



ANÁLISIS DE RESPUESTA EN FRECUENCIA DE UN DISPOSITIVO PIEZO-
ACTUADO PARA LA IDENTIFICACIÓN DE VARIACIONES ESTRUCTURALES DE
SU SOPORTE

AUTOR

DANIEL RICARDO BARCO CASTAÑO

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MANIZALES

FACULTAD DE INGENIERÍA

MAESTRÍA EN INGENIERÍA

MANIZALES

2019

ANÁLISIS DE RESPUESTA EN FRECUENCIA DE UN DISPOSITIVO PIEZO-
ACTUADO PARA LA IDENTIFICACIÓN DE VARIACIONES ESTRUCTURALES DE
SU SOPORTE

DANIEL RICARDO BARCO CASTAÑO

Proyecto de grado para optar al título de Magister en ingeniería

Tutor

HECTOR ANDRES TINOCO NAVARRO

Cotutor

FABIO MARCELO PEÑA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MANIZALES

FACULTAD DE INGENIERIA

MAESTRÍA EN INGENIERIA

MANIZALES

2019

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo a mi hijo Juan Martin Barco Valencia pues es mi mayor motivación por la que cada día intento ser mejor, y crecer en mi vida personal y laboral para que pueda estar orgulloso y le pueda servir de ejemplo para su futuro.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco el apoyo prestado por el personal del Laboratorio de Mecánica Computacional y Experimental de la Universidad Autónoma de Manizales en el desarrollo del trabajo de maestría.

También agradezco el apoyo financiero brindado por del Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (COLCIENCIAS, código 121974455599 convocatoria 744 del 2016) contrato legalizado 739-2016, ya que gracias a este la realización de este trabajo fue posible.

Un agradecimiento muy especial a mi tutor en este proyecto de maestría Héctor Andrés Tinoco Navarro, por su acompañamiento constante en esta gestión y por el enriquecimiento personal y laboral que tuve en estos años de trabajo bajo su dirección.

Y por último y no menos importante a mis padres y esposa por su paciencia, apoyo y los consejos que me brindaron en el desarrollo de este trabajo de investigación.

RESUMEN

Este trabajo presenta el desarrollo y evaluación de un dispositivo piezo actuado que tiene como objetivo una aplicación de monitoreo estructural basada en las condiciones de vibración del mismo. Para esto, se describió un proceso de diseño que consideró las condiciones estáticas parametrizadas por medio de un análisis de elementos finitos (FEA). Adicional a esto, un análisis armónico (1 kHz hasta 50 kHz) fue llevado a cabo por FEA para la evaluación dinámica del piezo dispositivo. Los resultados muestran la sensibilidad de este en todo el espectro de frecuencia frente a los cambios de la interface de acoplamiento (elemento cónico y diente); sin embargo, los cambios elásticos (módulo de Young) del sustrato solo perturbaron un intervalo de frecuencia reducido. En ese intervalo, el análisis evidenció que cuando el sustrato incrementa su módulo de Young, los desplazamientos del dispositivo son mayores, esto es debido a que el sustrato limita el movimiento en el punto de anclaje cuando es más rígido. Para verificar las simulaciones, experimentos dinámicos fueron propuestos con sustratos de diferentes materiales (Aluminio, bronce y acero). Los resultados revelaron los efectos elásticos del sustrato sobre la condición de vibración del dispositivo, ya que en los intervalos de frecuencia definidos entre 0 y 100 Hz; 3 kHz y 11 kHz; las velocidades modificaron la forma de vibrar del dispositivo lo cual significa un cambio de su estado vibratorio. Este resultado concluye que el dispositivo puede ser usado como instrumento de monitoreo estructural, ya que demostró la capacidad de capturar los cambios elásticos en su condición vibratoria.

Palabras Claves: Piezo-dispositivo, integridad estructural, vibraciones mecánicas, respuesta en frecuencia, análisis armónico, análisis por elementos finitos.

ABSTRACT

This project presents the development and evaluation of a piezo-actuated device that aims at a structural monitoring application based on the vibration conditions of the device. For this, a design process was described that considered the static conditions parameterized by means of a finite element analysis (FEA). In addition, a harmonic analysis (1 kHz up to 50 kHz) was carried out by FEA for the dynamic evaluation of the piezo device. The results show the sensitivity of this in the whole frequency spectrum when coupling interface (conical element and tooth) were changed; however, the elastic changes (Young's modulus) on the substrate only disturbed a reduced frequency range. In that interval, the analysis showed that when the substrate increases its Young's modulus, the displacements of the device were greater, this is due to the fact that the substrate constraints the displacement at the clamping point when it is stiffer. To verify the simulations, dynamic experiments were proposed with substrates of different materials (Aluminum, bronze, and steel). The results revealed the elastic effects of the substrate on the vibration condition of the device since in the frequency ranges defined between 0 and 100 Hz; 3 kHz and 11 kHz; the velocities modified the vibration of the device, which means a change of its vibratory state. This result concludes that the device can be used as a structural monitoring instrument since it demonstrated the ability to capture the elastic changes in its vibratory condition.

Keywords: Piezo-device, structural health monitoring, mechanical vibrations, frequency response, harmonic analysis, finite element analysis

CONTENIDO

CAPITULO I.....	18
1. Introducción.....	18
1.1 Introducción.....	18
1.2 Planteamiento del problema y pregunta de investigación	20
1.3 Justificación.....	22
1.4 Objetivos	25
CAPÍTULO II	26
2. Revisión de la literatura	26
2.1 Análisis modal de un sistema dinámico de un grado de libertad	26
2.1.1 Funciones de respuesta de frecuencia de un sistema de un grado de libertad	26
2.1.2 Tipos de representación de las funciones de respuesta en frecuencia.....	31
2.2 Monitoreo de la integridad estructural basado en vibraciones	33
2.2.1 Métodos basados en la respuesta en la frecuencia	35
2.2.2 Método basado en la forma modal	39
2.2.3 Otros métodos	42
CAPÍTULO III.....	44

3.	Diseño y evaluación experimental del piezo-dispositivo	44
3.1	Introducción.....	44
3.2	Diseño del dispositivo piezo actuado basado en el concepto de Tinoco et al. (2016a).....	44
3.3	Análisis por elementos finitos para la selección de la junta.....	47
3.3.1	Modelo de elementos finitos	47
3.3.2	Mallado del modelo.....	49
3.3.3	Resultado del análisis estático.....	51
3.4	Diseño de prototipo operativo del piezo-dispositivo.....	54
3.5	Procedimiento de fabricación.....	55
3.5.1	Prototipo de prueba	57
3.5.2	Prototipo operativo.....	58
3.6	Pruebas experimentales con el piezo-dispositivo de prueba	59
3.6.1	Experimento 1: Ensayo experimental de prueba.....	61
3.6.2	Experimento 2: Mediciones de las velocidades en el piezo-dispositivo.....	63
	CAPÍTULO IV	70
4.	Evaluación dinámica de la sensibilidad del Piezo-dispositivo	70

4.1	Introducción.....	70
4.1.1	Propiedades físicas y características del modelo	71
4.1.2	Condiciones de carga y de frontera.....	73
4.1.3	Puntos de medición de velocidad en análisis armónico	74
4.2	Resultados del análisis armónico	75
4.2.1	Resultados de la velocidad entre 1-5 kHz.....	75
4.2.2	Resultados de la velocidad entre 10-20 kHz.....	76
4.2.3	Análisis armónico para la correlación experimental de los modos de vibración	78
4.3	Resultados de la correlación experimental.....	80
4.3.1	Correlación del modelo de elementos finitos con los resultados experimentales de velocidad.....	80
4.3.2	Resultados de mediciones experimentales de velocidad del piezo-dispositivo, modelo de elementos finitos y comparación con señales de resistencia eléctrica.	81
4.3.3	Modos de vibración del piezo-dispositivo	83
4.4	Modelo de elementos finitos (FEM) del piezo-dispositivo acoplado a una interface y diferentes sustratos: Análisis armónico.....	85
4.4.1	Configuración del análisis armónico.....	88

4.4.2	Efectos de la variación de la interface (diente vs elemento mecánico) sobre un mismo sustrato	89
4.4.3	Efectos de las variaciones elásticas del sustrato sobre la lámina piezoeléctrica.	94
CAPÍTULO V		98
5.	Evaluación experimental del Piezo-dispositivo ante cambios elásticos en el sustrato de soporte	98
5.1	Introducción.....	98
5.2	Configuración experimental para determinar la velocidad del piezo-dispositivo empotrado	99
5.2.1	Resultados del análisis de velocidad en el piezo-dispositivo en condiciones de empotramiento	101
5.3	Comparación entre la velocidad y las mediciones de impedancia eléctrica en el piezo- dispositivo.	102
5.4	Análisis de vibración basado en la condición del piezo-dispositivo unido a diferentes sustratos	105
CAPÍTULO VI.....		113
6.	Conclusiones.....	113
REFERENCIAS		115

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1 Propiedades asignadas al cable, masa y actuadores piezoeléctricos	48
Tabla 4.1 Propiedades físicas y mecánicas de los materiales asignados en ANSYS.....	71
Tabla 4.2 Matriz elástica material piezo-eléctrico PZT-5H asignada en ANSYS, valores en GPa.....	72
Tabla 4.3 Valores de frecuencia para picos identificados entre 1000 Hz y 35000 Hz	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Recuperado y modificado de Bhalla & Suresh (2013). a) Hueso de prueba. b) Efectos de la densidad del hueso sobre la señal de conductancia.	24
Figura 2.1 Sistema de un grado de libertad con excitación armónica.....	26
Figura 2.2 Función típica de respuesta en frecuencia de un GDL	31
Figura 2.3 Grafica lineal-log de la receptancia, movilidad y aceleración.....	32
Figura 2.4 Recuperado y modificado de Tsogka et al. (2017). Campanario de la basílica de San Prieto	36
Figura 2.5 Recuperado y modificado de Hu et al. (2013). Representación esquemática del puente peatonal de FEUD. A. vista general puente peatonal de FEUP, b. elevación longitudinal, c. elevación transversal, d. sección en corte.	38
Figura 2.6 Recuperado y modificado de Hu et al. (2015). Turbina eólica a. vista general, b. esquema de una turbina de viento y la posición de los 8 acelerómetros, c. vista en plano de la turbina de viento y dirección del viento.	41
Figura 2.7 Recuperado y modificado de Hu et al. (2015). a. Forma modal SWD, b. forma modal MWD, c. modo dominante, d. modo numérico.....	42
Figura 2.8 Recuperado y modificado de García et al. (2012). Partes de una turbina: 1. aspas, 2. rotor, 3. caja de engranes, 4. generador, 5. rodamientos, 6. sistema de bandas, 7. torre.	43
Figura 3.1 Diseño concepto del piezo-dispositivo vibratorio. b) Masa cilíndrica. c) Láminas piezoeléctricas. Dimensiones en [mm].	45
Figura 3.2 Esquemas de la junta de acople.	46

Figura 3.3 Dimensiones de las juntas: a) Diseño A, b) Diseño B, c) Diseño C. Dimensiones en [mm]	47
Figura 3.4 Modelo con junta en la posición inicial y final.....	48
Figura 3.5 Malla usada para los modelos A, B y C.....	50
Figura 3.6 Zona de desplazamiento máximo del dispositivo diseño B. a) Isométrico. b) Plano x-y.	52
Figura 3.7 Desplazamiento máximo de la masa VS posición de la junta para los tres diseños analizados.....	53
Figura 3.8 a) Fuerzas de reacción en el punto de empotramiento. b) RMS de las fuerzas de reacción.	54
Figura 3.9 a) Comparación dimensional de prototipos en escala adimensional. b) Dimensiones no detalladas del prototipo operativo en mm.	55
Figura 3.10 Prototipo de prueba.....	58
Figura 3.11 Prototipo operativo versión.....	59
Figura 3.12 Esquema general del experimento de prueba	61
Figura 3.13 a) Montaje experimental con cabeza de sensor Dytran1051V2. b) Montaje experimental sin cabeza de sensor.	63
Figura 3.14 a) Montaje experimental con prototipo de prueba. b) Señal de entrada chirp. c) Señal de salida de velocidad.	64
Figura 3.15 a) Periodograma barrido lineal tiempo VS Frecuencia. b) Puntos de medición en el piezo-dispositivo operativo.	65

Figura 3.16 a) Amplitud de velocidad para P_{1m}, P_{2m} y P_{5m} . b) Amplitud de velocidad para P_{3m}, P_{4m} y P_{5m} .	66
Figura 3.17 a) Amplitud de velocidad para P_{1p} y P_{2p} . b) Amplitud de velocidad para P_{1v} y P_{2v} .	66
Figura 3.18 Funciones de respuesta en frecuencia entre 1-5 kHz, a) $P_{1m}, P_{2m}, P_{3m}, P_{4m}$ y P_{5m} . b) P_{1p} y P_{2p} . c) P_{1v} y P_{2v} .	68
Figura 3.19 Funciones de respuesta en frecuencia entre 10-20 kHz, a) $P_{1m}, P_{2m}, P_{3m}, P_{4m}$ y P_{5m} . b) P_{1p} y P_{2p} . c) P_{1v} y P_{2v} .	69
Figura 4.1 a) Elementos del modelo (piezo-dispositivo) de elementos finitos. b) Condiciones físicas del modelo.	70
Figura 4.2 Enmallado del modelo	73
Figura 4.3 Puntos de evaluación de velocidad.	74
Figura 4.4 Velocidad normalizada frecuencia 1-5 kHz	76
Figura 4.5 Velocidad normalizada frecuencia 10-20 kHz	77
Figura 4.6 Modos de vibración identificados entre 1-20 kHz	78
Figura 4.7 a) Elementos del modelo (piezo-dispositivo) de elementos finitos. b) Puntos de medición.	79
Figura 4.8 a) Correlación entre los valores de los picos de frecuencia numéricos y experimentales. b) Razón entre frecuencias desde una frecuencia máxima base.	80

Figura 4.9 a) Velocidad promedio en la lámina piezoeléctrico con frecuencia corregida. b) Velocidad en la masa con frecuencia corregida.....	82
Figura 4.10 Modos de vibracion del piezo-dispositivo (comparacion experimental-FEM).	84
Figura 4.11 Correlaciones numericas y experimentales de la velocidad en los puntos marcados de la Figura 4.7b.	84
Figura 4.12 Modelo completo de análisis, dispositivo, interface y sustrato.	86
Figura 4.13 Reconstrucción computacional del diente Canino.....	87
Figura 4.14 Mallado del modelo con interface. a) Diente. b) Cono.	88
Figura 4.15 Modelo de elementos finitos para el conjunto de estudio, puntos de interés resaltados.....	89
Figura 4.16 Comparaciones entre velocidades promedio en la frecuencia con un sustrato de módulo de Young de 5GPa. a) Lamina piezoeléctrica. b) Masa.....	90
Figura 4.17 Velocidad media en sustrato puntos P1-P3 a) cono. b) comparación cono y sensor aislado. c) Diente canino. d) Comparación diente canino y sensor aislado.....	93
Figura 4.18 Efectos de las variaciones elásticas del sustrato en la velocidad media de la lamina piezoeléctrica usando la interface. a) cono. b) sección A-A cono. c) diente. d) Sección A-A, diente	94
Figura 4.19 Efectos en la forma modal del dispositivo e interface cono por las variaciones elásticas	95
Figura 4.20 Efectos en la forma modal del dispositivo e interface diente por las variaciones elásticas	96
Figura 5.1 Configuración experimental paras mediciones de velocidad.	100

Figura 5.2 Mediciones de velocidad. a) Parche piezoeléctrico (P1, P2, P3, P4). b) Alambre y masa (P5, P6, P7).	102
Figura 5.3 Configuración experimental para mediciones de impedancia eléctrica.	103
Figura 5.4 Comparación entre resonancias de la velocidad y resistencia eléctrica, a) 1-2kHz. b) 6-15kHz.....	105
Figura 5.5 Velocidades en el tiempo de los puntos de medición descritos en la Figura 5.1b.	107
Figura 5.6 Velocidades en la frecuencia de los puntos de medición descritos en la Figura 5.1b.....	109
Figura 5.7 Velocidad media de las velocidades en la frecuencia de la lámina piezoeléctrica.	110
Figura 5.8 Comparación de modos de vibrar obtenidos desde la velocidad experimental en 8800 Hz.	111

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1 Planos detallados del piezo dispositivo.....	116
Anexo 2 Programas de MATLAB.	116
Anexo 3 Planos probeta e interfaz.	116
Anexo 4 Publicaciones.....	116

CAPITULO I

1. Introducción

1.1 Introducción

A principio de los años 80, en las industrias aeroespaciales y petroleras surgió la necesidad de implementar técnicas de mantenimiento más avanzadas lo que promovió el inicio de la detección de daños en sistemas mecánicos utilizando el análisis de las vibraciones mecánicas. Los primeros enfoques utilizados correspondieron con la correlación de modelos numéricos paramétricos para evaluar los cambios dinámicos en componentes dañados (variación de propiedades localizadas) y no dañados (Carden & Fanning, 2004).

En términos más generales, el daño se puede definir como la afectación negativa del rendimiento de un sistema mecánico después de un cambio en sus propiedades o características. Implícito en esta definición, está el concepto que un daño no es significativo si entre dos estados del sistema no existen diferencias dinámicas comparativas (Farrar et al., 2001). Esto puede ser verificado mediante diferentes metodologías que han sido propuestas en el tiempo para determinar estos tipos de cambios desde diversas perspectivas, ya sea en sitio o fuera de servicio (Deraemaeker et al., 2008).

Actualmente, la evaluación de la integridad estructural y las técnicas de detección de daños son herramientas de gran importancia en las áreas de mantenimiento, tanto por razones de

seguridad funcional, o por los beneficios económicos (Fan & Qiao, 2011). La necesidad de poder detectar daños en estructuras ha llevado a desarrollo de una amplia gama de técnicas, muchas de las cuales se basan en el análisis de vibraciones (Carden & Fanning, 2004).

En los últimos años los transductores piezo-eléctricos siguen incrementando su popularidad en diferentes áreas de la mecánica estructural, esto debido a las diversas aplicaciones que han sido desarrolladas en estructuras (Deraemaeker et al., 2008, Tawie & Lee, 2010 Velásquez-Forero, 2009). Especialmente, en estructuras civiles, aeroespaciales, sistemas mecánicos y recientemente en sistemas biológicos (Ribolla & Rizzo, 2015; Bhalla & Suresh, 2013) entre otras. Esto se debe a la capacidad que tienen diferentes materiales para convertir energía mecánica en energía eléctrica y viceversa, como por ejemplo los materiales piezoeléctricos y ferro-eléctricos. Los materiales piezo-eléctricos pueden medir la respuesta dinámica local cuando son usados como sensores y estos generan una deformación local cuando son usados como actuadores. Bajo ciertas condiciones, estas mediciones y excitaciones pueden ser utilizadas para obtener información de una estructura y de esta forma utilizar algunas metodologías de monitoreo de la integridad estructural (SHM). Estas metodologías permiten correlacionar parámetros intrínsecos de la estructura con diferentes estrategias de monitoreo para verificar algún cambio en las propiedades. Con las tecnologías desarrolladas con materiales piezoeléctricos se han logrado diferentes herramientas para analizar el comportamiento de las estructuras cuando son sometidas a diferentes tipos de fuerzas (controladas y aleatorias). Algunas técnicas se han propuesto para cuantificar y localizar las modificaciones estructurales, tales como técnicas con frecuencias naturales y formas modales, técnicas de emisión, técnicas de propagación de ondas Lamb, técnicas con

la impedancia electromecánica (EMI) (Kessler & Spearing, 2002). Sin embargo, las técnicas más aplicadas son la técnica EMI y la técnica de propagación de ondas Lamb debido a que presentan mayores ventajas respecto de las otras, la principal, es que en alta frecuencia pueden ser muy sensibles a pequeñas variaciones estructurales. Estas herramientas todavía están en etapa de desarrollo y necesitan de un amplio espectro de investigación en sus aplicaciones.

Recientes estudios han explorado la aplicación de la técnica EMI en el campo biomédico, podemos mencionar el uso de piezoeléctricos como sensores biomédicos para monitorear la condición de los huesos en laboratorio (Zou et al, 2000; Moll et al. 2018), y la estabilidad de implantes dentales (Boemio et al., 2011; Ribolla & Rizzo, 2015); sin embargo, las aplicaciones reales están lejos de ser usadas en humanos.

En este trabajo se muestra el desarrollo de un piezo-dispositivo que se constituye de materiales piezo-eléctricos usados para monitorear los cambios de las propiedades elásticas del sustrato donde este se acopla.

1.2 Planteamiento del problema y pregunta de investigación

La identificación de daños estructurales ha ganado cada vez más atención por parte de las comunidades científicas debido a que la falla estructural imprevista puede causar pérdidas catastróficas, económicas y humanas (Fan & Qiao, 2011).

Una evaluación estructural se puede utilizar para determinar las siguientes condiciones estructurales; daño, deterioro, rendimiento, pronóstico, esquemas de mantenimiento preventivo, índices de confiabilidad y vida residual de las estructuras, Todo esto se realiza

con el fin de verificar el estado de las estructuras para administrar en buen término los recursos humanos, financieros y tiempos de acuerdo con la importancia económica, social, costo de la estructura y seguridad de los usuarios.

El desarrollo de técnicas SHM tiene muchos elementos que la convierten en un “gran desafío” en diferentes áreas de la ingeniería, ya que existen diferentes limitaciones en la aplicación de del monitoreo estructural de forma práctica. Por lo tanto, en el contexto que se desarrolla este trabajo, los desafíos son parte de los objetivos definidos en el macroproyecto “Identificación de cambios en la densidad ósea desde estructuras dentales utilizando un dispositivo vibratorio de alta frecuencia mediante la técnica EMI (Electromechanical impedance)”; que pretende monitorear con un piezo-dispositivo, el cambio en las propiedades elásticas del soporte a través de una interface de acoplamiento. El monitoreo se realizará por medio de la evaluación dinámica aplicando análisis de frecuencias y formas modales. Esta evaluación es típicamente conocida como monitoreo de condición basado en vibraciones (Bhalla & Suresh, 2013)

Como el dispositivo tendrá una bio-aplicación, es decir, este evaluará la densidad del hueso (cambio en su contenido mineral) a través de piezas dentales; este trabajo emula condiciones estructurales similares (cambios de elasticidad). En general, las técnicas para el diagnóstico óseo (SPA, QCT, DXA, etc.) generan niveles variables de radiación ionizante indeseada (una cantidad limitada de diagnósticos) y son de un alto costo económico (Ibáñez, 2003). Además, para los diagnósticos tradicionales se debe considerar el personal que realiza el diagnóstico y también los equipos requeridos, que deben ser especializados. De las limitantes anteriores para el diagnóstico de las variaciones óseas, surge la siguiente pregunta de investigación que sustenta el desarrollo de la tesis presentada:

¿Cómo cuantificar mediante el análisis de las características dinámicas de un dispositivo piezo-actuado las variaciones elásticas de su soporte?

1.3 Justificación

El monitoreo de la integridad estructural (SHM) es un área de gran interés técnico y científico debido a que las infraestructuras existentes requieren de permanente supervisión lo cual hace que el costo de mantenimiento y reparaciones sean variables importantes en este tipo de actividades. El monitoreo continuo mediante SHM podría reemplazar la inspección programada según sea necesario, ahorrando así el costo innecesario, por una parte, y evitando el sobrecosto que generan los diagnósticos no programados (Zou et al. 2000; Salawu 1997). Adicionalmente, para las nuevas estructuras, la inclusión de sistemas de monitoreo desde la etapa de diseño probablemente reducirá en gran medida el costo de operación en el ciclo de vida de las estas.

La mayoría de los métodos de identificación de daños no destructivos se pueden clasificar en técnicas de identificación enfocadas en daños locales o globales (Fan & Qiao, 2011). Las técnicas locales son basadas en métodos ultrasónicos y de rayos X (siendo las principales), estos requieren que se conozca a priori la proximidad del daño y que este sea accesible para realizar pruebas, lo que no se puede garantizar en la mayoría de los casos en que las aplicaciones se relacionan con estructuras civiles y aeroespaciales. Por lo tanto, la identificación de daños basada en las características dinámicas globales se presenta como una técnica que supera las dificultades encontradas en la identificación localizada, ya que desarrolla un mayor potencial por su aplicación (Deraemaeker et al., 2008, Tawie & Lee, 2010). La idea fundamental se centra en que los cambios inducidos por daños en las

propiedades físicas (masa, amortiguación y rigidez) causarán cambios detectables en las propiedades modales (frecuencias naturales, amortiguación modal y formas de modo) como lo demuestran algunos autores (Deraemaeker et al., 2008, Tawie & Lee, 2010 Velásquez Forero, 2009, Carden & Fanning, 2004, Kessler & Spearing, 2002).

Durante los últimos años, la comunidad biomédica ha mostrado un gran interés por la utilización de los materiales piezo-eléctricos en el campo de tecnologías aplicadas con uso clínico. Bender et al. (2006) reportaron el uso de láminas de piezoeléctricos con el fin de monitorear la formación de cápsulas alrededor de implantes de tejidos blandos en ratas *Sprague dawley* utilizando la técnica de impedancia electromecánica (EMI). Se ha asociado un interés especial en la medición de las propiedades mecánicas de los huesos, ya que su condición y bienestar se pueden correlacionar fácilmente con las propiedades mecánicas, como el módulo de Young y la densidad (Erickson et al., 2002; Ritchie et al., 2006). Es sabido que naturalmente los huesos son sometidos a una reestructuración continua producida por el recambio óseo que es un proceso biológico normal, sin embargo; bajo otras condiciones anormales el hueso muestra cambios estructurales que se asocian con diferentes enfermedades metabólicas; como la osteoporosis, que se acompaña de la pérdida de densidad ósea. El hecho que el tejido óseo sea una estructura en constante adaptación, responde a una amplia gama de estímulos externos e internos, esto contribuye a la complejidad del estudio de su comportamiento. Los investigadores enfrentan una tarea desalentadora cuando buscan una mejor comprensión de cómo los diferentes factores afectan su metabolismo, especialmente porque los procesos continuos de modelado, remodelado y adaptación de las estructuras óseas imponen inherentemente la necesidad de una evaluación repetida de la

densidad mineral ósea (DMO). Estudiar los efectos de la edad (Laermann KH, 2010), el sexo. (Yang et al., 2008), dieta, carga física, salud sistémica (Giurgiutiu & Zagrai, 2002) y factores ambientales en la DMO, son los desafíos que proponen la realización de estudios con mediciones confiables. Las técnicas para la evaluación de la DMO incluyen la radiogrametría (RG), la técnica de dispersión Compton, fotodensitometría radiográfica (PR), absorpsometría de fotones de energía dual (DPA) entre otros. En general, la mayoría de las técnicas actuales se consideran invasivas, ya que la cuantificación de la densidad ósea implica el uso de radiación ionizante (rayos X), lo que valida la necesidad de desarrollar un método más conservador para evaluar las variaciones de la DMO que permitan la evaluación repetida en seres humanos.

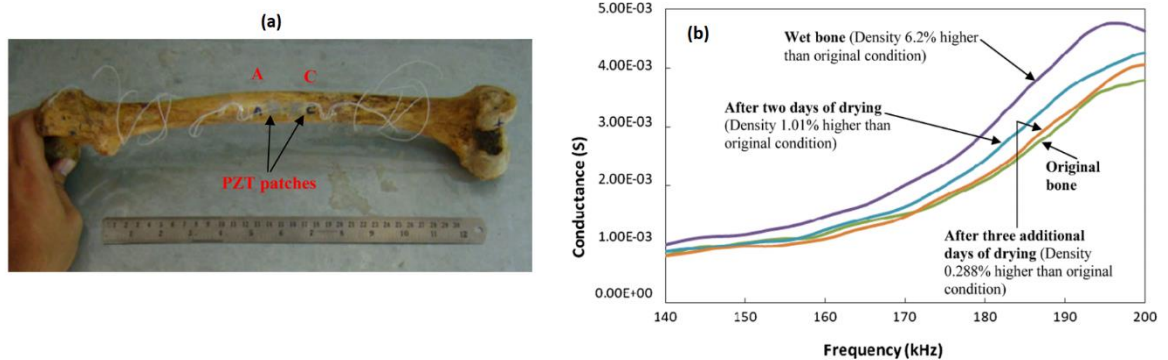


Figura 1.1 Recuperado y modificado de Bhalla & Suresh (2013). a) Hueso de prueba. b) Efectos de la densidad del hueso sobre la señal de conductancia.

En realidad, diferentes autores han propuesto algunas aplicaciones en el campo biomédico, como el uso de sensores para monitorear el estado de los huesos, mediante estudios experimentales en huesos humanos, como experimentó Bhalla & Suresh (2013); donde los cambios en las señales de conductancia eléctrica correlacionaron las variaciones en la condición de los huesos (Ver Figura 1.1). Adicionalmente, Ribolla & Rizzo (2015)

propusieron una técnica para monitorear un implante dental utilizando la técnica EMI. El método consistió en medir la admitancia eléctrica de un piezo-transductor integrado al implante con el fin de correlacionar los parámetros mecánicos de estabilidad con las mediciones eléctricas. Esto ilustra la oportunidad de utilizar la técnica EMI en el monitoreo de estructuras biológicas, lo cual evidencia que el desarrollo de dispositivos para usos de diagnóstico biomédica es una temática vigente y de gran interés.

1.4 Objetivos

Objetivo General.

Analizar la respuesta en frecuencia de un dispositivo piezo-actuado para la identificación de variaciones elásticas de su soporte

Objetivos específicos.

- Desarrollar un dispositivo electromecánico (piezoeléctrico) y determinar sus funciones de respuesta en frecuencia mayores a 1 kHz.
- Evaluar numéricamente la sensibilidad del dispositivo en alta frecuencia (>1 kHz) sujeto a variaciones elásticas del soporte y a diferentes interfaces acoplamiento.
- Evaluar mediante experimentos la dinámica del dispositivo para determinar los efectos de los cambios elásticos en el soporte.

CAPÍTULO II

2. Revisión de la literatura

2.1 Análisis modal de un sistema dinámico de un grado de libertad

A diferencia de la teoría clásica de vibraciones, que se ocupa principalmente de la respuesta de un sistema dinámico en el tiempo; el análisis modal se ocupa de la respuesta en la frecuencia debido a sus propiedades intrínsecas (masa, rigidez y amortiguamiento). Esta sección definirá la función de respuesta en frecuencia de un sistema dinámico de un grado de libertad (SDoF) la cual forma una base para los métodos experimentales del análisis modal.

2.1.1 Funciones de respuesta de frecuencia de un sistema de un grado de libertad

Algunos sistemas mecánicos y estructurales pueden idealizarse como sistemas de un grado de libertad. La teoría para un sistema de un grado de libertad proporciona una visión física de la vibración de un sistema estructural. Para hablar de sistemas de un grado de libertad se tomó como ejemplo el sistema masa resorte con y sin amortiguamiento.

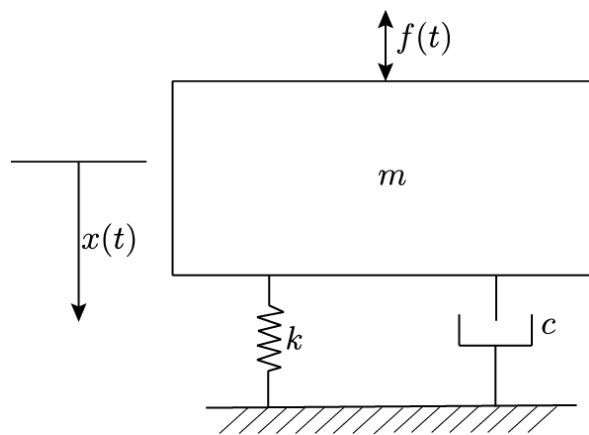


Figura 2.1 Sistema de un grado de libertad con excitación armónica

Para una fuerza armónica $f(t) = F(\omega)e^{j\omega t}$, la respuesta del sistema es otra función armónica $x(t) = X(\omega)e^{j\omega t}$ donde $X(\omega)$ es una amplitud compleja. Al sustituirlos en las ecuaciones de movimiento de diferentes modelos de amortiguación, podemos derivar la relación de la respuesta de desplazamiento y la entrada de fuerza como

- Para amortiguamiento viscoso:

$$\frac{X(\omega)}{F(\omega)} = \frac{1}{k - \omega^2 m + j\omega c} \quad (2.1)$$

- Para amortiguamiento estructural:

$$\frac{X(\omega)}{F(\omega)} = \frac{1}{k - \omega^2 m + jh} \quad (2.2)$$

Esta relación, a menudo denotada como $\alpha(\omega)$, se define como la función de respuesta de frecuencia (FRF) del sistema. Aunque se define como la proporción de la fuerza y la respuesta, la FRF es independiente de ellos. Cuando la amortiguación es cero, la función FRF compleja se relega a una función real. La FRF es la función principal de la que dependerá el análisis modal. Aunque en teoría el FRF solo la dicta el sistema, en realidad la precisión de los datos medidos de FRF es fundamental para el éxito del análisis modal. Las FRF definidas en las ecuaciones (2.1) y (2.2) pueden tomar diferentes formas. Para el caso de amortiguamiento viscoso, se calcula como (Fu & He, 2001)

$$\alpha(\omega) = \frac{1/k}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} + j2\frac{\omega}{\omega_0}}. \quad (2.3)$$

Donde ω_0 son las frecuencias de resonancia. Usando la masa en la ecuación 2.3, tenemos que

$$\alpha(\omega) = \frac{1/m}{\omega_0^2 - \omega^2 + j2\omega\omega_0\xi}. \quad (2.4)$$

Para el caso de amortiguamiento estructural, las expresiones son similares, tal que

$$\alpha(\omega) = \frac{1/k}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} + j\eta^2}, \quad (2.5)$$

y modificando la ecuación 2.4 es determinado que

$$\alpha(\omega) = \frac{1/m}{\omega_0^2 - \omega^2 + j\omega_0^2\eta}. \quad (2.6)$$

La respuesta de vibración también puede ser de velocidad o aceleración. Al reemplazar la respuesta de desplazamiento $X(\omega)$ con la velocidad $\dot{X}(\omega)$ y aceleración $\ddot{X}(\omega)$, se pueden definir diferentes FRF como

- Movilidad FRF para un amortiguamiento viscoso:

$$Y(\omega) = \frac{\dot{X}(\omega)}{F(\omega)} = \frac{j\omega}{k - \omega^2 m + j\omega c} \quad (2.7)$$

- Movilidad FRF con histéresis en el amortiguamiento:

$$Y(\omega) = \frac{\dot{X}(\omega)}{F(\omega)} = \frac{j\omega}{k - \omega^2 m + jh} \quad (2.8)$$

- Aceleración FRF para un amortiguamiento viscoso:

$$Y(\omega) = \frac{\ddot{X}(\omega)}{F(\omega)} = \frac{-\omega^2}{k - \omega^2 m + j\omega c} \quad (2.9)$$

- Aceleración FRF con histéresis en el amortiguamiento:

$$Y(\omega) = \frac{\ddot{X}(\omega)}{F(\omega)} = \frac{-\omega^2}{k - \omega^2 m + jh} \quad (2.10)$$

Es evidente que los tres tipos de FRF, $\alpha(\omega)$, $Y(\omega)$ y $A(\omega)$, son fácilmente intercambiables. Los tres son funciones complejas de frecuencia. Sus amplitudes cumplen

$$|A(\omega)| = \omega |Y(\omega)| = \omega^2 |\alpha(\omega)|. \quad (2.11)$$

La diferencia de fase entre ellos permanece constante en cualquier frecuencia

$$\theta_{A(\omega)} = \theta_{Y(\omega)} + \frac{\pi}{2} = \theta_{\alpha(\omega)} + \pi. \quad (2.12)$$

Los recíprocos de las tres FRF de un sistema de un grado de libertad también tienen un significado físico útil y, en ocasiones, se utilizan en el análisis modal. Son respectivamente

- Rigidez dinámica:

$$\frac{1}{\alpha(\omega)} = \frac{F(\omega)}{X(\omega)} \quad (2.13)$$

- Impedancia mecánica:

$$\frac{1}{Y(\omega)} = \frac{F(\omega)}{\dot{X}(\omega)} \quad (2.14)$$

- Masa aparente:

$$\frac{1}{A(\omega)} = \frac{F(\omega)}{\ddot{X}(\omega)} \quad (2.15)$$

La FRF de un sistema de un grado de libertad se puede presentar en formas diferentes a las de las ecuaciones anteriores. Para el caso de la amortiguación viscosa, la FRF puede factorizarse para convertirse en

$$\alpha(\omega) = \frac{R}{j\omega + \lambda} + \frac{R^*}{j\omega + \lambda^*}, \quad (2.16)$$

dónde $R = \frac{1}{2m\omega_0 j}$ y $\lambda = (-\zeta + \sqrt{1 - \zeta^2} j)\omega_0$.

Los coeficientes conjugados R y R^* se denominan residuos de la receptancia. λ y λ^* son los polos complejos del sistema de un grado de libertad. Si se considera que la misma FRF de receptancia es la función de transferencia con la parte real de la variable de Laplace anulada, entonces se puede expresar como:

$$\alpha(\omega) = \frac{1}{(j\omega)^2 m + (j\omega)c + k} \quad (2.17)$$

La FRF también se puede ver como la transformada de Fourier inversa de la respuesta al impulso del sistema, por lo tanto:

$$\alpha(\omega) = F^{-1}(h(t)) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)e^{j\omega t} dt. \quad (2.18)$$

2.1.2 Tipos de representación de las funciones de respuesta en frecuencia

La gráfica de amplitud-fase consta de dos partes: la magnitud del FRF frente a la frecuencia y la fase frente a la frecuencia. La gráfica de fase no tiene mucha variedad, ya que la información de la fase no se puede procesar numéricamente de la misma manera que los datos de magnitud. Por lo tanto, el foco principal estará en la gráfica de magnitud de una FRF. Esta gráfica se puede trazar en una escala lineal para los ejes de frecuencia y magnitud (gráfica lineal-lineal). La Figuras 2 muestra una representación de la receptancia, movilidad y aceleración del mismo sistema de un grado de libertad, todas son denominadas funciones de respuesta en frecuencia.

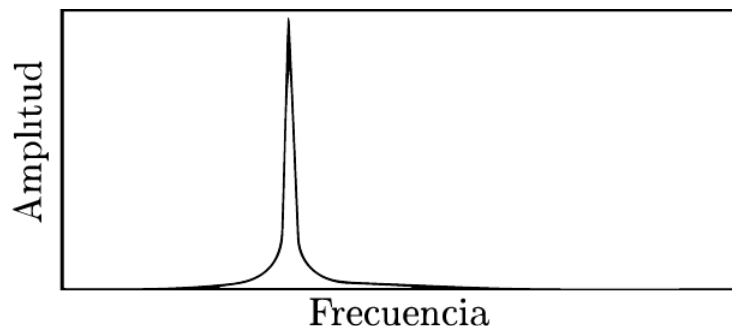


Figura 2.2 Función típica de respuesta en frecuencia de un GDL

Una característica distintiva de estas figuras es la prominencia de la resonancia. Pero debido a eso, es difícil apreciar toda la curva de FRF, ya que el pico de alta resonancia reduce la escala del resto de la curva. Para superar esto, es habitual en el análisis modal trazar datos utilizando escalas logarítmicas. Esto se puede hacer de dos maneras diferentes:

- Escala logarítmica solo para el eje de frecuencia (gráfica lineal-logarítmica)
- Escalas logarítmicas para ambos ejes de módulo y frecuencia (gráfica log-log).

En ambos casos, la magnitud del FRF se convierte en su escala de decibeles definida como:

$$FRF_{dB} = 20 \log_{10} \frac{\text{magnitud lineal}}{\text{unidad FRF}} \quad (2.19)$$

Por ejemplo, la receptancia FRB en dB es estimada como

$$\alpha(\omega)_{dB} = 20 \log_{10} \left| \alpha(\omega) \right| \frac{N}{m}. \quad (2.20)$$

La Figura 2.3 muestra la gráfica lineal-logarítmica de un FRF en formas de receptancia, movilidad y aceleración.

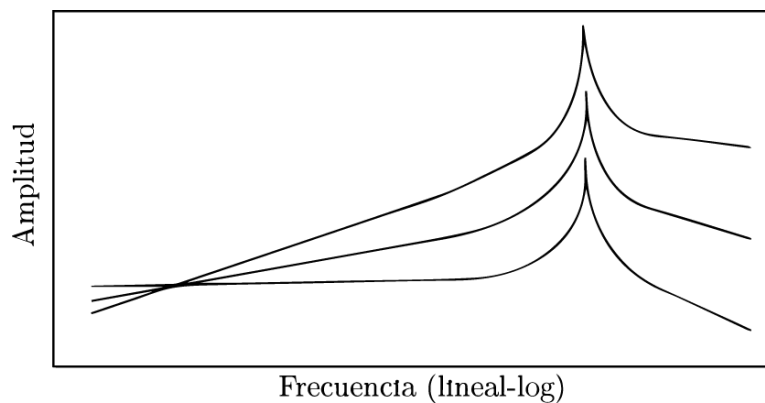


Figura 2.3 Grafica lineal-log de la receptancia, movilidad y aceleración.

