

**IDENTIFICACIÓN Y LOCALIZACIÓN DE DAÑOS EN ESTRUCTURAS ACTIVAS CON
LA TÉCNICA DE LA IMPEDANCIA ELECTROMECAÁNICA (EMI) ENFOCADA AL
MONITOREO DE LA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL (SHM)**



Universidad
Tecnológica
de Pereira

**DAIRON JOSE MARULANDA HURTADO
LEONARDO ROBLEDO CALLEJAS**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
PEREIRA**

2022

**IDENTIFICACIÓN Y LOCALIZACIÓN DE DAÑOS EN ESTRUCTURAS ACTIVAS CON
LA TÉCNICA DE LA IMPEDANCIA ELECTROMECAÁNICA (EMI) ENFOCADA AL
MONITOREO DE LA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL (SHM)**

**DAIRON JOSE MARULANDA HURTADO
LEONARDO ROBLEDO CALLEJAS**

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Magister en
Sistemas Automáticos de Producción

Director

PhD. Héctor Andrés Tinoco Navarro

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
PEREIRA
2022**

NOTA DE ACEPTACIÓN

FIRMA DIRECTOR

FIRMA JURADO

FIRMA JURADO

Pereira, 15 de octubre de 2022

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento muy especial al profesor PhD. Héctor Andrés Tinoco por su paciencia y apoyo incondicional para la realización de esta tesis.

Agradecemos a nuestros amigos y colegas Jaime Buitrago Osorio y Carlos Iván García Cardona por sus valiosos aportes y recomendaciones en la realización de este documento.

Un agradecimiento al soporte brindado por el personal del Laboratorio de mecánica Computacional y Experimental de la Universidad Autónoma de Manizales en el desarrollo de los procesos investigativos de este proyecto.

Un agradecimiento a la Universidad Autónoma de Manizales por disponer de sus instalaciones y de los equipos requeridos para llevar a cabo esta investigación

Un agradecimiento a la Universidad Tecnológica de Pereira y en especial a la Facultad de Ingeniería Mecánica por el apoyo para la culminación de nuestro proceso de formación.

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo a mis padres, Alfredo y Beatriz, quienes siempre me han apoyado de manera incondicional, a mi esposa Jennifer y a mi hija Luciana, quienes son mi fuente de motivación y mi más grande orgullo.

Dairon José Marulanda Hurtado

Este trabajo va dedicado a mis padres quienes me han brindado todo el amor y el apoyo para mi progreso personal y profesional, a mi esposa y a mi hija, quienes son el motor para seguir adelante y e inspirar a las generaciones futuras.

Leonardo Robledo Callejas

CONTENIDO

CAPÍTULO 1 PRESENTACIÓN	14
1.2 Justificación	16
1.3 Planteamiento del problema	17
1.4 Antecedentes	19
1.5 Objetivos	20
1.5.1 Objetivo general	20
1.5.2 Objetivos específicos.....	21
1.6 Estructura de la tesis	21
CAPÍTULO 2 IDENTIFICACIÓN DE DAÑOS EN PLACAS ACTIVAS CON ÍNDICES BASADOS EN ELIPSES DE CONFIANZA GAUSSIANAS OBTENIDAS DE LA ADMITANCIA ELECTROMECAÁNICA	22
2.1 Introducción	22
2.2 Fundamentos teóricos.....	25
2.2.1 Impedancia electromecánica (EM) acoplada para transductores piezoeléctricos	25
2.2.2 Índices de daño basados en una distribución gaussiana normal ...	29
2.2.3 Estimación de la línea base de daño.....	32
2.2.4 Índices RMSD y MAPD para la técnica EMI.....	33
2.3 Montaje experimental.....	35
2.4 Resultados y discusión	37
2.4.1 Prueba 1: Identificación de daños superficiales con el índice EDI .	37
2.4.2 Prueba 2: Identificación de daños con diferentes índices (EDI, R_M y θ_N)	44

2.4.3	Prueba 3: Identificación de daños a partir de una línea de base probabilística.....	50
CAPÍTULO 3 DETECCIÓN DE DAÑOS EN PLACAS ACTIVAS MEDIANTE LA TÉCNICA DE IMPEDANCIA ELECTROMECÁNICA BASADA EN MEDICIONES DESACOPLADAS DE TRANSDUCTORES PIEZOELÉCTRICOS		
56		
3.1	Introducción	56
3.2	Fundamentos teóricos.....	60
3.2.1	Desacople de la impedancia electromecánica (EM) considerando un circuito en paralelo.....	60
3.2.2	Índice H_r , basado en una elipse de confianza gaussiana.....	63
3.3	Metodologías de detección de daños	64
3.3.1	Metodología de identificación de daños usando la reactancia (X)	64
3.3.2	Metodología de localización de daños mediante la resistencia (R)	67
3.4	Montaje experimental.....	70
3.5	Resultados y discusión	72
3.5.1	Identificación de los daños	72
3.5.2	Identificación y localización de daños	79
CAPÍTULO 4 DETECCIÓN DE PÉRDIDA DE TORQUE EN UNIONES PERNADAS USANDO LA TÉCNICA DE LA IMPEDANCIA ELECTROMECÁNICA.....		
89		
4.1	Introducción	89
4.2	Fundamentos teóricos.....	91
4.2.1	Técnica de impedancia electromecánica.....	91
4.2.2	Rango de frecuencia	91

