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Apéndice B.

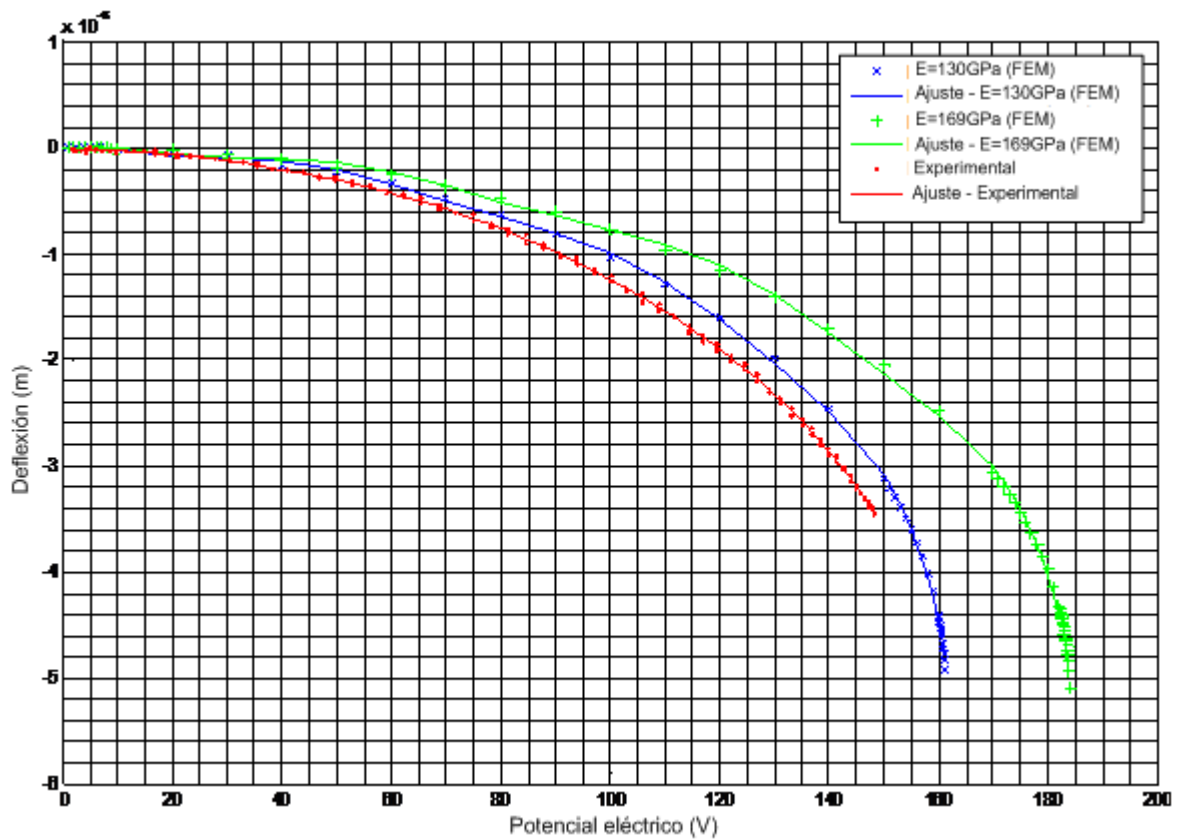


Figura B.12. Gráficos experimentales y de las simulaciones para microvigas de longitud $325 \mu\text{m}$ y electrodos de accionamiento de longitud $100 \mu\text{m}$.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Apéndice B.

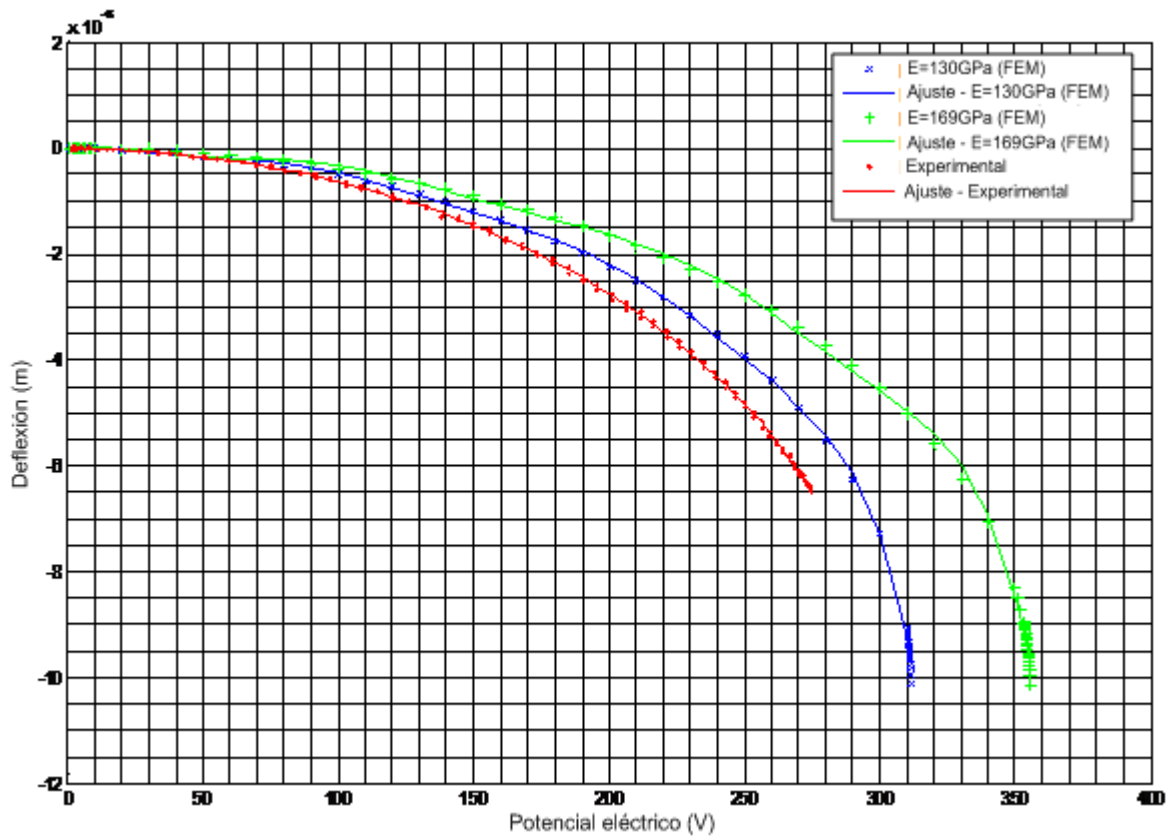


Figura B.13. Gráficos experimentales y de las simulaciones para microvigas de longitud $450 \mu\text{m}$ y electrodos de accionamiento de longitud $70 \mu\text{m}$.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Apéndice B.