Dado que la expresión analítica de un FRF está determinada por los parámetros del sistema (masa, rigidez y amortiguación) así como por la variable de frecuencia, es razonable que estos parámetros se puedan derivar fácilmente del gráfico FRF. Sin embargo, la gráfica lineal-lineal que se muestra en la Figura 2.3 evidencia que no es tan obvio cómo se pueden derivar los parámetros físicos. De la teoría de vibraciones de un sistema de un grado de libertad sabemos que, a baja frecuencia, la FRF está dominada por la rigidez característica del sistema. En alta frecuencia, la característica de masa domina la FRF. En las proximidades de la resonancia, la característica de amortiguación atenúa esta. La gráfica lineal-lineal no es una buena herramienta para estudiar de forma asertiva las características de masa y rigidez del sistema, mientras que la gráfica doble logarítmica sí.

2.2 Monitoreo de la integridad estructural basado en vibraciones

Las técnicas de monitoreo de integridad estructural (SHM por sus siglas en inglés) se han estudiado durante varios años y presentan enfoques efectivos para evaluar los parámetros estructurales que son sensibles al daño. Dentro de estas técnicas, existen varias metodologías para la detección de los daños basados en vibraciones. La inspección visual ha sido la técnica de detección de fallas más común y de menor inversión económica, sin embargo, este método tradicional solo se puede aplicar en estructuras simples (Dessi & Camerlengo, 2015). En el caso de diseños estructurales complejos, las inspecciones visuales pueden no ser aplicadas debido a la accesibilidad restringida. El monitoreo de integridad estructural es un método para evaluar el estado estructural y el desempeño sin afectar la estructura en sí. Esto implica comprender el comportamiento de la estructura en diferentes condiciones (Modares & Waksman, 2013). De todas las diversas metodologías de monitoreo, los métodos más

utilizados son los basados en vibraciones, ya que tratan con el cambio de las curvaturas modales y las frecuencias naturales para definir las funciones de probabilidad de daño. SHM abarca métodos locales y globales de identificación de daños.

Los métodos locales incluyen inspecciones visuales y herramientas de evaluación no destructiva, como emisión acústica, ultrasonidos, inspección de partículas magnéticas, radiografía y corrientes de Foucault. Todas estas técnicas, sin embargo, requieren una localización previa de la zona dañada y acceso a los lugares bajo inspección. Como una alternativa que supera estas limitaciones, los métodos basados en la vibración global se han desarrollado ampliamente a lo largo de los años (Farrar et al. 1994; Salawu, 1997; Doebling et al. 1998; Sohn et al. 2003; Chang et al. 2003; Farrar & Worden, 2007). El SHM basado en mediciones de vibración implica la medición temporal de una estructura mediante vibraciones muestreada periódicamente, la extracción de características sensibles al daño de estas mediciones y la evaluación de la integridad actual del sistema. La premisa básica de las técnicas basadas en la vibración es que las características de vibración o los llamados parámetros modales (frecuencias, formas de vibrar y amortiguamiento modal) son funciones de las propiedades físicas de la estructura (masa, amortiguamiento y rigidez).

De acuerdo con sus diferentes técnicas de detección, los métodos de análisis modal se pueden dividir en las siguientes categorías principales (Zimmerman & Smith, 1992):

- método de función de respuesta en frecuencia (Thyagarajan et al. 1998)
- métodos de cambio de forma modal (Lam et al. 1995),
- métodos de curva de forma modal

- método de parámetros modales combinados

En esta sección se discutirán los primeros dos métodos y otros revisados en la literatura.

2.2.1 Métodos basados en la respuesta en la frecuencia

Cawley & Adams (1979) comenzaron la investigación sobre las técnicas de detección de daños basadas en la frecuencia. Es una técnica simple que trata la detección de daños basada en los cambios en la frecuencia natural de la estructura. Los cambios en la frecuencia natural se producen debido a cambios en la masa, la rigidez y otros parámetros estructurales (Pandey et al. 1991; Hwang & Kim, 2004). La respuesta de frecuencia se obtiene a partir de la ecuación diferencial de movimiento de segundo orden (Huang et al. 2012).

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = f(t), \quad (2.21)$$

donde M , K y C son las matrices $n \times n$ de masa, rigidez y amortiguamiento, respectivamente. $x(t)$, $\dot{x}(t)$ y $\ddot{x}(t)$ son los vectores de desplazamiento, velocidad y aceleración, respectivamente. $f(t)$ es la fuerza externa del sistema que sería igual a $F(\omega)e^{i\omega t}$ y el desplazamiento que es igual a $x(t) = x(\omega)e^{i\omega t}$. La medición de FRF elimina la acumulación de errores que se forman durante el proceso de extracción de parámetros modales. Por lo tanto, según Huang et al. (2012) la ecuación 2.21 se convierte en

$$\frac{-\omega^2 M + j\omega C + K}{-\omega^2} \ddot{x}(\omega)e^{i\omega t} = F(\omega)e^{i\omega t}, \quad (2.22)$$

donde $\ddot{x}(\omega)$ es el vector de amplitud de respuesta de aceleración en el dominio de la frecuencia que sería igual a $H(\omega)F(\omega)$. $H(\omega)$ es la matriz de aceleración de la función de respuesta de frecuencia (FRF) definida por

$$H(\omega) = \left(\frac{-\omega^2 M + j\omega C + K}{-\omega^2} \right)^{-1}, \quad (2.23)$$

y $F(\omega)$ es un vector de amplitud de fuerza en el dominio de la frecuencia.

Chen & Xu (2008); Yu et al. (2013) y Yu & Zhu (2015) utilizaron el método de respuesta en frecuencia en sus experimentos y determinaron que la técnica de daño es sensible a los cambios en el daño estructural pero no es sensible a los cambios de las condiciones ambientales.

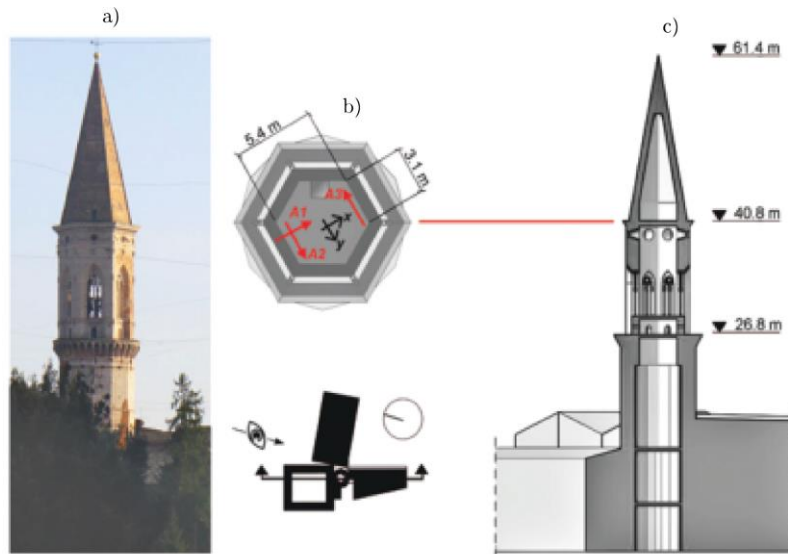


Figura 2.4 Recuperado y modificado de Tsogka et al. (2017). Campanario de la basílica de San Prieto

Tsogka et al. (2017) aplicaron una técnica de monitoreo basada en vibración en un campanario histórico localizado en Italia el cual se observa en la Figura 2.4. Los resultados demostraron que el monitoreo estructural permitió la detección de cambios de frecuencia del orden del 0.1%. En conclusión, Tsogka et al. (2017) consideran que la técnica propuesta es una alternativa bastante conveniente a las técnicas de procesamiento de señales existentes para el SHM basado en vibraciones a largo plazo, con ventajas en términos de reducción de la duración del período de entrenamiento y de la carga computacional.

Hu et al. (2013) con el propósito de investigar y eliminar los efectos de los factores ambientales y operativos en las propiedades modales, y detectar cambios estructurales tempranos en condiciones operativas, instalaron un sistema de monitoreo dinámico continuo con control remoto a través de internet en el puente peatonal del campus FEUP que se muestra en la Figura 2.5. Este sistema ha estado activo permanentemente desde junio de 2009 y se implementó con un conjunto de herramientas computacionales para procesar automáticamente la enorme cantidad de datos de monitoreo continuo. Entre sus funciones está la evaluación de niveles de vibración, medición de temperaturas, análisis de componentes de frecuencia e identificación modal estructural automatizada. Los resultados del monitoreo dinámico continuo obtenidos durante 2 años demuestran la eficiencia del procedimiento. En particular, se observa que los registros de temperatura muestran variaciones en el rango de 1.5 ° C a 49.0 C, mientras que la variación de las estimaciones de frecuencia de 12 modos cae en un intervalo de 15.3% a 21.4%. El análisis de correlación entre las estimaciones de frecuencia natural de diferentes modos y temperatura, así como los niveles de vibración promediados, revela que, desde el punto de vista del monitoreo a largo

plazo, la temperatura tiene un efecto primario en las variaciones de las frecuencias. El daño simulado basado en un modelo de elementos finitos fue validado experimentalmente.

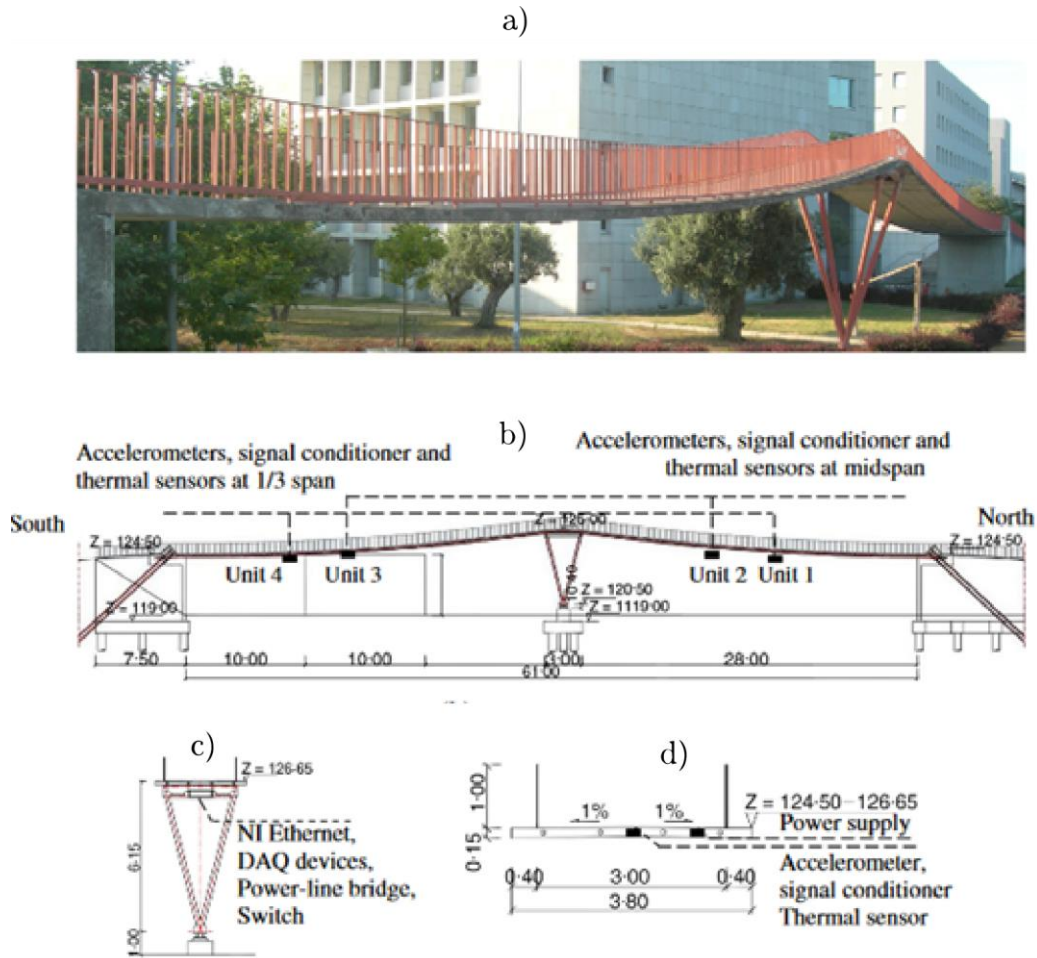


Figura 2.5 Recuperado y modificado de Hu et al. (2013). Representación esquemática del puente peatonal de

FEUD. A. vista general puente peatonal de FEUP, b. elevación longitudinal, c. elevación transversal, d.

sección en corte.

2.2.2 Método basado en la forma modal

En comparación con el uso de frecuencias naturales, la ventaja de usar formas modales y sus derivados como una característica básica para la detección de daños es bastante obvia. Primero, modos de vibrar contienen información local, lo que las hace más sensibles a los daños locales y les permite ser utilizadas directamente en detección de daños múltiples. En segundo lugar, los modos de vibrar son menos sensibles a los efectos ambientales, como la temperatura, que las frecuencias naturales (Farrar & James, 1997).

El método modal adoptado a principios de los 90 por Chen & Garba (1988), fue utilizado por Pandey et al. (1991), los cuales propusieron el uso de la curvatura del modo vibrar como el parámetro sensible para el daño estructural. Más tarde, se introdujo el concepto de curvatura del modo de vibrar para determinar tanto las propiedades como las frecuencias para la rigidez de una estructura. Li et al. (2011) y Wang & Qiao, (2007) utilizaron formas de modo y frecuencias naturales para determinar la sensibilidad de las estructuras, lo que puede determinar efectivamente el daño en una estructura. Se ha observado que los cambios en el modo de orden superior derivan de la curvatura modal, la derivada de tercer y cuarto orden son indicadores de daño más precisos que las formas de modo. El daño inducido en la estructura cambia las formas del modo de vibrar principal, que no pueden utilizarse para localizar el daño con precisión. Pero los derivados de orden superior muestran discontinuidades en las ubicaciones de daño, lo que indica que son más sensibles a la pérdida de rigidez y curvatura de la forma del modo que no presenta daño (Whalen TM, 2008).

El análisis modal se realiza comparando las frecuencias naturales y el modo de vibrar de las estructuras dañadas y no dañadas. La ecuación básica para las formas de modales de una viga sin daño es (Li et al., 2011)

$$\begin{aligned} \phi_k(\alpha_k \xi_k) &= C_k^{(1)} \sin(\alpha_k \xi_k) + C_k^{(2)} \cos(\alpha_k \xi_k) + C_k^{(3)} \sinh(\alpha_k \xi_k) + C_k^{(4)} \cosh(\alpha_k \xi_k); \\ k &= 1, 2, 3 \end{aligned} \quad (2.24)$$

Donde α_k y $C_k^{(r)}$ son las frecuencias y los coeficientes que deben determinarse, y $\xi_k = x / L$, siendo x la longitud dividida de una viga y L la longitud total dañada de la viga.

La medición de las formas de vibrar de una estructura requiere un solo punto de excitación y muchos sensores o un excitador itinerante con uno o más sensores fijos. Hay muchas técnicas de análisis modal disponibles para la extracción del modo de vibrar a partir de los datos medidos en el dominio del tiempo (Maia & Silva, 1997). Se han desarrollado métodos de detección de daños para la identificación de daños basados directamente en formas modales medidas o sus curvaturas.

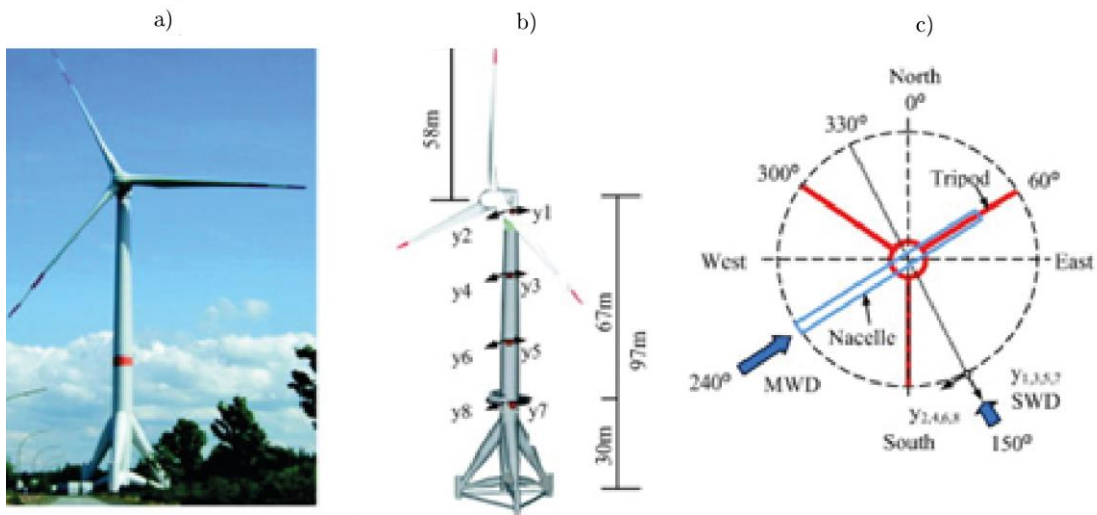


Figura 2.6 Recuperado y modificado de Hu et al. (2015). Turbina eólica a. vista general, b. esquema de una turbina de viento y la posición de los 8 acelerómetros, c. vista en plano de la turbina de viento y dirección del viento.

Dos métodos comúnmente usados para comparar dos conjuntos de modos son el Criterio de Garantía Modal, MAC (Allemang & Brown, 1982) y el Criterio de Garantía Modal de Coordenadas, COMAC (Li et al., 1999). El valor de MAC se puede considerar como una medida de la similitud de dos formas de modo. Un valor de MAC de 1 es una coincidencia perfecta y un valor de 0 significa que son completamente diferentes. Por lo tanto, la reducción de un valor de MAC puede ser una indicación de daño. El COMAC es una medida puntual de la diferencia entre dos conjuntos de formas de modo y toma un valor entre 1 y 0. Un valor bajo de COMAC indicaría discordancia en un punto y por lo tanto también es un posible indicador de ubicación de daño.

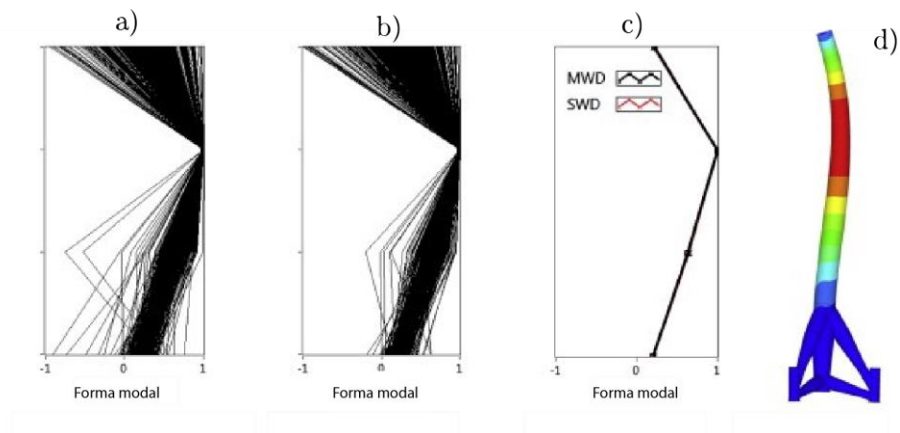


Figura 2.7 Recuperado y modificado de Hu et al. (2015). a. Forma modal SWD, b. forma modal MWD, c. modo dominante, d. modo numérico.

Una aplicación del análisis modal como técnica de detección de daño fue realizada por Hu et al. (2015) en una estructura de una turbina eólica (Ver Figura 2.6 y 2.7). Los autores concluyeron que el monitoreo de la integridad basado en vibraciones es una herramienta eficiente para poder comprender los comportamientos dinámicos estructurales que ocurren en cada sistema y que los hacen importantes a la hora de diseñar, mantener y gestionar un óptimo funcionamiento de las turbinas eólicas.

2.2.3 Otros métodos

En la literatura, también hay técnicas que no entran en ninguna de las categorías descritas anteriormente. Sawyer & Rao, (2000) propusieron un sistema de identificación de daños basado en la lógica difusa. Sohn & Law (2001) utilizaron vectores Ritz extraídos de la flexibilidad medida para el diagnóstico de daños. Tan et al. (2001) utilizaron medidores de tensión para monitorear la respuesta dinámica de losas de concreto reforzado. Las gráficas de la deformación dinámica medida mostraron firmas de deflexión únicas que variaron con el estado interno de la losa.

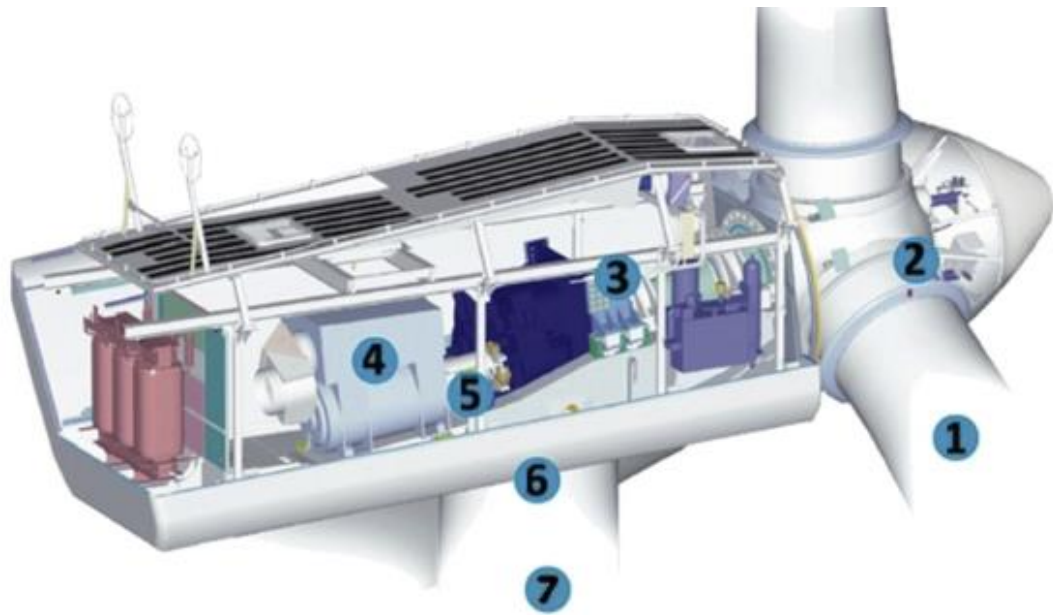


Figura 2.8 Recuperado y modificado de García et al. (2012). Partes de una turbina: 1. aspas, 2. rotor, 3. caja de engranes, 4. generador, 5. rodamientos, 6. sistema de bandas, 7. torre.

Magalhães et al. (2012) demostró que la metodología para el monitoreo de la integridad de un puente de arco de concreto, permitió la detección de escenarios de daños reales. Estos daños fueron asociados con cambios de frecuencia en torno al 0.2%, que se simularon con un modelo numérico.

García et al. (2012) adaptaron técnicas de monitoreo para turbinas de viento (ver Figura 2.8) usando análisis de vibraciones, junto con algoritmos de procesamiento de señales que posibilitaron la selección de un conjunto de procedimientos de diagnóstico. Como conclusión, esta técnica es comúnmente usada en toda la industria eólica debido a que ha mostrado beneficios en el mantenimiento de los parques eólicos marinos.

CAPÍTULO III

3. Diseño y evaluación experimental del piezo-dispositivo

3.1 Introducción

Este capítulo describe el diseño de un dispositivo piezo actuado que será usado como sensor en la identificación de variaciones elásticas de su soporte. El diseño se basa en los trabajos previos que fueron realizados por Tinoco et al. (2016a), Tinoco et al. (2016b) y Tinoco et al. (2017). Como diseño inicial, se definió el dispositivo funcional que fue validado en los estudios mencionados previamente. La idea principal de este capítulo, es la optimización del principio de funcionamiento del dispositivo mediante simulaciones numéricas. Herramientas de software como SOLIDWORKS ® y ANSYS son usadas para el desarrollo del diseño, incluyendo las simulaciones numéricas por análisis de elementos finitos (FEA).

3.2 Diseño del dispositivo piezo actuado basado en el concepto de Tinoco et al. (2016a)

De acuerdo con los autores, el dispositivo consta de un cable de acero usado en ortodoncia y actúa como viga de soporte, sobre este se ensambla una junta hecha con dos piezoeléctricos en forma de láminas. La junta de piezoeléctricos brinda la posibilidad de operar simultáneamente como actuador y sensor; ya que el acoplamiento piezoeléctrico lo permite (Arnau, 2004). Para completar un sistema inercial, una porción de masa concentrada es adherida a un extremo del alambre, con el objetivo de formar un sistema mecánico viga-masa. En el trabajo de los autores, este sistema fue conceptualizado en su funcionalidad y no en una síntesis de diseño. Por lo tanto, para el propósito del desarrollo de este capítulo, se

propone parametrizar el modelo con el fin de optimizar la funcionalidad, es decir conseguir el máximo efecto de flexión.

Como concepto inicial, se consideró una viga hecha de alambre para tratamientos de ortodoncia de sección rectangular con dimensiones (0.019 in x 0.025 in) estandarizadas (Pelsue et al., 2009), dos láminas piezoeléctricas (ver Figura 3.1c) que son acoplados a la viga simétricamente y una masa cilíndrica de dimensiones mostradas en la Figura 3.1b. Los detalles de las dimensiones del prototipo concepto son mostrados en el Anexo 3.1. El modelo completo fue diseñado en SOLIDWORKS® y se muestra en la Figura 3.1a.

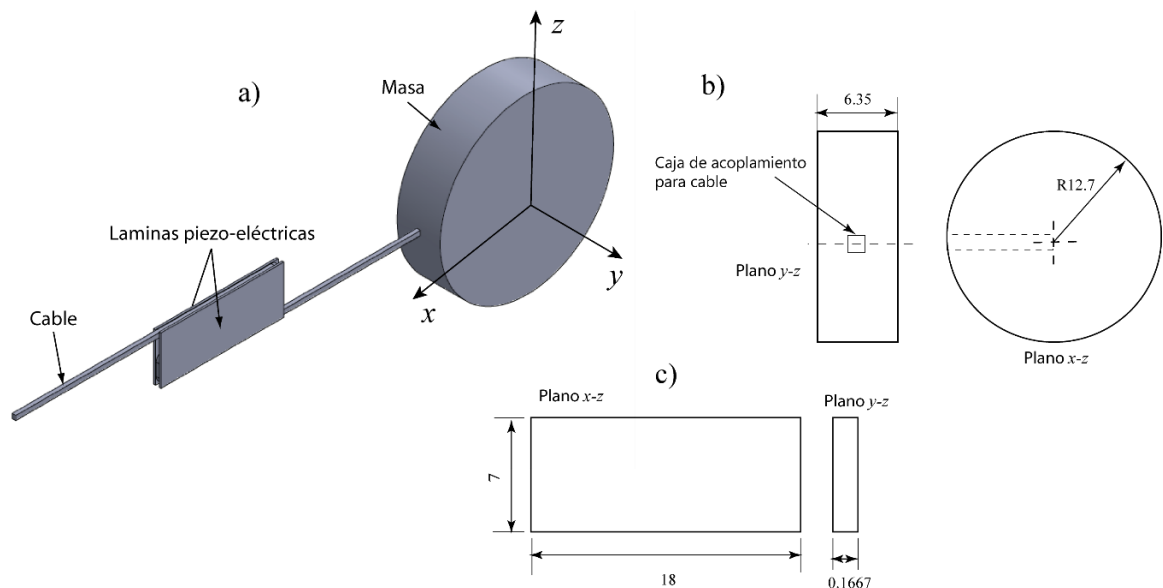


Figura 3.1 Diseño concepto del piezo-dispositivo vibratorio. b) Masa cilíndrica. c) Láminas piezoeléctricas.

Dimensiones en [mm].

Como parámetros de diseño, se seleccionó el acople piezoeléctrico, ya que en esa localización la viga (cable) es estimulada por las fuerzas que generan las piezo láminas, Por lo tanto, el diseño de una junta que permita maximizar la interacción entre las láminas y el cable, es el objetivo principal del estudio propuesto. Para este propósito, 3 modelos geométricos fueron

realizados en SOLIDWORKS ® y son mostrados en la Figura 3.2. Cada modelo se diferencia en el diseño de la junta de acoplamiento del cable con las láminas.

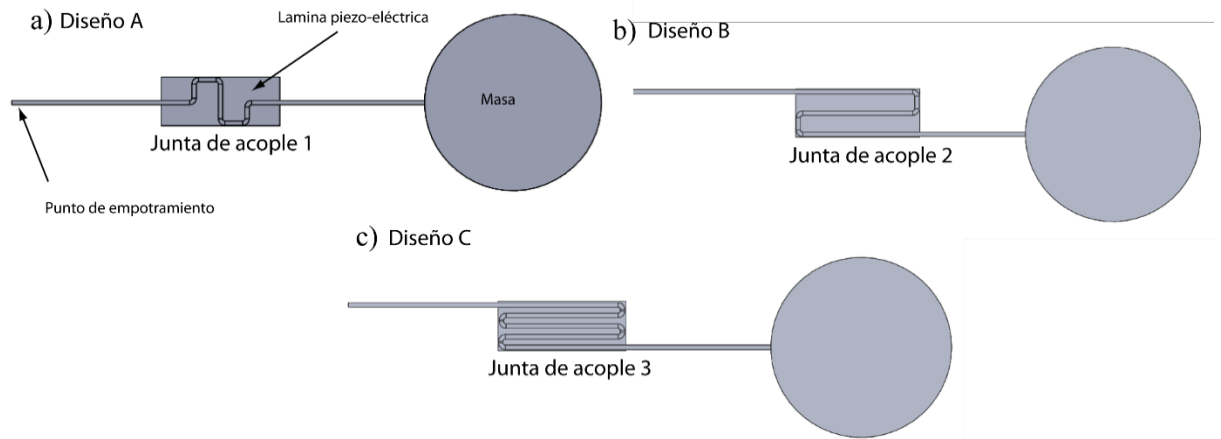


Figura 3.2 Esquemas de la junta de acople.

El objetivo de diseño es determinar cuál tipo de junta (zona de contacto) maximiza el sistema de fuerzas generado en la frontera del cable, esto es, genera una señal más intensa en las láminas piezoeléctricas. Con este fin, se establecen tres propuestas de diseño (A, B y C) que se describen a continuación:

- a. Pliegue vertical (ver Figura 3.2 diseño A)
- b. Pliegue horizontal (ver Figura 3.2 diseño B)
- c. Pliegues horizontales con dos curvas (ver Figura 3.2 Diseño C)

Para todos los diseños se mantuvieron las mismas condiciones geométricas. Distancia entre el empotramiento (ver Figura 3.2a) y centro de la masa concentrada, geometría de las láminas

piezoeléctricos, geometría de la cable y tamaño de la junta mantenido en el rango de área de los laminas, como lo indican las dimensiones de las juntas mostradas en la Figura 3.3. Las dimensiones detalladas se encuentran en los planos de referencia Anexo 3.1.

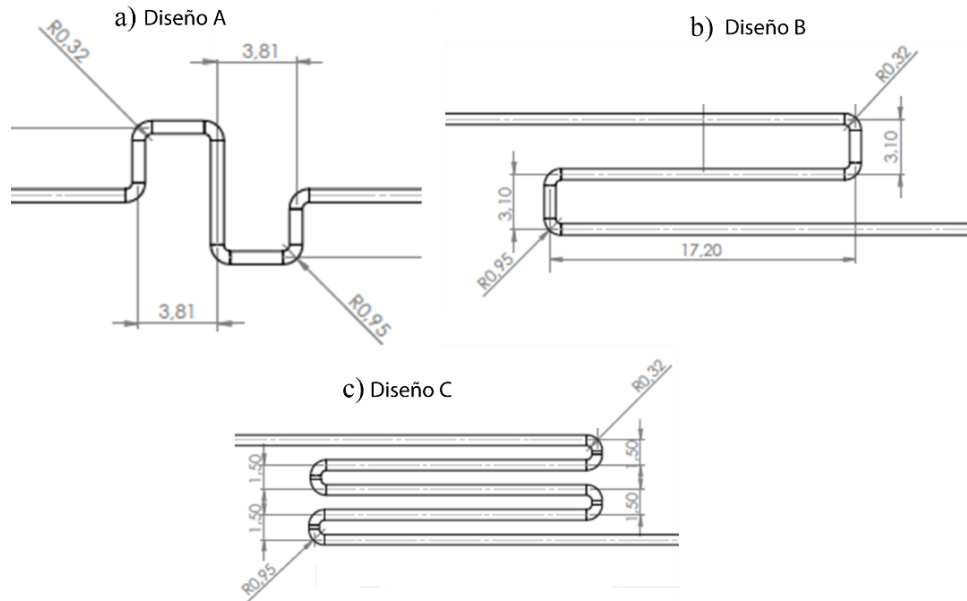


Figura 3.3 Dimensiones de las juntas: a) Diseño A, b) Diseño B, c) Diseño C. Dimensiones en [mm]

3.3 Análisis por elementos finitos para la selección de la junta

3.3.1 Modelo de elementos finitos

Los diseños iniciales (A, B y C mostrados en la Figura 3) son importados al software ANSYS 17.1® en un formato CAD (Computer Aided Design) compatible con ANSYS 17.1 para establecer los modelos de simulación. Es importante resaltar que las simulaciones deben ser realizadas con el fin de determinar numéricamente cuál de las juntas favorece un mejor acoplamiento mecánico con las láminas piezo-eléctricas. El resultado del análisis será basado en la maximización del sistema de fuerzas transmitidas al empotramiento del cable. La localización del empotramiento es señalada en la Figura 3.4b.

Tabla 3.1 Propiedades asignadas al cable, masa y actuadores piezoeléctricos

Elemento	Material	Módulo de Young [GPa]	Relación de Poisson
Cable	Alambre ortodoncia Australiano Pelsue et al. (2009)	177 GPa	0.31
Masa	Aluminio	71 GPa	0.33
Piezo-eléctrico	PZT-5H Shah (2011)	120.34 GPa	0.35

Como se puede observar en la Figura 3.4a, el piezo-dispositivo consta de tres elementos principales, dentro de la simulación, se utilizó un material homogéneo elástico e isotrópico para cada una de los elementos. En la Tabla 3.1 se listan las propiedades de cada elemento y su fuente de información.

Para la simulación de los modelos sus propiedades fueron determinadas de la siguiente manera:

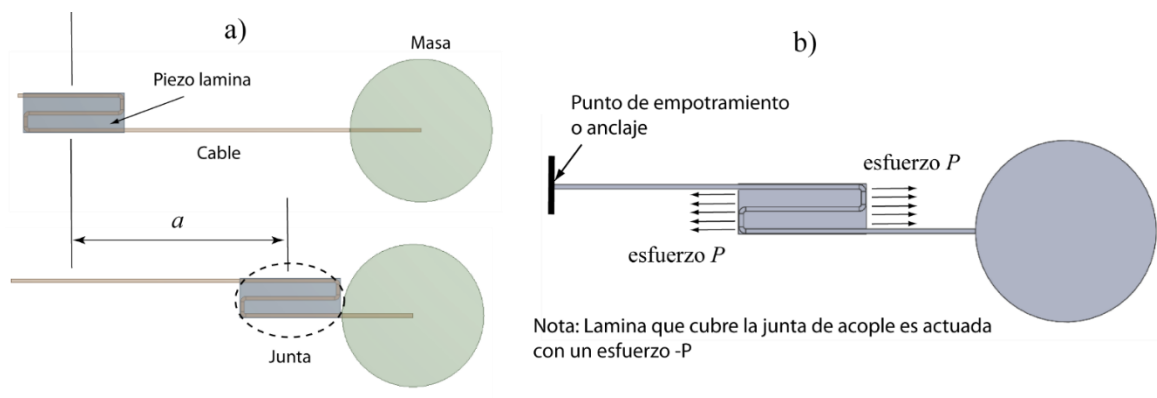


Figura 3.4 Modelo con junta en la posición inicial y final.

Con el propósito de seleccionar una junta óptima teniendo como referencia los tres modelos propuestos, se realizó un análisis estático estructural, esto significa que fuerzas dinámicas son despreciadas en el análisis. En el análisis se definió como parámetro la distancia de la junta con respecto al empotramiento, la cual se describe en la Figura 3.4a, identificada con la variable a . Este parámetro es variado en el intervalo $a \in (10, 50)$ mm. a varía desde la posición del empotramiento hasta la posición más cercana de la masa concentrada, como es mostrado en la Figura 3.4a. La variación tiene como objetivo evaluar la posición ideal de la junta.

3.3.2 Mallado del modelo

Una malla en elementos finitos hace referencia a los modelos de aproximación de las funciones de interpolación que usa el método de los elementos finitos para resolver un problema físico. Por lo tanto, las mallas (mesh) juegan un papel importante en los diferentes tipos de solución, y uno de los factores relevantes es el seguimiento o correspondencia geométrica de los modelos que se desean solucionar. Tomando estas consideraciones numéricas, en nuestro estudio cada modelo fue enmallado siguiendo un patrón específico para cada elemento que compone el piezo-dispositivo. Para las piezo-laminas y el cable, elementos hexaédricos fueron aplicados; y para la masa elementos tetraédricos, como se describe en la Figura 3.5. La ventaja de esta elección es correspondida y basada en la geometría de cada elemento, geometrías regulares son mallados comúnmente con hexaedros y geometrías irregulares con tetraedros en los problemas tridimensionales.

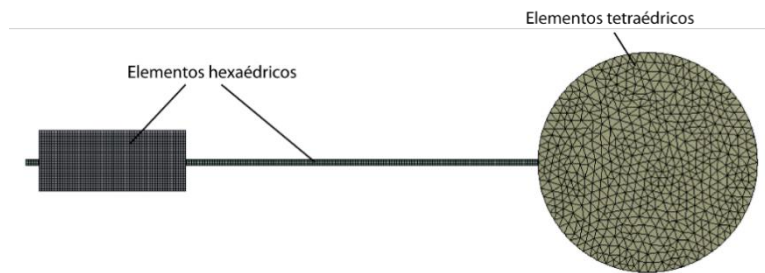


Figura 3.5 Malla usada para los modelos A, B y C.

Condiciones de frontera y restricciones

En este caso, el estudio es enfocado en la física estática, ya que solo consideraciones de equilibrio definidas por fuerzas, momentos y desplazamientos son analizadas en los resultados. Diferentes condiciones de contacto fueron establecidas de tipo pegado (bonded) entre las siguientes interfaces: laminas piezoeléctricas – alambre o viga y masa-viga.

Otra condición especificada en el modelo fue una de soporte fijo en el empotramiento. Esto significa que la viga en ese punto no presentará ningún desplazamiento en ninguna dirección.

Para excitar el modelo por medio de fuerzas, estas serán inducidas en las láminas piezoeléctricas tal y como se indica en la Figura 3.4b. Para este caso las láminas piezoeléctricas serán activadas mecánicamente con fines de simplificar el modelo, sin embargo, por el efecto piezoeléctrico éstas podrían ser activadas por medio de un potencial eléctrico. En este modelo solo será considerada la interacción mecánica de los elementos para el propósito que se busca con el análisis. Con el propósito de activación, una presión uniformemente distribuida P como fuerza de entrada en las caras laterales de cada lamina (compresión en lamina 1 y tensión en 2) fue aplicada. Ambas presiones fueron establecidas

con la misma magnitud y asumidas con un valor absoluto de $P = 1.0058 \text{MPa}$. El valor del voltaje fue estimado desde la Ecuación 3.1 reportada por Sirohi and Chopra (2000)

$$V_c = \frac{d_{31} E w}{C_p} \int_l \varepsilon dx, \quad (3.1)$$

Donde la capacitancia es $C_p = \frac{e_{33} l w}{t}$, y las constantes geométricas del lámina l , w and t son la longitud, el ancho y el espesor, respectivamente. Los parámetros d_{31} y e_{33} son constantes piezoeléctricas.

3.3.3 Resultado del análisis estático

En esta sección son presentados los resultados del análisis estático obtenidos con las simulaciones de elementos finitos. En la Figura 3.6 podemos observar el campo de desplazamiento determinado para una junta (diseño B) localizada en $a = 10$.

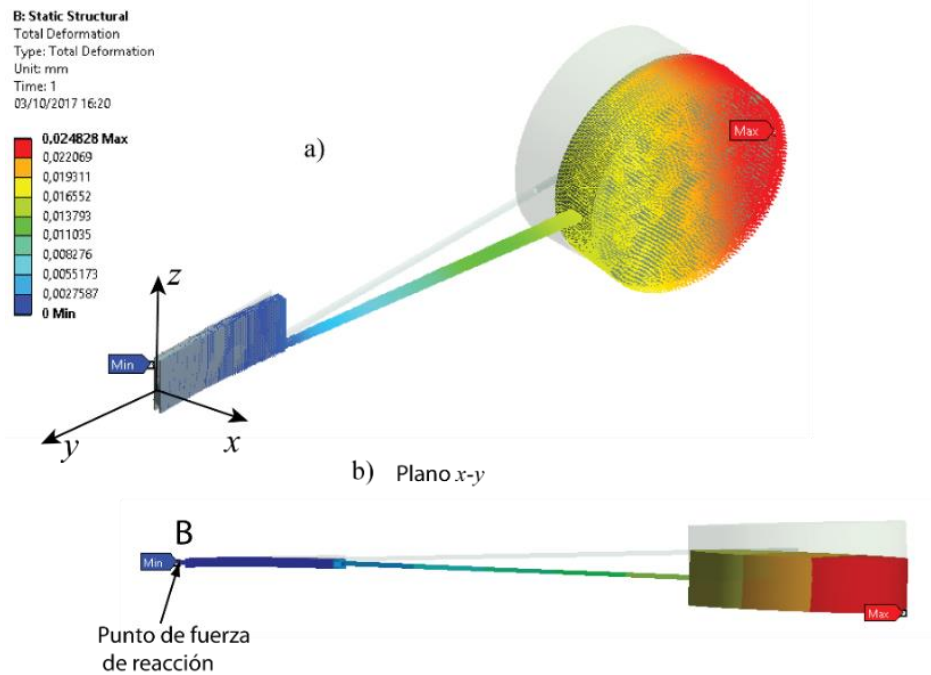


Figura 3.6 Zona de desplazamiento máximo del dispositivo diseño B. a) Isométrico.

b) Plano x-y.