4.3	Índices de identificación de pérdida de par o aflojamiento.....	91
4.4	Montaje experimental.....	92
4.5	Resultados y discusión	96
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES.....		102
PUBLICACIONES		104
REFERENCIAS.....		105
ANEXOS		115

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1.	Media y desviación estándar para los índices EDI, RMSD y MAPD (etapas I a IV).....	42
Tabla 2.2.	Variaciones de las direcciones principales β de las señales suavizadas	47
Tabla 2.3.	Incremento de los índices desde la etapa I hasta la III	48
Tabla 3.1.	Dimensiones de las placas experimentales	71
Tabla 3.2.	Cálculo del R-cuadrado y de la suma de los residuos para los modelos aproximados a la Ecuación (3.10).....	82
Tabla 3.3.	Relación entre R_i y d	83
Tabla 3.4.	Modelos aproximados para R_i	84
Tabla 4.1.	Par de apriete de los pernos	94
Tabla 4.2.	Ventanas de frecuencia para la comparación del índice RMSD	96

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Representación esquemática de un sistema genérico de SHM, compuesto por sensores activos, concentradores de datos, comunicación inalámbrica y una unidad central de SHM. Tomada de (Giurgiutiu, 2014c)	14
Figura 2.1. a. Combinación en serie del circuito RLC (resistencia R , inductancia L y capacitancia C). b. Triángulo de impedancia para circuito RLC	26
Figura 2.2. a. Impedancia eléctrica de un transductor piezoeléctrico unido a una estructura. b. Sistema electromecánico acoplado de un grado de libertad (C. Liang et al., 1994b)	28
Figura 2.3. a. Elipses de error obtenidas a partir de la matriz de covarianza. b. Elipse probabilística	31
Figura 2.4. a. Montaje experimental. b. Probetas para los ensayos.....	36
Figura 2.5. Dimensiones y daños en las muestras	37
Figura 2.6. a. G_A , b. B_A , c. G_B , d. B_B	39
Figura 2.7. Elipses para: a. $G_{0A} G_A$, b. $G_{0B} G_B$, c. $B_{0A} B_A$, d. $B_{0B} B_B$	40
Figura 2.8. Comparación de índices para: a. $G_0 G_i$ PZT A, b. $G_0 G_i$ PZT B, c. $B_0 B_i$ PZT A, d. $B_0 B_i$ PZT B	41
Figura 2.9. a. Variación para dG_i . b. Variación para dB_i	44
Figura 2.10. a. $G_i, \forall i=0, 1, 2$. b. $B_i, \forall i=0, 1, 2$. c. Elipses de G_i . d. Elipses de B_i	45
Figura 2.11. a. Comparación de los índices determinados a partir de G_B . b. Comparación de los índices determinados a partir de B_B . c. Índice R_M . d. Índice θ_M	49
Figura 2.12. Índices probabilísticos para: a. G_A , b. G_B , c. B_A , d. B_B	51

Figura 2.13. Índice probabilístico EDI para la identificación de daños. a. $\phi_{est} = 5\%$, b. $\phi_{est} = 3\%$	52
Figura 3.1. a. Equivalencia eléctrica de la impedancia eléctrica acoplada. b. Equivalencia mecánica del sistema estructura-piezotransductor acoplado.....	61
Figura 3.2. Procedimientos de identificación de daños	66
Figura 3.3. Procedimiento de localización de daños	67
Figura 3.4. Montaje experimental	70
Figura 3.5. a. Impedancia eléctrica del PZT acoplado a la placa (sin daños). b. Impedancia eléctrica del PZT libre	72
Figura 3.6. Estructura sin daños: a. Resistencia. b. Reactancia. Estructura con daños, perforada $1/32$ in: c. Resistencia d. Reactancia.....	74
Figura 3.7. Estructura sin daños: a. Resistencia desacoplada. b. Reactancia desacoplada. Estructura con daños, perforada $1/32$ in: c. Resistencia desacoplada. d. Reactancia desacoplada.....	76
Figura 3.8. Índice H_r de: a. Reactancia acoplada. b. Reactancia desacoplada... 77	
Figura 3.9. Homogeneización de datos con funciones gaussianas para $R_s^R(\omega)$ y $R_s^M(\omega)$. a. $1/32$ in. b. $5/64$ in.....	81
Figura 3.10. Modelo de daño previsto a partir de a. $1/32$ in y b. $5/64$ in	82
Figura 3.11. Validación de la localización de daños mediante la metodología de la sección 3.2	87
Figura 4.1. Espécimen de prueba con la vista explosionada de un perno.....	93
Figura 4.2. Montaje experimental propuesto	94