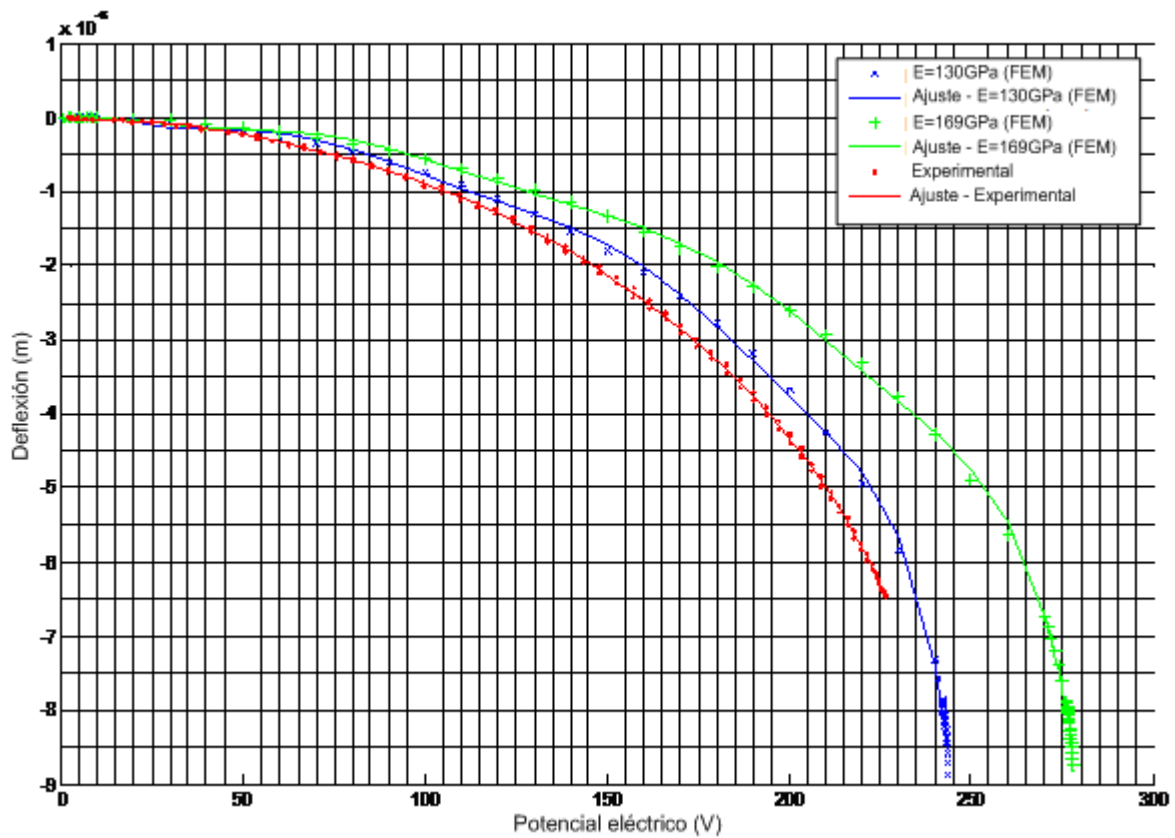


Figura B.14. Gráficos experimentales y de las simulaciones para microvigas de longitud $450 \mu\text{m}$ y electrodos de accionamiento de longitud $80 \mu\text{m}$.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPÍA DE BARRIDO (SPM)

Apéndice B.

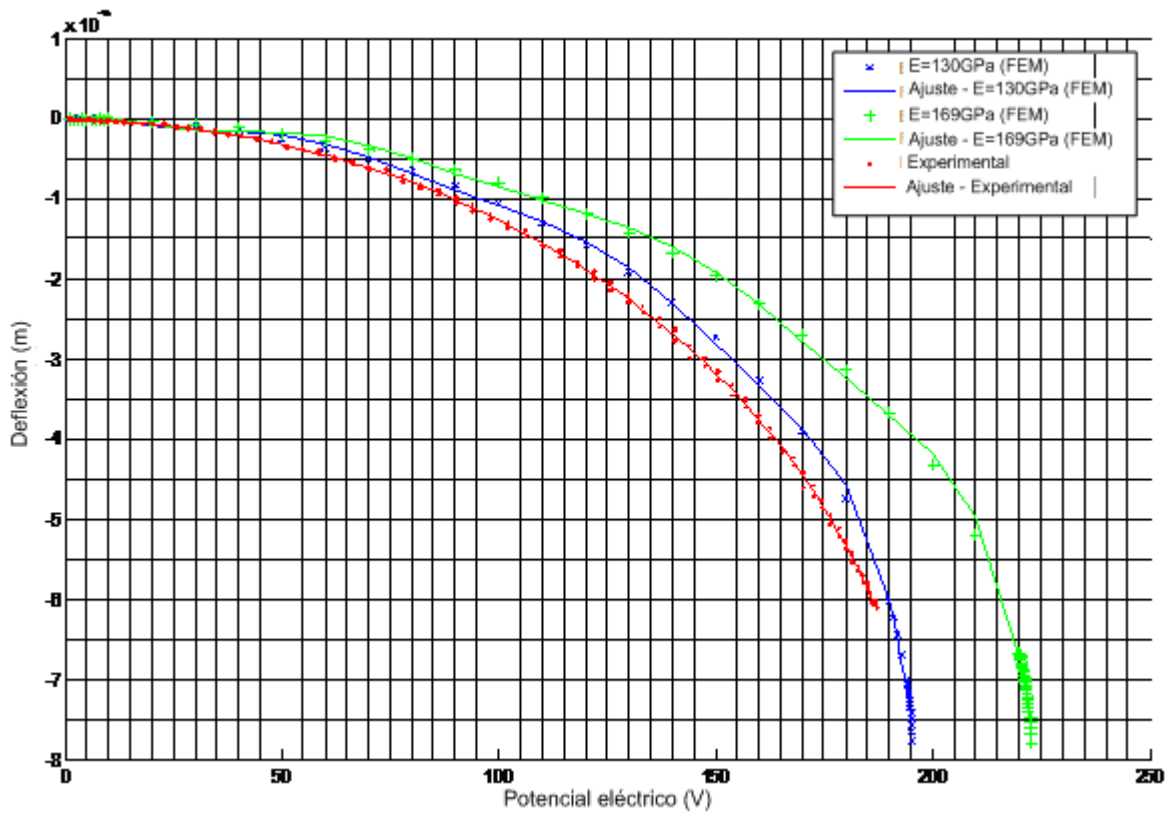


Figura B.15. Gráficos experimentales y de las simulaciones para microvigas de longitud $450 \mu\text{m}$ y electrodos de accionamiento de longitud $90 \mu\text{m}$.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)

Apéndice B.