Es observado que la activación de las láminas genera un movimiento de flexión en la dirección x . Para tomar valores de referencia de desplazamientos, los valores máximos son tenidos en cuenta para el análisis. Específicamente el desplazamiento máximo total se encuentra en el extremo derecho de la masa, como se ilustra en la Figura 3.6b. Este comportamiento es esperado, ya que la configuración mecánica representa un sistema viga en voladizo.

Para observar el comportamiento del desplazamiento máximo en los tres modelos, 63 simulaciones fueron realizadas en total, es decir, 21 casos de desplazamiento de la junta en cada modelo, los resultados son mostrados en la Figura 3.7.

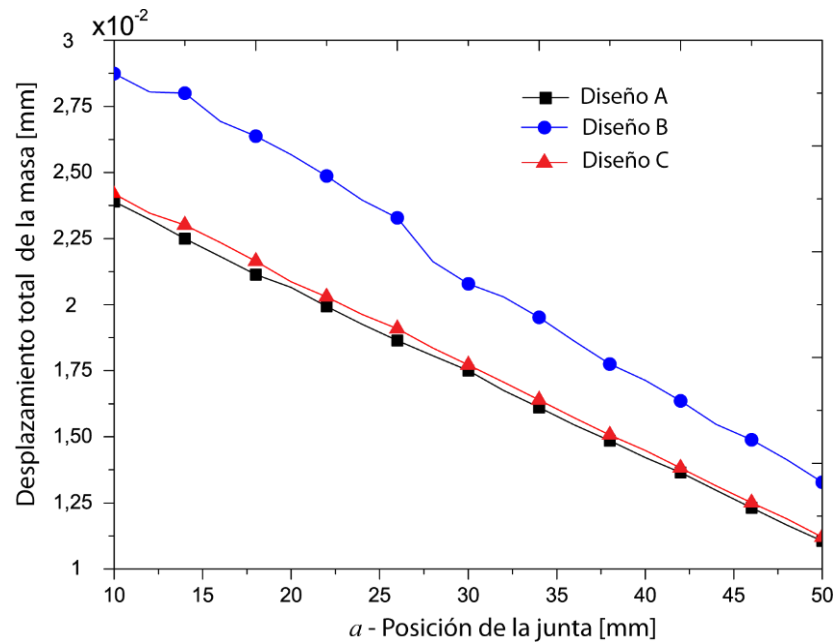


Figura 3.7 Desplazamiento máximo de la masa VS posición de la junta para los tres diseños analizados.

En esta figura se ilustra el desplazamiento máximo de la masa respecto a la posición de la junta, es decir la variable a (ver Figura 3.4a). En los tres casos (diseño de junta) es analizado que cuando la junta se encuentra en su posición mínima ($a = 10$), el desplazamiento es máximo, pero si las juntas son comparadas, el diseño B evidentemente aporta un mejor acoplamiento al sistema. Esto debido a que en todas las localizaciones de la junta el desplazamiento es mayor cuando es comparado con los diseños A y C.

Para confirmar que la junta del diseño B interactúa mejor desde el punto de vista de las fuerzas, estas fueron determinadas en el empotramiento como se ilustra en la Figura 8a. Se observa que las magnitudes de las fuerzas presentan una dispersión y no un valor de tendencia, esto ocurre cuando los valores de las fuerzas son demasiado pequeños. Para cuantificar los valores en un indicador, un valor es estimado para establecer una comparación. Con este propósito la desviación media cuadrática (Root Mean Square - RMS) de los valores

es tomada como referencia y los resultados se ilustran en la Figura 3.8b. El valor RMS de las fuerzas es determinada por:

$$RMS_{Force} = \sqrt{\frac{1}{n} (f_1^2 + f_2^2 + f_3^2 \dots f_n^2)}, \quad (3.2)$$

donde $f_n \forall n = 1, 2, 3 \dots 21$ corresponde a las fuerzas obtenidas en el empotramiento.

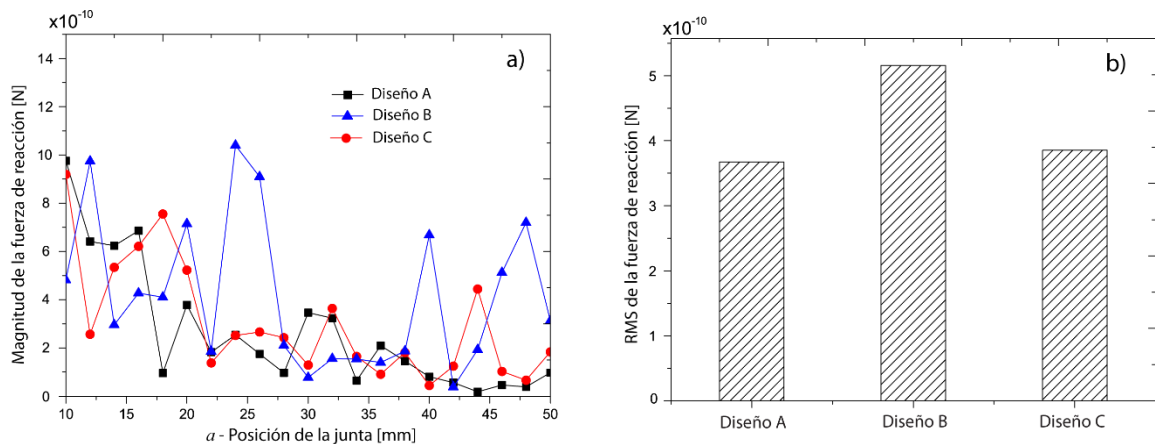


Figura 3.8 a) Fuerzas de reacción en el punto de empotramiento. b) RMS de las fuerzas de reacción.

El resultado de la Figura 3.8b indica que la junta B genera un 20% más de fuerza. Por lo tanto, el diseño B maximiza la interacción de las fuerzas entre el cable y las láminas piezoeléctricas. Es importante mencionar que el orden de magnitud de las fuerzas corresponde con el problema planteado, ya que las deformaciones máximas son dadas en la junta, considerando que los máximos desplazamientos son del orden de $25 \mu m$ (diseño A y C) y $28 \mu m$ (diseño B).

3.4 Diseño de prototipo operativo del piezo-dispositivo

De acuerdo con el análisis presentado anteriormente, se diseñó un prototipo considerando la junta B; este es un nuevo prototipo escalado del modelo presentado en la Figura 3.1, el cual

es llamado *prototipo de prueba*. La selección de la junta está soportada por los resultados mostrados en la sección anterior. Para consideraciones diferenciadoras, el prototipo presentado en esta sección será llamado *prototipo operativo* como se describe en la Figura 3.9. Este será el modelo usado para las simulaciones posteriores consolidadas en el trabajo.

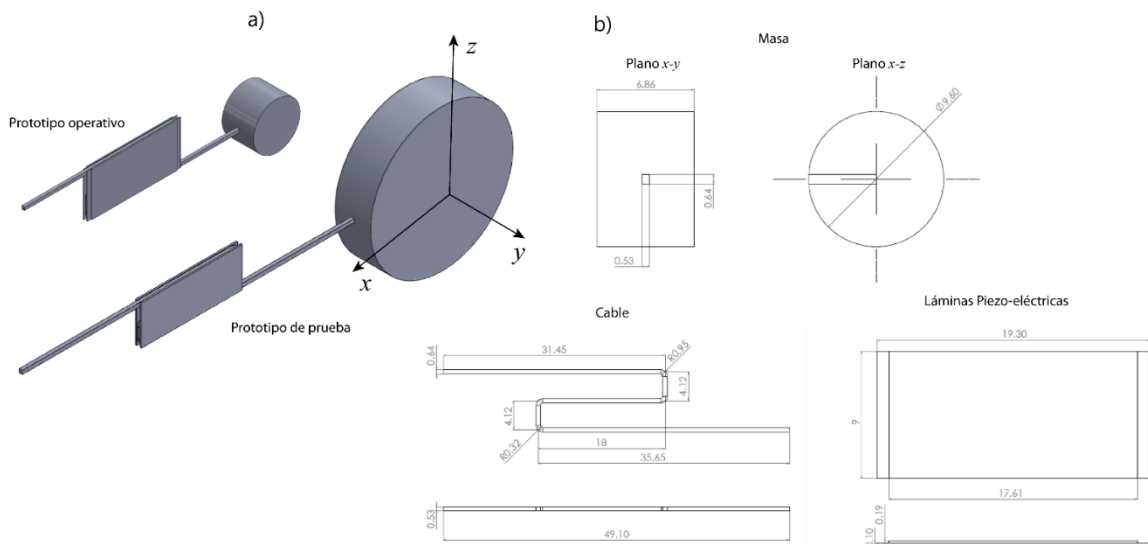


Figura 3.9 a) Comparación dimensional de prototipos en escala adimensional. b) Dimensiones no detalladas del prototipo operativo en mm.

El *prototipo de prueba* será utilizado con fines de calibración y puesta a punto de los equipos de medición, esto debido a las dimensiones que lo componen. Para el propósito principal del proceso de investigación, es necesario un dispositivo más compacto por la aplicación buscada.

3.5 Procedimiento de fabricación

Teniendo en cuenta los resultados anteriores y tomando como referencia las geometrías establecidas en los modelos geométricos (hechos en SOLIDWORKS®), se procedió con la

fabricación de los piezo-dispositivos mediante el ensamble de los siguientes elementos; masa (Aluminio), cable para tratamientos de ortodoncia y dos laminas piezo-eléctricas de referencia SEN-10293 (Piezoelectric-plate, 2016).

El proceso de fabricación fue realizado en dos etapas. La primera etapa consistió en la preparación de cada pieza por medio de operaciones (doblado de alambres, cortes de lámina y etc.) que permitieron adecuar las geometrías para el ensamble; y la segunda etapa consistió en el ensamble del piezo-dispositivo. Las Figuras 3.9 y 3.10 describen los elementos que componen el ensamblaje completo de ambos dispositivos. Todo el proceso de ensamblaje y fabricación fue desarrollado con los siguientes procesos:

Doblado del cable: Consiste en la conformación de pliegues que definen la geometría de la junta (diseño B), el cual se realiza doblando el cable utilizando una pinza de procedimientos de ortodoncia diseñada para este propósito.

Corte del cable: Se procede a cortar el cable en los puntos que definen las dimensiones de la viga. Este procedimiento se realiza con una pinza de corte.

Perforación de la masa: En esta etapa se realiza una perforación lateral a la masa con una broca de 1/16 in hasta el centro de la pieza, con el fin de formar un agujero de acople para el ensamble del cable para este proceso se utilizó un taladro de árbol para garantizar la perpendicularidad en el agujero.

Corte de los materiales piezoeléctricos: Consiste en el corte realizado en las láminas de material piezoeléctrico, de tal manera que estos quedaron conformados con una geometría rectangular que abarcaba la junta. Este proceso se llevó a cabo empleando como herramienta

unas tijeras y haciendo cortes en líneas trazadas previamente sobre la placa, retirando el material no deseado. Es importante resaltar que el corte de los materiales piezoeléctricos debe ser hecho cuidadosamente debido a sus características cerámicas. Esto significa que son materiales duros y por lo tanto se fracturan fácilmente. En nuestro estudio, 1 de cada diez cortes fueron hechos correctamente.

Pegado y ensamble del prototipo: En este proceso se realizó el ensamble del prototipo, aplicando una capa de pegante epóxico (Loctite) en las zonas de contacto donde interactúan las piezas, con el fin de unir las zonas de contacto; junta del cable-piezoeléctricos, masa cilíndrica-cable.

Uniones eléctricas - cables: Proceso de unión de los cables eléctricos en las láminas piezoeléctricas. Esto se realizó soldando un cable a la placa de bronce (Tierra) y otro cable al electrodo de plata expuesto en la lámina piezoeléctrica. El proceso es realizado utilizando un cautín con temperatura controlada de 280 °C y estaño como material aporte. Dicho proceso se efectuó en ambas laminas piezoeléctricas.

3.5.1 Prototipo de prueba

En la Figura 3.10 se muestra el prototipo de prueba ensamblado con los cuatro elementos principales que lo componen; cable, masa, junta (diseño B) y láminas piezoeléctricas. Las dimensiones de la junta (diseño B) son las mismas de la Figura 3.3.

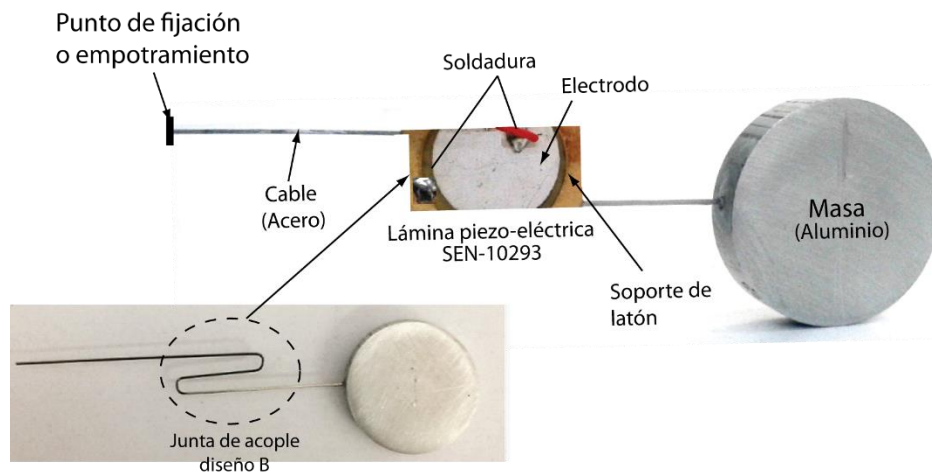


Figura 3.10 Prototipo de prueba.

El prototipo mostrado en la Figura 3.10 se fabricó con el objetivo de realizar pruebas experimentales de entrenamiento y verificar el diseño de la junta de acople.

3.5.2 Prototipo operativo

Posteriormente se procedió con la fabricación de un dispositivo más compacto comparado con el prototipo de prueba, manteniendo el criterio de la junta óptima seleccionada en la fase de diseño (junta diseño B), como se muestra en la Figura 3.11. Los elementos que conforman el ensamble son: un cable 0.021 in x 0.025 in (Marca morelli ortodontia), una masa de cilíndrica de aluminio de 0.377 in de diámetro x 0.27 in de espesor (masa 1.27g) y dos laminas piezoeléctricas de referencia SEN-10293 (Piezoelectric-plate, 2016). El procedimiento de unión de los elementos es el mismo descrito para el prototipo de prueba. Los detalles dimensionales pueden ser verificados en el ANEXO 1, anexo que contiene los planos definitivos de los modelos fabricados (prueba y operativo).

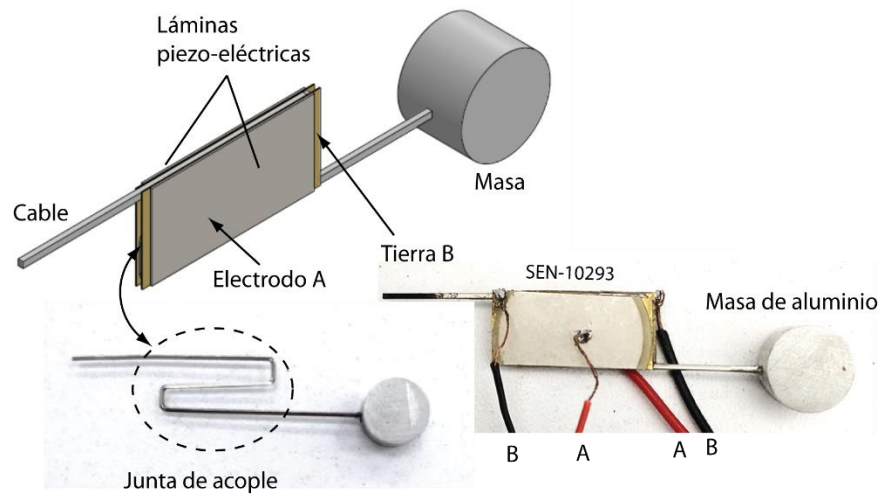


Figura 3.11 Prototipo operativo versión.

3.6 Pruebas experimentales con el piezo-dispositivo de prueba

Luego de finalizado el proceso de fabricación de cada dispositivo (prueba y operativo), se procedió con el desarrollo de un montaje experimental para la medición de velocidades de los piezo-dispositivos manufacturados. Se utilizó una tarjeta de adquisición de datos National Instruments NI-USB-6211 para la captura de los datos de los sensores. En la Figura 3.12 son mostrados los equipos y sistemas que presentarán interacción durante el experimento y estos fueron conectados a los canales de entrada y salida análogas como se describe en los siguientes ítems:

- Equipos conectados a salidas análogas (analog output)
 - Shaker electrodinámico (Marca Sentek)
 - Amplificador de potencia (Trek model 2205)
- Equipos conectados a entradas análogas (analog input)
 - Vibrómetro laser (Polytec CLV-2534)

- Actuadores piezoeléctricos (SEN-10293)

Este procedimiento fue llevado a cabo con el fin de diseñar un sistema que permitiera el envío de señales a los equipos que operan con señales de excitación (Excitador electrodinámico y amplificador de voltaje para las láminas piezoeléctricas), y que a su vez permitiera la evaluación de los parámetros de interés de manera simultánea en los sistemas de medición; como son el Vibrómetro laser Polytec CLV-2534 y las láminas piezo-eléctricas. Por lo tanto, se desarrolló un código en el software MATLAB, desde el cual señales de excitación son enviadas a la salida análoga de NI-USB-6211, mediante una señal de voltaje chirp lineal, de la siguiente forma:

$$V_s = A_s \sin(\omega t). \quad (3.3)$$

Donde V_s es la señal chirp, A_s es la amplitud de la señal en voltios, ω la frecuencia de excitación y t el tiempo. Las señales obtenidas por las entradas análogas de la tarjeta son las señales eléctricas que provienen del Vibrómetro y de las láminas. Desde el programa escrito en MATLAB (ANEXO 2) se controlan los parámetros de frecuencia, amplitud, tasa de muestreo de la señal y tiempo de excitación de la ecuación 3.3.

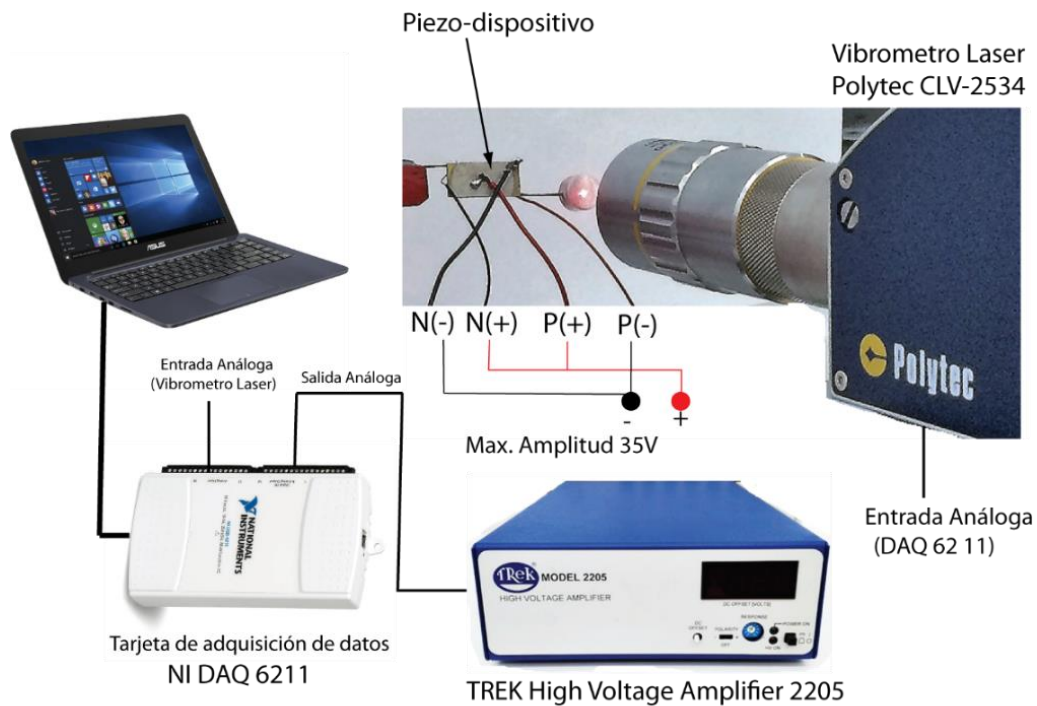


Figura 3.12 Esquema general del experimento de prueba

3.6.1 Experimento 1: Ensayo experimental de prueba.

Para la puesta a punto del experimento se estableció un esquema experimental inicial con los equipos mostrados en la Figura 3.13. El experimento consistió en empotrar el prototipo inicial en una prensa (piezo-dispositivo aislado) y como segundo paso el excitador electrodinámico (Shaker) fue posicionado de forma lateral y perpendicular al piezo-dispositivo como se muestra en la Figura 3.13a. Para poner en contacto el Shaker con el piezo-dispositivo la barra rígida es acoplada a este desde el shaker y esta a su vez se acopla al sensor de fuerza (Dytran impedance head) como se ilustra en la Figura 3.13. Para el experimento, una barra complementaria ranurada es pegada a la cabeza del sensor de forma concéntrica con el montaje (Stinger, Shaker y sensor de fuerza). Finalmente, se posiciona el equipo de medición vibrómetro laser de forma perpendicular al centro de la masa del piezo-dispositivo. Algunos

elementos fueron pegados con adhesivo epóxico Loctite 401 para garantizar la rigidez del acoplamiento (Piezo-dispositivo-barra complementaria).

Objetivo del experimento 1: Excitar dinámicamente el piezo-dispositivo a diferentes frecuencias, y al mismo tiempo medir la fuerza de excitación con el sensor de fuerza acoplado al punto de fuerza como también medir la velocidad con el Vibrómetro. Para este propósito, diferentes pruebas se llevaron a cabo bajo diferentes condiciones operación:

- Prueba 1: 0-10 Hz
- Prueba 2: 0-200 Hz
- Prueba 3: 1kHz- 5kHz.

Para estas pruebas, la sensibilidad de los sensores de fuerza era muy baja a las condiciones operativas del ensayo. Por lo tanto, no se lograron obtener medidas de fuerza confiables con el sensor de fuerza (Dytran) acoplado y se concluyó que las fuerzas inerciales causadas por el sensor no son suficientes en comparación con la fuerza de sensibilidad mínima requerida por el sensor.

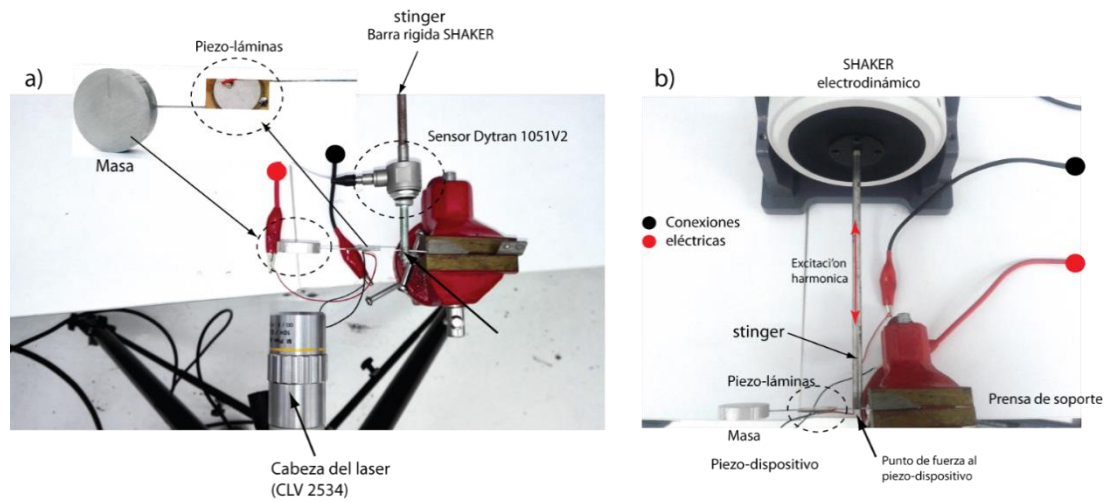


Figura 3.13 a) Montaje experimental con cabeza de sensor Dytran1051V2. b) Montaje experimental sin cabeza de sensor.

En la Figura 3.14a, es mostrado el montaje experimental realizado para el experimento 1, una de las señales análogas enviadas al Shaker es ilustrada en la Figura 3.14b y una de las señales análogas (Velocidad) leídas desde vibrómetro es visible en la Figura 3.14c. Estas señales fueron emitidas y leídas a una tasa de muestreo de 100000 muestras por segundo con el fin de garantizar al menos 25 kHz, lo que significa evitar el aliasing.

3.6.2 Experimento 2: Mediciones de las velocidades en el piezo-dispositivo

Con el fin de registrar la dinámica del sensor operativo, se procedió con el montaje de un experimento para determinar las respuestas en frecuencia de la velocidad tomando medidas en el piezo-dispositivo entre el rango de (1-20 kHz). El método de excitación consistió en utilizar los piezoeléctricos como actuadores mediante la alimentación de un voltaje de entrada suministrado desde el equipo amplificador de potencia como fuente de excitación,

como se describe en el esquema de la Figura 3.12. En esta figura puede ser observado el diagrama de conexión que fue planteado para realizar el experimento.

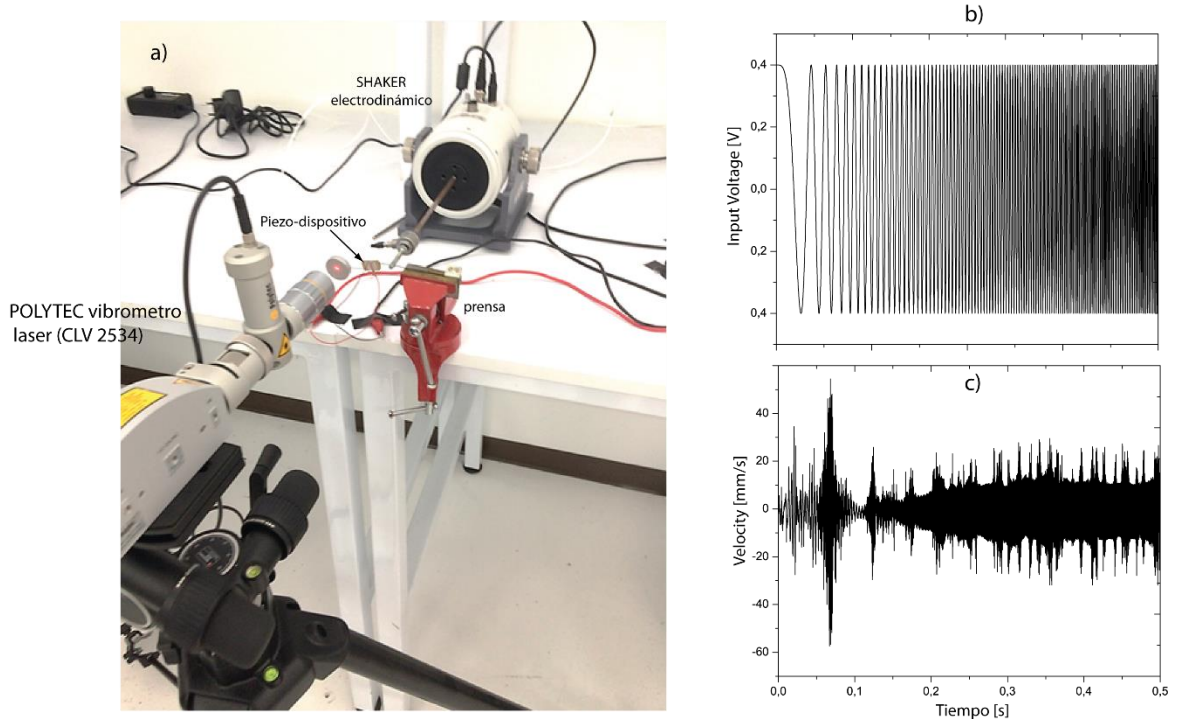


Figura 3.14 a) Montaje experimental con prototipo de prueba. b) Señal de entrada chirp. c) Señal de salida de velocidad.

La Figura 3.15a muestra un chirp o señal de barrido enviado al equipo amplificador de potencia. Esta señal consiste en una señal senoidal de barrido lineal creada para 1 segundo, y desde 0 a 20 kHz, Los parámetros del experimento son descritos como sigue:

- Tiempo de muestreo= 1 s
- Amplitud de la señal en las láminas = 35 V
- Frecuencia de inicio= 0 Hz
- Frecuencia final= 20 kHz

- Tasa de muestreo= 100000 muestras por segundo

El procedimiento de barrido en la frecuencia fue realizado para nueve puntos de medición establecidos y descritos en la Figura 3.15b. Los puntos enmarcados en rojo sobre el piezo-dispositivo son los puntos de lectura de las medidas de velocidad que serán obtenidas con el vibrómetro laser, la notación fue organizada de la siguiente forma, los subíndices v, m y p, indican viga o cable, masa y piezo. Los números denotan el orden de las mediciones.

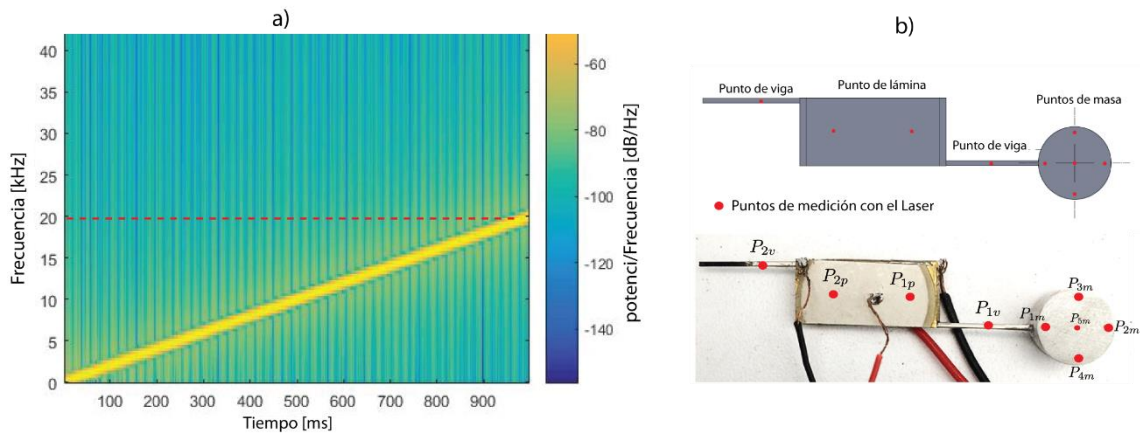


Figura 3.15 a) Periodograma barrido lineal tiempo VS Frecuencia. b) Puntos de medición en el piezo-dispositivo operativo.

Las figuras 3.16 y 3.17 muestran las mediciones de velocidad realizadas en los puntos demarcados en la Figura 3.15b. Específicamente, la Figura 3.16 describe las velocidades medidas en la masa para los cinco puntos resaltados. Podemos observar que, en determinados momentos del tiempo, las amplitudes de las velocidades son mayores en unos puntos que en otros, particularmente en el punto P_{1m} , esto significa que la masa presenta mayores amplitudes en ese grado de libertad generando una forma de vibrar cuando se combinan todas. Para verificar los valores de mayor amplitud en la frecuencia, debe aplicarse una

Transformada de Fourier Rápida (Fast Fourier Transform FFT) sobre las señales, como se describe en la siguiente sección.

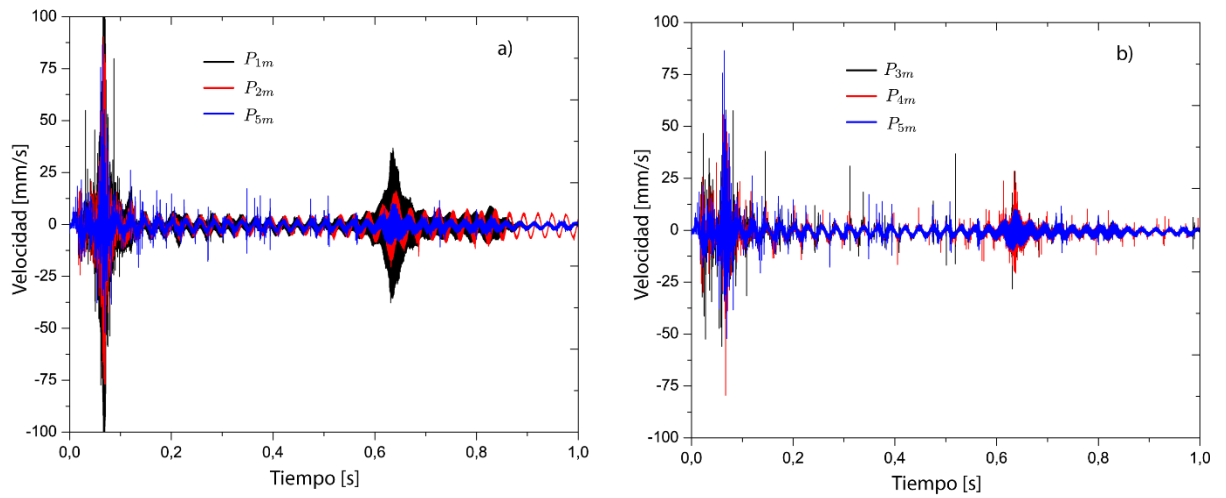


Figura 3.16 a) Amplitud de velocidad para P_{1m} , P_{2m} y P_{5m} . b) Amplitud de velocidad para P_{3m} , P_{4m} y

P_{5m} .

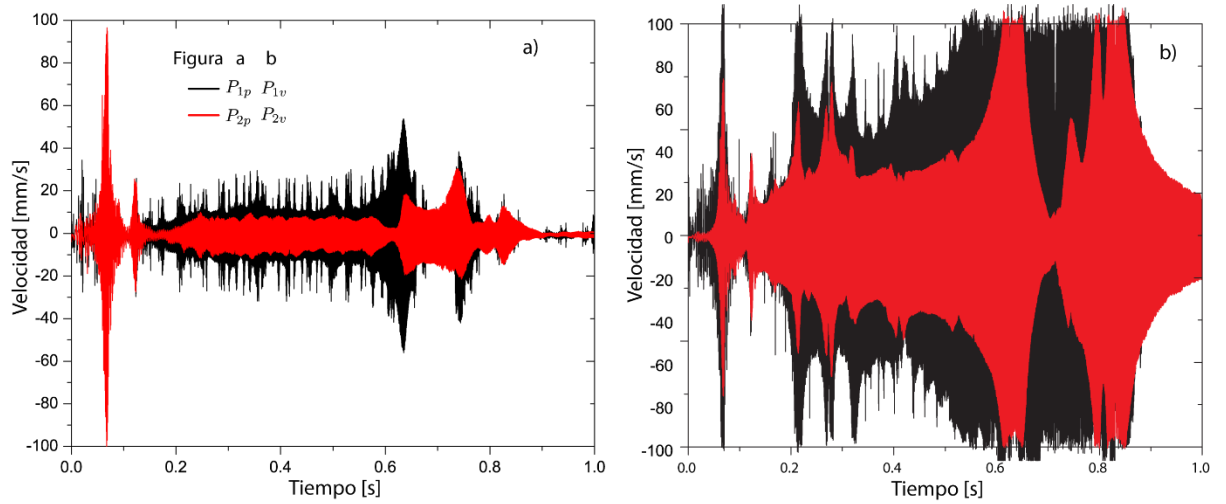


Figura 3.17 a) Amplitud de velocidad para P_{1p} y P_{2p} . b) Amplitud de velocidad para P_{1v} y P_{2v} .

Las señales mostradas en la Figura 3.17 se diferencian de las mostradas en la Figura 3.16, específicamente en su amplitud. Sin embargo, en 0.8 segundos la señal muestra una primera gran amplitud en todos los casos, esto puede ser detallado en la función de respuesta en frecuencia.

Análisis en la frecuencia de las velocidades

Para realizar un análisis en la frecuencia desde una señal del tiempo primero es necesario introducir el concepto de transformada de Fourier rápida (Fast Fourier Transform) que permite pasar del tiempo a la frecuencia; consideremos una $f(t)$ en el cual su transformada de Fourier es

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \quad (3.4)$$

La transformada inversa de la ecuación (3.4) está dada por

$$F(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(\omega)e^{-i\omega t} d\omega \quad (3.5)$$

Donde en (3.4) y (3.5), $i = \sqrt{-1}$ y $e^{i\theta} = \cos\theta + isen\theta$. La transformada de Fourier usa funciones exponenciales complejas (sinusoides) en varias frecuencias como sus funciones base. Con el objetivo de desarrollar el análisis de frecuencia de las velocidades y evidenciar la respuesta en la frecuencia, la transformada fue calculada en las nueve funciones de velocidad adquiridas con los puntos demarcados, las funciones de respuesta en frecuencia entre 1-5 kHz son consolidadas y mostradas en la Figura 3.18. Se puede observar que dos

picos sobresalen en 1262 Hz y 2363 Hz, aproximadamente. Las funciones permiten identificar los mismos picos en todos los puntos donde las mediciones fueron realizadas.

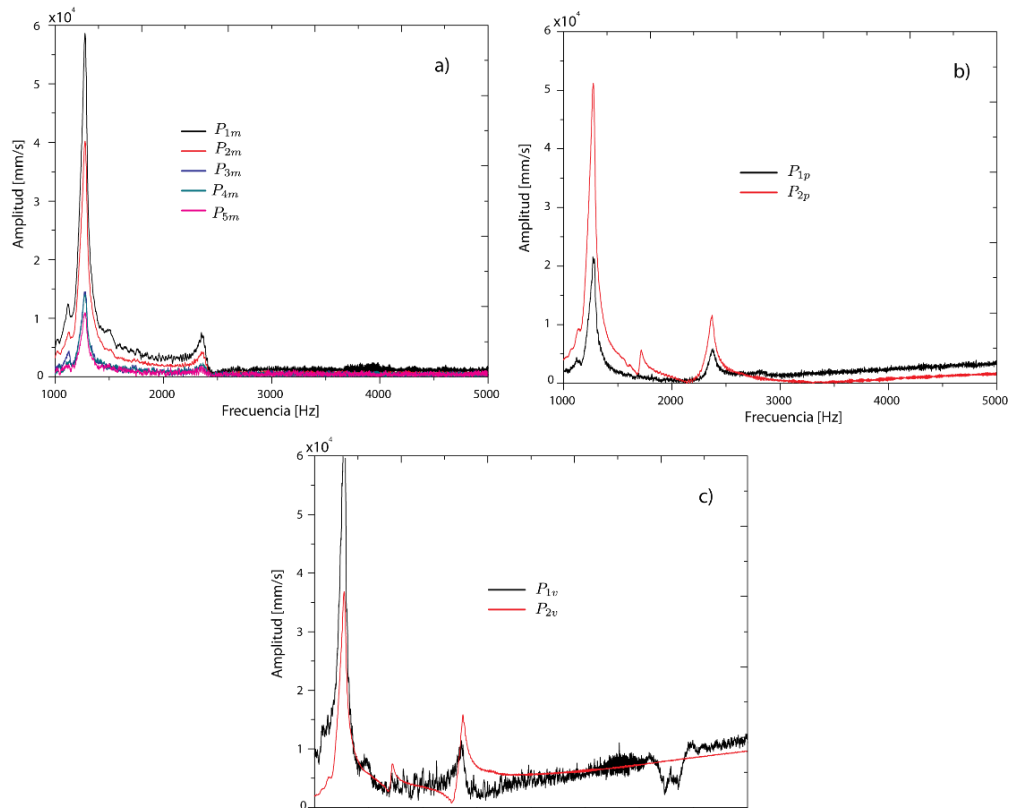


Figura 3.18 Funciones de respuesta en frecuencia entre 1-5 kHz, a) $P_{1m}, P_{2m}, P_{3m}, P_{4m}$ y

P_{5m} . b) P_{1p} y P_{2p} . c) P_{1v} y P_{2v} .

Los resultados obtenidos para el rango de frecuencia entre 10 kHz y 20 kHz son mostrados en la Figura 3.19. En este intervalo podemos observar una frecuencia que resalta para todos los puntos de medición y es de 12346 Hz. Sin embargo, diferentes picos o resonancias también son observados en todos los gráficos, lo cual significa que algunos podrían ser tomados en cuenta para este estudio, pero estos deben ser verificados numéricamente si corresponden con un modo de vibración de interés. En los análisis posteriores a este capítulo,

se tomará en cuenta solo los picos que presenten mayor sensibilidad a los cambios elásticos del soporte donde el piezo-dispositivo será integrado.