Figura 4.3. a. Adquisición de las señales de la EI. b. Proceso de apriete de los pernos	95
Figura 4.4. Diagrama de flujo del proceso experimental	95
Figura 4.5. Señales de impedancia $Z_p(\omega)$ obtenidas de los cinco pernos.....	97
Figura 4.6. Señales de conductancia $G_p(\omega)$ obtenidas de los cinco pernos	98
Figura 4.7. Índice RMSD para: $G_1 G_i \quad \forall i = 2,3,\dots,5$	99
Figura 4.8. Correlación de pérdida de torque contra RMSD.....	100

RESUMEN

En esta tesis se presenta el uso de la técnica de impedancia electromecánica para la detección y localización de daños en estructuras activas bajo un enfoque de monitoreo estructural mediante pruebas experimentales. Dado que las señales obtenidas de las pruebas experimentales suelen presentar ruidos y grandes dispersiones, estas se homogenizan mediante las funciones de distribución normal, lo que permite estimar diferentes índices escalares para establecer la detección, cuantificación y localización de los daños cuando se comparan las señales capturadas de la estructura sin daño, denominada señal de referencia, con las de la estructura afectada por los daños, denominada señal de monitoreo. Se proponen tres pruebas experimentales en las que se inducen diferentes tipos de daño a las estructuras activas, y se usan transductores piezoeléctricos y un analizador de impedancia para detectar la presencia del daño, cuantificar su severidad y determinar su localización. En la primera prueba, los daños inducidos son marcas y perforaciones practicadas en el material de la estructura, con dimensiones controladas. La segunda prueba se realiza controlando dos tamaños para las perforaciones y cuatro distancias entre estas y el parche piezoeléctrico. Las mediciones de impedancia eléctrica son desacopladas tanto antes como después de inducir los daños en la estructura activa. En la última prueba, el daño estructural se formula como la pérdida de torque de apriete en uniones pernadas. Se encontró que los índices estadísticos usados son criterios adecuados para determinar la presencia del daño en la estructura, así como su severidad y su localización con respecto a la del transductor piezoeléctrico. Esto se concluye al observar las diferencias entre los índices calculados a partir de mediciones de impedancia eléctrica en la estructura intacta con respecto a las mediciones realizadas después de inducir daños en diferentes etapas y ubicaciones.

ABSTRACT

This thesis presents the use of the electro-mechanical impedance technique for the detection and localization of damage in active structures under a structural monitoring approach by means of experimental tests. Since the signals obtained from experimental tests usually present noises and large dispersions, these are homogenized by means of normal distribution functions, which allows estimating different scalar indices to establish the detection, quantification and localization of damage when comparing the signals captured from the undamaged structure, called reference signal, with those from the structure affected by damage, called monitoring signal. Three experimental tests are proposed in which different types of damage are induced to active structures, and piezoelectric transducers and an impedance analyzer are used to detect the presence of damage, quantify its severity, and determine its location. In the first test, the induced damages are marks and holes drilled in the material of the structure, with controlled dimensions. The second test is performed by controlling two sizes for the perforations and four distances between the perforations and the piezoelectric patch. Electrical impedance measurements are decoupled both before and after inducing damage to the active structure. In the last test, structural damage is formulated as the loss of tightening torque in bolted joints. It was found that the statistical indices used are adequate criteria to determine the presence of damage in the structure, as well as its severity and its location with respect to that of the piezoelectric transducer. This is concluded by observing the differences between the indices calculated from electrical impedance measurements on the undamaged structure with respect to measurements made after inducing damage at different stages and locations.

CAPÍTULO 1 PRESENTACIÓN

El monitoreo del estado estructural (SHM, por sus iniciales en inglés) se usa en la evaluación de la pérdida de integridad de una estructura. Los tipos de SHM que existen son el SHM pasivo y el SHM activo, de los cuáles solo el SHM activo permite detectar la presencia de daños, así como su alcance en la estructura. Este enfoque se asemeja al de las metodologías de evaluación no destructiva, avanzando un poco más al buscar el desarrollo de sensores que puedan ser instalados permanentemente en la estructura para detectar los daños, además de métodos de monitoreo capaces de entregar informes del estado de la estructura por demanda, como se muestra en la Figura 1.1 (Giurgiutiu, 2014c).