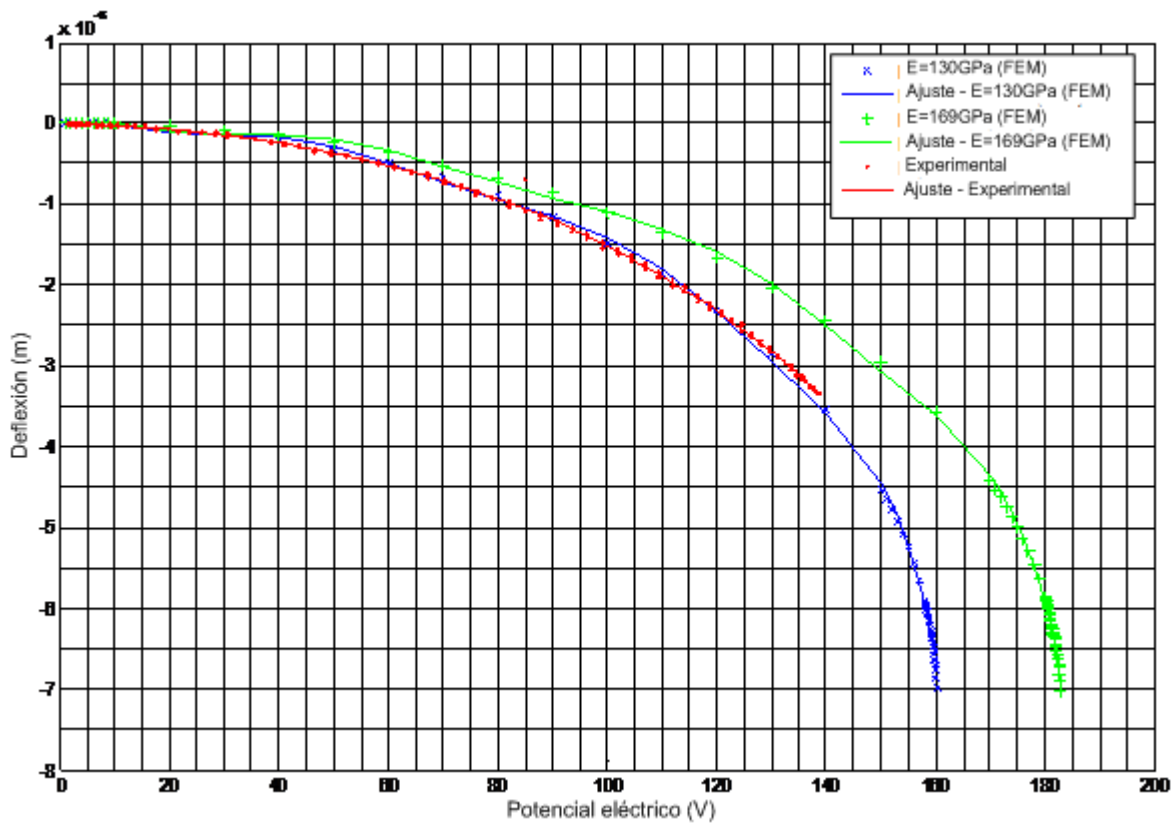


Figura B.16. Gráficos experimentales y de las simulaciones para microvigas de longitud $450 \mu\text{m}$ y electrodos de accionamiento de longitud $100 \mu\text{m}$.

Apéndice C

Gráficos de fuerza aplicada versus desplazamiento para las microvigas de acuerdo con la longitud del electrodo

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPÍA DE BARRIDO (SPM)
 Apéndice C.