Los resultados mostrados en esta sección corresponden con el cumplimiento del primer objetivo específico planteado como “Desarrollar un dispositivo electromecánico (piezoeléctrico) y determinar sus funciones de respuesta en frecuencia mayores a 1 KHz”

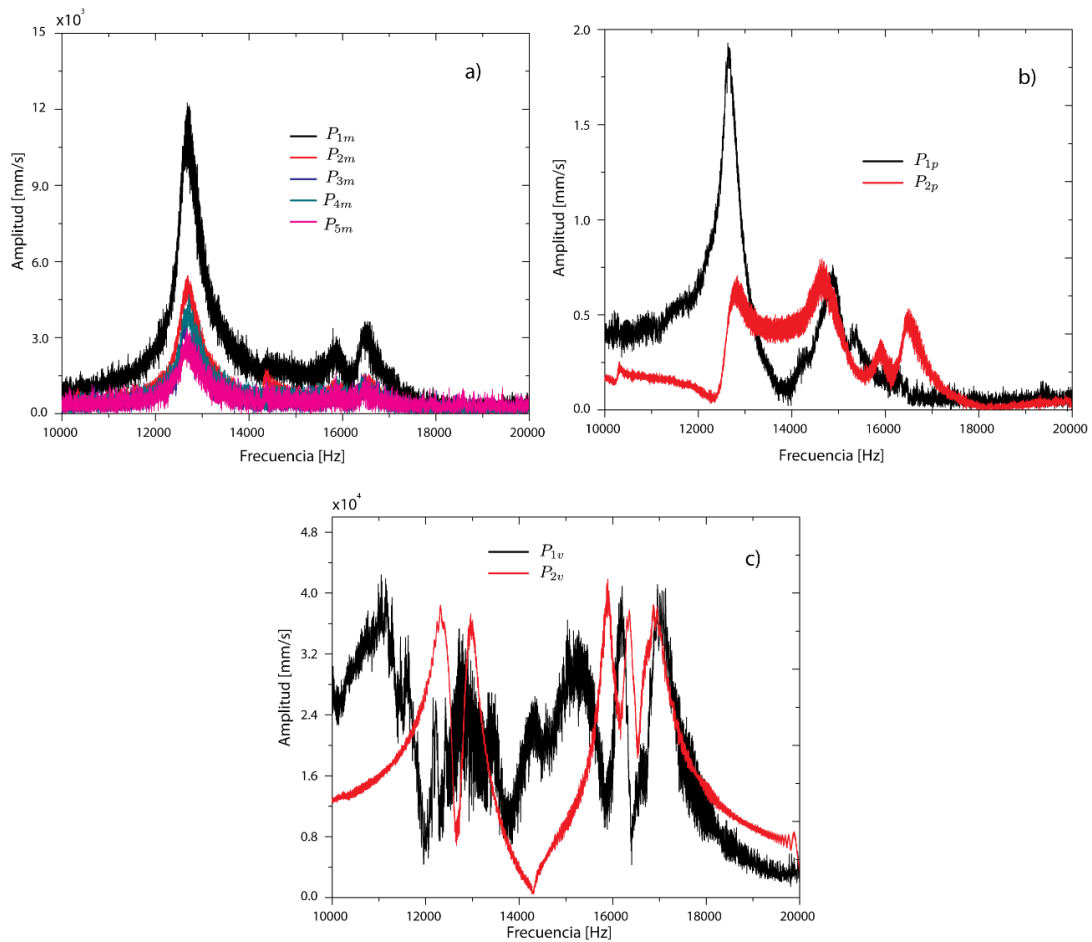


Figura 3.19 Funciones de respuesta en frecuencia entre 10-20 kHz, a) $P_{1m}, P_{2m}, P_{3m}, P_{4m}$ y P_{5m} . b) P_{1p} y

P_{2p} . c) P_{1v} y P_{2v} .

CAPÍTULO IV

4. Evaluación dinámica de la sensibilidad del Piezo-dispositivo

4.1 Introducción

En esta sección, se mostrará un análisis por elementos finitos (FEM) que describe la determinación de los modos de vibrar del piezo-dispositivo de forma numérica y experimental. En el desarrollo del capítulo, es discutida la correlación de los resultados numéricos con los resultados experimentales.

Con el fin de analizar el comportamiento dinámico del sistema completo (dispositivo acoplado a interface/sustrato); un análisis paramétrico (análisis armónico) fue realizado variando las propiedades elásticas del sustrato para observar los efectos en los estados vibratorios (cambios cinemáticos) del piezo-dispositivo.

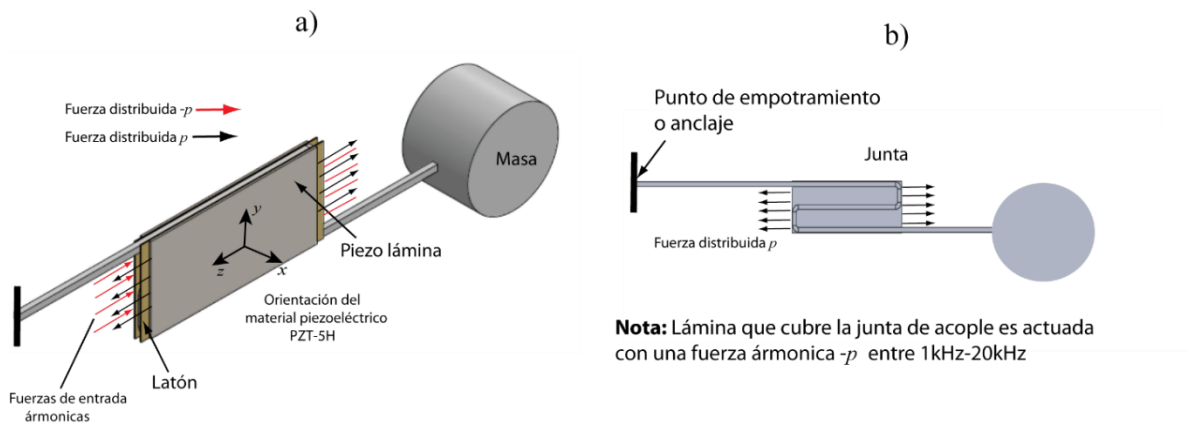


Figura 4.1 a) Elementos del modelo (piezo-dispositivo) de elementos finitos. b) Condiciones físicas del modelo.

4.1.1 Propiedades físicas y características del modelo

Para el análisis de respuesta en la frecuencia, se realizó un análisis de respuesta armónica con el fin de obtener el comportamiento dinámico del dispositivo en los rangos 1-5 KHz, 10-20 KHz. El procedimiento fue llevado a cabo como se describe a continuación:

Para la simulación es necesario asignar las propiedades físicas y mecánicas de cada elemento que compone el piezo-dispositivo, las propiedades utilizadas se listan en la Tabla 4.1 y Tabla 4.2. los materiales se modelaron utilizando un material elástico lineal homogéneo en cada elemento.

Tabla 4.1 Propiedades físicas y mecánicas de los materiales asignados en ANSYS

Pieza	Material	Módulo de Young [GPa]	Razón de Poisson	Densidad [kg/m ³]
Cable	Alambre de ortodoncia	177	0.31	7750
Masa	Aluminio	70	0.33	2700
Piezo-eléctrico	PZT-5H	Material anisotrópico (Tabla 4.2)	-	7800
Placa de soporte del piezo-eléctrico	Aleación de cobre	127	0.34	8670

Cada propiedad física fue asignada a los siguientes elementos del piezo-dispositivo:

Cable: propiedades mecánicas tomadas de la referencia Pelsue et al. (2009), donde los autores citados determinan la estructura, composición y propiedades mecánicas de diferentes tamaños de cables australianos templados utilizados en tratamientos de ortodoncia. Material isotrópico, lineal y homogéneo.

Masa: propiedades mecánicas asignadas de un material (aluminio) tomadas de la librería de ANSYS 17.1.

Tabla 4.2 Matriz elástica material piezo-eléctrico PZT-5H asignada en ANSYS, valores en GPa.

C [-,1]	C [-,2]	C [-,3]	C [-,4]	C [-,5]	C [-,6]
126	84.1	84.1	0	0	0
84.1	126	79.5	0	0	0
84.1	79.5	126	0	0	0
0	0	0	23	0	0
0	0	0	0	23	0
0	0	0	0	0	23

Material piezoeléctrico: se asumió un piezoeléctrico con propiedades mecánicas tomadas del estudio Shah (2011), donde los autores definen las propiedades mecánicas de un transductor piezoeléctrico PZT-5H. Material anisotrópico con la matriz elástica definidas en la Tabla 4.2. Es importante mencionar que la orientación del material es parte esencial para la asignación de las propiedades, como se describe en la Figura 4.1a.

Placa de latón: Propiedades mecánicas tomadas del material “copper alloy” predeterminado en la librería de materiales del software ANSYS. 17.1

Una de las características esenciales en un modelo de elementos finitos es su proceso de enmallado, en el cual el modelo fue enmallado con elementos rectangulares (láminas piezoeléctricas, placas de latón complementarias del piezoeléctrico, cable) y elementos triangulares (masa concentrada) como puede observarse en la Figura 4.2. Una malla en elementos finitos hace referencia a los modelos de aproximación de las funciones de interpolación que usa el método de los elementos finitos para resolver un problema físico. Por lo tanto, las mallas (mesh) juegan un papel importante en los diferentes tipos de solución, y uno de los factores relevantes es la correspondencia geométrica de los modelos que se

desean solucionar. Tomando estas consideraciones numéricas, en el estudio cada modelo fue enmallado siguiendo un patrón específico para cada elemento que compone el piezo-dispositivo. Para las piezo-laminas y el cable, elementos hexaédricos fueron aplicados; y para la masa elementos tetraédricos, como se describe en la Figura 4.2. La ventaja de esta elección es correspondida y basada en la geometría de cada elemento, geometrías regulares son mallados comúnmente con hexaedros y geometrías irregulares con tetraedros en los problemas tridimensionales.

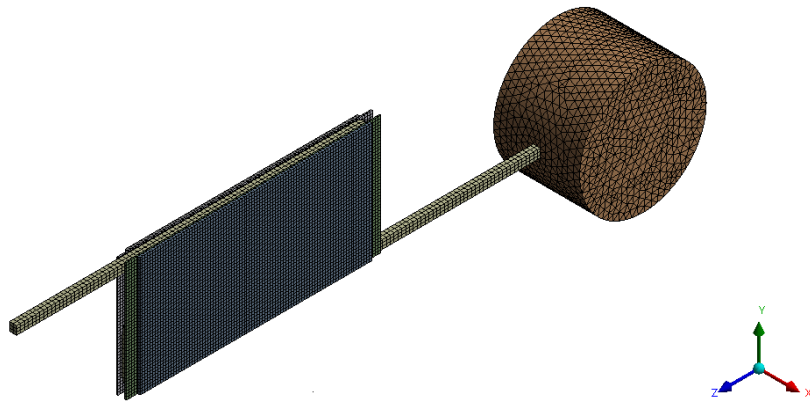


Figura 4.2 Enmallado del modelo

4.1.2 Condiciones de carga y de frontera

Las condiciones de frontera en el modelo definen el conjunto de parámetros conocidos en el modelo, por lo tanto, entre todos los elementos que presentan contacto se establece una condición de contacto de desplazamiento relativo cero entre superficies también llamado pegado (bonded). Esta condición es aplicada para las siguientes interfaces: placa latón-cable, lámina piezoeléctrica-latón, masa-cable. Dicha condición es creada con el fin de garantizar uniones que no generen desplazamientos relativos entre las interfaces de las piezas que

interactúan en el modelo. Adicionalmente, una condición de desplazamiento nulo en el soporte fijo fue definida en el extremo del cable con el objetivo de simular el piezo-dispositivo empotrado como se ilustra en la Figura 4.1.

Para activar las láminas piezo-eléctricas como actuadores, una fuerza distribuida armónica p es aplicada como se ilustra en la Figura 4.1a. Esta fuerza es considerada como la entrada del piezo-dispositivo, la fuerza presenta una excitación en los rangos 1-5 KHz y 10-20 KHz. Esto significa que el modelo de las láminas no considera las componentes eléctricas, ya que la excitación es mecánica. Sin embargo, para la aplicación requerida no es necesario tener en cuenta esta característica. Cabe resaltar que la fuerza es aplicada de manera síncrona y con un desfase de manera que una lámina queda en compresión y la otra en tensión. Las fuerzas presentan la misma magnitud y fue estimada con los modelos reportados por Sirohi y Chopra (2000).

4.1.3 Puntos de medición de velocidad en análisis armónico

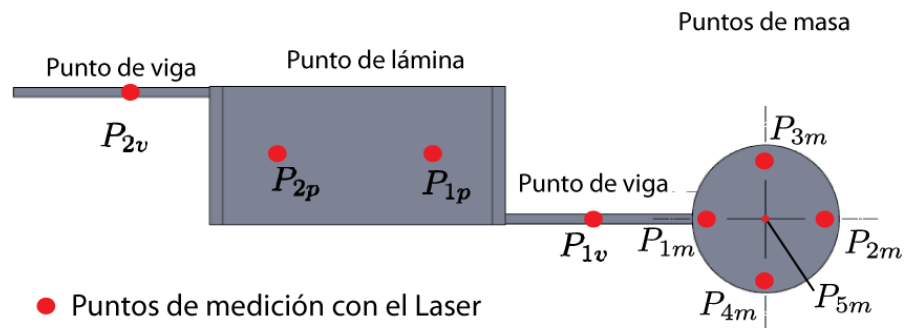


Figura 4.3 Puntos de evaluación de velocidad.

Como salida de la simulación se obtendrán valores de velocidad correspondientes a grados de libertad específicos en el piezo-dispositivo, como se observa en la Figura 4.3. Se

definieron nueve puntos de medición como se había realizado previamente en la fase experimental. En el modelo, el procedimiento consiste en la selección de un conjunto de nodos sobre la malla en cada punto definido en la Figura 4.3. Para el modelo de elementos finitos, el Intervalo de frecuencia establecido fue de 120 Hz en los rangos de 1-5 kHz y 10-20 kHz, respectivamente.

4.2 Resultados del análisis armónico

Para el piezo dispositivo se realizaron registros de la velocidad en el tiempo en los puntos anteriormente descritos los cuales fueron medidos en [mm/s]. esto con el fin de poder determinar de las funciones de respuesta en frecuencia en el modelo de elementos finitos. Las funciones obtenidas fueron normalizadas con respecto al valor mayor en el intervalo de estudio y este fueron consolidadas para cada elemento que conforma el dispositivo (masa, piezoeléctrico, cable). Es importante mencionar que los valores de velocidad fueron normalizados con respecto el valor del pico máximo en cada grado de libertad como se mencionó en la sección anterior, por lo tanto, su amplitud es irrelevante.

4.2.1 Resultados de la velocidad entre 1-5 kHz

Los resultados de las velocidades calculadas para los 8 puntos, en el rango de frecuencia 1-5 kHz, son mostrados en la Figura 4.4. Podemos observar que dos picos resaltan en las frecuencias; la primera en 1100 Hz y la segunda en 2466.7 Hz, los picos se repiten en todos los puntos de medición. En estos dos picos el piezo-dispositivo presenta los modos de vibración mostradas en la Figura 4.6. Los resultados experimentales mostraron dos picos de resonancia similares, sin embargo, esto debe ser validado en procesos posteriores.

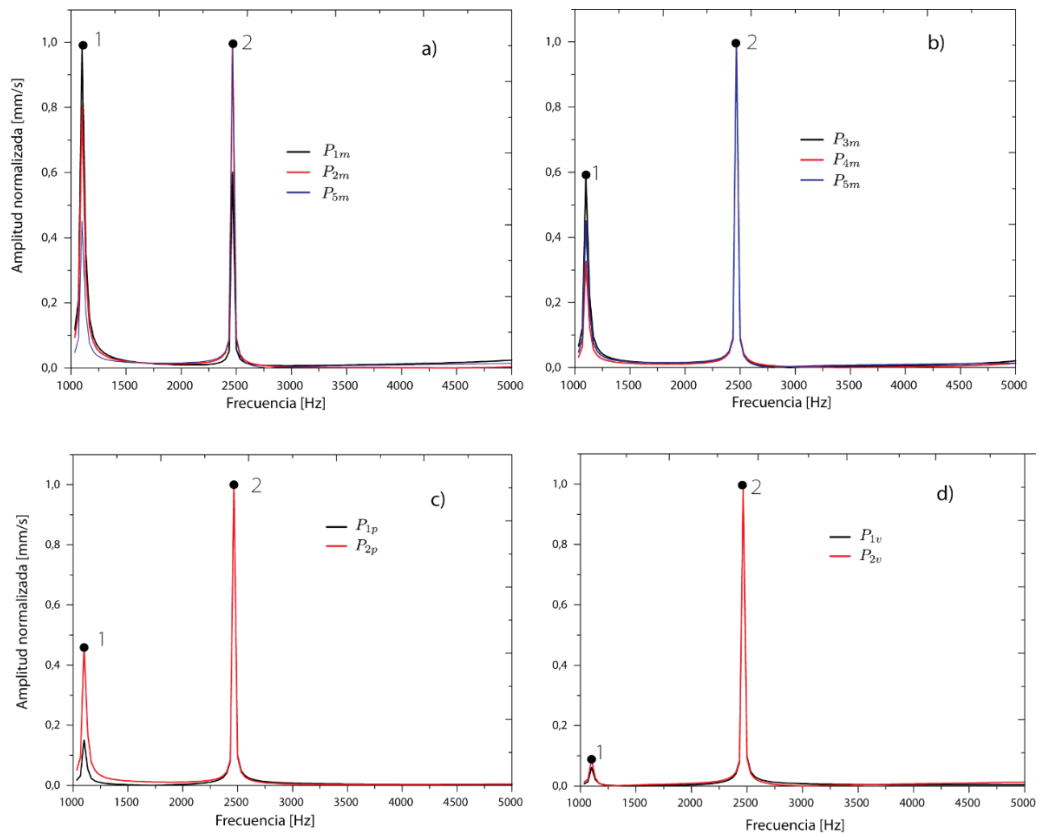


Figura 4.4 Velocidad normalizada frecuencia 1-5 kHz

4.2.2 Resultados de la velocidad entre 10-20 kHz

Los resultados de velocidad en el rango de frecuencia 10-20 kHz, permiten la identificación de varias frecuencias que sobresalen en su amplitud, cinco picos fueron elegidos como resonantes como se evidencia en la Figura 4.5. Estas frecuencias se identificaron en los siguientes valores 10417 Hz (3), 12000 Hz (4), 13333 Hz (5), 13833 Hz (6) y 14167 Hz (7). Todas las formas de vibrar asociadas a estas frecuencias son ilustradas en la Figura 4.6.

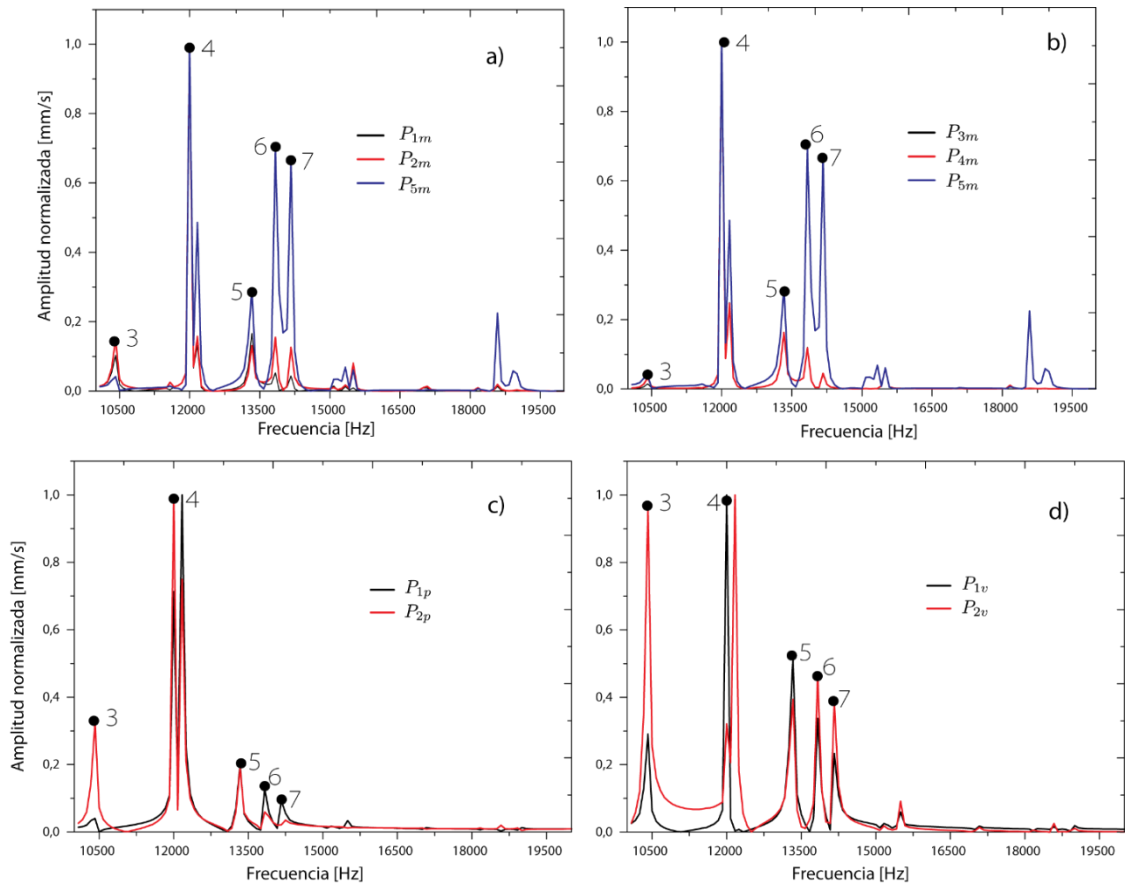


Figura 4.5 Velocidad normalizada frecuencia 10-20 kHz

En este capítulo se muestran los modos de vibración numéricos asociados con algunas frecuencias determinadas en las velocidades. Los modos determinan las formas de excitación en las cuales el piezo-dispositivo podría actuar, sin embargo, esto debe ser validado experimentalmente.

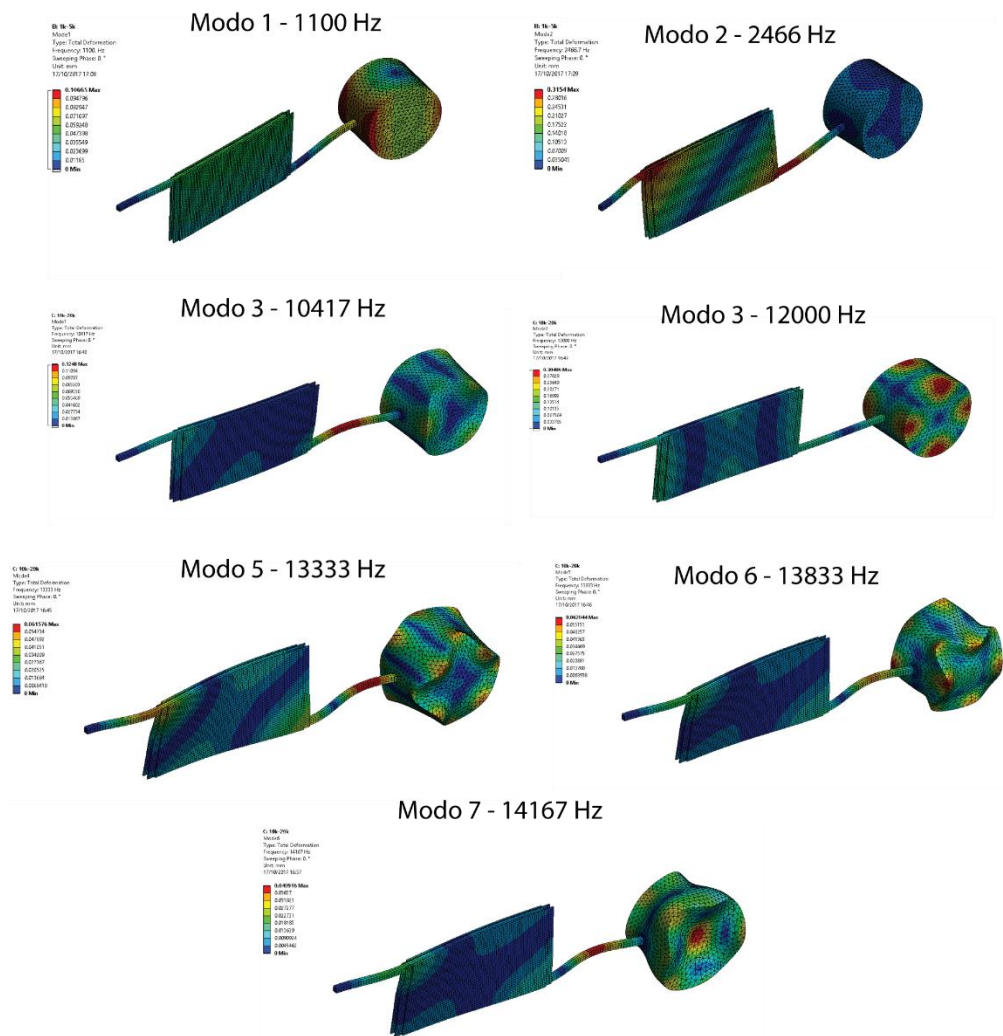


Figura 4.6 Modos de vibración identificados entre 1-20 kHz

4.2.3 Análisis armónico para la correlación experimental de los modos de vibración

A continuación, se realiza un ajuste de parámetros mediante la modificación de propiedades mecánicas con el fin de identificar la dinámica del sensor en las diferentes resonancias mecánicas para que los resultados experimentales correspondan con el modelo numérico estudiado. Inicialmente se planteaba modificando los parámetros mecánicos y eléctricos, sin

embargo, una correlación de estos permitió conocer cuales resonancias experimentales corresponden con la numéricas.

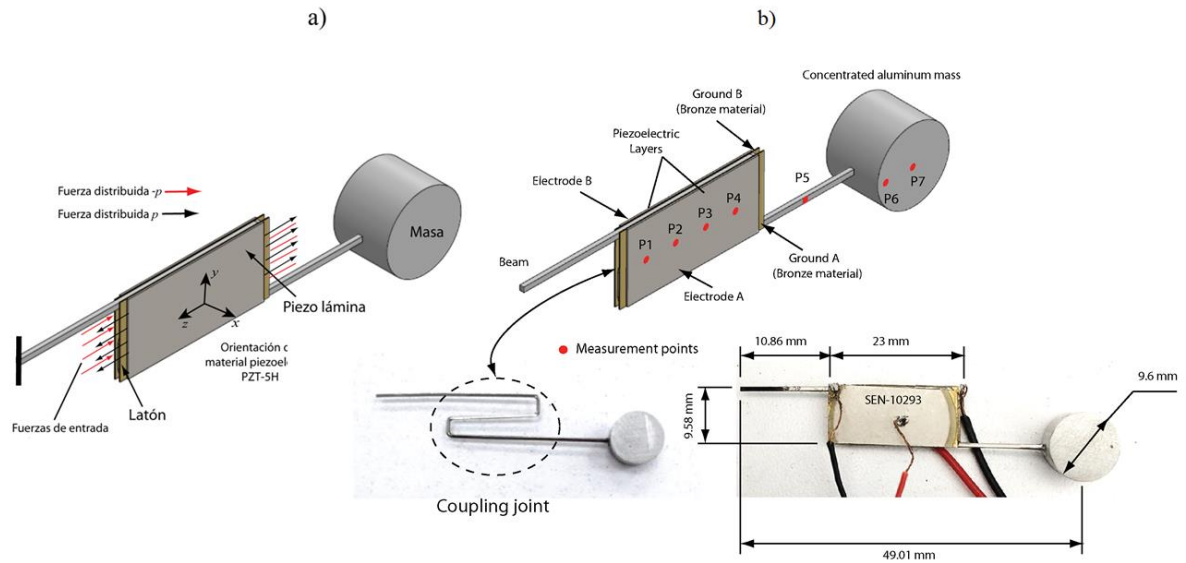


Figura 4.7 a) Elementos del modelo (piezo-dispositivo) de elementos finitos. b) Puntos de medición.

El análisis de respuesta en frecuencia se realiza con el fin de obtener el comportamiento dinámico en los grados de libertad demarcados en la Figura 4.7b., El rango de frecuencia en la simulación fue definido como 1-30 KHz establecido por el análisis exploratorio realizado previamente mediante la simulación; para los experimentos realizados este intervalo se determinó entre 1-20 KHz. Para el análisis fueron asignadas las propiedades físicas listadas en la Tabla 4.1 y Tabla 4.2, estas corresponden con los elementos que componen el piezo-dispositivo y que fueron utilizadas en el análisis armónico descrito en el apartado anterior.

4.3 Resultados de la correlación experimental

4.3.1 Correlación del modelo de elementos finitos con los resultados experimentales de velocidad

Los resultados experimentales fueron correlacionados con la aproximación obtenida en el modelo de elementos finitos. Este procedimiento fue realizado mediante la variación de las propiedades mecánicas de las partes que constituyen el piezo-dispositivo en el modelo de elementos finitos hasta obtener una relación lineal entre los valores de los picos evidenciados en los resultados experimentales y del modelo de elementos finitos. Cinco picos resaltan en el espectro de frecuencia con los siguientes valores; 1042 Hz, 1973 Hz, 8828 Hz, 11295 Hz y 17436 Hz. Por otro lado, en el modelo de elementos se evidencian los siguientes picos; 1256 Hz, 2840 Hz, 12240 Hz, 16020 Hz y 22680 Hz, estos nuevos valores fueron determinados después de un proceso de variación de parámetros para ajustar los picos a los experimentos.

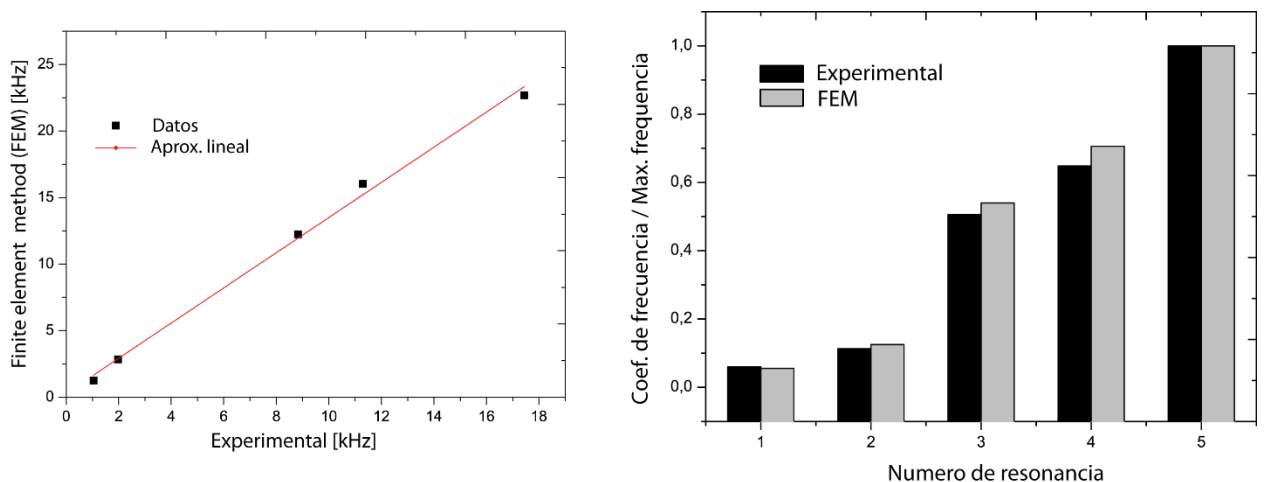


Figura 4.8 a) Correlación entre los valores de los picos de frecuencia numéricos y experimentales. b) Razón entre frecuencias desde una frecuencia máxima base.

en la Figura 4.8a. se puede observar que una relación lineal es determinada entre los valores de los picos, la función lineal determinada es $f_{FEM} = 285.99 + 1.32f_{EXP}$. Los valores de las frecuencias fueron normalizados con respecto al valor máximo para evidenciar la relación porcentual y la razón con el pico máximo entre los picos (Experimental y FEM) como es representado en la Figura 4.8b. Es observado que los valores numéricos determinados corresponden a una relación porcentual que es acorde con los picos experimentales.

4.3.2 Resultados de mediciones experimentales de velocidad del piezo-dispositivo, modelo de elementos finitos y comparación con señales de resistencia eléctrica.

Tomando como referencia las funciones de respuesta en frecuencia obtenidas experimentalmente con el vibrómetro laser (Ver Figura 3.12 sección 3.6), una nueva solución numérica fue realizada con el fin de caracterizar los modos de vibrar del piezo-dispositivo para evidenciar los modos que corresponden con las resonancias medidas experimentalmente. Las funciones obtenidas (velocidad experimental, velocidad FEM) fueron normalizadas con respecto al valor máximo y para este análisis se tomaron en cuenta las medidas efectuadas en los puntos demarcados en el piezoeléctrico y en la masa del piezo-dispositivo. Las mediciones de los puntos 1 hasta 4 corresponden con la lámina piezoeléctrica, y puntos 6 hasta 7 hacen parte de las mediciones sobre la masa; la media aritmética fue calculada para ambos conjuntos de mediciones extrayéndose finalmente una función de respuesta en frecuencia para la velocidad en la masa y la lámina piezoeléctrica como se observa en la Figura 4.9. Los resultados muestran (demarcados con rojo) que los valores de los picos indican amplitudes en la velocidad que sugieren una forma de vibrar correspondientes con las resonancias numéricas encontradas. Para corregir el espectro de la

frecuencia (velocidad en la frecuencia) que se evidencia en la figura, la inversa de la pendiente $(1/1.32)f_{FEM}$ (obtenida de la gráfica 4.8a) por la frecuencia numérica (f_{FEM}) genera un intervalo corregido correspondiente con el intervalo experimental f_{exp} , como lo demarcan las líneas negras y rojas asociadas a la solución numérica y experimental. La corrección es necesaria para comparar las resonancias identificadas en los experimentos con los modos de vibración calculados por el análisis de elementos finitos.

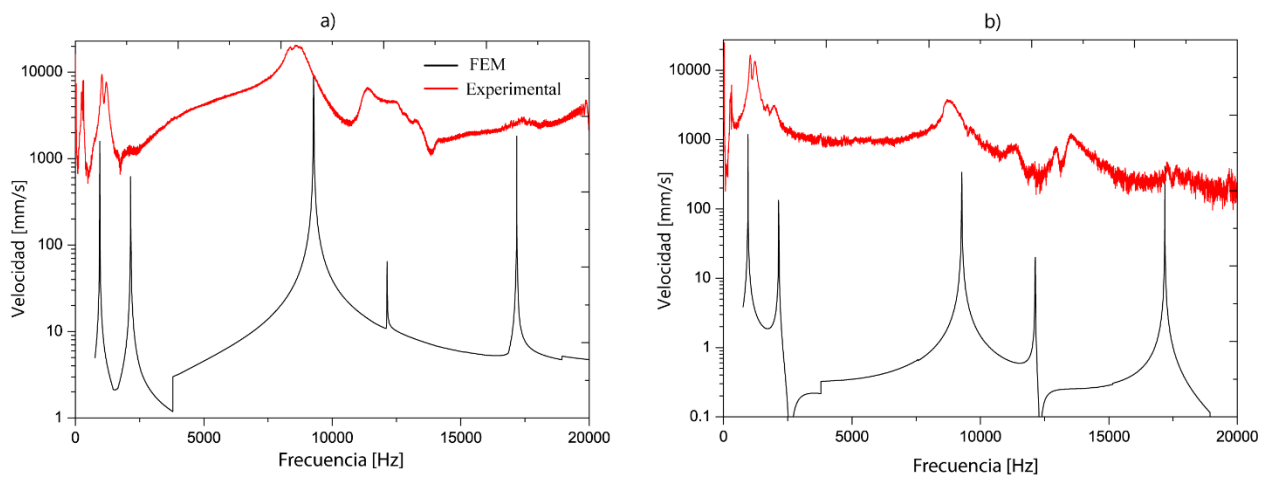


Figura 4.9 a) Velocidad promedio en la lámina piezoeléctrico con frecuencia corregida. b) Velocidad en la masa con frecuencia corregida.

Los picos no coinciden exactamente si los comparamos sin las correcciones, ya que los valores exactos de las propiedades mecánicas son desconocidos; pero las relaciones ilustradas en la Figura 4.8b muestran que las frecuencias corresponden en ambos casos con valores muy cercanos entre sí. Esto evidencia la correspondencia entre los picos resonantes y, por lo tanto, la correlación de los modos obtenidos numéricamente con los experimentales.

4.3.3 Modos de vibración del piezo-dispositivo

La Figura 4.10 describe los 6 modos de vibración que determinan la dinámica del piezo-dispositivo en las frecuencias que se correlacionan con los experimentos realizados, es decir, las que se aproximen mejor con los experimentos. Podemos observar su orden con el incremento de la frecuencia. La descripción dinámica de cada modo de vibrar es la siguiente:

- Modo de vibrar a 1256 Hz: Es un modo donde la masa realiza su movimiento inercial.
- Modo de vibrar a 2840 Hz: Es un modo donde la lámina piezoeléctrica presenta flexión.
- Modo de vibrar a 12240 Hz: Es un modo donde el cable presenta flexión. Este modo es ideal para la excitación, ya que las vibraciones deforman la lámina piezoeléctrica y esto lo hace muy sensible eléctricamente y por lo tanto apropiado para la determinación de variaciones estructurales. Esto se ve reflejado en los resultados experimentales determinados en la Figura 4.9.
- Modo de vibrar a 16020 Hz: Es un modo combinado donde el cable y la lámina piezoeléctrica experimentan grandes desplazamientos.
- Modo de vibrar a 22680 Hz: Es un modo donde una parte del cable (entre la masa y lámina) vibra. En los resultados experimentales puede verse que el modo no resalta

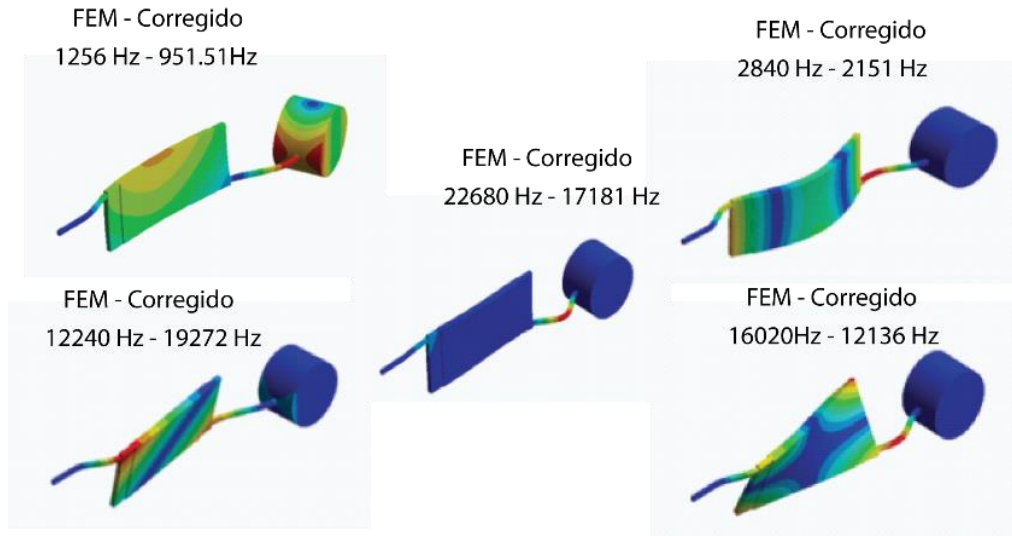


Figura 4.10 Modos de vibracion del piezo-dispositivo (comparacion experimental-FEM).

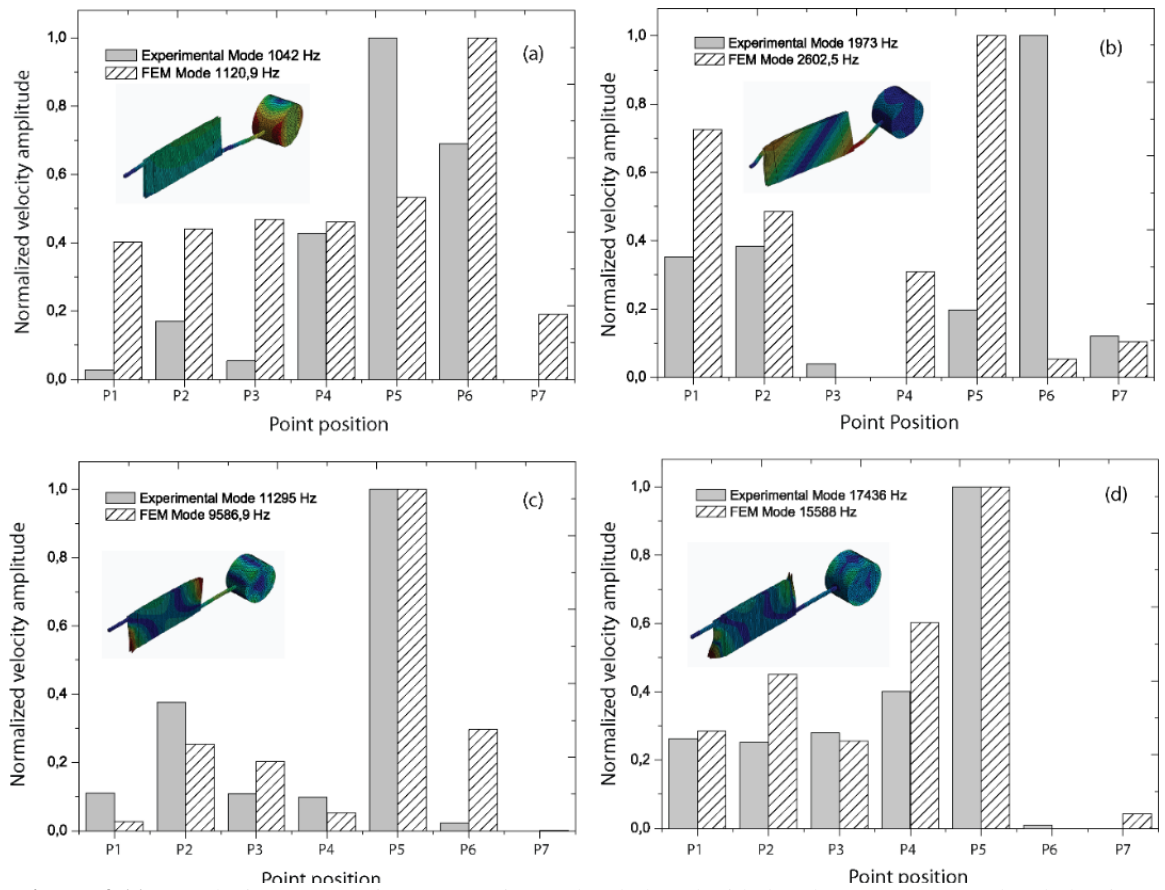


Figura 4.11 Correlaciones numericas y experimentales de la velocidad en los puntos marcados de la Figura

4.7b.