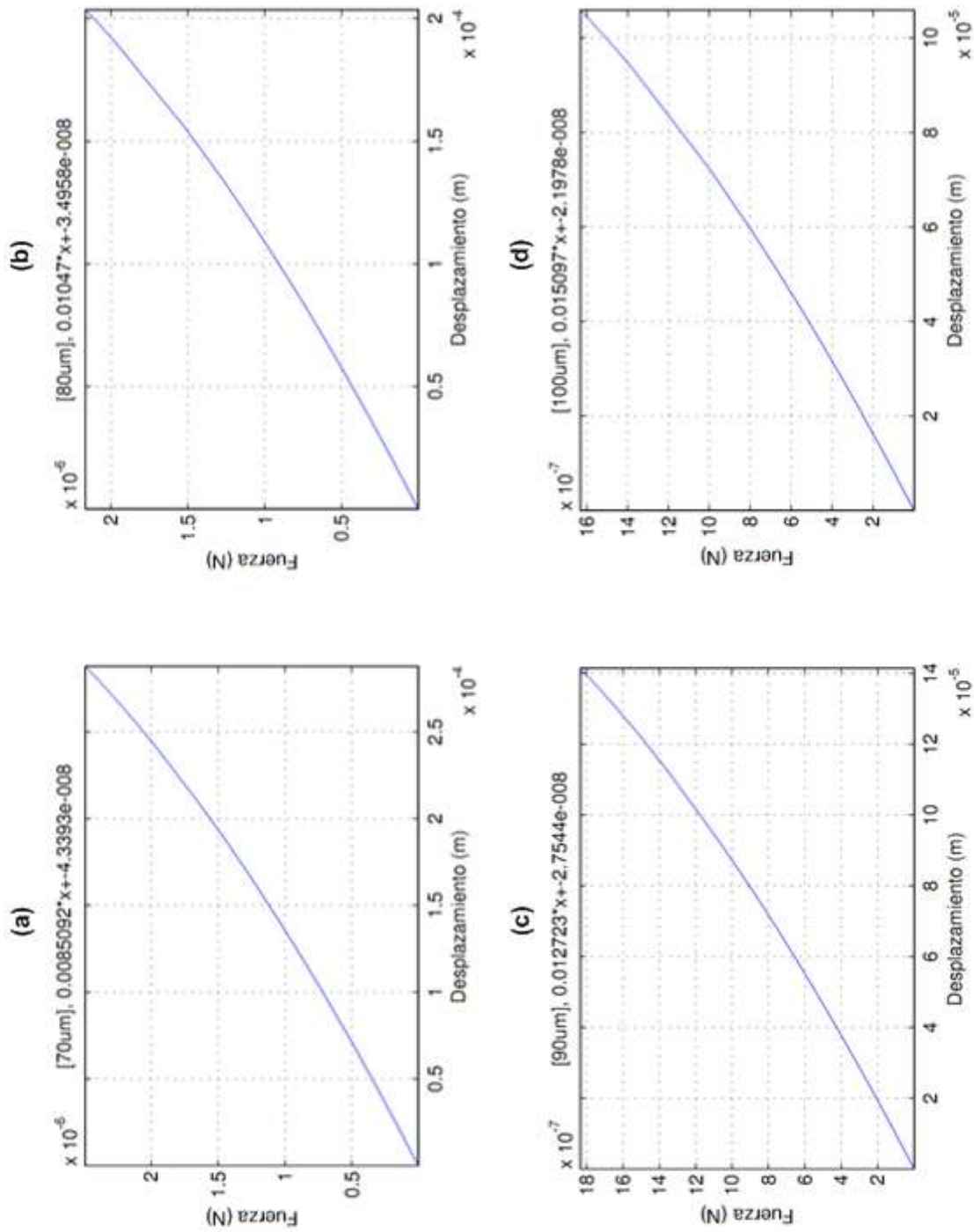


Figura C.1. Gráficos de Fuerza vs. Desplazamiento de la punta de la microviga de 125 μm, considerando 4 longitudes de electrodos de accionamiento: (a) 70 μm (b) 80 μm (c) 90 μm (d) 100 μm. Considerando material isotrópico con E = 130 GPa.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPÍA DE BARRIDO (SPM)
 Apéndice C.

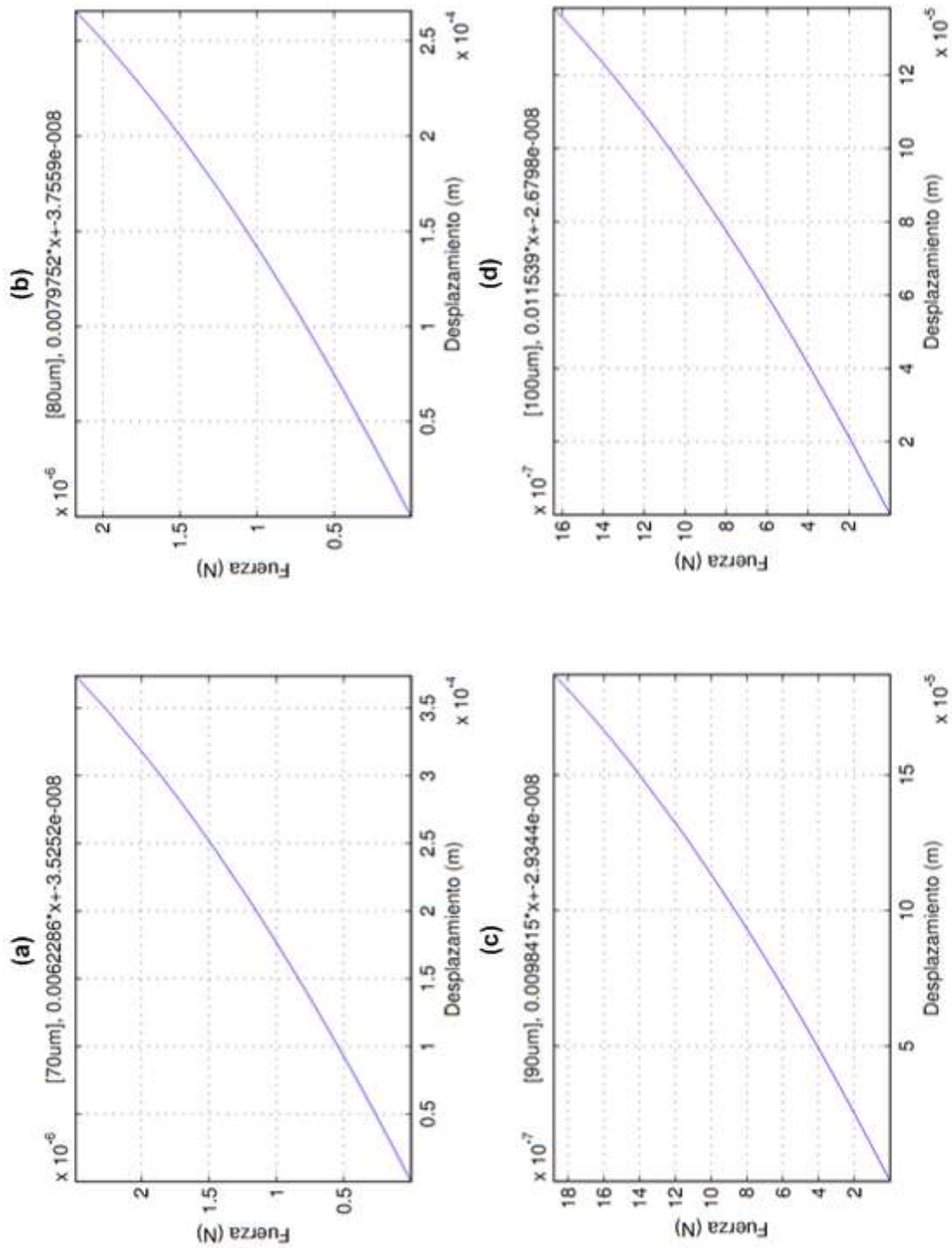


Figura C.2. Gráficos de Fuerza vs. Desplazamiento de la punta de la microviga de 125 μm , considerando 4 longitudes de electrodos de accionamiento: (a) 70 μm (b) 80 μm (c) 90 μm (d) 100 μm . Considerando material isotrópico con $E = 169 \text{ GPa}$.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)
 Apéndice C.