A continuación, la Figura 4.11 muestra los puntos de comparación marcados en rojo en la Figura 4.7b. El eje y , representa la velocidad normalizada (dividida por el máximo) en dichos puntos para las medidas de velocidad experimental y numérica. Podemos observar como las razones de velocidad pueden verificar las formas de vibrar usando los resultados numéricos y experimentales. Estas relaciones son fundamentales para activar el sensor en el modo de vibrar que sea más sensitivo a los cambios elásticos del sustrato. El sustrato es el elemento que el sensor deberá monitorear cuando esté presente variaciones en sus propiedades. En la siguiente sección es mostrado el análisis del conjunto completo compuesto por piezo-dispositivo, interface de acoplamiento y sustrato.

4.4 Modelo de elementos finitos (FEM) del piezo-dispositivo acoplado a una interface y diferentes sustratos: Análisis armónico.

La Figura 4.12, muestra un montaje que se compone de tres partes; el piezo-dispositivo, una interface (diente canino y elemento mecánico en forma de cono) y un sustrato. El dispositivo es acoplado al diente por medio de un bracket y a otro tipo de interface (elemento cónico) por medio de una ranura. La geometría de los elementos de la interface y del sustrato son elementos que fueron diseñados para la realización de las pruebas experimentales. Estos elementos cuentan con planos detallados, ya que estos fueron manufacturados en diferentes materiales como se observa en el Anexo 3. Para reconstruir la pieza dental (diente canino) mostrada en la Figura 4.13; los siguientes procedimientos fueron realizados; el diente canino fue colectado en la facultad de salud, del programa de odontología de la Universidad Autónoma de Manizales (UAM); con el fin de ser escaneado con el dispositivo de Artec Leo

que permitió la generación de un conjunto de puntos para su posterior reconstrucción en un software de modelado geométrico, tal como se ilustra en la Figura 4.13.

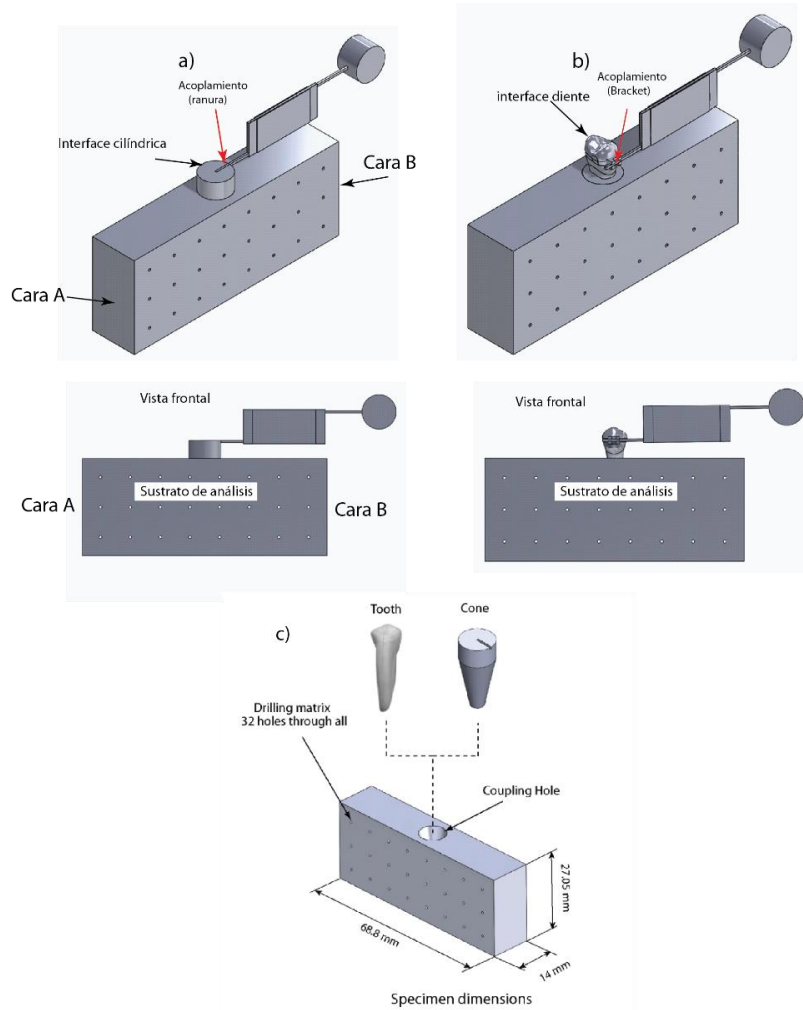


Figura 4.12 Modelo completo de análisis, dispositivo, interface y sustrato.

La nube de puntos fue importada al software SOLIDWORKS 2018 para la reconstrucción del diente mediante la unión de superficies como se evidencia en la Figura 4.13.

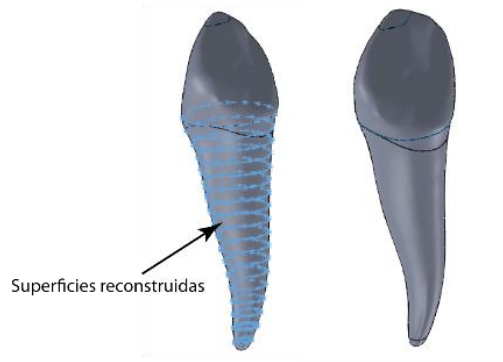


Figura 4.13 Reconstrucción computacional del diente Canino.

Para realizar la simulación, las condiciones de frontera fueron definidas con el fin de establecer un modelo que pueda ser comparado con los experimentos. Las condiciones de frontera del piezo-dispositivo son asumidas de la siguiente forma; se definieron superficies de contacto rígidas entre las interfaces que acoplan el sustrato y el dispositivo. Dicha condición fue creada con el fin de garantizar los movimientos entre los cuerpos de forma directa. Por lo cual, no se generan desplazamientos relativos entre las interfaces que interactúan en el modelo. Adicionalmente, condiciones de soporte fijo fueron definidas para el sustrato en las caras A y B. La descripción de las caras A y B está representada en la Figura 4.12 en los extremos del sustrato de análisis. La Figura 4.14 muestra el mallado realizado a los modelos de estudio que incluyen las interfaces de acople (diente y cono) y el sustrato. Las mallas fueron simplificadas en el sentido que el número de elementos finitos no sobrepasara el umbral de computo de 32 GBytes de memoria de una Workstation DELL PRECISION WORKSTATION T7810.

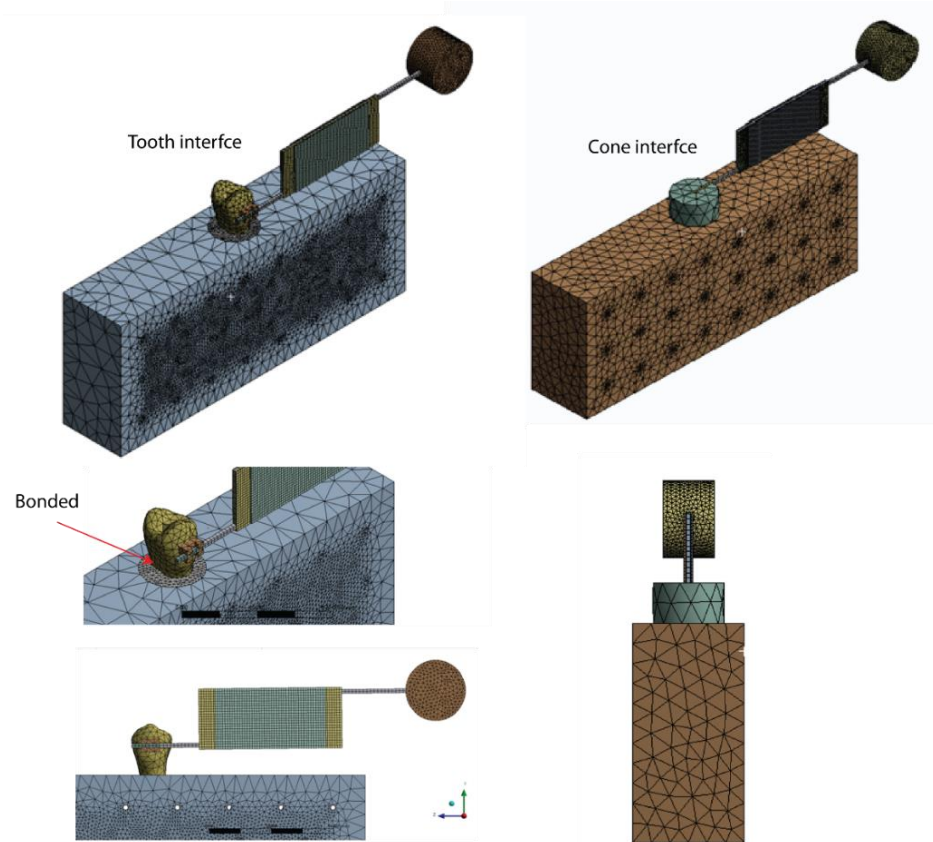


Figura 4.14 Mallado del modelo con interface. a) Diente. b) Cono.

4.4.1 Configuración del análisis armónico

Para emular los experimentos realizados las siguientes consideraciones son tenidas en cuenta en la simulación. Como variables de salida se definieron los valores de velocidad correspondientes a grados de libertad específicos en el piezo-dispositivo, como se muestra en la Figura 4.15. El objetivo principal del análisis es variar el módulo de Young del sustrato de análisis para observar los cambios en la cinemática del dispositivo. Diferentes puntos de medición son seleccionados como puntos claves del análisis. El Intervalo de frecuencia establecido fue de 1-30 kHz, respectivamente. Los puntos de análisis son establecidos de la

siguiente forma; 2 puntos en el cable, 4 puntos en la lámina piezoeléctrica, 2 puntos en la masa y 3 puntos en el sustrato. Las propiedades del diente fueron asumidas como 2500 kg/m³ para la densidad con un módulo de elasticidad 100 GPa de elasticidad y para la interface cónica las propiedades son las mismas que las de la masa, reportadas en la tabla 3.1.

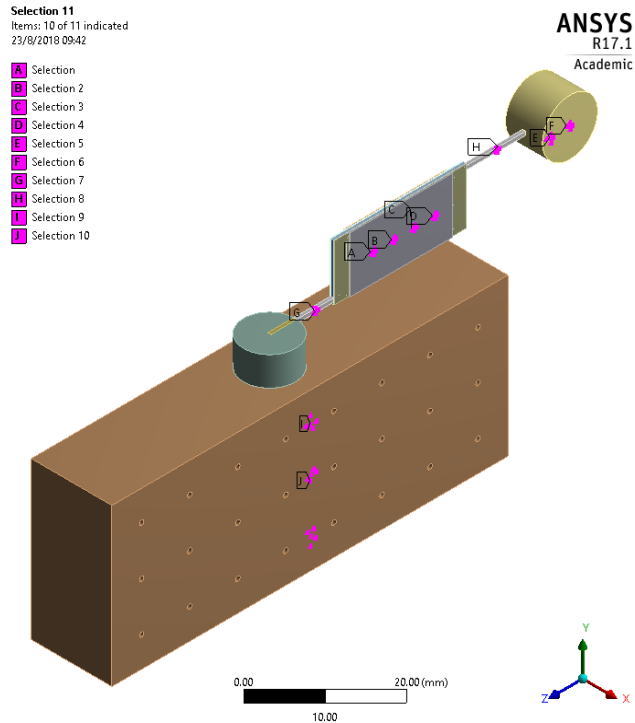


Figura 4.15 Modelo de elementos finitos para el conjunto de estudio, puntos de interés resaltados

4.4.2 Efectos de la variación de la interface (diente vs elemento mecánico) sobre un mismo sustrato

Los resultados obtenidos de las velocidades promediadas para los puntos correspondientes a la lámina piezoeléctrica y la masa son mostrados en Figura 4.16a y 4.16b. Los puntos están demarcados en la Figura 4.15, cuatro puntos para la lámina piezoeléctrica y dos para la masa.

La línea demarcada con azul corresponde a las velocidades cuando el diente canino actúa como interface del piezo-dispositivo y la roja cuando este está acoplado al cono de aluminio. Dentro de las figuras, la línea negra representa las velocidades del piezo-dispositivo empotrado, eso significa que no hay sustrato y tampoco interface de acoplamiento. El objetivo es observar los efectos de la interface de acoplamiento en la dinámica del dispositivo, manteniendo las mismas propiedades elásticas en el sustrato, que para este caso es considerado un módulo de Young de 5 GPa. En las figuras se observa que la interface representa un punto de partida importante en la dinámica del dispositivo, ya que este define las formas de vibrar en y por lo tanto la determinación en la dinámica del conjunto. Hay que señalar que en las secciones (4.2 y 4.3) las propiedades de los elementos fueron ajustadas con el fin de reproducir una función de respuesta en frecuencia más cercana a la experimental. Por lo tanto, los resultados muestran resonancias en posiciones diferentes, sin embargo, el objeto del análisis es determinar el modo de vibración que presenta más sensibilidad a los cambios del sustrato, como se expone en la siguiente sección.

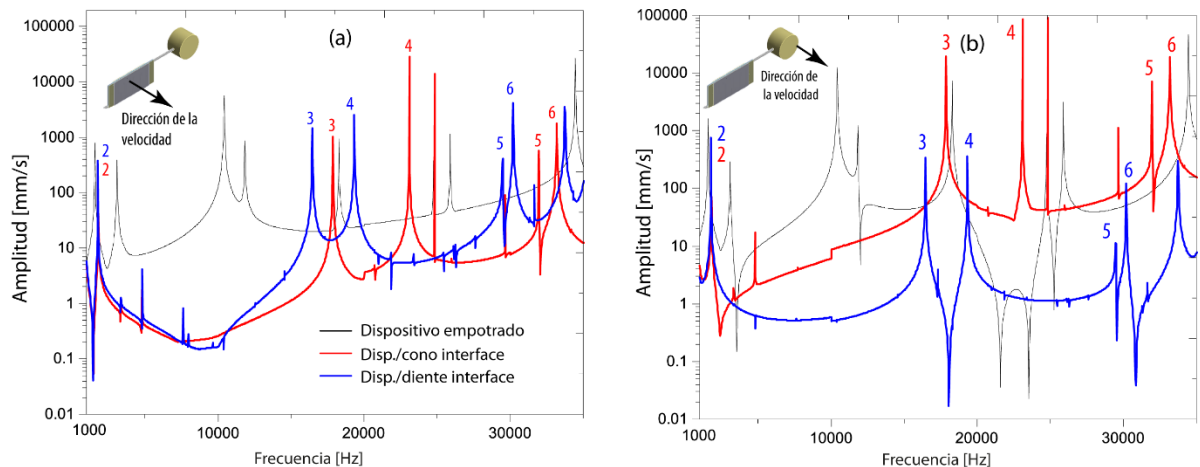


Figura 4.16 Comparaciones entre velocidades promedio en la frecuencia con un sustrato de módulo de Young de 5GPa. a) Lamina piezoeléctrica. b) Masa.

En la Figura 4.16a se puede evidenciar que en el intervalo de 1-10 kHz la interface no tiene efectos sobre la cinemática de la lámina piezoeléctrica, ya que básicamente las señales tienen la misma tendencia. A partir de 10 kHz se corrobora que la lámina vibra de forma diferente cuando la interface es cambiada. Los picos de resonancia fueron numerados para resaltar los efectos de cada interface (diente y cono). Resonancias 1 y 2, se encuentran en los mismos valores de frecuencia lo cual indica que estas pertenecen a la lámina piezoeléctrica porque independiente de la interface las frecuencias son las mismas. Las relaciones entre las resonancias 3, 4, 5 y 6 son afectadas por los cambios de masa y rigidez que introducen las interfaces en la cinemática del dispositivo. Los valores de los picos identificados son listados en la Tabla 4.3. En la Figura 4.16b, es visible que las velocidades de la masa son mucho mayores cuando el cono actúa como interface, esto puede ser asociado al empotramiento del cono en el sustrato. Dado que el diente es más rígido, las velocidades de la masa son menores que las reportadas por el cono en el intervalo definido por 1 kHz y 12.5 kHz. Esto puede ser fácilmente verificado con las amplitudes de la resonancia que son mostrados en la figura, ya que casi en todo el espectro los valores de resonancia son mayores a los de cono.

Tabla 4.3 Valores de frecuencia para picos identificados entre 1000 Hz y 35000 Hz

Modo	Interface [Hz]	
	Cono	Canino
2	1816	1783
3	17867	16467
4	23100	19333
5	31967	29467
6	33200	30200

En la práctica, la identificación de estas regiones en la frecuencia sirve para establecer un parámetro de referencia que será usado como línea base para el monitoreo.

4.6. Efectos de las variaciones elásticas en el sustrato sobre las velocidades del sustrato

Para observar los efectos que se generan en la dinámica del dispositivo (piezo-laminas, interface y sustrato), la variación del módulo de Young del sustrato fue considerado como parámetro de correlación. Por lo tanto, diferentes simulaciones fueron realizadas con los siguientes módulos de elasticidad asignados al sustrato 1 GPa, 10 GPa, 35 GPa, 70 GPa y 120 GPa. Los resultados de las velocidades medias en el sustrato son resumidos en la Figura 4.17. Podemos observar en las figuras 4.17a y 4.17b, las comparaciones entre las diferentes velocidades medias con la interface cono. Es analizado que cuando el módulo se incrementa, las velocidades son menores, en el intervalo 1-15 kHz, y a partir de 15 kHz las resonancias se modifican por el cambio de elasticidad. Cuando estas son comparadas con las señales de velocidad de la lámina, se evidencia que los picos principales del sensor son reflejados en las velocidades medias del sustrato. Como caso de estudio para la comparación fueron elegidos sustratos de 10 GPa y 70 GPa, y la señal de la lámina fue determinada con un sustrato de 10 GPa. De acuerdo con los resultados de la Figura 4.17b, es visto que el sensor excita el sustrato en sus resonancias principales. Sin embargo, mecánicamente las resonancias del sustrato no se ven del todo reflejadas en la dinámica del sensor. Dado que las propiedades mecánicas cambian (variación elástica), las cuantificaciones de estas variaciones podrían verse mayormente reflejadas en las deformaciones del sensor, esto debido a que las señales eléctricas emitidas por el sensor dependen de las deformaciones de la lámina de material

piezoeléctrico, de esta forma la naturaleza dinámica del sistema completo puede ser cuantificada.

Usando el diente como interface en el sistema completo, en las figuras 4.17a y 4.17b, podemos observar que hay una tendencia incremental en el valor de las velocidades. Como se discutió anteriormente, los efectos de las variaciones elásticas reflejan el mismo comportamiento general al de las figuras 4.17a y 4.17b, sin embargo, es importante resaltar que estructura dinámica es distinta debido a la interface dental.

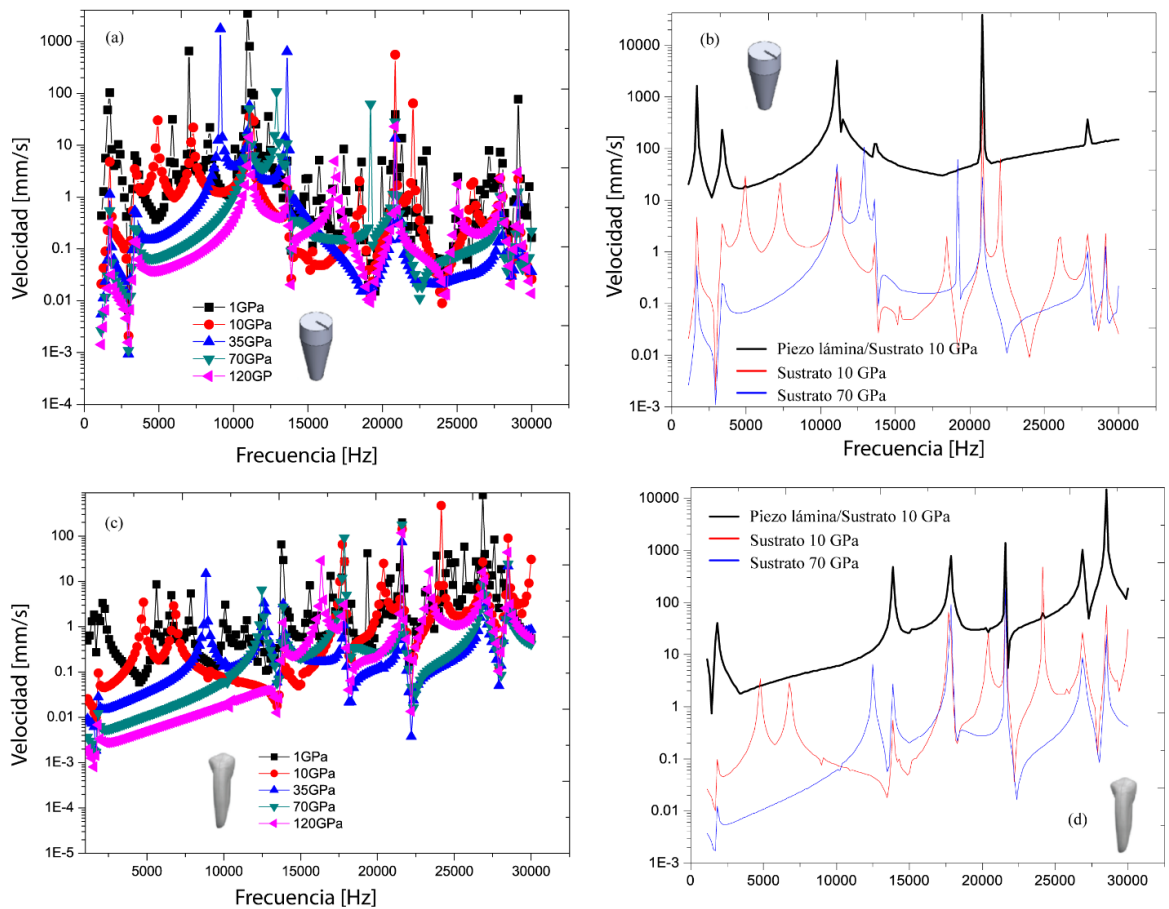


Figura 4.17 Velocidad media en sustrato puntos P1-P3 a) como. b) comparación cono y sensor aislado. c) Diente canino. d) Comparación diente canino y sensor aislado.

Como conclusión vemos que los picos de resonancias que no dependen de las variaciones del sustrato y estas corresponden con las impuestas por las relaciones de masa y rigidez entre la interface y el dispositivo, como se muestra en la Figura 4.17b y Figura 4.17d entre 20 kHz-22.5 kHz. Se evidencian los efectos de las variaciones del Módulo de Young del sustrato sobre la dinámica del sistema completo. De acuerdo con lo observado, las resonancias del sustrato podrían reflejarse en las señales eléctricas emitidas por el material piezoeléctrico que compone el piezo-dispositivo, pero esto debe ser verificado y analizado.

4.4.3 Efectos de las variaciones elásticas del sustrato sobre la lámina piezoeléctrica.

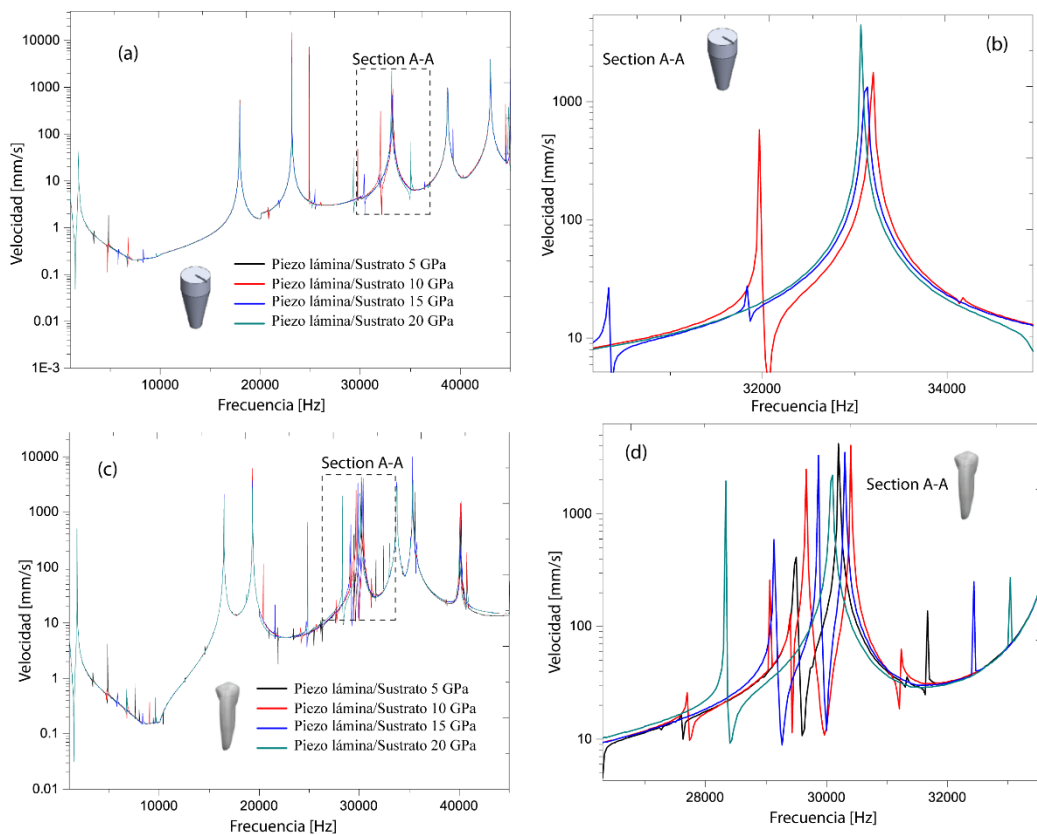


Figura 4.18 Efectos de las variaciones elásticas del sustrato en la velocidad media de la lamina piezoeléctrica usando la interface. a) cono. b) sección A-A cono. c) diente. d) Sección A-A, diente

Para evidenciar los efectos de las variaciones elásticas del sustrato sobre el piezo-dispositivo, las velocidades medias fueron obtenidas en la lámina piezoeléctrica ya que su rendimiento eléctrico depende de las deformaciones que esta sufra, como el dispositivo tiene dos láminas es tomado en cuenta que ambas son afectadas. Podemos ver que en la Figura 4.18a son graficadas todas las funciones medias de velocidad en la frecuencia entre 1 kHz-45 kHz, es perceptible a simple vista que las velocidades no se ven afectadas por el cambio de elasticidad en el sustrato. Caso contrario ocurre cuando la interface de acoplamiento fue cambiada (Figura 4.16), sin embargo, entre el intervalo 30 kHz-35 kHz es determinada una sección que presenta sensibilidad al cambio de los parámetros elásticos, esta sección es denominada sección A-A y es ilustrada en la Figure 4.18b. Allí se observa que las resonancias se mueven ante el cambio de elasticidad y para ilustrar los efectos en el modo de vibrar estos son graficados en la Figura 4.19; la figura evidencia el análisis cinemático en la lámina piezoeléctrica y el cono.

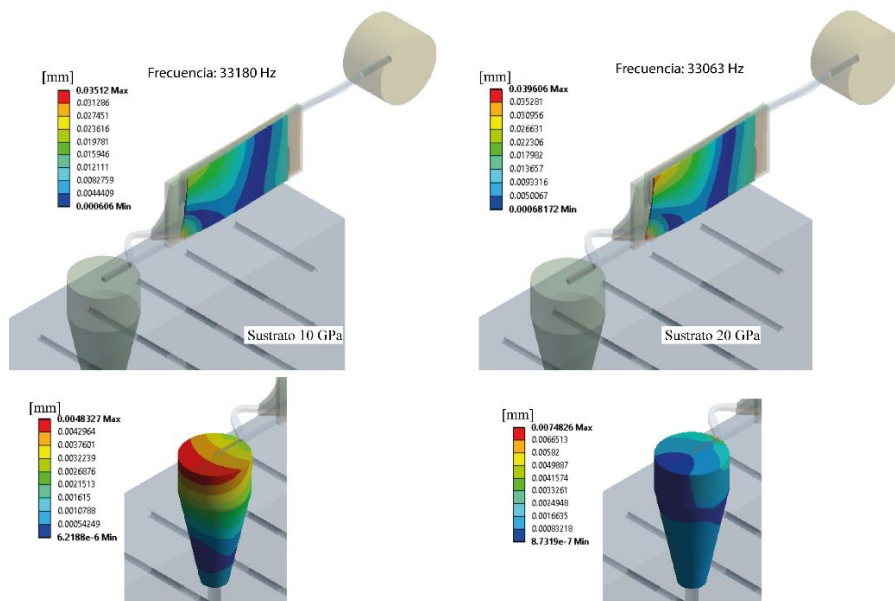


Figura 4.19 Efectos en la forma modal del dispositivo e interface cono por las variaciones elásticas

La forma de vibrar muestra que el sensor presenta mayores desplazamientos en su parte superior izquierda induciendo flexión, y como consecuencia de la variación de 10 GPa a 20 GPa en el sustrato vemos un aumento del desplazamiento en 12.7%. Uno de los efectos significativos es el cambio en la frecuencia, que paso de 33180 kHz a 30067 kHz, usualmente, cuando la rigidez de un sistema es incrementada sus frecuencias resonantes también, como se mostró en la figura 4.17. Pero es importante resaltar que esto puede verse simplemente evidenciado en un sistema mecánico simplificado ya que realmente las resonancias dependen de las relaciones elásticas y de masa en el sistema completo.

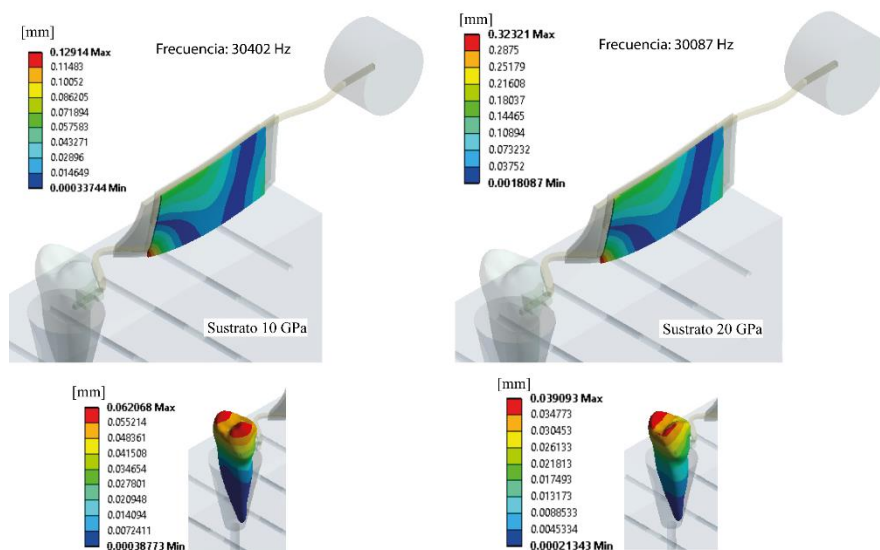


Figura 4.20 Efectos en la forma modal del dispositivo e interface diente por las variaciones elásticas

En la Figura 4.20 se evidencia que en el diente los efectos son más visibles, ya que los desplazamientos se incrementaron un 150%, eso significa que el diente permite mayor movilidad al dispositivo si la rigidez en el sustrato es incrementada. Al igual que le cono la forma de vibrar es la misma pero las amplitudes de los desplazamientos son mucho mayores en el dispositivo cuando está conectado el diente. La forma de vibrar no cambia tan

drásticamente como en el caso del cono, pero si se ve afectada por el cambio de elasticidad en el sustrato.

En este capítulo, fueron mostrados los diferentes efectos causados por las variaciones elásticas del sustrato y estos fueron analizados a través de simulaciones paramétricas hechas con análisis de elementos finitos. En el siguiente capítulo los resultados discutidos en este capítulo serán corroborados con experimentos.

CAPÍTULO V

5. Evaluación experimental del Piezo-dispositivo ante cambios elásticos en el sustrato de soporte

5.1 Introducción

En este capítulo se discutirán los efectos de los cambios elásticos del sustrato en el piezo dispositivo basado en los resultados de pruebas experimentales. Estas consideran la medición de la velocidad en el tiempo y la frecuencia en determinados puntos del dispositivo; los puntos fueron tomados como referencia en capítulos anteriores. El parámetro de análisis será enfocado en dos elementos; las interfaces de acoplamiento y la variación de tres diferentes sustratos con propiedades elásticas conocidas, fueron elegidos sustratos de aluminio, bronce y acero; esto con el fin de corroborar el análisis realizado con las simulaciones en el capítulo IV.

Adicional a las pruebas de velocidad, una prueba de impedancia eléctrica es efectuada con el dispositivo en condición de empotramiento; esto con el objetivo de correlacionar las resonancias mecánicas de la velocidad con las resonancias eléctricas de la impedancia. Desde el análisis de velocidad son verificados los intervalos de la frecuencia donde el piezo-dispositivo es más sensible a los cambios de elasticidad del sustrato.

5.2 Configuración experimental para determinar la velocidad del piezo-dispositivo empotrado

Para la evaluación y comprensión del comportamiento dinámico propio del piezo-dispositivo, se realizaron mediciones de velocidad tomadas en puntos específicos, como se describe en la Figura 5.1. Dos configuraciones experimentales son destacadas; la primera (Figura 5.1a) se definió para el dispositivo en condición de empotramiento y la segunda se estableció con el dispositivo integrado a un sistema que incluye diferentes sustratos (Figura 6b); sin embargo, en esta sección se discutirá la primera configuración. En la Figura 5.1a. se observa al dispositivo fijado en una prensa mecánica, lo que significa que la interface de acoplamiento y el sustrato no se consideraron para este análisis. El objetivo principal es identificar las resonancias mecánicas desde las señales de velocidad para compararlas con las resonancias eléctricas que aparecen en la impedancia eléctrica.

El experimento se compone de los siguientes elementos; una computadora DELL PRECISION T7810, una tarjeta de adquisición de datos (NI DAQ 6343 X series), un amplificador de potencia (TREK 2205) y un vibrómetro láser (POLYTEC CLV-2534), otros elementos como el generador de funciones Tektronix AFG1000 y el Osciloscopio Tektronix TBS1000 fueron utilizados en los experimentos iniciales y exploratorios (experimentos de prueba), pero no hicieron parte integral de los mismos.

Durante el experimento el dispositivo es sujetado a una prensa mecánica para fijar un extremo del cable que actúa como viga principal. Los puntos marcados en color rojo se establecen como puntos de medición de la velocidad.

Los transductores piezoeléctricos son conectados a la salida de voltaje del amplificador de potencia en el que se aplica una señal de excitación de banda ancha de 35 V amplificada. La frecuencia de la señal de entrada barre de 0 kHz a 20 kHz en una ventana de 1 s. Se configuró una frecuencia de muestreo en 100 k muestras / s en el sistema de adquisición de datos. Simultáneamente, el vibrómetro láser se enfocó en los puntos marcados en el dispositivo piezoeléctrico para registrar la velocidad por medio del láser que compone el sistema de medición.

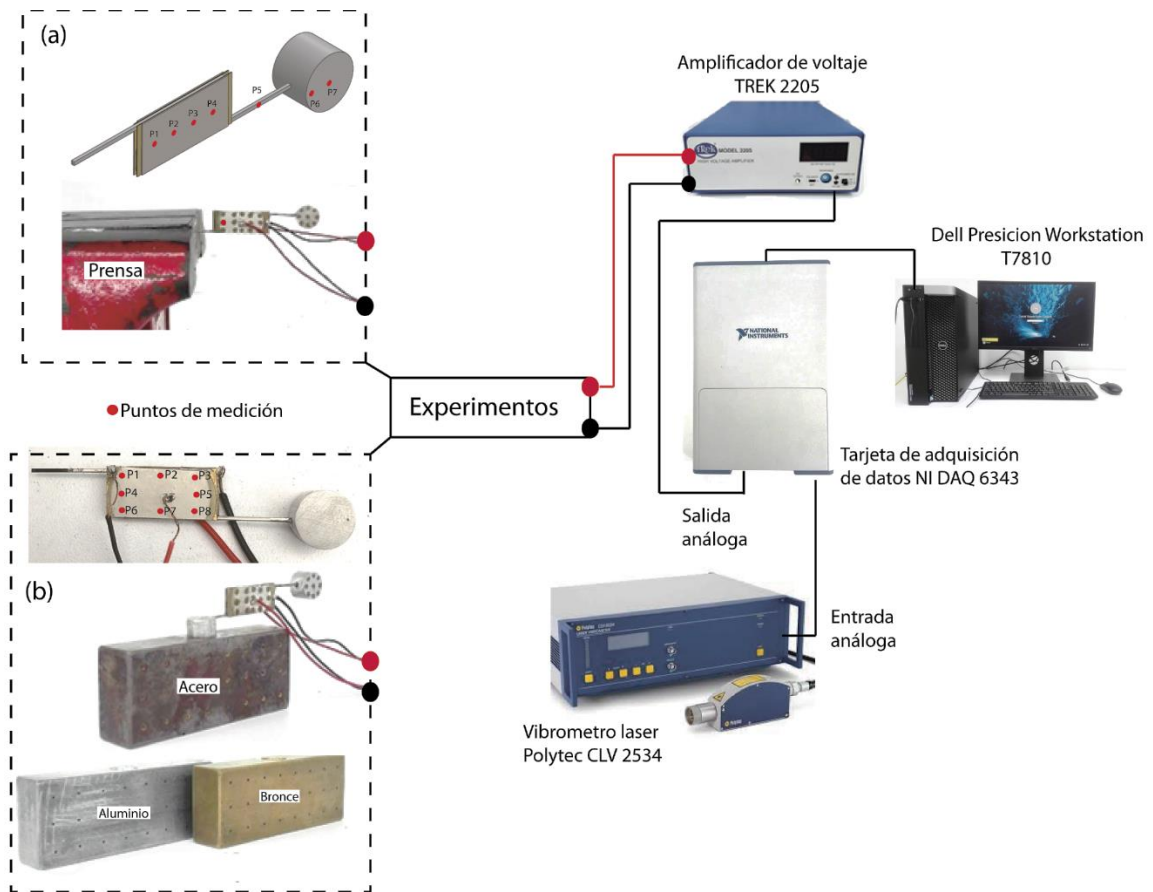


Figura 5.1 Configuración experimental para mediciones de velocidad.

5.2.1 Resultados del análisis de velocidad en el piezo-dispositivo en condiciones de empotramiento

Para la prueba realizada en el piezo-dispositivo, las mediciones de la velocidad en los puntos descritos en la Figura 5.1a, pertenecientes al parche piezoeléctrico (P1 a P4), masa (P6 y P7) y el alambre (P5), fueron registrados en forma de amplitudes como se ilustra en la Figura 5.2. Las velocidades fueron provocadas por una señal de excitación armónica variable que se aplicó a cada parche piezoeléctrico a través de barrido de frecuencia de manera inversa (campo eléctrico inverso para cada PZT) con el fin de inducir flexión en el dispositivo (ver capítulo 3). Esto significa que los desplazamientos de masa son amplificados por el modo de activación.

En la Figura 5.2a, se observan diferentes magnitudes de velocidad en el dominio del tiempo; indica que el dispositivo toma diferentes formas de vibración en valores específicos del espectro de frecuencia en la ventana de tiempo mostrada. Las formas de vibración se refieren a la deformación específica (perfil geométrico) que representa la cinemática del dispositivo en cualquier valor de frecuencia. Se analiza que hay tres transiciones de velocidad máxima (puntos grises) que reflejan la naturaleza resonante del dispositivo. La mayor amplitud se observa cerca de 0.42 s, en la que los puntos P2 y P3 toman los valores máximos (puntos centrales), de otra forma P1 y P4 alcanzan aproximadamente el 20% de las velocidades máximas. La Figura 5.2b muestra que P5 (el cable) presenta la misma amplitud que P2 y P3 en 0.42 s, aproximadamente. Sin embargo, la velocidad en la masa alcanza el 10% de la misma, lo que revela que las velocidades son mucho más bajas que los otros puntos. Denota que la masa presenta pequeños movimientos y el cuerpo del dispositivo se flexiona. La

segunda mayor amplitud de velocidad se observa en 0.57 s para ambas Figuras 5.2a, b. En este pico, la mitad del parche está deformado, lo que dobla el cable a su mayor amplitud. Un tercer pico se identifica en 0.05 s, en el que la masa y el alambre presentan velocidades mayores en comparación con las de los parches piezoeléctricos. Para determinar los valores de frecuencia que corresponden a estas velocidades máximas, la transformada de Fourier se calculó y los resultados están graficados en la Figura 5.4.

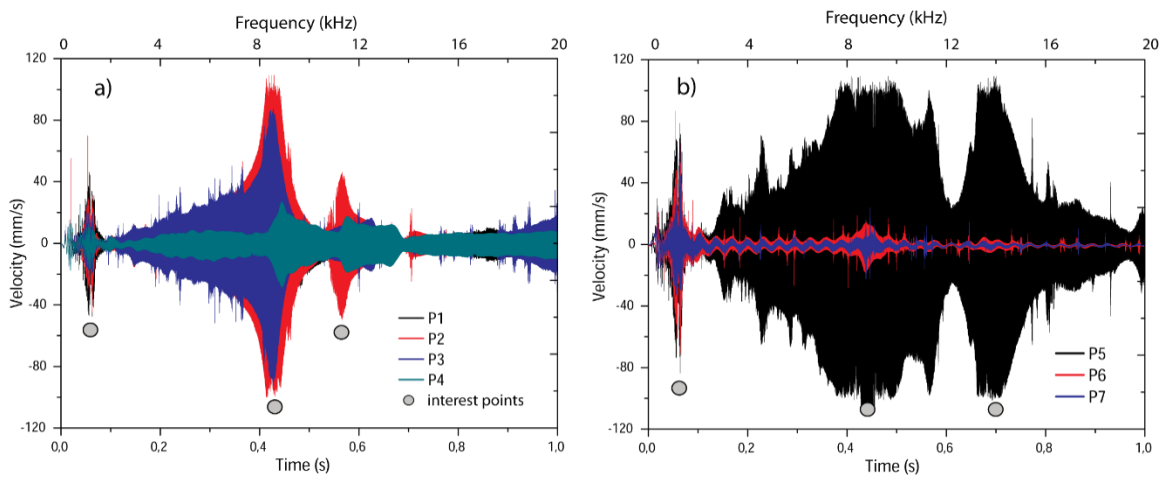


Figura 5.2 Mediciones de velocidad. a) Parche piezoeléctrico (P1, P2, P3, P4). b) Alambre y masa (P5, P6, P7).

5.3 Comparación entre la velocidad y las mediciones de impedancia eléctrica en el piezo- dispositivo.

Las mediciones obtenidas de la resistencia eléctrica en el dominio de la frecuencia (parte real de la impedancia eléctrica) se llevaron a cabo con el dispositivo montado en la prensa mecánica (aislada) del mismo modo que los experimentos de la sección anterior. Se desarrolló una configuración experimental para identificar las resonancias mecánicas a partir de mediciones eléctricas aplicando la técnica de impedancia electromecánica (Shanker et al.,

2011). La identificación permitirá elegir qué resonancias pertenecen a las respuestas mecánicas que pueden controlarse a partir de las mediciones eléctricas mediante el acoplamiento electromecánico. La resistencia eléctrica se midió utilizando un analizador de impedancia (E4990A, Agilent, Palo Alto, CA, EE. UU.) como se muestra en la Figura 5.3. La prueba consiste excitar ambos transductores piezoeléctricos aplicando simultáneamente un voltaje armónico y leyendo las señales de respuesta eléctrica de la corriente que pasa a través de él. La configuración de barrido de la señal se definió de 1 a 20 kHz para la medición con 400 puntos de resolución en cada ancho de banda seleccionado.

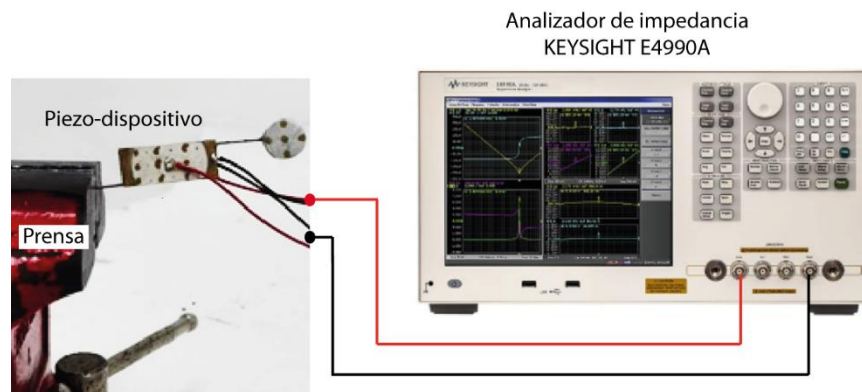


Figura 5.3 Configuración experimental para mediciones de impedancia eléctrica.

La Figura 5.4 compara las velocidades y la resistencia eléctrica en dos grupos con el objetivo de mostrar la correlación entre los picos mecánicos y eléctricos en los siguientes rangos de frecuencia de 1 a 2 kHz (Figura 5.4a) y 6–15 kHz (Figura 5.4b). Estos intervalos de frecuencia se definieron mediante un análisis exploratorio de datos que implicaba reducir el intervalo 2–6 kHz. Las líneas negras discontinuas representan los valores en frecuencia que dan lugar a picos. Dos picos son visibles en el rango de 1 a 2 kHz, con el primer pico a 1046 Hz (A) y un segundo pico a 1220 Hz (B). Se observa que la resistencia eléctrica presenta dos

picos suavizados en los mismos valores de frecuencia, aproximadamente. Esta correlación indica que los picos reflejados en la resistencia eléctrica se corresponden con las resonancias mecánicas inducidas por la dinámica del dispositivo. Sin embargo, esa influencia es baja, ya que la amplitud relativa (altura desde la línea de base) del pico es baja, lo que indica que los parches piezoeléctricos se están deformando ligeramente por las vibraciones. Esto se puede verificar reconstruyendo la forma de la vibración con las amplitudes de estos picos. En otras palabras, para fines de monitoreo, los modos de vibración deberían ser favorables para deformar los PZT, ya que reflejarán una mayor amplitud en las resonancias eléctricas. Los métodos basados en la idea de los modos de impedancia y vibración electromecánicos requieren un análisis dinámico para obtener una mayor sensibilidad en las señales eléctricas cuando se modifica la estructura monitoreada. Por este motivo, este intervalo (1–2 kHz) no se considera como un espectro de monitoreo. En el rango de 6–15 kHz, se identificaron tres picos en la resistencia eléctrica, con el primer pico a 9.1 kHz (C), el segundo pico a 11.5 kHz (D) y un tercer pico a 13.7 kHz (E) como se muestra en Figura 5.4b. Como en el primer caso (Figura 5.4a) y el segundo (Figura 5.4b), es evidente que los picos eléctricos coinciden con los cinemáticos. Además, se observa que la amplitud relativa para el pico A es de 130 ohmios y para B es de 37 ohmios, aproximadamente. Comparando la relación entre las amplitudes relativas del pico C y D en las velocidades, D representa el 30.5% de la amplitud de C. En las resistencias eléctricas, esta relación es del 28.5%. De acuerdo con lo anterior, los resultados demostraron que las resonancias eléctricas dependen estrictamente del modo de vibración en las frecuencias resonantes. La correlación de parámetros mecánicos a través de la impedancia eléctrica muestra una gran ventaja en las aplicaciones de SHM. No es necesario medir los parámetros cinemáticos en grados de libertad localizados para verificar las

resonancias de toda la estructura. Implica que un PZT es capaz de capturar las resonancias mecánicas si éstas influyen en su deformación, como se observa en la Figura 5.4b, la primera figura, el pico C (gráfico de velocidad), mientras que P1 y P4 tienen 1/3 y 1/5 de las amplitudes de P2 y P3. Esto significa que el parche piezo está deformado por flexión.

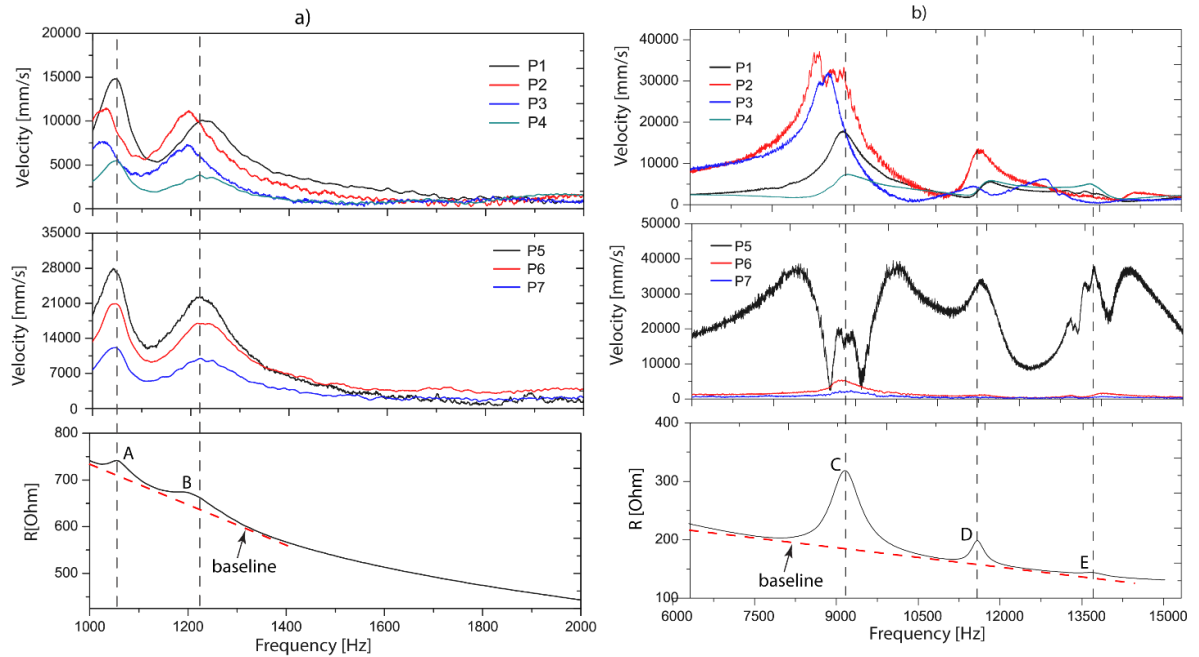


Figura 5.4 Comparación entre resonancias de la velocidad y resistencia eléctrica, a) 1-2kHz. b) 6-15kHz.

5.4 Análisis de vibración basado en la condición del piezo-dispositivo unido a diferentes sustratos

Esta sección describe un análisis de vibraciones basado en la condición dinámica del piezo dispositivo, con esta finalidad tres muestras de diferentes materiales (aluminio, bronce y acero) fueron consideradas como estructuras de monitoreo (sustrato). Además, se definió una interface de acoplamiento fija que para este caso fue utilizado el cono de aluminio mostrado en el Capítulo 4. Cada sustrato posee las mismas dimensiones; y el experimento se configuró

de la misma manera que se muestra en la Figura 4.12. El experimento fue realizado sobre una mesa rígida para garantizar las condiciones de estabilidad y restringir la muestra durante la prueba.

5.4.1 Análisis en el tiempo

En la Figura 5.5 se pueden ver las mediciones de velocidad en el tiempo para los 8 puntos (entre P1 y P9) marcados en el parche piezoeléctrico que cuales fueron descritos en la Figura 5.1b. Es detallado en la Figura 5.5, que en ciertos intervalos las amplitudes de la velocidad alcanzan valores máximos y como se destacó en los capítulos anteriores, estos representan las resonancias del dispositivo en el dominio del tiempo; estas resonancias también están correlacionadas en el dominio de la frecuencia debido a que la aplicación de la excitación expone la dinámica en el espacio temporal. Para los tres sustratos la amplitud mayor se encuentra aproximadamente en 0.3s, lo que indica un pico de resonancia natural a una frecuencia determinada, evidenciando que a ese modo de vibrar el piezo dispositivo presenta mayor sensibilidad a los cambios elásticos del sustrato.

También se puede evidenciar diferencias entre las mediciones cuando el sustrato es cambiado de material, por ejemplo, si se comparan todas las mediciones, se destaca que la velocidad obtenida con el sustrato de acero es de mayor amplitud, caso contrario sucede con el sustrato de aluminio que presenta la menor amplitud. Lo anterior indica que la velocidad en el parche se correlaciona directamente con el cambio en las propiedades elásticas del sustrato, ya que los valores del módulo de Young son 70 GPa (Aluminio), 100 GPa (Bronce) y 200 GPa.

Como conclusión se observa que cuando el módulo de Young es mayor, la amplitud de las velocidades en el parche aumenta.

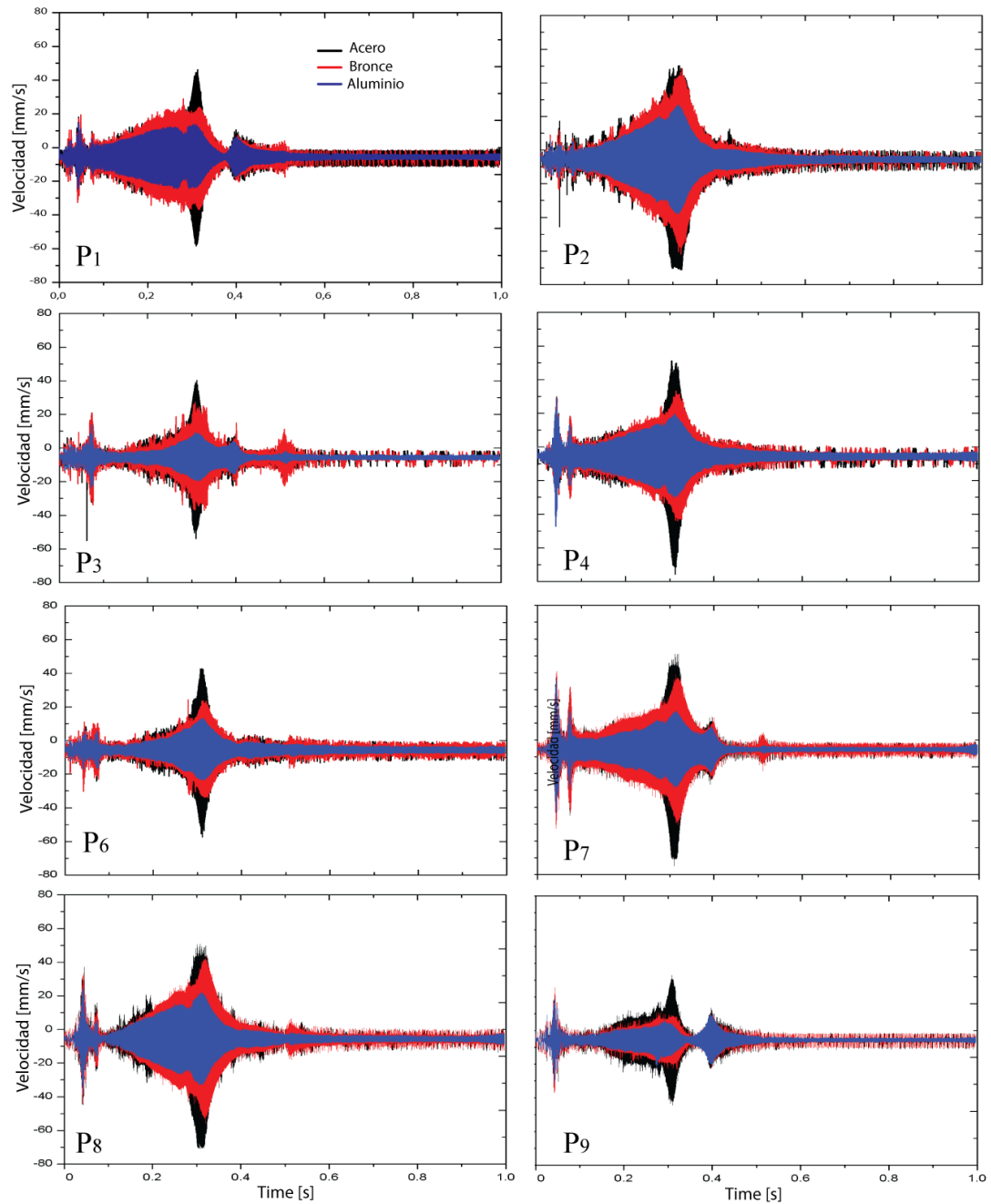


Figura 5.5 Velocidades en el tiempo de los puntos de medición descritos en la Figura 5.1b.

5.4.2 Análisis en la frecuencia

Esta sección muestra una comparación de la velocidad en la frecuencia para todos los puntos del parche piezoeléctrico, puntos entre P1 y P9. Las funciones de repuesta en frecuencia (FRF) fueron determinadas utilizando la transformada de Fourier rápida (FFT) con las mediciones del tiempo ilustradas en la Figura 5.5. El análisis en la frecuencia permite evidenciar los picos de resonancia presentes y las zonas donde el piezo-dispositivo muestra mayor sensibilidad cuando es acoplado a sustratos de diferente material.

En la Figura 5.6 se ilustran las funciones de repuesta en frecuencia en un espectro de frecuencia de 0 a 30 kHz para los puntos de medición resaltados en la Figura 5.1b. en las cuales se evidencia un comportamiento similar en el perfil de las funciones obtenidas, esto demuestra que no importa en donde se mida el parche a lo largo del barrido los picos en la frecuencia estarán siempre presentes en el mismo lugar de la frecuencia.

Las FFR muestran un pico de resonancia aproximadamente a los 8800 Hz para todos los puntos y para todos los sustratos de soporte, lo que demuestra que el piezo dispositivo posee una mayor sensibilidad a estas frecuencias. Además, este pico de resonancia evidencia que el piezo dispositivo puede detectar los cambios de elasticidad del sustrato, ya que el acero (curva negra) por tener una mayor rigidez genera mayores amplitudes de velocidad por consiguiente se generan mayores deformaciones en el parche piezoeléctrico. Lo contrario pasa con el soporte de aluminio (curva azul), el cual posee una menor rigidez, y esto es reflejado en las amplitudes de la velocidad, que son más bajas y por lo tanto genera menores

deformaciones en los parches. Como fue demostrado en el capítulo 4, el modo de vibrar en 8800 Hz cambia de forma leve cuando el sustrato es modificado.

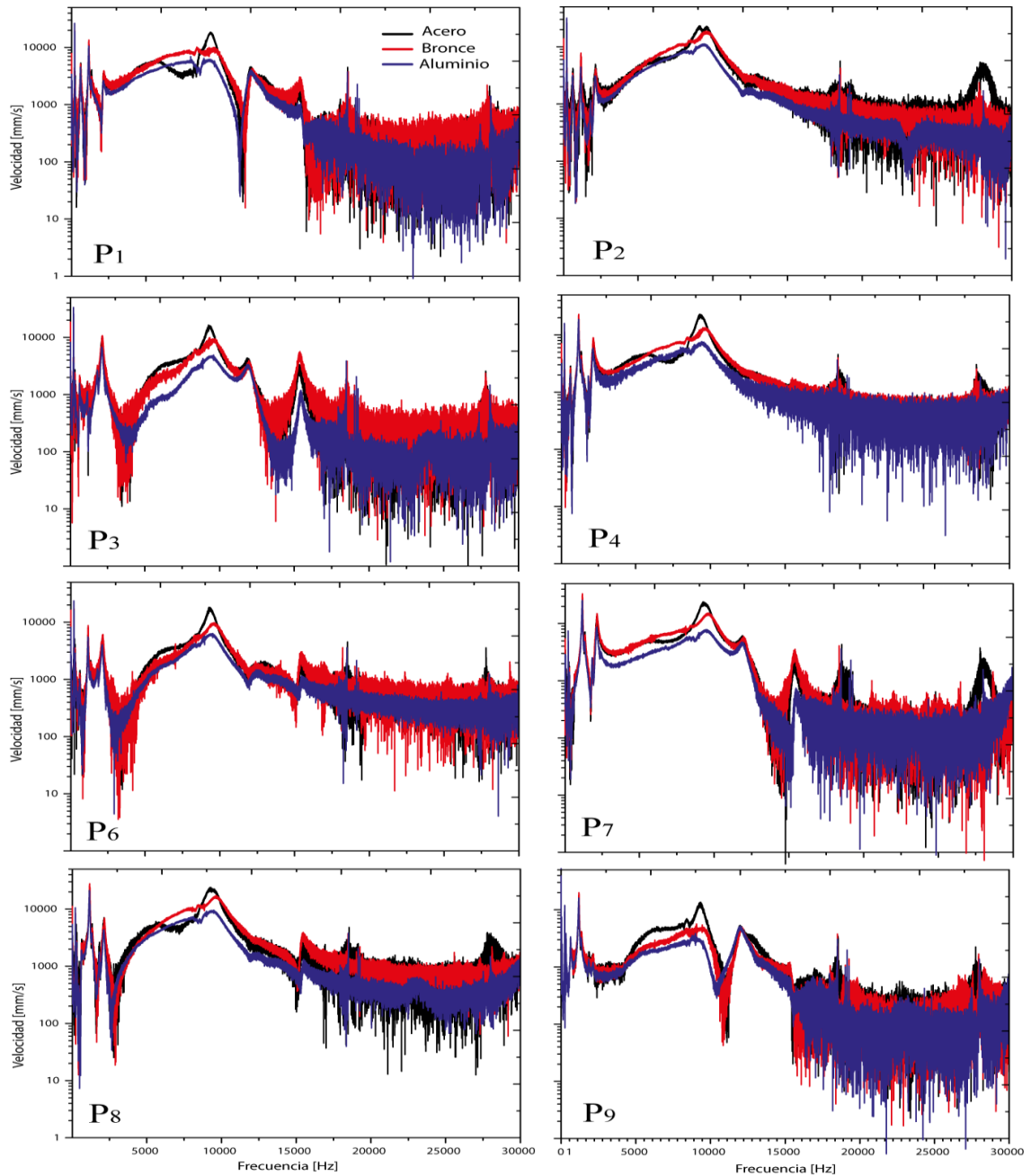


Figura 5.6 Velocidades en la frecuencia de los puntos de medición descritos en la Figura 5.1b.

Lo que verdaderamente es concluido en la Figura 5.6, es que la condición de vibración es modificada con cada sustrato, esto hace que el intervalo entre 5 kHz y 10 kHz puede ser usado con el objetivo de monitorear cambios en los sustratos, ya que ese intervalo muestra mayor sensibilidad.

5.4.2 Modos de vibrar y velocidades medias en la frecuencia

Para comprender en un entorno general, el comportamiento dinámico del parche piezoeléctrico, se calculó el promedio de todas las FFR mostradas en la Figura 5.6 y el resultado es graficado en la Figura 5.7. Se puede destacar todas las resonancias del parche más claramente, para esto los ejes de la gráfica están en escala logarítmica.

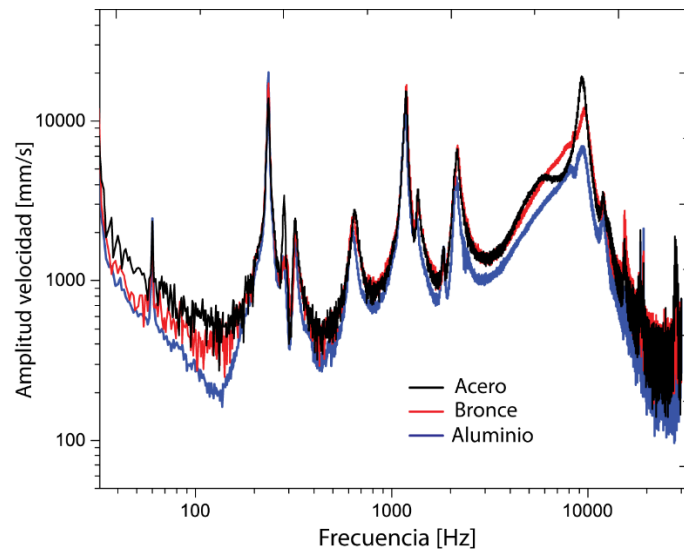


Figura 5.7 Velocidad media de las velocidades en la frecuencia de la lámina piezoeléctrica.

Desde la figura, se detallan dos regiones que muestran sensibilidad ante los cambios de elasticidad del sustrato, estas se observan entre 0-100 Hz y 3000-11000Hz. En estas zonas las FRFs cambian su comportamiento, ya que el perfil de la curva modifica las pendientes

por el cambio de elasticidad. También, se observa que a medida que la elasticidad aumenta las magnitudes de la amplitud aumentan.

Para observar el perfil de vibración o modo de vibrar (de velocidades) de la lámina, se seleccionaron las amplitudes del tiempo en 8800 Hz and estas se correlacionaron con las coordenadas de los puntos de medición (P1 a P9), el resultado es mostrado en la Figura 5.8. Dada que 8 puntos fueron medidos una interpolación entre las amplitudes de la velocidad fue necesaria. En la distribución de las velocidades se puede evidenciar que las zonas de mayor amplitud se encuentran en la zona superior central de la lámina piezoeléctrica, comparando con la simulación realizada por FEM vemos que hay una correspondencia con el modo de vibrar encontrado en el capítulo 4.

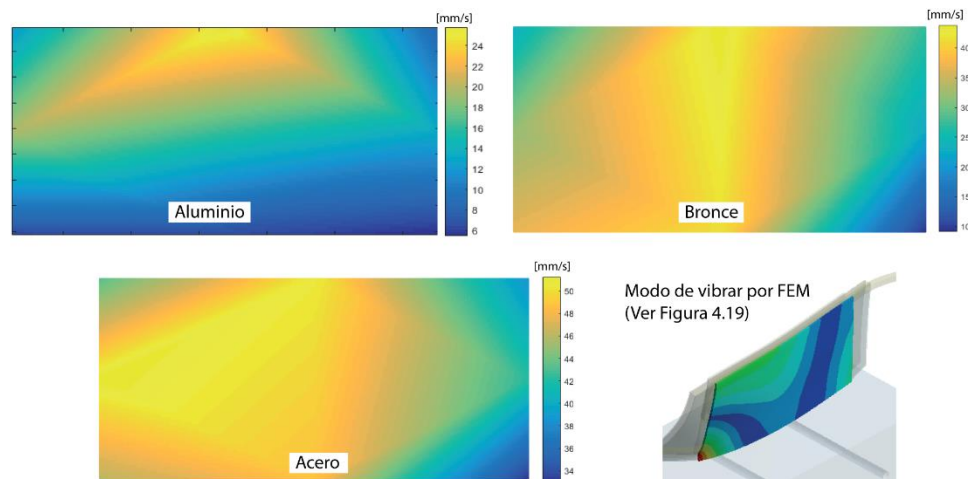


Figura 5.8 Comparación de modos de vibrar obtenidos desde la velocidad experimental en 8800 Hz.

Finalmente, el modo de vibrar muestra que la sensibilidad es debida a la deformación de la lámina ya que esta experimenta una forma de flexión, y por lo tanto estos estímulos dinámicos son convertidos en señales eléctricas. También es observado que las velocidades

aumentan en la medida que aumenta el módulo de elasticidad del sustrato. Como conclusión, se evidenció como el piezo dispositivo modifica su comportamiento dinámico cuando el sustrato es cambiado de material, las zonas observadas con mayor sensibilidad a estos cambios pueden ser usadas para monitorear el sustrato. Esto sería posible usando las señales eléctricas del piezo dispositivo como una futura aplicación.

CAPÍTULO VI

6. Conclusiones

En este trabajo se evidenció el desarrollo de un dispositivo electromecánico (piezo actuado) basado en principios de vigas que fueron optimizadas a través de un análisis de elementos finitos. Con el fin de maximizar el efecto mecánico en el soporte (anclaje del dispositivo), un estudio numérico fue realizado por medio de simulaciones para obtener las mejores respuestas estáticas en el punto de empotramiento. Los dispositivos diseñados y construidos, fueron evaluados experimentalmente para evidenciar sus funciones de respuesta en frecuencia mayores a 1 kHz, y estos mostraron ser efectivos dinámicamente en la aplicación buscada. Esto significa que los dispositivos eran actuados desde las láminas piezoeléctricas que producían estados vibratorios de flexión.

Para evaluar la sensibilidad del piezo dispositivo frente a los cambios elásticos de su sustrato de soporte, diferentes simulaciones por elementos finitos fueron realizadas en el espectro de la frecuencia (>1 kHz hasta 50 kHz) por medio de un análisis armónico. Los resultados mostraron que los cambios de interface (cono y diente) afectan la dinámica del dispositivo, sin embargo, los del sustrato no perturban en si la condición vibratoria general del mismo (cambios en la frecuencia), solo un espectro reducido mostro tener cierta sensibilidad bajo diferentes variaciones elásticas parametrizadas (cambio en el módulo de Young). En la región sensitiva, el modo de vibración de la lámina piezoeléctrica fue determinado para ambas interfaces para entender la configuración dinámica de la misma. Como conclusión es

destacado que cuando el sustrato aumenta el valor del módulo de Young, los desplazamientos del dispositivo incrementan y por lo tanto un estado de flexión en la lámina es inducido. Esto es debido a que el sustrato limita el movimiento en el punto de anclaje cuando es más rígido.

Seguido de la etapa de las simulaciones, la evaluación experimental de la dinámica del dispositivo corroboró los efectos de los cambios elásticos en el soporte sobre la condición de vibración del dispositivo. La aplicación de la técnica de la impedancia electromecánica (EMI) verificó que las resonancias en la frecuencia correspondían con las resonancias mecánicas del dispositivo, esto ayudó a comprender el sentido vibratorio del mismo. Para el conjunto completo dispositivo/interface/sustrato, los resultados mostraron intervalos en la frecuencia donde las variaciones elásticas del sustrato (cambios de material; aluminio, bronce y acero) cambiaban la condición vibratoria del dispositivo, estos intervalos fueron encontrados entre 0 y 100 Hz; 3000 Hz y 11000 Hz. Este resultado conduce a concluir que el dispositivo puede ser usado como instrumento de monitoreo estructural, ya que presenta la capacidad de capturar los cambios elásticos en su condición vibratoria.

REFERENCIAS

- Allemang, R. J., & Brown, D. L. (1982, November). A correlation coefficient for modal vector analysis. In *Proceedings of the 1st international modal analysis conference* (Vol. 1, pp. 110-116). SEM Orlando.
- Bender, J. W., Friedman, H. I., Giurgiutiu, V., Watson, C., Fitzmaurice, M., & Yost, M. L. (2006). The use of biomedical sensors to monitor capsule formation around soft tissue implants. *Annals of Plastic Surgery*, *56*(1), 72-77.
- Bhalla, S., & Suresh, R. (2013). Condition monitoring of bones using piezo-transducers. *Meccanica*, *48*(9), 2233-2244.
- Boemio, G., Rizzo, P., & De Nardo, L. (2011). Assessment of dental implant stability by means of the electromechanical impedance method. *Smart Materials and Structures*, *20*(4), 045008.
- Buck, D. L., & Wheeler, P. W. (1969). A density comparison of human alveolar and retromolar bone. *The Angle Orthodontist*, *39*(2), 133-136.
- Carden, E. P., & Fanning, P. (2004). Vibration based condition monitoring: a review. *Structural health monitoring*, *3*(4), 355-377.
- Cawley, P., & Adams, R. D. (1979). The location of defects in structures from measurements of natural frequencies. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, *14*(2), 49-57.

- Chen, J. C., & Garba, J. A. (1988). On-orbit damage assessment for large space structures. *AIAA journal*, 26(9), 1119-1126.
- Chen, B., & Xu, Y. L. (2008). Integrated vibration control and health monitoring of building structures using semi-active friction dampers: part II—numerical investigation. *Engineering Structures*, 30(3), 573-587.
- Deraemaeker, A., Reynders, E., De Roeck, G., & Kullaa, J. (2008). Vibration-based structural health monitoring using output-only measurements under changing environment. *Mechanical systems and signal processing*, 22(1), 34-56.
- Dessi, D., & Camerlengo, G. (2015). Damage identification techniques via modal curvature analysis: overview and comparison. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 52, 181-205.
- Erickson, G. M., Catanese III, J., & Keaveny, T. M. (2002). Evolution of the biomechanical material properties of the femur. *The Anatomical Record: An Official Publication of the American Association of Anatomists*, 268(2), 115-124.
- Farrar, C. R., Doebling, S. W., & Nix, D. A. (2001). Vibration-based structural damage identification. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 359(1778), 131-149.
- Farrar, C. R., & James III, G. H. (1997). System identification from ambient vibration measurements on a bridge. *Journal of sound and vibration*, 205(1), 1-18.

- Fan, W., & Qiao, P. (2011). Vibration-based damage identification methods: a review and comparative study. *Structural health monitoring*, 10(1), 83-111.
- Fu, Z. F., & He, J. (2001). *Modal analysis*. Butterworth Heinemann, Oxford.
- García Márquez, F. P., Tobias, A. M., Pinar Pérez, J. M., & Papaelias, M. (2012). *Condition monitoring of wind turbines: Techniques and methods*. *Renewable Energy*, 46, 169–178.
- Giurgiutiu, V., & Zagrai, A. N. (2002). Embedded self-sensing piezoelectric active sensors for on-line structural identification. *Journal of Vibration and Acoustics*, 124(1), 116-125.
- Hu, W.-H., Caetano, E., & Cunha, Á. (2013). *Structural health monitoring of a stress-ribbon footbridge*. *Engineering Structures*, 57, 578–593. doi:10.1016/j.engstruct.2012.06.051
- Hu, W. H., Thöns, S., Rohrman, R. G., Said, S., & Rucker, W. (2015). Vibration-based structural health monitoring of a wind turbine system. Part I: Resonance phenomenon. *Engineering Structures*, 89, 260-272.
- Huang, Q., Xu, Y. L., Li, J. C., Su, Z. Q., & Liu, H. J. (2012). Structural damage detection of controlled building structures using frequency response functions. *Journal of Sound and Vibration*, 331(15), 3476-3492.
- Hwang, H. Y., & Kim, C. (2004). Damage detection in structures using a few frequency response measurements. *Journal of sound and vibration*, 270(1-2), 1-14.
- Ibanez, R. (2003). Bone mineral density measurement techniques. In *Anales del sistema sanitario de Navarra* (Vol. 26, pp. 19-27).

- Kessler, S. S., & Spearing, S. M. (2002, July). Design of a piezoelectric-based structural health monitoring system for damage detection in composite materials. In *Smart Structures and Materials 2002: Smart Structures and Integrated Systems*(Vol. 4701, pp. 86-97). International Society for Optics and Photonics.
- Laermann, K. H. (2010). Assessment of structural integrity and durability—a task of experimental mechanics. *Meccanica*, *45*(2), 167-174.
- Lam, H. F., Ko, J. M., & Wong, C. W. (1995). Detection of damage location based on sensitivity analysis. In *Proceedings of the 13th international modal analysis conference* (Vol. 2460, p. 1499).
- Li, H., Huang, Y., Ou, J., & Bao, Y. (2011). Fractal dimension-based damage detection method for beams with a uniform cross-section. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, *26*(3), 190-206.
- Li, G. Q., Hao, K. C., Lu, Y., & Chen, S. W. (1999). A flexibility approach for damage identification of cantilever-type structures with bending and shear deformation. *Computers & structures*, *73*(6), 565-572.
- Magalhães, F., Cunha, A., & Caetano, E. (2012). Vibration based structural health monitoring of an arch bridge: from automated OMA to damage detection. *Mechanical Systems and Signal Processing*, *28*, 212-228.
- Maia, N. M. M., & e Silva, J. M. M. (1997). *Theoretical and experimental modal analysis*. Research Studies Press.

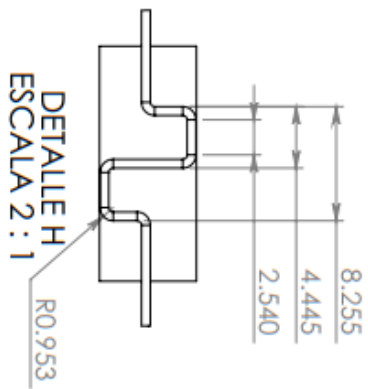
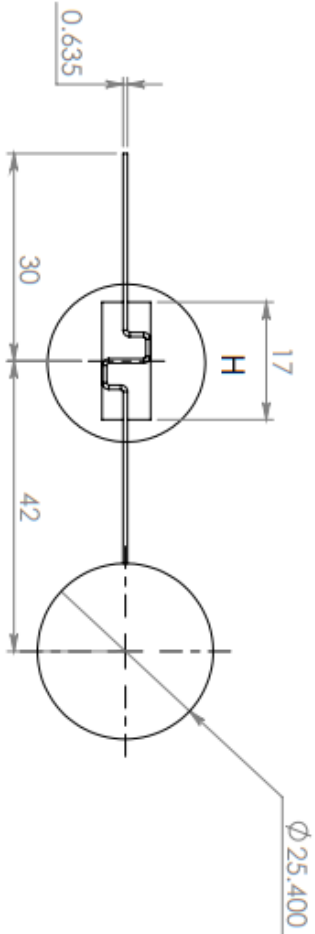
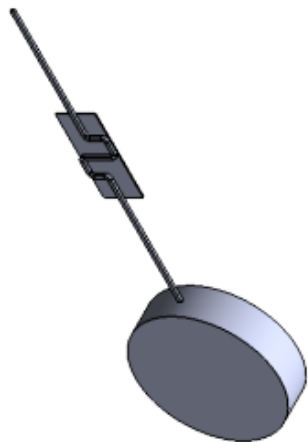
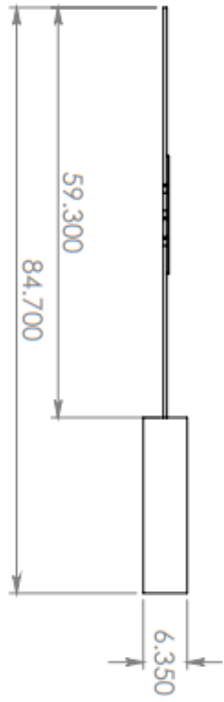
- Modares, M., & Waksanski, N. (2012). Overview of structural health monitoring for steel bridges. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 18(3), 187-191.
- Pandey, A. K., Biswas, M., & Samman, M. M. (1991). Damage detection from changes in curvature mode shapes. *Journal of sound and vibration*, 145(2), 321-332.
- Ribolla, E. L., & Rizzo, P. (2015). Modeling the electromechanical impedance technique for the assessment of dental implant stability. *Journal of biomechanics*, 48(10), 1713-1720.
- Ritchie, R. O., Nalla, R. K., Kruzic, J. J., Ager III, J. W., Balooch, G., & Kinney, J. H. (2006). Fracture and ageing in bone: toughness and structural characterization. *Strain*, 42(4), 225-232.
- Salawu, O. S. (1997). Detection of structural damage through changes in frequency: a review. *Engineering structures*, 19(9), 718-723.
- Sawyer, J. P., & Rao, S. S. (2000). Structural damage detection and identification using fuzzy logic. *AIAA journal*, 38(12), 2328-2335.
- Shanker, R., Bhalla, S., Gupta, A., & Praveen Kumar, M. (2011). Dual use of PZT patches as sensors in global dynamic and local electromechanical impedance techniques for structural health monitoring. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 22(16), 1841-1856.
- Sirohi, J., & Chopra, I. (2000). Fundamental understanding of piezoelectric strain sensors. *Journal of intelligent material systems and structures*, 11(4), 246-257.

- Sohn, H., & Law, K. H. (2001). Damage diagnosis using experimental Ritz vectors. *Journal of Engineering Mechanics*, 127(11), 1184-1193.
- Tan, H. C., Famiyesin, O. O., & Imbabi, M. S. (2001). Dynamic deformation signatures in reinforced concrete slabs for condition monitoring. *Computers & Structures*, 79(26-28), 2413-2423.
- Tawie, R., & Lee, H. K. (2010). Monitoring the strength development in concrete by EMI sensing technique. *Construction and Building Materials*, 24(9), 1746-1753.
- Thyagarajan, S. K., Schulz, M. J., Pai, P. F., & Chung, J. (1998). Detecting structural damage using frequency response functions. *Journal of Sound and Vibration*, 1(210), 162-170.
- Tsogka, C., Daskalakis, E., Comanducci, G., & Ubertini, F. (2017). The stretching method for vibration-based structural health monitoring of civil structures. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 32(4), 288-303.
- Velásquez-Forero, F. H. (2009). Histomorfometría de la biopsia ósea previo marcaje y procesada sin descalcificar. *Patología Revista latinoamericana*, 47(2).
- Wang, J., & Qiao, P. (2007). Improved damage detection for beam-type structures using a uniform load surface. *Structural Health Monitoring*, 6(2), 99-110.
- Whalen, T. M. (2008). The behavior of higher order mode shape derivatives in damaged, beam-like structures. *Journal of sound and vibration*, 309(3-5), 426-464.

- Yang, Y., Lim, Y. Y., & Soh, C. K. (2008). Practical issues related to the application of the electromechanical impedance technique in the structural health monitoring of civil structures: I. Experiment. *Smart Materials and Structures*, *17*(3), 035008.
- Yu, L., & Zhu, J. H. (2015). Nonlinear damage detection using higher statistical moments of structural responses. *Struct. Eng. Mech*, *54*(2), 221-237.
- Yu, L., Zhu, J. H., & Yu, L. L. (2013). Structural damage detection in a truss bridge model using fuzzy clustering and measured FRF data reduced by principal component projection. *Advances in Structural Engineering*, *16*(1), 207-217.
- Zimmerman, D. C., & Smith, S. W. (1992). Model refinement and damage location for intelligent structures. In *Intelligent structural systems* (pp. 403-452). Springer, Dordrecht.
- Zou, Y., Tong, L. P. S. G., & Steven, G. P. (2000). Vibration-based model-dependent damage (delamination) identification and health monitoring for composite structures—a review. *Journal of Sound and vibration*, *230*(2), 357-378.

Anexo 1

Propuestas para el diseño de la junta y el piezo- dispositivo



Universidad Autónoma de Manizales

La información aquí contenida es propiedad intelectual de la Universidad Autónoma de Manizales por lo tanto es confidencial y no podrá ser dada a conocer o utilizar por terceros, sin la autorización escrita.