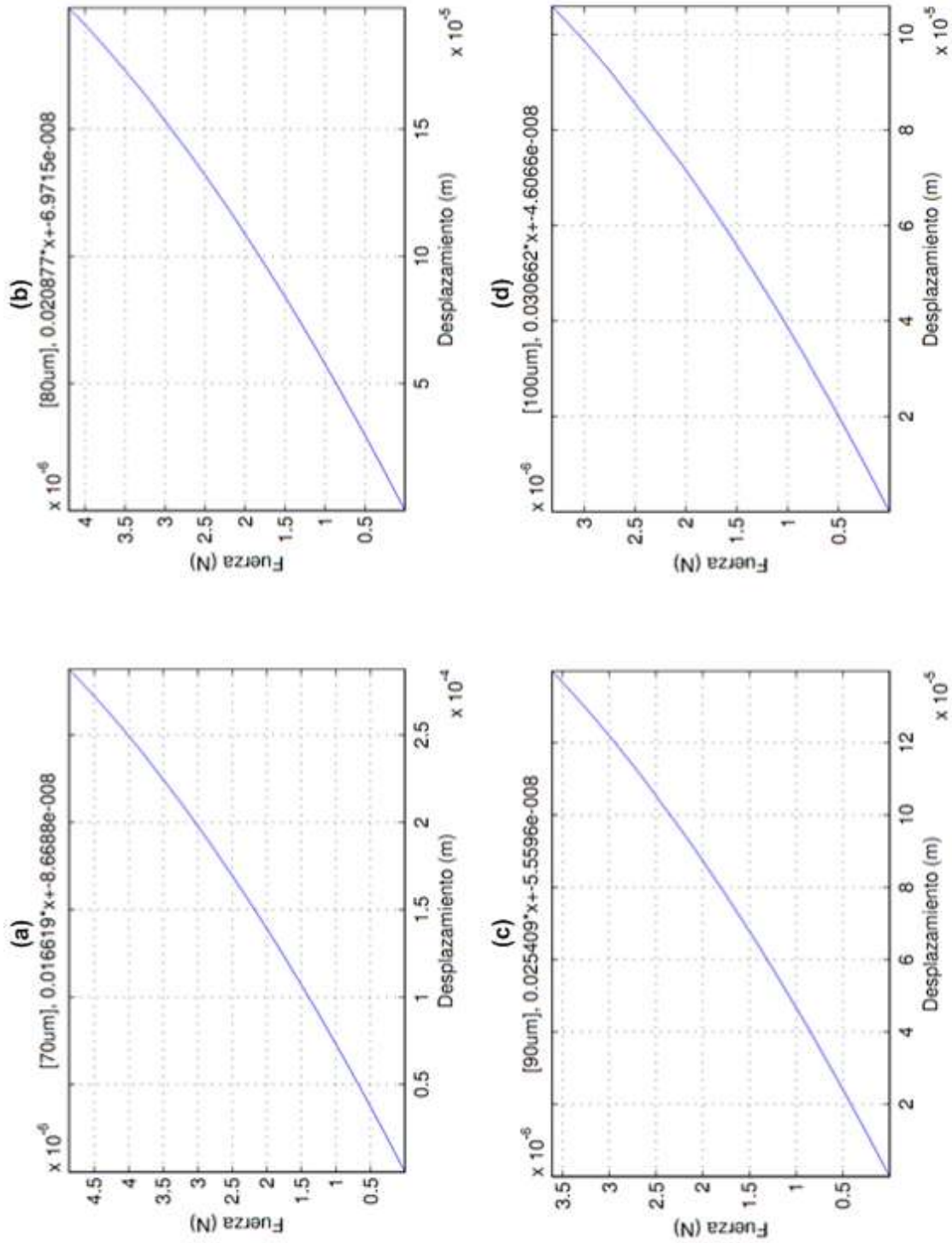


Figura C.3. Gráficos de Fuerza vs. Desplazamiento de la punta de la microviga de 225µm, considerando 4 longitudes de electrodos de accionamiento: (a) 70 µm (b) 80 µm (c) 90 µm (d) 100 µm. Considerando material isótropo con $E = 130$ GPa.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPÍA DE BARRIDO (SPM)
 Apéndice C.

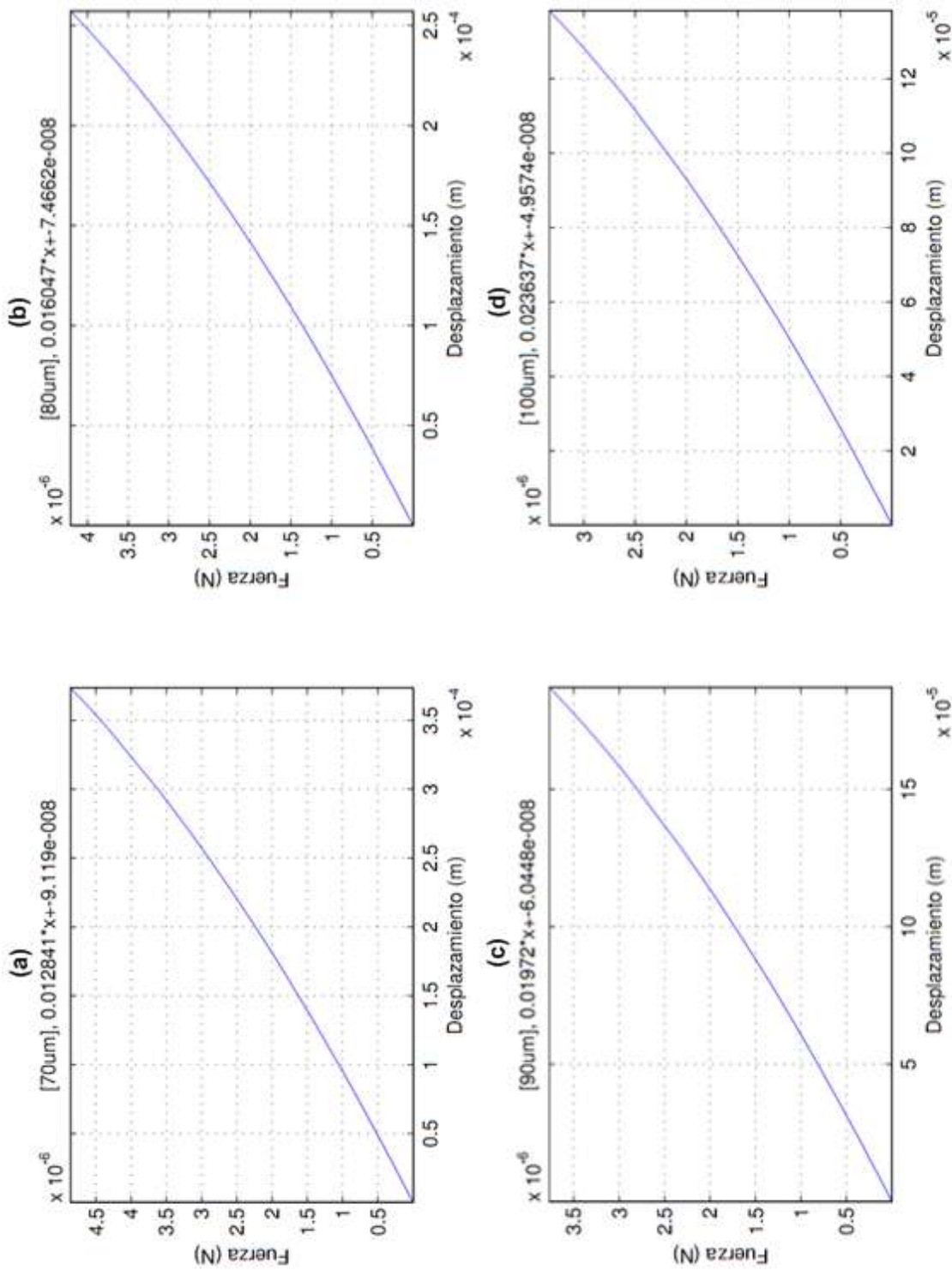


Figura C.4. Gráficos de Fuerza vs. Desplazamiento de la punta de la microviga de 225µm, considerando 4 longitudes de electrodos de accionamiento: (a) 70 µm (b) 80 µm (c) 90 µm (d) 100 µm. Considerando material isotropo con E = 169 GPa.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)
 Apéndice C.

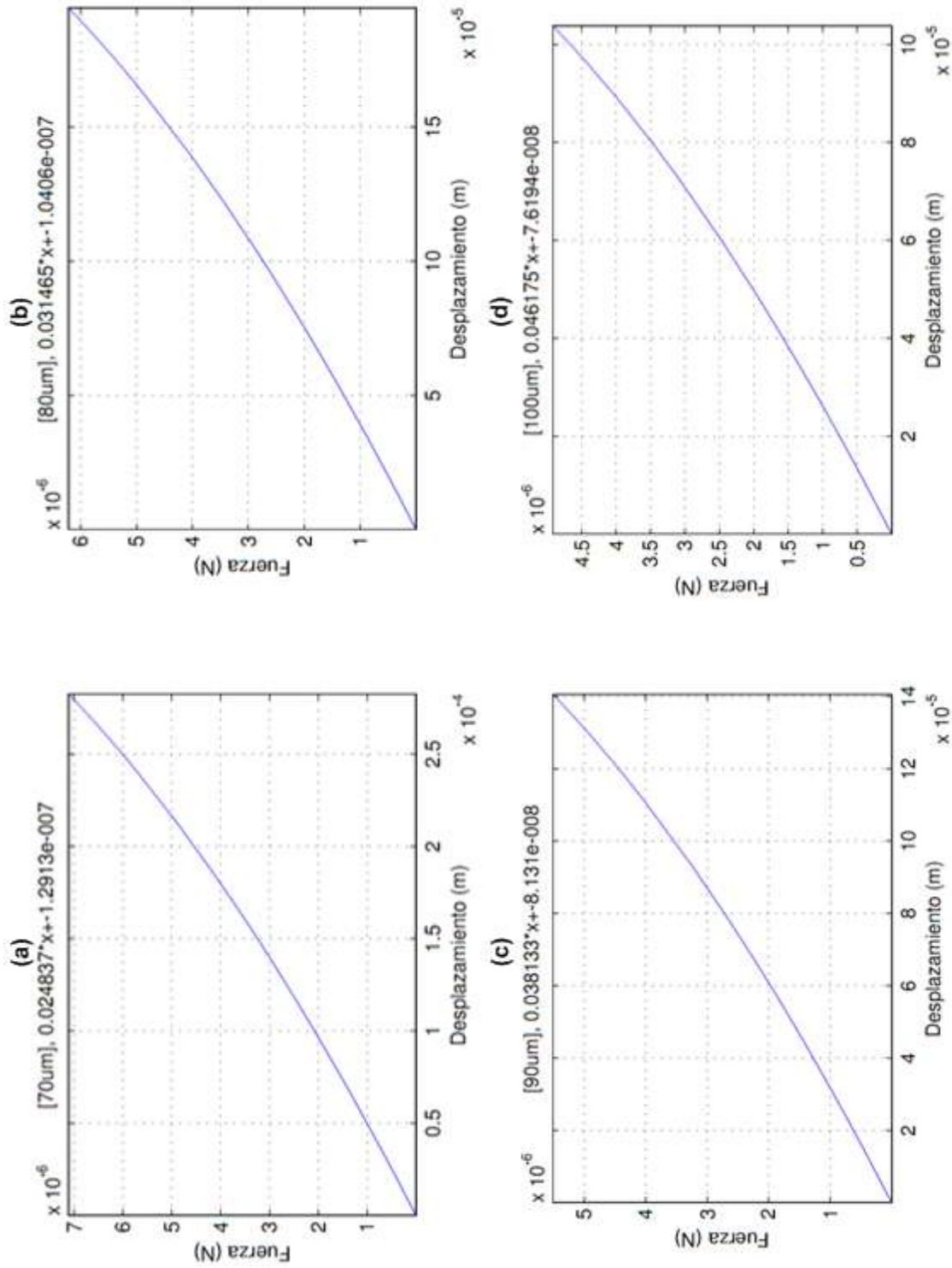


Figura C.5. Gráficos de Fuerza vs. Desplazamiento de la punta de la microviga de 325µm, considerando 4 longitudes de electrodos de accionamiento: (a) 70 µm (b) 80 µm (c) 90 µm (d) 100 µm. Considerando material isotropo con E = 130 GPa.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)
 Apéndice C.