Nombre: Diseño A

Anexo: 1

Diseñado por: Daniel Ricardo Barco Castaño

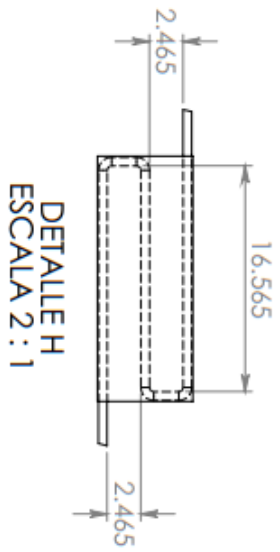
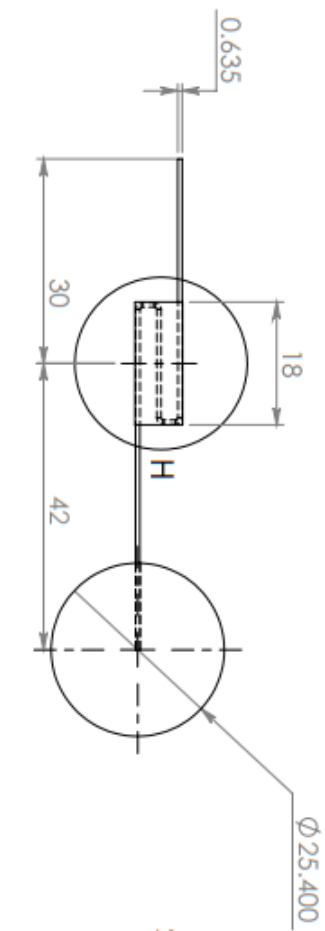
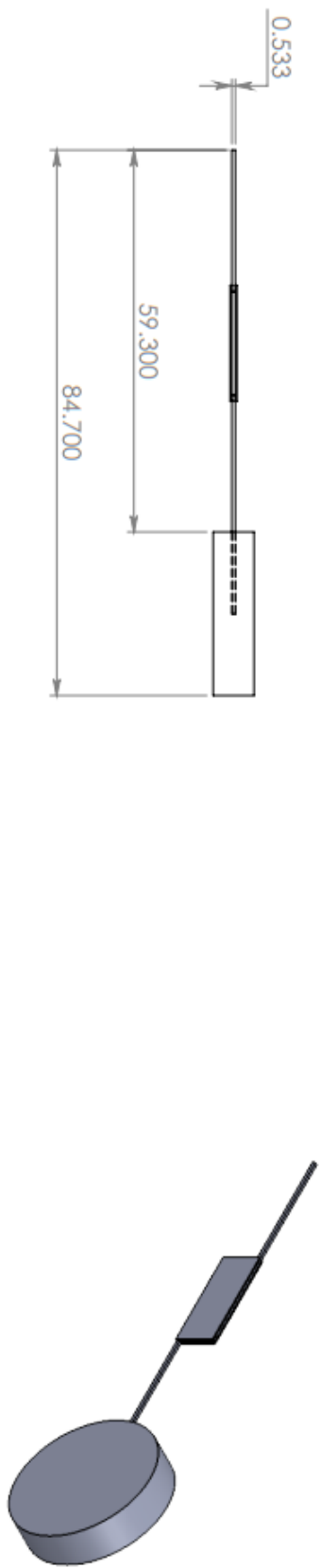
Aprobado por: Daniel Ricardo Barco Castaño

Fecha: Oct 2017

Escala: 1:1 **A4**

Hoja: 1 de 1

Dimensiones en m.m. - Redondear y pulir aristas vivas



Universidad Autónoma de Manizales

La información aquí contenida es propiedad intelectual de la Universidad Autónoma de Manizales por lo tanto es confidencial y no podrá ser dada a conocer o utilizar por terceros, sin la autorización escrita.

Nombre: Diseño B

Diseñado por: Daniel Ricardo Barco Castaño

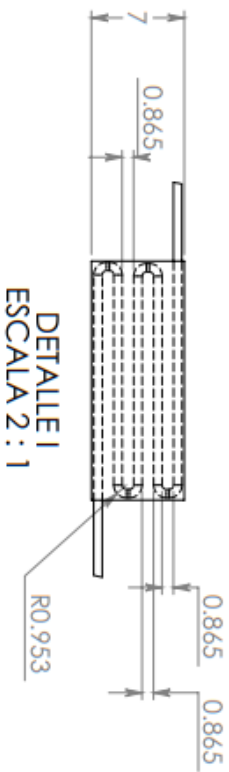
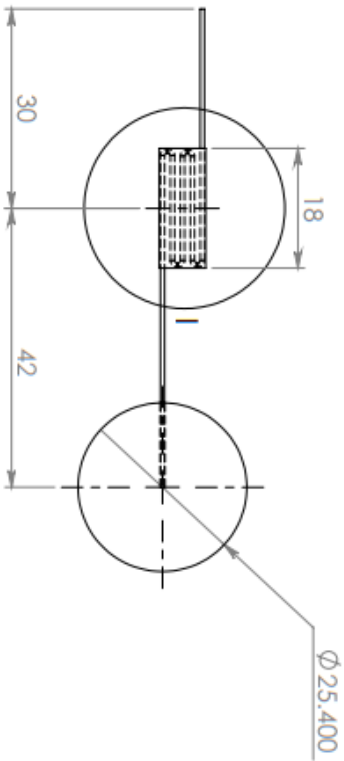
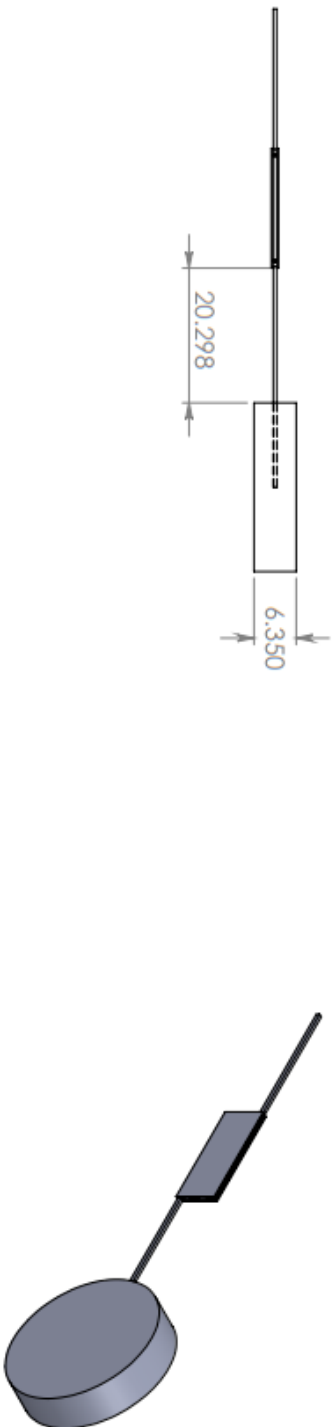
Aprobado por: Daniel Ricardo Barco Castaño

Fecha: Oct 2017

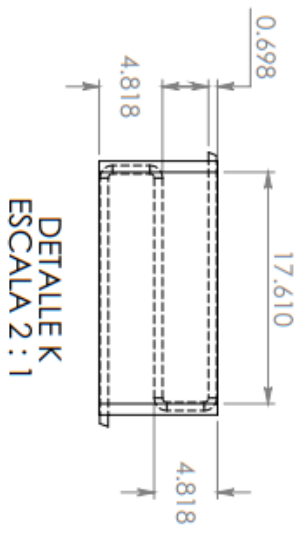
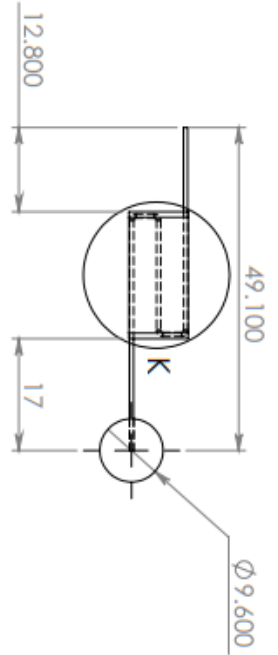
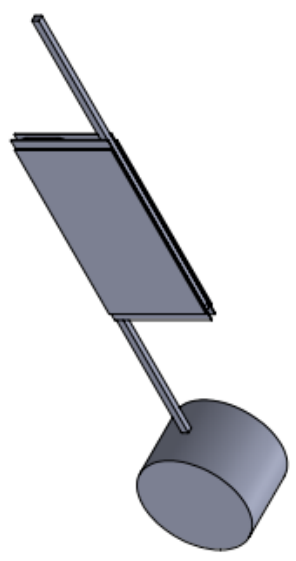
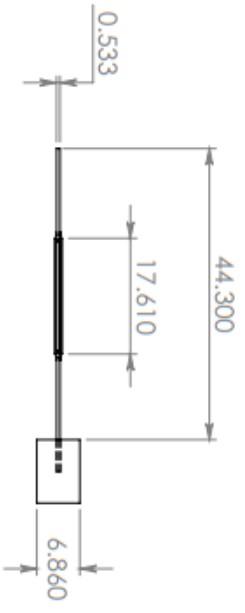
Escala: 1:1 **A4**

Hoja: 1 de 1

Dimensiones en m.m. - Redondear y pulir aristas vivas



Universidad Autónoma de Manizales		Diseñado por: Daniel Ricardo Barco Castaño	
<small>La información aquí contenida es propiedad intelectual de la Universidad Autónoma de Manizales por lo tanto es confidencial y no podrá ser dada a conocer o utilizar por terceros, sin la autorización escrita.</small>		Aprobado por: Daniel Ricardo Barco Castaño	
Nombre: Diseño C		Fecha: Oct 2017	Escala: 1:1
		Hoja: 1 de 1	A4
<small>Dimensiones en m.m. - Redondear y pulir aristas vivas</small>			



Universidad Autónoma de Manizales		Diseñado por: Daniel Ricardo Barco Castaño	
La información aquí contenida es propiedad intelectual de la Universidad Autónoma de Manizales por lo tanto es confidencial y no podrá ser dada a conocer o utilizar por terceros, sin la autorización escrita.		Aprobado por: Daniel Ricardo Barco Castaño	
Nombre: Piezo_dispositivo		Fecha: Oct 2017	A4
		Escala: 1:1	
		Hoja: 1 de 1	
Dimensiones en m.m. • Redondear y pulir aristas vivas			

Anexo 2

Programas MATLAB

Programa 1. Lectura del Vibrometro laser aplicando señales armónicas

```
%% Data: 28 Agosto 2017
%% Creado por: Hector A. Tinoco y Daniel Barco

clear all, close all
time=3; % Tiempo del muestreo
Freq=500;%% Limited 12000

rate=20000%Freq*20; %% Tasa de Muestreo 40 datos
s = daq.createSession('ni');

s.DurationInSeconds=time;
s.Rate=rate;

addAnalogInputChannel(s, 'Dev1', [1 3 11], 'Voltage');
addAnalogOutputChannel(s, 'Dev1', 'ao0', 'Voltage');
set(s.Channels(1), 'TerminalConfig', 'SingleEnded')
% ('TerminalConfig', 'SingleEnded')
%% Output signal
t=0:time/(rate*time-1):time;
Amplitude=0.3; %Maximum value 0.5 Volts
data=Amplitude*sin(2*pi*Freq*t);
%outputSingleScan(s, data)
queueOutputData(s, data')

disp('Ready')

[data2, time]=s.startForeground();
figure
plot(t, data)

%% Printing Results
figure
subplot(1,2,1)
plot(time, data2(:,3))
subplot(1,2,2)
plot(time, data2(:,1)) %

%% Frequency

freq=0:rate/(length(data2(:,3))-1):rate;
Tffs=abs(fft(data2(:,3)));
Tffp=abs(fft(data2(:,1)));

figure
subplot(1,2,1)
plot(freq(1:round(length(data2(:,3))/5)), Tffs(1:round(length(data2(:,3))/5)))
```

```

subplot(1,2,2)

plot(freq(1:round(length(data2(:,1))/5)),Tffp(1:round(length(data2(:,1))/5)))

```

Programa 2. Leyendo el Vibrometro laser aplicando una señal Chirp lineal

```

%% Data; 29 Agosto 2017
%% Creado por: Hector A. Tinoco y Daniel Barco

clear all, close all
time=10; % Tiempo del muestreo
Freq=10;%% Limited 12000

rate=10000*Freq*20; %% Tasa de Muestreo 40 datos
s = daq.createSession('ni');

s.DurationInSeconds=time;
s.Rate=rate;

addAnalogInputChannel(s,'Dev1',[1 3 11],'Voltage');
addAnalogOutputChannel(s,'Dev1','ao0','Voltage');
set(s.Channels(1),'TerminalConfig','SingleEnded')
% ('TerminalConfig','SingleEnded')
%% Output signal
t=0:time/(rate*time-1):time;
Amplitude=0.4; %Maximum value 0.5 Volts
data=Amplitude*chirp(t,0,time,Freq);
figure
spectrogram(data,256,250,256,rate,'yaxis')
queueOutputData(s,data)

figure
plot(t,data)
disp('Ready')

[data2, time]=s.startForeground();
figure
plot(t,data)

%% Printing Results
figure
subplot(1,2,1)
plot(time,data2(:,2))
subplot(1,2,2)
plot(time,data2(:,1)) %

%% Frequency

freq=0:rate/(length(data2(:,3))-1):rate;
Tffs=abs(fft(data2(:,2)));
Tffp=abs(fft(data2(:,1)));
Tff=abs(fft(data2(:,3)));

figure
subplot(1,3,1)
plot(freq(1:round(length(data2(:,2))/5)),20*log(Tffs(1:round(length(data2(:,2))/5))))

```

```

subplot(1,3,2)
plot(freq(1:round(length(data2(:,1))/5)),20*log(Tffp(1:round(length(data2(:,1))/5))))
subplot(1,3,3)
plot(freq(1:round(length(data2(:,3))/5)),20*log(Tff(1:round(length(data2(:,3))/5))))

```

Programa 3. Programa principal para la realización del experimento 2

```

%% Data; 1 September 2017
%% Data: 7 September 2017
%% Creado por: Hector A. Tinoco y Daniel Barco

%% Descripción: Programa para escribir al amplificador de potencia (Output channel:
Channel Ao0 (power amplifier))
%% Programa para leer el Laser: Channel 3 (Laser) - Channel 1 optional (PZT-Shaker))

clear all, close all
time=1; % Tiempo del muestreo
IniFreq=0;
Freq=20000; %% Limited 12000

n=5;
rate=Freq*n; %% Tasa de Muestreo n datos

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
s = daq.createSession('ni');

s.DurationInSeconds=time;
s.Rate=rate;

addAnalogInputChannel(s,'Dev1',[1 3],'Voltage');%% input channels: Channel 3 (Laser)
- Channel 1 optional (PZT-Shaker)
addAnalogOutputChannel(s,'Dev1','ao0','Voltage');%% Output channel: Channel Ao0
(power amplifier)
set(s.Channels(1),'TerminalConfig','SingleEnded')

t=0:time/(rate*time-1):time;
Amplitude=0.7; %Maximum value 0.5 Volts for Shaker

data=Amplitude*chirp(t,IniFreq,time,Freq); % datos a Escribir

figure
spectrogram(data,256,250,256,rate,'yaxis')

%% Colocando datos en la Tarjeta
queueOutputData(s,data')

figure
plot(t,data)
disp('Ready to measure')

%%%% Preparando para medir y escribir
[data2, time]=s.startForeground();

```

```

%% Printing Results
figure
subplot(1,2,1)
plot(time,data2(:,2))

%% Database Velocity

Vel_DB=[time data2(:,2)*10];%% Velocity Value Laser

subplot(1,2,2)
plot(time,data2(:,1)) %

%%% Frequency
freq=0:(rate)/(length(data2(:,1))-1):rate;
Tffs=abs(fft(data2(:,2)));
Tffp=abs(fft(data2(:,1)));

HW=Tffp(1:round(length(data2(:,1))/(n)))/Tffs(1:round(length(data2(:,2))/(n)));
%
figure
subplot(1,2,1)

plot(freq(1:round(length(data2(:,2))/(n))),20*log(Tffs(1:round(length(data2(:,2))/(n)
))))
title('FRF Velocity Laser')
subplot(1,2,2)

plot(freq(1:round(length(data2(:,1))/(n))),20*log(Tffp(1:round(length(data2(:,1))/(n)
))),'-r')
title('FRF Piezo')

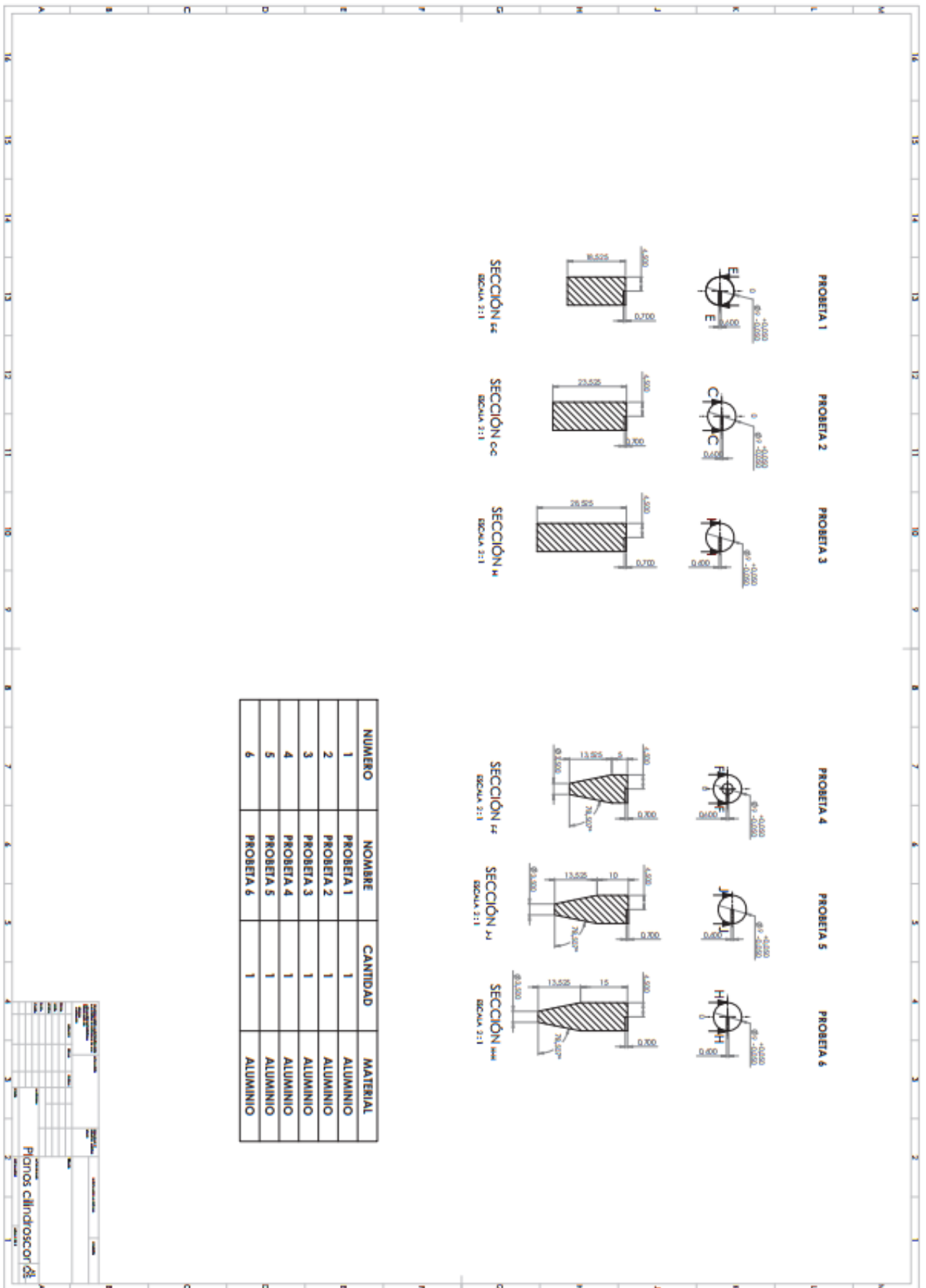
%
figure
subplot(1,2,1)
plot(freq(1:round(length(data2(:,2))/(n))), (Tffs(1:round(length(data2(:,2))/(n))))
title('FRF Velocity Laser')
subplot(1,2,2)
plot(freq(1:round(length(data2(:,1))/(n))), (HW), '-r')
title('FRF Force/Velocity ')

figure
plot(freq(1:round(length(data2(:,1))/(n))),20*log(HW))

```

Anexo 3

Planos Probetas e interfaz



NUMERO	NOMBRE	CANTIDAD	MATERIAL
1	PROBETA 1	1	ALUMINIO
2	PROBETA 2	1	ALUMINIO
3	PROBETA 3	1	ALUMINIO
4	PROBETA 4	1	ALUMINIO
5	PROBETA 5	1	ALUMINIO
6	PROBETA 6	1	ALUMINIO

Planos cilindros con Ø3
 Escala: 1:1
 Fecha: _____
 Autor: _____
 Revisor: _____
 Aprobado: _____
 Proyecto: _____
 Cliente: _____
 Referencia: _____


Anexo 4

Artículo publicado



Article

Evaluation of a Piezo-Actuated Sensor for Monitoring Elastic Variations of Its Support with Impedance-Based Measurements

Hector A. Tinoco ^{1,2,3,*} , Carlos I. Cardona ¹, Fabio M. Peña ¹, Juan P. Gomez ⁴, Samuel I. Roldan-Restrepo ⁵, Maria A. Velasco-Mejia ⁴ and Daniel R. Barco ¹

¹ Computational and Experimental Mechanics Laboratory, Universidad Autónoma de Manizales, Antigua Estación del Ferrocarril, edificio fundadores, C.P. 170001 Manizales-Caldas, Colombia; ivancg19@gmail.com (C.I.C.); fabiope@autonoma.edu.co (F.M.P.); danielbarco6@gmail.com (D.R.B.)

² Institute of Physics of Materials, Czech Academy of Sciences, Zizkova 22, 61662 Brno, Czech Republic

³ Central European Institute of Technology (CEITEC)/Brno University of Technology, Technická 10, 61600 Brno, Czech Republic

⁴ Department of Oral Health, Universidad Autónoma de Manizales, Antigua Estación del Ferrocarril, Edificio Fundadores, C.P. 170001 Manizales-Caldas, Colombia; jgomez@autonoma.edu.co (J.P.G.); mariaandrevelascomejia@hotmail.com (M.A.V.-M.)

⁵ Centro de Innovación Roldán, C.P. 050024 Medellín-Antioquia, Colombia; sirr1965@gmail.com

* Correspondence: htinoco@autonoma.edu.co; Tel.: +420-532-290-338

Received: 29 November 2018; Accepted: 2 January 2019; Published: 7 January 2019



Abstract: This study exposes the assessment of a piezo-actuated sensor for monitoring elastic variations (change in Young's modulus) of a host structure in which it is attached. The host structure is monitored through a coupling interface connected to the piezo-actuated device. Two coupling interfaces were considered (an aluminum cone and a human tooth) for the experimental tests. Three different materials (aluminum, bronze and steel) were prepared to emulate the elastic changes in the support, keeping the geometry as a fixed parameter. The piezo device was characterized from velocity frequency response functions in pursuance to understand how vibration modes stimulate the electrical resistance through electrical resonance peaks of the sensor. An impedance-based analysis (1–20 kHz) was performed to correlate elastic variations with indexes based on root mean square deviation (RMSD) for two observation windows (9.3 to 9.7 kHz and 11.1 to 11.5 kHz). Results show that imposed elastic variations were detected and quantified with the electrical resistance measurements. Moreover, it was demonstrated that the sensitivity of the device was influenced by the type of coupling interface since the cone was more sensitive than the tooth in both observation windows. As a final consideration, results suggest that bio-structures (fruits and bone, among others) could be studied since these can modify naturally its elastic properties.

Keywords: structural health monitoring; bio-monitoring; piezo-actuated sensor; electromechanical impedance technique; elastic variations; vibration through teeth

1. Introduction

In the structural health monitoring (SHM) field, predictive and preventive strategies are playing an important role in the prognosis of catastrophic scenarios in order to guarantee safety and reliability during the service of the structures. Currently, different monitoring applications have been implemented with piezoelectric technologies due to its implementation easiness and relatively low cost in comparison with other nondestructive inspection techniques. The structural integrity analysis based on changes of dynamic characteristics requires a permanent monitoring to detect, locate

and quantify damages by means of in-situ diagnosis techniques, such as have been implemented in aircraft wings, space shuttles, concrete, turbine rotor blades, and pressure vessels, among others [1–5]. In general, SHM presents advantages with respect to the preventive traditional way of diagnosis since it minimizes the operative costs of maintenance because it eliminates unnecessary technical checks. Moreover, with this technology the structures acquire an intelligence component since these could provide information of its functionality for which were designed.

SHM technologies are being extrapolated to biological fields with the purpose of detecting specific changes in bio-system properties. Bio-structures modify its intrinsic conditions by natural effects or by modifications in the biological equilibrium. Some examples of bio-systems that can modify its properties are fruits [6], bone tissue [7], and plants [8], among others. These changes are detected traditionally by several techniques that involve the use of chemical components that identify any variation in a passive way in laboratory tests. It indicates that there is no inspection and monitoring in-situ by the challenges that exist with this type of procedures. From a physical point of view, geometric and elastic variations in bio-structures could be considered as entities with invariant properties (slow changes) and therefore traditional SHM techniques could be applied in the same way as in conventional structures.

Electromechanical impedance technique (EMI) permits to detect structural changes in high frequency (typically >20 kHz) by means of a self-diagnosis of piezo-transducers [5,9–11]. Mechanical impedance variations (damage or structural variations) of the host structure are determined through a correlation obtained by electrical impedance measurements in piezo-transducers (PZT). The quantification of any change is performed through indices computed between a healthy structural condition and a monitoring state. Some applications have shown the feasibility of the technique in applications of bio-monitoring. For instance, [12] using PZT for the assessment and detection of different types of damage in a chicken's femur, in which damages were identified though the EMI technique. In the study carried out by [13], piezoelectric patches were used in human and rabbit bones as biomedical sensors. EMI evaluated the feasibility of the technique when bone was modified by different controlled conditions as crack existence, fractures and density variations. In other applications for bone, [14] presented an experimental study to detect a simulated healing process by applying the EMI technique. The applied methodology consisted in putting a healing agent in particular cracks in an isolated bone to be monitored by a PZT-needle sensor. Results showed that the computed index increased with the time of healing bone until it reached a stable value. It indicated that the method was capable of detecting that the bone cracks were fully recovered. The electrical impedance measurements were taken using an AD5933 evaluation board which is low-cost; this aspect is pointed out since the majority of nondestructive techniques require expensive equipments. Assessment of human bone conditions is a significant challenge toward future diagnosis of physiological state in-situ. Bone tissue is not only responsible for providing an adaptive structural support of the body, but also makes available a reservoir for the complex metabolism of calcium, showing its biomedical importance [15].

A study reported by [16] applied the EMI technique with piezo-sensors in a non-bonded configuration to an artificial arm (bones covered with skin and tissue, silicone-based coating). The overall results demonstrated good prospects since the conductance signals correlated well in all experiments in the healthy and damaged conditions. [17] connected a PZT to an intact pig limb with soft tissue (muscle, fat, skin, etc.) obtained from a butcher. Simulated fractures in the bone were measured by electromechanical impedance spectroscopy and dynamic stimuli were sent to a receiver located externally on the skin surface. The presented methodology was able to accurately detect cuts in the bone as shallow as 2 mm and distinguish between different depths of cuts in the bone.

Other approaches of bio-monitoring have been explored in the dentistry area. For instance, dental implant stability requires a permanent evaluation of the prosthesis since the load-bearing depends on the integrations of bone-implant system. For this purpose, [18] assessed a monitoring system over a controlled experiment. Dental implants were entrenched in two in vitro bone types, namely an extremity and a costal bovine bone. The inverse of the osseointegration process (bone degradation)

was simulated by immersing the samples into a solution of nitric acid for several hours. Results showed that variations in the calcium percentage were quantified through the conductance measurements. This work was extended by [19] from a numerical approach including an experimental validation performed by [20] in another study. They suggested a hypothesis based on the EMI technique which consisted in bonding a PZT-5A4E (Piezo System, Inc., Cambridge, MA, USA) to an abutment screwed into two bovine bone samples to measure the electrical admittance. This had the aim to monitor and assess the degree of healing of the peri-implant tissue by means of the electrical impedance of PZT. The experiments were conducted by using a dental cement paste Pulp Canal Sealer EWT (PCS) (SybronEndo, Glendora, CA, USA) to interlock the implant to in vitro bovine bone samples, which simulated the osseointegration process. The experimental results obtained in eight implant sites in the same bone evidenced similar trends in the indexes calculated. The root mean square (RMS) index rapidly decreased within the first few hours and then stabilized during the last 6 h of monitoring. These results inspired different work done by [21–23] to use teeth embedded in different substrates with the objective to detect structural variations. In those studies, the teeth were used as coupling interfaces to monitor the changes in the substrate which allowed to show that it is feasible to diagnose the bone as a future application. The substrates tried to mimic the bone portion that contains the teeth. The consideration of a mechanical coupling interface between the sensor and the host structure have been described in other studies as [24,25]. However, in the mentioned works (teeth in substrates), the electro-dynamic behavior of the piezo-device and coupling interface effects on the electrical signatures have not been studied yet, which is the main contribution of this study.

This paper presents an electro-dynamic assessment of a piezo-actuated sensor for monitoring the elastic variations (change in Young's modulus) of a substrate (host structure) with fixed geometric conditions and variable Young's modulus. The host structure acts as a main support of the coupling interface (aluminum cone or human tooth) that joints the piezo device with it. The substrate was made of three different materials (aluminum, bronze and steel) to simulate the elastic changes in the monitoring process with the EMI technique.

2. Materials and Methods

2.1. Electromechanical Impedance Technique (EMI) Principles

Piezoelectric materials present electro-mechanical properties that have been exploited in structures with different purposes, for instance to monitor the structural integrity in the frequency spectrum [9,25,26]. If a PZT is deformed by dynamic external forces, electrical charges are moved through the poling direction producing an electric field through thickness (sensor case). In the opposite case, when an electrical field is applied on it, it changes its shape (actuator case). This effect permits it to deform a host structure for obtaining indirect information through electrical measurements [27–29]. Two approaches can be applied; the first one is to measure the electrical signatures caused by local deformations (direct sensor) and the second one is associated with the measurement of electrical properties in the PZT (indirect sensor), i.e., electrical impedance. In recent years, the second approach has demonstrated great potential due to the capacity of correlating structural variations (physical changes) with the electrical impedance of the material [29–32].

According to [28], a PZT is considered an electrical element that can generate two states when combined with other electrical components (resistance, capacitor and inductor), i.e., open circuit and short circuit. Electrically, a PZT is a resistive-capacitive element. It means that there is no inductance since it has the capacity to store energy by short time periods. Therefore, the rules applied to electrical circuits are analogously valid for PZTs. In a PZT, the electrical impedance is described in general terms as

$$Z_p^E(\omega) = \frac{V(\omega)}{i(\omega)} = R(\omega) + X(\omega)j \quad (1)$$

where ω is the frequency, $R(\omega)$ is the electrical resistance and $X(\omega)$ is the reactance which can be inductive or capacitive; being $V(\omega)$ and $i(\omega)$ the input voltage and output current. In practical terms, the constants inside $X(\omega)$ can be experimentally determined using a parameter identification from the electrical impedance if those parameters are unknown. It is important to denote that the electrical resistance is a constant value as a pure electrical component, but it depends on the frequency in a PZT [33].

Figure 1 shows a simple scheme that couples a mechanical system with an electrical system [34] determined electromechanical admittance $Y_p^E(\omega)$ for a one-dimensional model of a PZT bonded to a structure as follows:

$$Y_p^E(\omega) = \frac{1}{Z_p^E(\omega)} = \frac{2\omega j w_p l_p}{h_p} \left[e_{33}(1 - j\delta) - d_{31}^2 \bar{y}^E + \left(\frac{Z_p^M(\omega)}{Z_p^M(\omega) + Z_{eq}^M(\omega)} \right) d_{31}^2 \bar{y}^E \left(\frac{\tan(kl_p)}{kl_p} \right) \right] \quad (2)$$

where h_p , l_p and w_p are the thickness, the length and the width of the piezoelectric material. d_{31} is the piezoelectric strain coefficient corresponding to $x(1) - z(3)$ coordinates, $\bar{y}^E = y^E(1 + \eta)$ is the complex Young's modulus of the piezoelectric sheet at constant electric field and e_{33} is the electric permittivity. η and δ denote both mechanical loss and dielectric loss factors. $Z_p^M(\omega)$ and $Z_{eq}^M(\omega)$ are mechanical impedances of the PZT and structure. Equation (2) shows that the mechanical impedances of both structures are related with the electrical impedance. The application of this principle is called EMI. In Figure 1, a scheme is observed that mechanical impedances are coupled by the dynamic interaction between $Z_p^M(\omega)$ and $Z_{eq}^M(\omega)$ (equivalent impedance). However, in this study, $Z_{eq}^M(\omega)$ is represented by a system of two degrees of freedom composed by a monitoring structure and a coupling interface. Usually, a coupling interface serves as a probe of the piezo-device for monitoring the host structure as detailed in the work done by [25,26]. In a mechanical system with two degrees of freedom, the mechanical parameters (mass, stiffness and damping) are related in the following way with the equivalent impedance as follows

$$Z_{eq}^E(\omega) = \frac{2\omega(-\omega^2 m_i + j\omega c_i + k_i)(-\omega^2 m_s + j\omega c_s + k_i + k_s) - (j\omega c_i + k_i)^2}{j\omega(-\omega^2 m_s + j\omega c_s + k_i + k_s)} \quad (3)$$

where the subscripts "i" and "s" refer to coupling interface and monitoring structure. As electromechanical impedance theory suggests, each modification in the stiffness k_{eq} (coupled structure) is reflected on the electrical impedance, indicating that the stiffness can be modified by αk_{eq} , where α is a function that depends on the frequency. The stiffness changes can be produced by geometric and elastic variations. Geometric changes can be induced by damages meanwhile elastic variations are related with degradation in structures or intrinsic changes in its properties such as biosystems. With the EMI technique, changes can be quantified by means of indexes that are computed typically by comparing two electrical impedance signals. The first one is a signal established when the structure is considered healthy and this is called baseline. The second one is the monitoring signal. The quantitative comparison is carried out by calculating different indices such as root mean square deviation (RMSD), correlation coefficient deviation metric (CCDM), mean absolute percentage deviation (MAPD) and others reported in the literature [32,35–37]. In this study, RMSD index will be used to quantify the changes in the electromechanical impedance. RMSD index is based on the Euclidean norm and it is the most widely used in the EMI technique; it is defined in our study by

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_{i(M)} - R_{i(Ref)})^2}{\sum_{i=1}^n (R_{i(Ref)})^2}} \times 100 \quad (4)$$

where $R_{i(M)}$ is the electrical resistance of the monitoring signal, $R_{i(Ref)}$ corresponds to the values of the resistance of a signal taken as reference or baseline. This is defined from a linear trend of the analyzed signal as described in Figure 1.

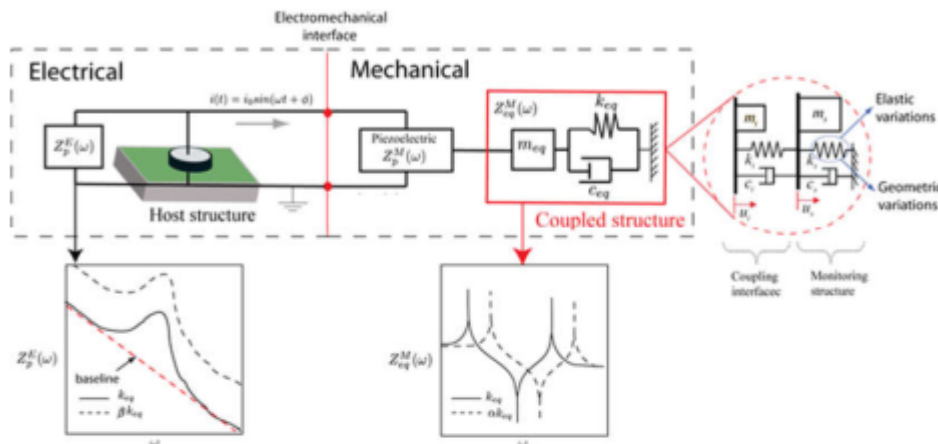


Figure 1. Scheme of a coupled electromechanical system of one degree of freedom with stiffness variations in the host structure.

2.2. Working Principles of the Piezo-Actuated Sensor

This section presents and develops the description and design of an electromechanical piezo-actuated sensor, as illustrated in Figure 2a. The device is proposed to evaluate the elastic variations of a support or substrate in which a mechanical coupling element is allocated. The support is called monitoring structure or host structure, as detailed in Figure 2b. The following elements compose the electromechanical device: a flexible wire made of stainless-steel with the shape of “S” (coupling joint) is the principal element. The wire has the dimensions of 0.021×0.025 in, commonly used in orthodontic treatments. Two piezoelectric patches are bonded to the coupling joint to arrange a composite joint. A supplementary cylindric aluminum mass (1.27 g) is embedded to the end of the wire. PZTs used in the sensor device are SEN10293 ROHS (SparkFun Electronics, Niwot, CO, USA) and these were cut into rectangular shapes in order to cover the coupling joint; the piezo patches are the same used in the study [29,38]. Piezo-device design, dimensions and configuration are illustrated in Figure 2.

The piezo-actuated sensor is activated by applying a harmonic voltage (linear sweep) in such way that oscillatory deformations are produced, a scheme is described in Figure 2b. Therefore, bending is induced in the wire due to a force system generated by the PZTs. The physical purpose of the piezo sensor is to monitor the host structure through the coupling interface. This is an element that helps to transfer the vibrations between the piezo-actuated sensor and the monitoring structure. It can have any geometry, for this study a tooth and a piece of aluminum will be used as coupling interfaces. Piezo-actuated devices present advantages when these are used in monitoring tasks, since the whole dynamic system depends on three parameters that are invariants; mass, stiffness and damping. If these any of these parameters are modified, changes can be observed in the electrical impedance [36,39]. All experiments carried out in this study were performed with an unique device which is shown in Figure 2a.

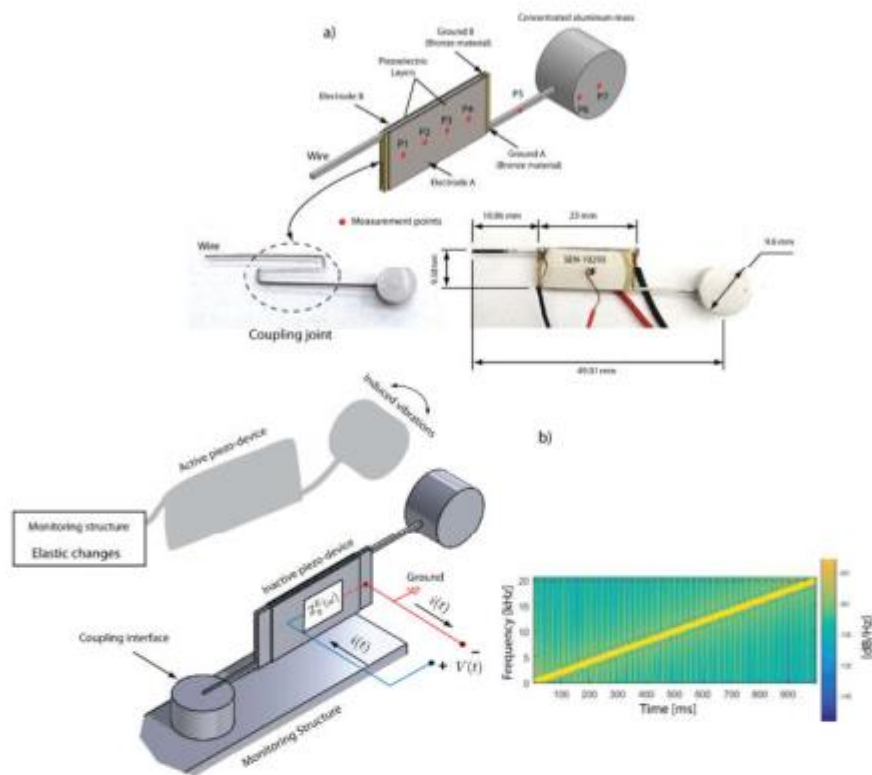


Figure 2. (a) Piezo-device design, dimensions and measurement points. (b) Piezo-device working principle.

2.3. Velocity Measurements of the Piezo-Actuated Sensor

For the assessment and comprehension of the piezo-device dynamic behavior, velocity measurements are taken when it is clamped in a mechanical press. It means that the coupling interface and the monitoring structure are not considered in the initial analysis. The main objective is to identify some mechanical resonances of the piezo-device itself to compare it with the resonance peaks of the electrical impedance.