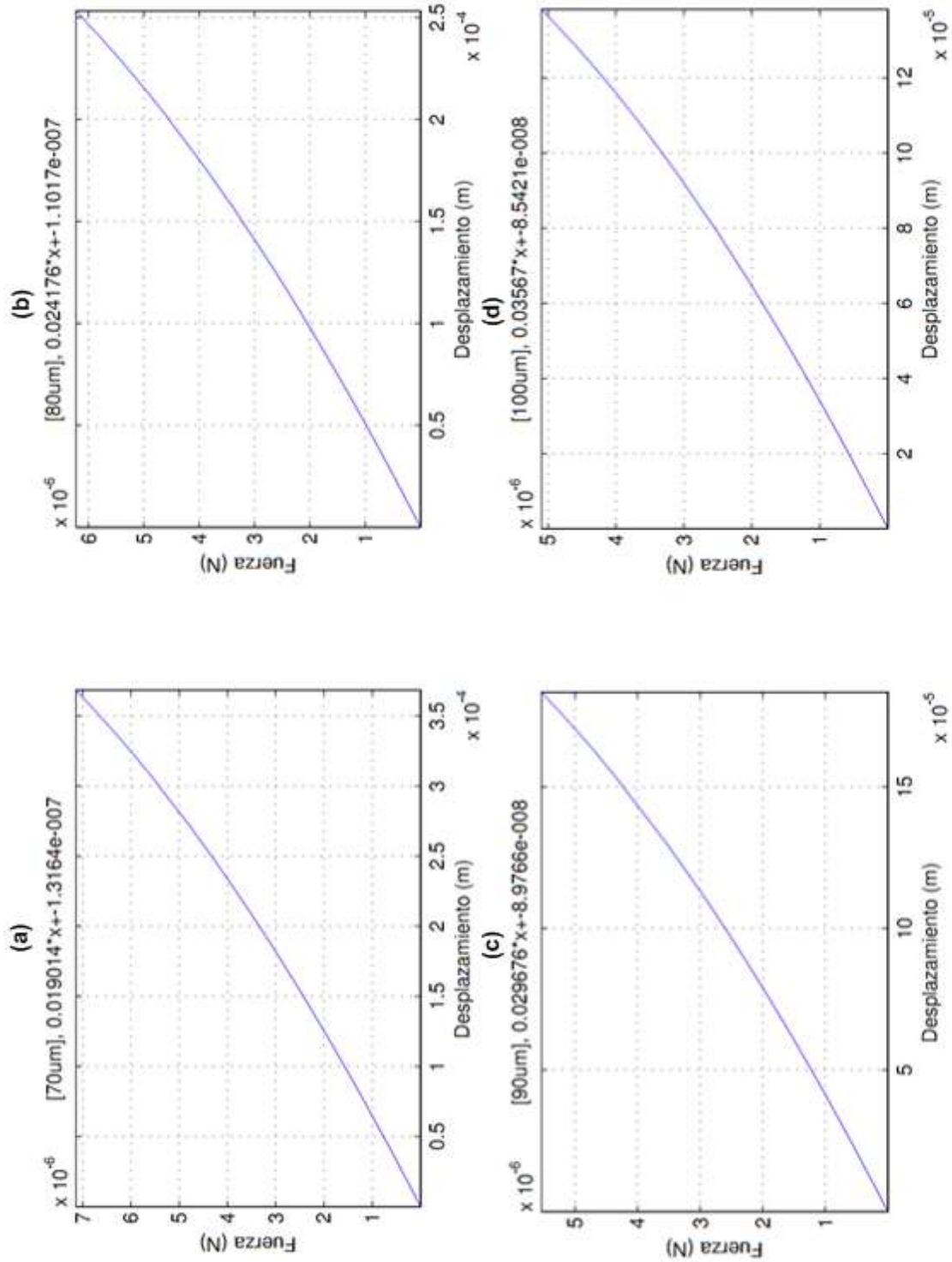


Figura C.6. Gráficos de Fuerza vs. Desplazamiento de la punta de la microviga de 325 μm , considerando 4 longitudes de electrodos de accionamiento: (a) 70 μm (b) 80 μm (c) 90 μm (d) 100 μm . Considerando material isotrópico con $E = 169 \text{ GPa}$.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)
 Apéndice C.

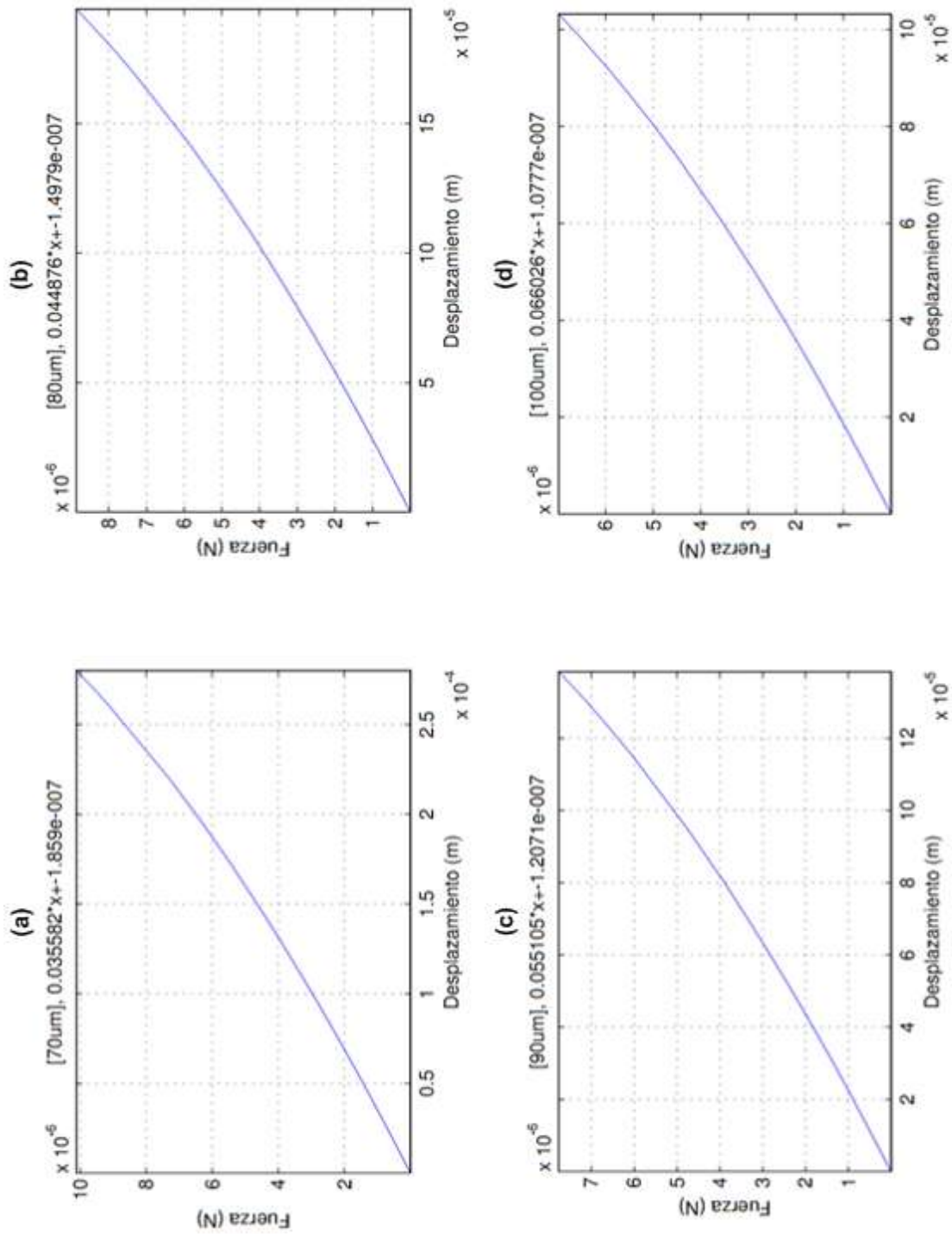


Figura C.7. Gráficos de Fuerza vs. Desplazamiento de la punta de la microviga de 450 μ m, considerando 4 longitudes de electrodos de accionamiento: (a) 70 μ m (b) 80 μ m (c) 90 μ m (d) 100 μ m. Considerando material isotropo con $E = 130$ GPa.

DESARROLLO DE MICROVIGAS PARA MICROSCOPIA DE BARRIDO (SPM)
 Apéndice C.

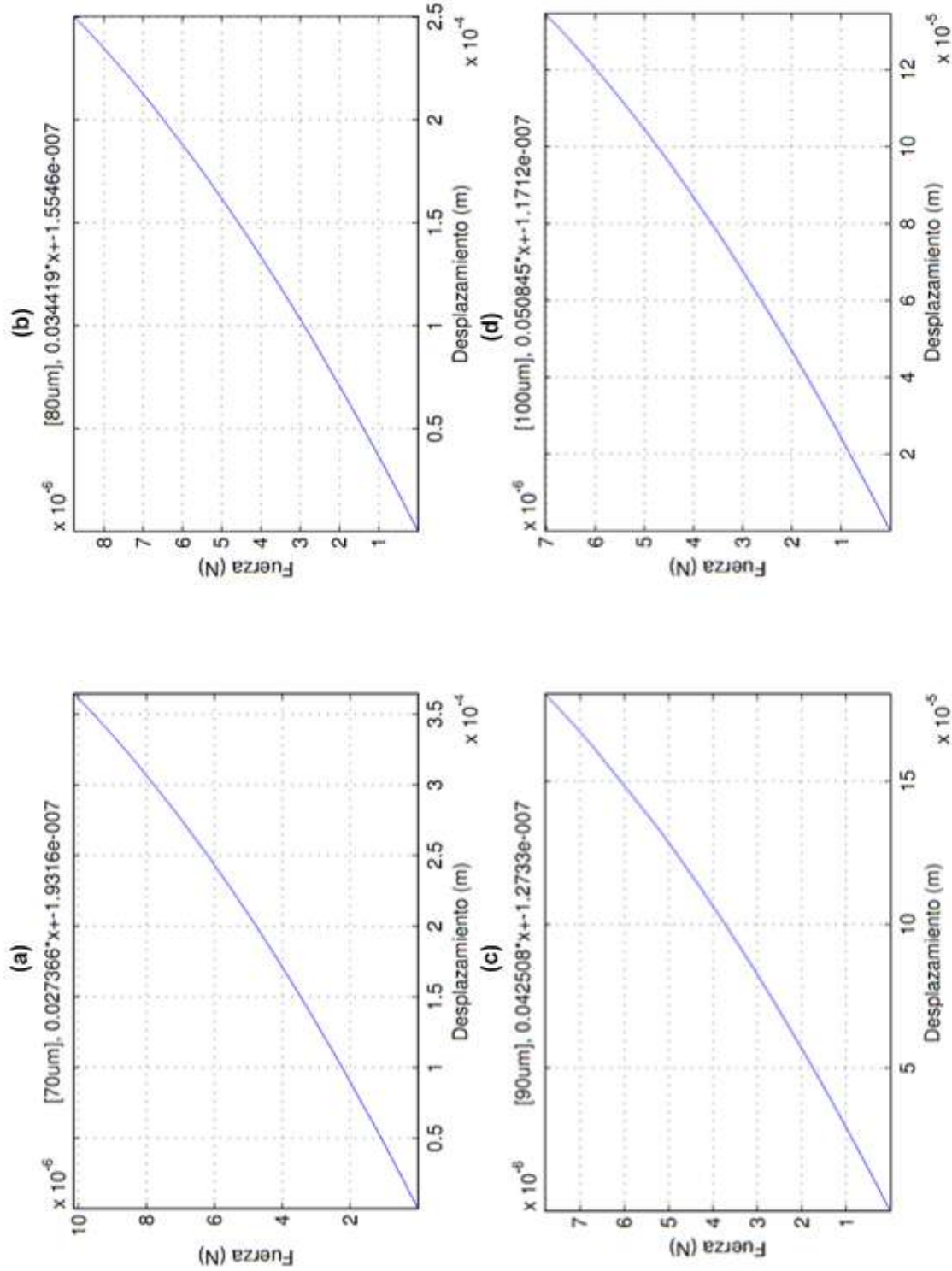


Figura C.8. Gráficos de Fuerza vs. Desplazamiento de la punta de la microviga de 450µm, considerando 4 longitudes de electrodos de aclonamiento: (a) 70 µm (b) 80 µm (c) 90 µm (d) 100 µm. Considerando material isótropo con $E = 169$ GPa.