The experimental setup is defined by a computer, a data acquisition card (NI DAQ 6211) which has 16 analog inputs (16 bit, 250 kS/s), a power amplifier TREK high voltage amplifier 2205 (TREK Inc., Lockport, NY, USA) and a POLYTEC CLV-2534 (Polytec Inc., Auburn, MA, USA) laser vibrometer. A scheme of the experimental setup is shown in Figure 3. The piezo-device is fixed in one end of the wire to a mechanical press for the measurements. The red color marked points (Figure 2a) are established as measurement points of velocity which are distributed for the piezo-patches (P1 to P4), mass (P6 to P7) and wire (P5). Piezoelectric transducers are connected to the voltage output of the power amplifier in which a broadband chirp excitation signal of 35 V is applied in the input connector. The frequency of the input signal sweeps from 0 kHz to 20 kHz over a 1 s window. A sample frequency was set in 100 K samples/s in the data acquisition system. Simultaneously, the laser vibrometer was focused on the marked points in the piezo device to register the velocity by means of a laser beam that should be focused to avoid scattered data. For the experiment, seven tests were performed in order to obtain different measurements on the piezo-device in each detailed measurement point.

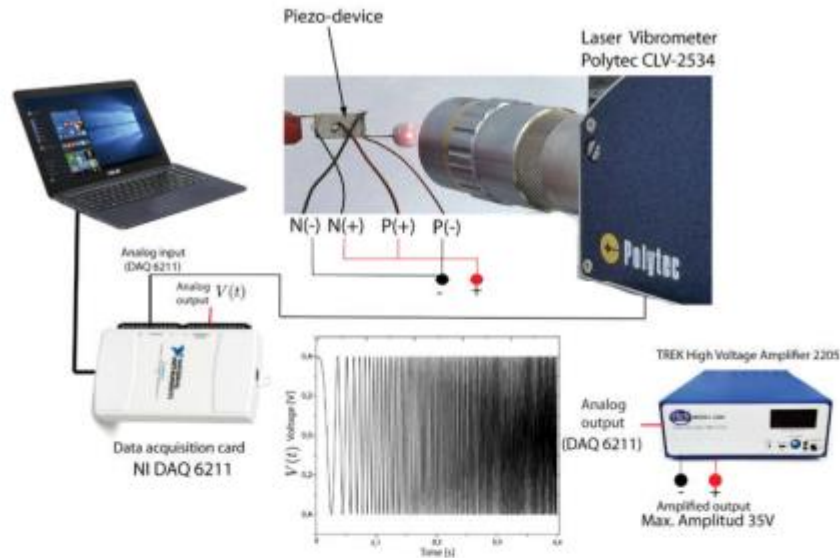


Figure 3. Experimental setup for the velocity measurements.

2.4. Experimental Setup for Structural Monitoring with the EMI Technique

An experimental setup was settled in order to correlate the mechanical resonances of the piezo-actuated sensor from electrical impedance applying the EMI technique. The identification will permit to choose which resonances belong to mechanical responses that can be monitored from the electrical measurements by EMI, as explained in Section 2. The electrical impedance was measured using an impedance analyzer (E4990A, Agilent, Palo Alto, CA, USA) in two proposed experiments; in the first one, the piezo-actuated sensor is isolated, and in the second one it is coupled to a monitoring structure as detailed in Figure 4a.

The activation principle of the piezo device consists of exciting both piezoelectric patches simultaneously applying a harmonic voltage and reading the current response signals that pass through it using the impedance analyzer [40]. The sweep setup of the signal was defined from 1 to 20 kHz with 400 points of resolution in the selected bandwidth.

For the searched application, the piezo-device was coupled to three different metal specimens (aluminum, bronze and steel) to emulate a variation of the elastic modulus in the monitoring structure as shown in Figure 4b. Dimensions of the specimens are illustrated in the figure, as well as both coupling interfaces (human tooth and conic element). Each specimen has the same dimensions and the experiment was organized in the following way: the piezo-device is bonded into a slot of the coupling interface which in turn is joined to the monitoring structure. In order to guarantee stability conditions, the monitoring structure was fixed to a rigid structure in the bottom surface during the test. Epoxy adhesive (adhesive Loctite 4981) was used to bond all parts. To clarify the use of the human tooth, it is considered that biological structures such as bone modify their mechanical properties depending on different factors such as stress application, natural remodeling and metabolic diseases; the experiment pretends to show that the piezo device can identify the elastic variations independently of the coupling interface used.

Six tests were performed in the chosen materials (Aluminum, Bronze, Steel) using both coupling interfaces. Elastic properties of each material were provided according to the material supplier as 70 GPa (Aluminum), 120 GPa (Bronze), and 200 GPa (Steel). For the first one, three tests were done with the aluminum conic interface (Cone) coupled to the three specimens; and in the second one, another three tests were carried out with a premolar tooth coupled to each specimen. Coupling interfaces were

bonded with epoxy adhesive Loctite 4981. It is also important to highlight that all three specimens have the same dimensions and geometrical configuration in order to focus our study on stiffness changes due exclusively to elastic changes done in the monitoring structure.

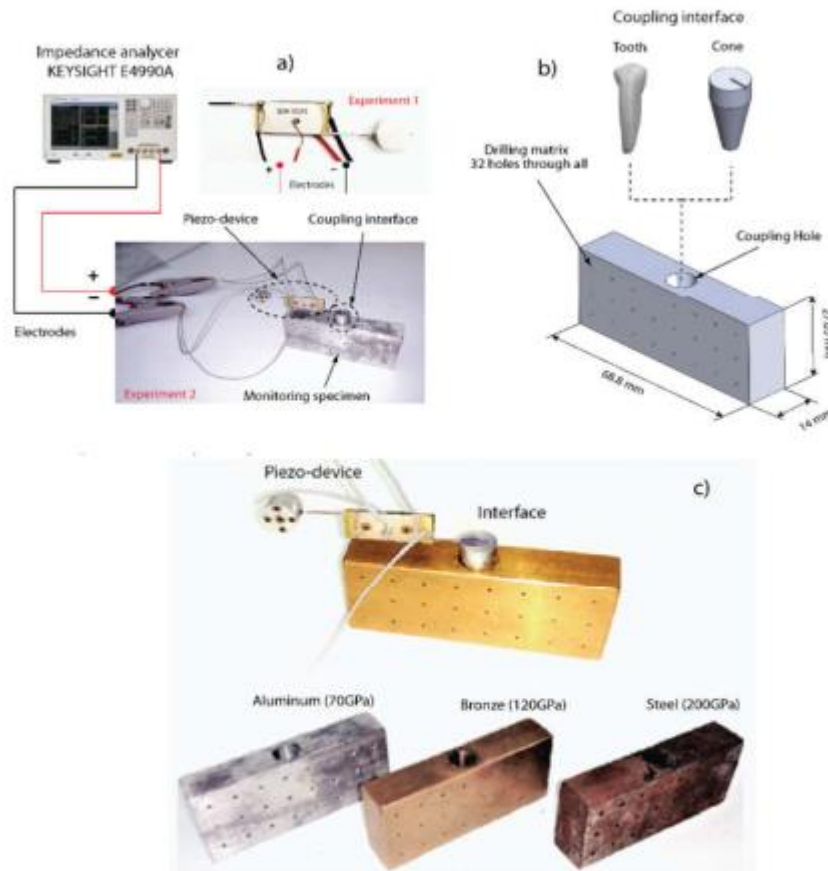


Figure 4. (a) Experimental setup for electromechanical impedance measurements. (b) Dimensions and materials for the monitoring structure including the coupling interface. (c) Materials for the experiment.

3. Results and Discussion

3.1. Velocity Measurements in the Piezo-Device

Figure 5 consolidates all velocity signals measured with the vibrometer laser (POLYTEC CLV 2534) for the seven points marked in the piezo-device as described in Figure 2; four in the PT (P1 to P4), two in the mass (P6 and P7) and one in the wire (P5). The excitation signal was applied on each piezo patch as a harmonic chirp in an inverse way (inverse electric field for each PZT) to induce bending in the device. It means that the mass displacements were amplified. The connection scheme of the experiment is detailed in Section 2.3.

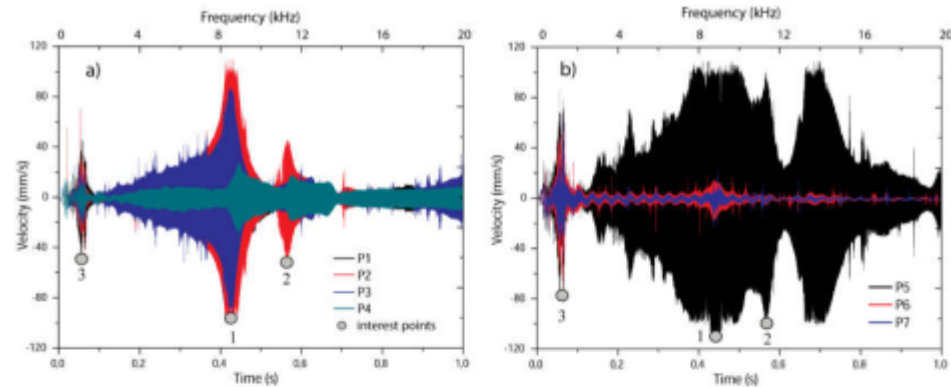


Figure 5. Velocity measurements. (a) Piezoelectric patch (P1, P2, P3, P4). (b) Wire and mass (P5, P6, P7).

Velocity signals measured in one piezoelectric patch are illustrated in Figure 5a. For obtaining the measurements, the laser was focused in a normal direction to the electrodes of the piezo patch. There were observed different velocity magnitudes in the time domain; it indicates that the device takes different vibration shapes in specific values of the time-frequency spectrum established for a window of 1 s and 0–20 kHz. Vibration shapes refer to the specific deformation (geometric profile) that represent the kinematics of the device in any frequency value. It is analyzed that there are three velocity maximum transitions (grey points) that reflect the resonant nature of the device. The higher amplitude is observed close to 0.42 s, in which the points P2 and P3 take the maximum values (central points), but P1 and P4 achieve about 20% of the maximum velocities. For the same time, Figure 5b shows that P5 (on the wire) presents the same amplitude as P2 and P3 in 0.42 s, approximately. However, the velocity in the mass reaches 10% of it, revealing that the velocities are much lower than the other points. It denotes that the mass presents small motions and the body of the device is bending. The second largest velocity amplitude is observed in 0.57 s for both Figure 5a,b. In this peak, half of the piezo patch is deformed which bends the wire to its higher amplitude. A third peak is identified in 0.005 s, in which the mass and the wire present greater velocities compared with those of the piezo patches.

To determine the frequency values that corresponds to these maximum velocities, Fourier's transform was computed and plotted in Figure 6. All obtained frequency response velocity functions are particularly detailed in the following section. All velocities in frequency are compared with the electrical impedance results.

3.2. Comparison between Velocity and Electrical Impedance Measurements

This section deals with comparisons of measurements obtained for the velocity and electrical resistance in the frequency domain (real part of the electrical impedance). Electrical resistance measurements were also carried out with the piezo-device mounted in a mechanical press (isolated) as the velocity experiments. Electrical resistance was measured using the impedance analyzer (E4990A, Agilent, Palo Alto, CA, USA) shown in Figure 4a (experiment 1).

Figure 6 compares the velocities and electrical resistance in two groups with the aim to show the correlation between the mechanical and electrical peaks in the following frequency ranges of 1–2 kHz (Figure 6a) and 6–15 kHz (Figure 6b). These frequency intervals were defined by an exploratory data analysis which implied to cut the interval 2–6 kHz. Dashed black lines represent the values in frequency that give rise to peaks.

Two peaks are visible in the range of 1 to 2 kHz, with the first peak at 1046 Hz (A) and a second peak at 1220 Hz (B). It is observed that the electrical resistance presents two smoothed peaks in the same frequency values, approximately. This correlation indicates that reflected peaks in the

electrical resistance correspond with mechanical resonances induced by the dynamics of the device. Nevertheless, that influence is low since the relative amplitude (height from the baseline) of the peak is low, indicating that the piezoelectric patches are being deformed slightly by the vibrations. This can be verified reconstructing the vibration shape with the amplitudes of these peaks. In other words, for monitoring purposes the vibration modes should be favorable to deform the PZTs since it will reflect a higher amplitude in the electrical resonances. Methods based on the idea of electromechanical impedance and vibration modes require a dynamic analysis to obtain a major sensitivity in the electrical signatures when the monitoring structure is modified. For this reason, this interval (1–2 kHz) is not considered as a monitoring spectrum.

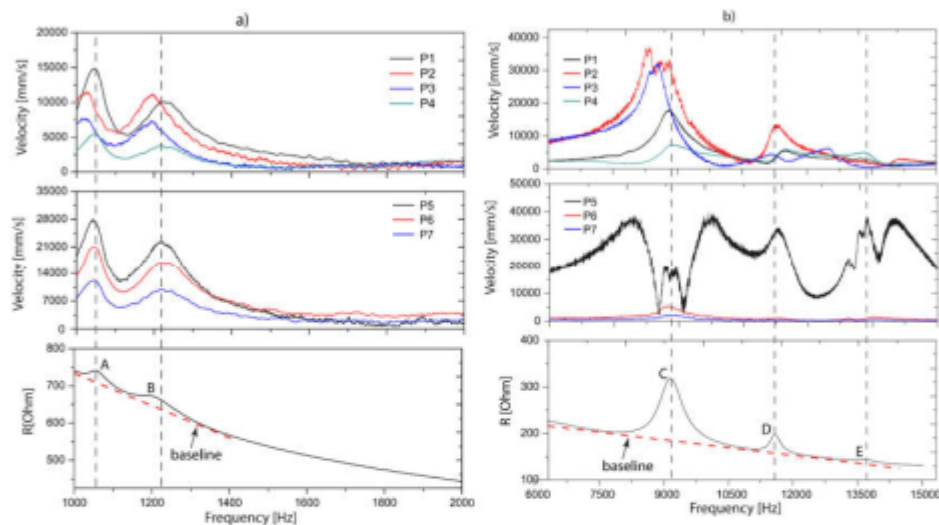


Figure 6. Comparison between velocity and electrical resistance, (a) 1–2 kHz. (b) 6–15 kHz.

In the range of 6–15 kHz, three peaks were identified in the electrical resistance, with the first peak at 9.1 kHz (C), second peak at 11.5 kHz (D) and a third peak at 13.7 kHz (E) as shown in Figure 6b. As in the first case (Figure 6a), as for the second one (Figure 6b), it is evident that the electrical peaks have a coincidence with the kinematic ones. Moreover, it is seen that relative amplitude for peak A is 130 Ohms and for B 37 Ohms, approximately. Comparing the relation between the relative amplitudes of Peak C and D in the velocities, D represents 30.5% of the amplitude of C. In the electrical resistances, this relation is 28.5%. According to the above, the results demonstrated that electrical resonances strictly depend on the vibration mode in the resonant frequencies.

The correlation of mechanical parameters through the electrical impedance shows a big advantage in SHM applications. It is not necessary to measure kinematic parameters in localized degrees of freedom to verify the resonances of the whole structure. It implies that a PZT is able to capture the mechanical resonances if these influence the deformation of it, as observed in Figure 6b, first one figure, peak C (velocity graph), whereas P1 and P4 have 1/3 and 1/5 of the amplitudes of P2 and P3. It means that the piezo patch is deformed by bending. To evaluate the piezo-actuated sensor in monitoring conditions, experiment 2 was proposed, as described in Figure 4a which is discussed in the next section.

3.3. Assessment of Young's Modulus Variation in the Monitoring Structure

The main idea of the proposed piezo device is to track changes in the electrical resistance when the elastic properties undergo variations in monitoring structure. As Figure 4 details, the experiment

emulates different elastic conditions with three specimens of different materials. We want to remark that the elastic variations in-situ can occur in some bio-structures such as bone [41,42] and fruits [43], among others [44–46].

Figure 7a shows six curves that represent the electrical resistances of all the experimental tests composed by three measurements with a human tooth and three with an aluminum cone. All signals were acquired in the bandwidth 8–15 kHz according to the analysis described in the previous section. The experiments were designed considering the following working hypothesis, which states that independent of the coupling interface (cone and tooth), it should generate similar results in both experiments.

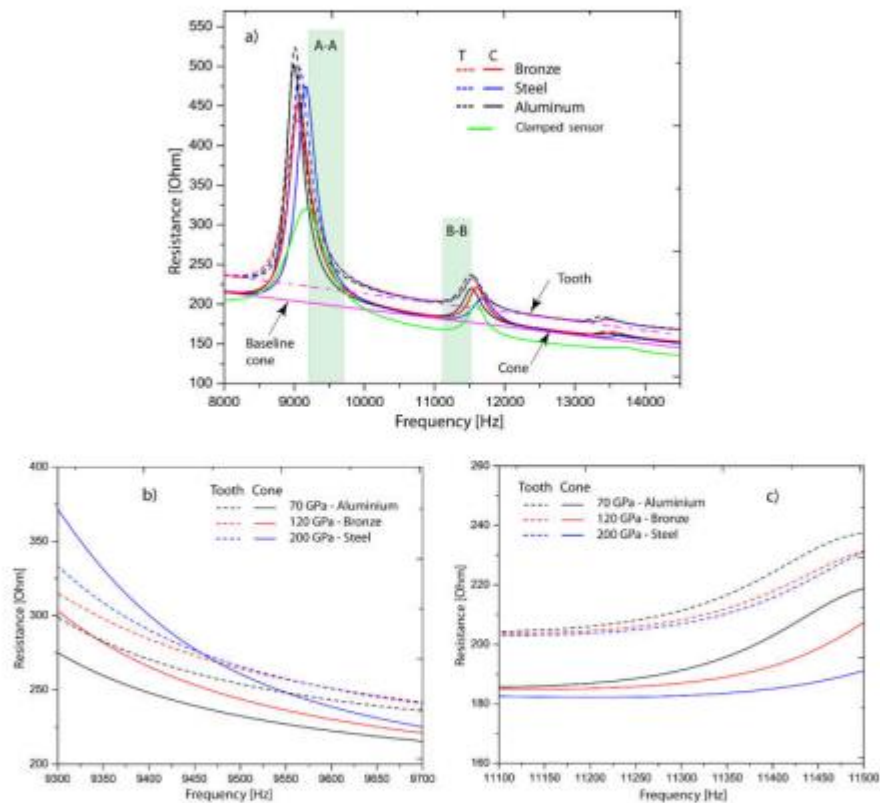


Figure 7. (a) Electrical resistance for experiments 1 and 2 in the frequency spectrum 8 kHz–15 kHz. (b) Electrical resistance signals in the first monitoring window (9.3–9.7 kHz). (c) Electrical resistance signals in the second monitoring window (11.1–11.5 kHz).

As seen in Figure 7a, the piezo device presents a structure of three peaks supported by a baseline that is demarked in pink color. The baseline serves as reference pattern of each coupling interface. It is noted that the baseline is moved upwards when the device is connected to the coupling interfaces, which in turn are embedded to the metallic specimens. It means that the principal conditions of the signal (three peaks and linear trend) are kept in other levels of electrical resistance and these are modified only by the coupling interface. As discussed in Sections 3.1 and 3.2, the piezo device is activated in vibration modes that deform it.

Other changes occurred in the relative amplitudes (height from its baseline) of the peaks that were incremented, especially the first one. This is caused by the clamped conditions (piezo device) since

the vibration mode is less constrained (lower stiffness in the boundary). Also, the peaks were slightly shifted with respect to the peaks of the green curve (clamped device). The presence of new elements in the piezo device caused changes in its mechanical resonances as naturally expected, because these are directly affected by the mass/stiffness relation of the whole system. However, as results showed, it can be inferred that the mechanical resonances did not vary dramatically keeping the mechanical impedance of the sensor as the principal structure of the signal.

Analyzing the curves, there were found two observability windows where the signals were sensitive to the change of elastic variations. The searching parameter was based on the progressive changes of the signal when Young's modulus was increased. The first window was found in the range of 9.3–9.7 kHz, which is located at the right side of the first peak and labeled as A-A, and the second monitoring window is established in the interval of 11.1–11.5 kHz at the left side of the second peak, labeled as B-B, as illustrated in Figure 7b,c.

In Figure 7b, the electrical resistance shifts upwards when Young's modulus increases its value. This happens because the resonance (peak one) is moving to the right since the whole system gains some stiffness from 70 GPa to 200 GPa. In Figure 7c, the contrary is observed since curves moved downwards, but the main effect is the same as peak one. Analyzing in detail the results, it is seen that peak two shifts to the right also. The differences in both observation intervals are focused on the location of the window since one was taken after the resonance and the other one before it.

In order to quantify and monitor elastic variations using the observation windows, RMSD index was calculated (see Equation (4)) and the results are summarized in Figure 8. It is important to point out that, to determine the RMSD index, it was necessary to set a linear reference (baseline) for each coupling interface as illustrated Figure 7a. In both Figure 8a,b, there are compared the apparent relations between Young's modulus and the RMSD index for each coupling interface. Figure 8a shows that RMSD indexes increased with the variation of Young's modulus in both cases. In Figure 8b, indexes decreased as expected since the electrical resistance relation were inverse to those determined in Figure 7a. In both cases, RMSD of the cone is more sensitive to the elastic changes between 12–40% and 17–2%, contrasted with 7.5–25% and 16–8% for the tooth. In conclusion, it is observed that in both cases it was possible to quantify the elastic variations from the frequency ranges established for each coupling interface. For bio applications, it important to denote that bio-structures can modify its elastic capacity significantly in lower increments and therefore the exposed methodology could be applied in higher frequency intervals.

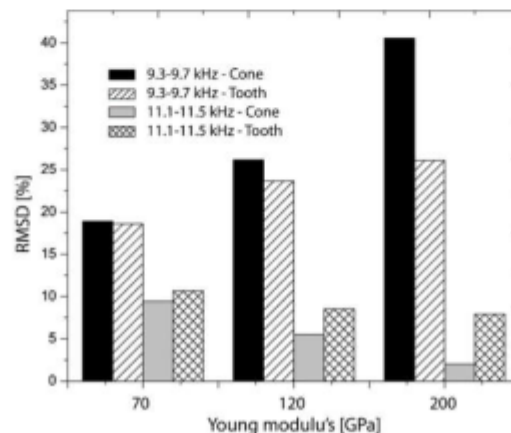


Figure 8. Root mean square deviation (RMSD) calculated for electrical resistances obtained in A-A and B-B.

Besides, the electrical resistances were correlated with the purpose of verifying the relation between both coupling interfaces as illustrated in Figure 9a (9.3–9.7 kHz) and Figure 9b (11.1–11.5 kHz). As the results evidenced, those relations change structurally in both cases which allows to detect each elastic variation in the support. This could be considered another way of detection if both interfaces belong to the same structure. For example, in a real context, teeth are structures with different geometric and mechanical properties and these are embedded in bone. Correlation between measurements may be applied as a monitoring indicator. However, for future applications, all efforts should be focused in the description of the physics of each problem with the aim to understand the effects of structural variations over these relations.

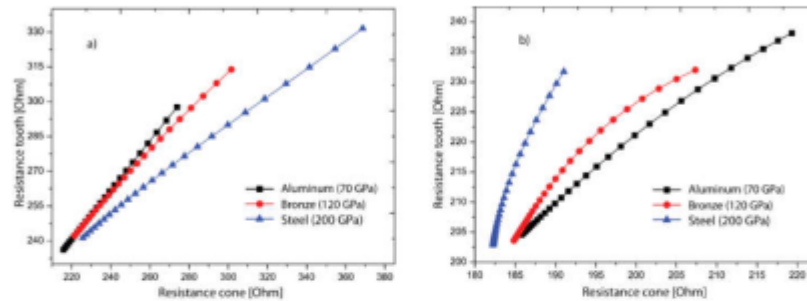


Figure 9. Relation between electrical resistance signals obtained with cone and premolar as coupling interfaces: (a) 9.3–9.7 kHz. (b) 11.1–11.5 kHz.

4. Conclusions

The mechanical design and assessment of a piezo-actuated sensor for structural monitoring has been described, developed and experimentally tested. The electromechanical impedance technique was applied and its effects were investigated in order to detect elastic variations imposed in the support of the piezo-device. Experiments showed that when the elastic modulus was modified, the electrical resistance consistently varied in intervals 9.3–9.7 kHz and 11.1–11.5 kHz. This permitted the elastic variations to be quantified with an index based on RMSD. Two types of coupling interfaces (cone and human tooth) were tested to evidence the repeatability of the analysis presented in this study. Considering both coupling interfaces (joining part between support and piezo-device), the correlation among its electrical resistances were shown to be effective and sensitive to the elastic variations. Therefore, these changes were identified with the correlations. To find a potential applicability, it is necessary to perform tests in bio-structures in which can be monitored the reduction or the increment of its global elasticity. We see an opportunity to apply this methodology on teeth since these are connected directly with bone. Bone is a sensitive structure in which metabolic changes are reflected in its structures. However, it is important to consider that this paper provided a proof-of-concept that should be validated before a real bio-application.

Author Contributions: Conceptualization, H.A.T., J.P.G. and S.I.R.-R.; Methodology, H.A.T., C.I.C., D.R.B. and F.M.P.; Software, H.A.T. and C.I.C.; Validation, H.A.T., C.I.C., D.R.B. and F.M.P.; Formal analysis, H.A.T., M.A.V.-M., J.P.G., F.M.P. and S.I.R.-R.; Investigation, H.A.T., M.A.V.-M., J.P.G., F.M.P. and S.I.R.-R.; Writing—original draft preparation, H.A.T., C.I.G. and D.R.B. and M.A.V.-M.; Writing—review and editing, H.A.T., J.P.G., F.M.P. and S.I.R.-R.; Visualization, H.A.T. and S.I.R.-R.; Supervision, H.A.T., J.P.G., F.M.P. and S.I.R.-R.; Project administration, H.A.T.; Funding acquisition, H.A.T. and J.P.G.

Funding: This research was funded by a grant from Departamento Administrativo de Ciencia Tecnología e Innovación (COLCIENCIAS) (Grant code 121974455599) legalized contract 739-2016 and obtained in the announcement 744, year 2016.

Acknowledgments: We want to extend acknowledgments to the mechanical engineering students Mateo Aguirre Rivera and Sergio Loaiza Gomez for their support in the measuring process. Additionally, acknowledgments

to Universidad Autónoma de Manizales (UAM) and Centro de Innovación Roldan (CIR) for their financial and technical support.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

- Li, H.N.; Ren, L.; Jia, Z.G.; Yi, T.H.; Li, D.S. State-of-the-art in structural health monitoring of large and complex civil infrastructures. *J. Civ. Struct. Health Monit.* **2016**, *6*, 3–16. [[CrossRef](#)]
- Martinez-Luengo, M.; Kolios, A.; Wang, L. Structural health monitoring of offshore wind turbines: A review through the Statistical Pattern Recognition Paradigm. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2016**, *64*, 91–105. [[CrossRef](#)]
- Huo, L.; Wang, B.; Chen, D.; Song, G. Monitoring of Pre-Load on Rock Bolt Using Piezoceramic-Transducer Enabled Time Reversal Method. *Sensors* **2017**, *17*, 2467. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- Wang, B.; Huo, L.; Chen, D.; Li, W.; Song, G. Impedance-based pre-stress monitoring of rock bolts using a piezoceramic-based smart washer—A feasibility study. *Sensors* **2017**, *17*, 250. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- Na, W.; Baek, J. A review of the piezoelectric electromechanical impedance based structural health monitoring technique for engineering structures. *Sensors* **2018**, *18*, 1307. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- Tinoco, H.A.; Ocampo, D.A.; Peña, F.M.; Sanz-Urbe, J.R. Finite element modal analysis of the fruit-peduncle of *Coffea arabica* L. var. Colombia estimating its geometrical and mechanical properties. *Comput. Electron. Agric.* **2014**, *108*, 17–27. [[CrossRef](#)]
- Bala, Y.; Lefèvre, E.; Roux, J.P.; Baron, C.; Lasaygues, P.; Pithioux, M.; Kaftandjian, V.; Follet, H. Pore network microarchitecture influences human cortical bone elasticity during growth and aging. *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* **2016**, *63*, 164–173. [[CrossRef](#)]
- Nadal, M.; Flexas, J.; Gulias, J. Possible link between photosynthesis and leaf modulus of elasticity among vascular plants: A new player in leaf traits relationships? *Ecol. Lett.* **2018**, *21*, 1372–1379. [[CrossRef](#)]
- Park, G.; Inman, D.J. Structural health monitoring using piezoelectric impedance measurements. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. A Math. Phys. Eng. Sci.* **2007**, *365*, 373–392. [[CrossRef](#)]
- Yang, Y.; Lim, Y.Y.; Soh, C.K. Practical issues related to the application of the electromechanical impedance technique in the structural health monitoring of civil structures: I. Experiment. *Smart Mater. Struct.* **2008**, *17*, 035008. [[CrossRef](#)]
- Annamdas, V.G.M.; Soh, C.K. Application of electromechanical impedance technique for engineering structures: Review and future issues. *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* **2010**, *21*, 41–59. [[CrossRef](#)]
- Bhalla, S.; Bajaj, S. Bone characterization using piezotransducers as biomedical sensors. *Strain* **2008**, *44*, 475–478. [[CrossRef](#)]
- Bhalla, S.; Suresh, R. Condition monitoring of bones using piezo-transducers. *Meccanica* **2013**, *48*, 2233–2244. [[CrossRef](#)]
- Mazlina, M.H.; Sarpinah, B.; Tawie, R.; Daho, C.D.; Annuar, I. Monitoring of bone healing by piezoelectric-EMI method. In *AIP Conference Proceedings*; AIP Publishing: Melville, NY, USA, 2016; Volume 1705, p. 020008.
- Johnell, O.; Kanis, J. Epidemiology of osteoporotic fractures. *Osteoporos. Int.* **2005**, *16*, S3–S7. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- Srivastava, S.; Bhalla, S.; Madan, A. Assessment of human bones encompassing physiological decay and damage using piezo sensors in non-bonded configuration. *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* **2017**, *28*, 1977–1992. [[CrossRef](#)]
- Moll, J.; Kexel, C.; Milanchian, H.; Bhavsar, M.B.; Barker, J.H. Ultrasound Bone Fracture Sensing and Data Communication: Experimental Results in a Pig Limb Sample. *Ultrasound Med. Biol.* **2018**, in press. [[CrossRef](#)]
- Tabrizi, A.; Rizzo, P.; Ochs, M.W. Electromechanical impedance method to assess dental implant stability. *Smart Mater. Struct.* **2012**, *21*, 115022. [[CrossRef](#)]
- Ribolla, E.L.; Rizzo, P. Modeling the electromechanical impedance technique for the assessment of dental implant stability. *J. Biomech.* **2015**, *48*, 1713–1720. [[CrossRef](#)]
- Ribolla, E.L.M.; Rizzo, P.; Gulizzi, V. On the use of the electromechanical impedance technique for the assessment of dental implant stability: Modeling and experimentation. *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* **2014**, *26*, 2266–2280. [[CrossRef](#)]

21. Tinoco, H.A.; Gomez, J.P.; Torres, J.; Velasco, M.A. Structural differentiation of tooth supporting substances with the electromechanical impedance technique. *Int. J. Mech. Mechatron. Eng.* **2016**, *16*, 8–15.
22. Tinoco, H.A.; Gomez, J.P.; Velasco, M.A.; Torres, J. Identification of stiffness variations in supporting substances of a human canine tooth with a bracket-beam-piezoelectric sensor and its electromechanical impedance. *Future Dent. J.* **2017**, *3*, 15–21. [[CrossRef](#)]
23. Tinoco, H.A.; Cardona, C.I.; Peña, F.M.; Gomez, J.P.; Roldan-Restrepo, S.I. Assessment of Material Loss in a Human Teeth Support by Applying EMI Technique. *Int. J. Mech. Mechatron. Eng.* **2018**, *18*, 113–120.
24. Huynh, T.C.; Kim, J.T. Impedance-based cable force monitoring in tendon-anchorage using portable PZT-interface technique. *Math. Probl. Eng.* **2014**, *2014*, 784731. [[CrossRef](#)]
25. Huynh, T.C.; Dang, N.L.; Kim, J.T. Preload Monitoring in Bolted Connection Using Piezoelectric-Based Smart Interface. *Sensors* **2018**, *18*, 2766. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
26. Annamdas, V.G.; Radhika, M.A. Electromechanical impedance of piezoelectric transducers for monitoring metallic and non-metallic structures: A review of wired, wireless and energy-harvesting methods. *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* **2013**, *24*, 1021–1042. [[CrossRef](#)]
27. Annamdas, V.G.M.; Soh, C.K. Evaluation of peak-free electromechanical piezo-impedance and electromagnetic contact sensing using metamaterial surface plasmons for load monitoring. *Smart Mater. Struct.* **2016**, *26*, 015003. [[CrossRef](#)]
28. Sirohi, J.; Chopra, I. Fundamental understanding of piezoelectric strain sensors. *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* **2000**, *11*, 246–257. [[CrossRef](#)]
29. Tinoco, H.A.; Robledo-Callejas, L.; Marulanda, D.J.; Serpa, A.L. Damage detection in plates using the electromechanical impedance technique based on decoupled measurements of piezoelectric transducers. *J. Sound Vib.* **2016**, *384*, 146–162. [[CrossRef](#)]
30. Hu, X.; Zhu, H.; Wang, D. A study of concrete slab damage detection based on the electromechanical impedance method. *Sensors* **2014**, *14*, 19897–19909. [[CrossRef](#)]
31. Fu, J.; Tan, C.; Li, F. Quantitative electromechanical impedance method for nondestructive testing based on a piezoelectric bimorph cantilever. *Smart Mater. Struct.* **2015**, *24*, 065038. [[CrossRef](#)]
32. Tinoco, H.A.; Marulanda, D.J. Damage Identification in Active Plates with Indices Based on Gaussian Confidence Ellipses Obtained of the Electromechanical Admittance. *J. Nondestruct. Eval.* **2015**, *34*, 28. [[CrossRef](#)]
33. Tinoco, H.A.; Rosas-Bastidas, D.A. Experimental study of the debonding effects on the electromechanical impedance of piezo wafer active sensors. In Proceedings of the Third International Conference on Advanced Mechatronics, Design, and Manufacturing Technology (AMDM 2016), Cali, Colombia, 13–15 April 2016; pp. 1–10.
34. Liang, C.; Sun, F.P.; Rogers, C.A. Coupled electro-mechanical analysis of adaptive material systems-determination of the actuator power consumption and system energy transfer. *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* **1994**, *8*, 335–343. [[CrossRef](#)]
35. Farrar, C.R.; Park, G.; Sohn, H.; Inman, D.J. Overview of piezoelectric impedance-based health monitoring and path forward. *Shock. Vib. Dig.* **2003**, *35*, 451–463.
36. Giurgiutiu, V.; Zagari, A. Damage detection in thin plates and aerospace structures with the electro-mechanical impedance method. *Struct. Health Monit.* **2005**, *4*, 99–118. [[CrossRef](#)]
37. Tawie, R.; Lee, H.K. Monitoring the strength development in concrete by EMI sensing technique. *Constr. Build. Mater.* **2010**, *24*, 1746–1753. [[CrossRef](#)]
38. De Freitas, E.S.; Baptista, F.G. Experimental analysis of the feasibility of low-cost piezoelectric diaphragms in impedance-based SHM applications. *Sens. Actuators A Phys.* **2016**, *238*, 220–228. [[CrossRef](#)]
39. Tua, P.S.; Quek, S.T.; Wang, Q. Detection of cracks in cylindrical pipes and plates using piezo-actuated Lamb waves. *Smart Mater. Struct.* **2005**, *14*, 1325. [[CrossRef](#)]
40. Campeiro, L.M.; da Silveira, R.Z.; Baptista, F.G. Impedance-based damage detection under noise and vibration effects. *Struct. Health Monit.* **2018**, *17*, 654–667. [[CrossRef](#)]
41. Day, J.S.; Ding, M.; Van Der Linden, J.C.; Hvid, I.; Sumner, D.R.; Weinans, H. A decreased subchondral trabecular bone tissue elastic modulus is associated with pre-arthritis cartilage damage. *J. Orthop. Res.* **2001**, *19*, 914–918. [[CrossRef](#)]
42. Osterhoff, G.; Morgan, E.F.; Shefelbine, S.J.; Karim, L.; McNamara, L.M.; Augat, P. Bone mechanical properties and changes with osteoporosis. *Injury* **2016**, *47*, S11–S20. [[CrossRef](#)]

43. Tinoco, H.; Peña, F. Finite Element Analysis of *Coffea arabica* L. var. Colombia Fruits for Selective Detachment Using Forced Vibrations. *Vibration* **2018**, *1*, 207–219. [[CrossRef](#)]
44. Streck, T.; Jopek, H.; Wojciechowski, K.W. The influence of large deformations on mechanical properties of sinusoidal ligament structures. *Smart Mater. Struct.* **2016**, *25*, 054002. [[CrossRef](#)]
45. Lee, S.H.; Moon, W.K.; Cho, N.; Chang, J.M.; Moon, H.G.; Han, W.; Noh, D.Y.; Lee, J.C.; Kim, H.C.; Lee, K.B.; et al. Shear-wave elastographic features of breast cancers: Comparison with mechanical elasticity and histopathologic characteristics. *Investig. Radiol.* **2014**, *49*, 147–155. [[CrossRef](#)]
46. Palacio-Torralba, J.; Good, D.W.; Stewart, G.D.; McNeill, S.A.; Reuben, R.L.; Chen, Y. A novel method for rapid and quantitative mechanical assessment of soft tissue for diagnostic purposes: A computational study. *Int. J. Numer. Methods Biomed. Eng.* **2018**, *34*, e2917. [[CrossRef](#)]



© 2019 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

**Articulo aceptado para
publicacion**

The 2nd International Conference on Numerical Modelling in Engineering (NME 2019)

ACCEPTANCE NOTIFICATION

August 1, 2019

Congratulations! We are glad to inform that your full paper:

PAPER ID:

NME1108

PAPER TITLE:

Piezo-actuated device for a bio-structural monitoring application through vibration-based condition and electromechanical impedance measurements

COMPLETE LIST OF AUTHORS:

Daniel R. Barco¹, Hector A. Tinoco^{1,2,3*}, Carlos I. Cardona¹, Fabio M. Peña¹

¹*Experimental and Computational Mechanics Laboratory, Universidad Autónoma de Manizales, Antigua Estación del Ferrocarril, Edificio Fundadores, 170001 Manizales, Colombia.*

²*Institute of Physics of Materials, Czech Academy of Sciences, Žitkova 22, 616 62 Brno, Czech Republic*

³*Central European Institute of Technology-Brno University of Technology, Technická 3058/10, 61600 Brno, Czech Republic*

*Corresponding author: htinoco@autonoma.edu.co

has been accepted by the 2nd International Conference on Numerical Modelling in Engineering (NME 2019) and will be published in **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering** (indexed by Ei Compendex, Scopus, CPCI, Inspec, etc.) based upon the peer-review from the technical committee. We are grateful for your contribution to NME 2019. We also hope that you will contribute your excellent work to future NME conferences.

For more information, please visit our website: <http://www.nmeconf.org/>

Look forward to meeting you in Beijing!

Best regards,



Ms. Bernice Wu-Conference Secretary

On behalf of Conference Chairman:



<http://www.nmeconf.org/>

August 19-22, 2019 Beijing, China

IOP Conference Series: Materials Science and Engineering

Piezo-actuated device for a bio-structural monitoring application through vibration-based condition and electromechanical impedance measurements

Daniel R. Barco¹, Hector A. Tinoco^{1,2,3*}, Carlos I. Cardona¹, Fabio M. Peña¹

¹Experimental and Computational Mechanics Laboratory, Universidad Autónoma de Manizales, Antigua Estación del Ferrocarril, Edificio Fundadores, 170001 Manizales, Colombia.

²Institute of Physics of Materials, Czech Academy of Sciences, Zizkova 22, 616 62 Brno, Czech Republic

³Central European Institute of Technology-Brno University of Technology, Technická 3058/10, 61600 Brno, Czech Republic

*Corresponding author: htinoco@autonoma.edu.co

Abstract. This study presents a numerical and experimental development of a piezo-actuated device used for monitoring the stiffness variations of its support through electromechanical impedance measurements. The piezo-device and its components define a clamped beam system activated dynamically by two piezo-transducers that transmit vibrations to the support (monitoring substrate). An harmonic finite element analysis was carried out to understand the effects of the substrate properties on the dynamics of the piezo-device. Experimental tests corroborated the simulations with the correspondence of modal shapes and frequency response functions (FRFs) when the substrate varies its stiffness. A biomedical application was conducted in a bone specimen with three embedded teeth to monitor the stiffness variations induced by drillings in the bone. Results showed that the bone stiffness monitoring could be possible through the teeth due to that the drillings effect were quantified by electrical impedance signals.

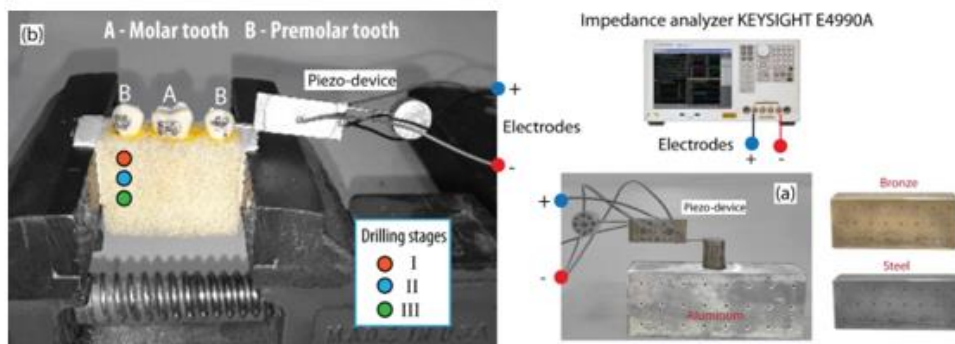


Figure 3. Electromechanical impedance measurements. (a) Variations of the metallic substrates. (b) Stiffness variation in a bone sample.