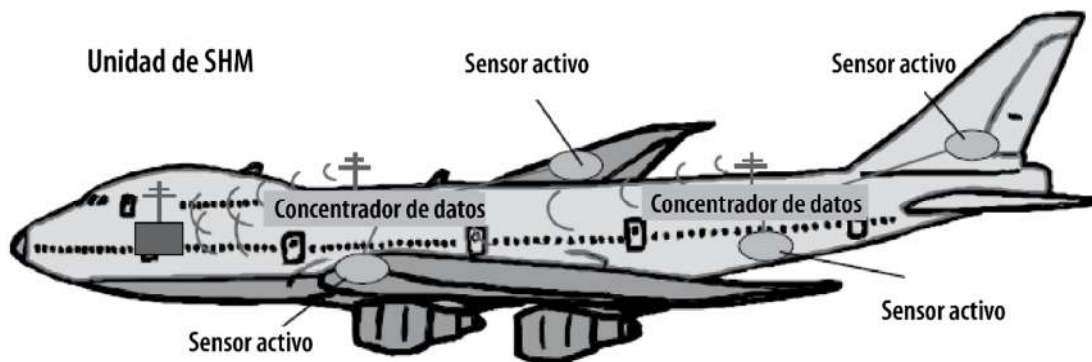


Figura 1.1. Representación esquemática de un sistema genérico de SHM, compuesto por sensores activos, concentradores de datos, comunicación inalámbrica y una unidad central de SHM. Tomada de (Giurgiutiu, 2014c)

Un daño estructural se puede entender como una imperfección que afecta el comportamiento de una estructura, o como un cambio en las propiedades de los materiales que conforman la estructura, o de sus factores estructurales, los cuales pueden sufrir cambios como consecuencia de fenómenos como corrosión, fatiga o plastificación del material (Chou & Ghaboussi, 2001; Uhl et al., 2013). Estos daños afectan las propiedades mecánicas y dinámicas de las estructuras y pueden ser

causados bien por factores ambientales o humanos a los cuáles están expuestas las estructuras (Chou & Chang, 2022).

Un daño estructural puede ser definido como un cambio que afecta el funcionamiento y el rendimiento de las estructuras y está asociado con variaciones geométricas o de propiedades mecánicas de una estructura. Las técnicas de detección de daño están basadas principalmente en el estudio de las modificaciones de los parámetros modales de una estructura, como: frecuencias naturales, formas y amortiguamiento modal, debido a que estos son funciones de los parámetros físicos, como: masa, rigidez y amortiguamiento, por lo tanto, cuando existe daño en una estructura, las propiedades modales cambian, debido a que sus parámetros físicos también lo hacen (Pavelko et al., 2011).

El efecto de un daño estructural también está asociado con los cambios de las propiedades dinámicas de una estructura y pueden ser efectivamente definidos a frecuencias ultrasónicas, mediante la identificación de la impedancia electromecánica (EMI, por sus iniciales en inglés), (Giurgiutiu, 2014a).

La impedancia electromecánica es un método de monitoreo estructural que usa los transductores piezoeléctricos de oblea (PWAS, por sus iniciales en inglés), relacionando la impedancia mecánica de la estructura evaluada con la impedancia eléctrica medida en los transductores, de manera que el espectro de resonancia mecánica de la estructura se ve reflejado en un espectro casi idéntico de la parte real de la impedancia electromecánica medida en los transductores piezoeléctricos (Giurgiutiu, 2014b). Así, se aprovecha el acoplamiento electromecánico, asociando la respuesta eléctrica del transductor piezoeléctrico con la impedancia mecánica de la estructura evaluada, permitiendo una medición indirecta de los cambios en la impedancia mecánica de la estructura, sorteando las dificultades para realizar una medición directa de esta variable, que entrega información de las propiedades estructurales del sistema mecánico (Martowicz & Rosiek, 2013).

1.2 Justificación

El surgimiento de sistemas de medición confiables y eficientes para el monitoreo estructural ha estado motivado por la necesidad de realizar una operación segura y un mantenimiento de las estructuras, además de los requerimientos en el cumplimiento de regulaciones recientes ([Khadour & Waeytens, 2018](#)).

En los últimos años, el desarrollo del área correspondiente al monitoreo de sistemas y estructuras para preservar su integridad estructural (SHM) ha atraído a un gran número de investigadores académicos e industriales, ([Inman et al., 2005](#)), y ha permitido a las estructuras y sistemas monitorear su propia integridad mientras se encuentran en estado operativo, con el objetivo de evitar catástrofes y reducir los costos y tareas de mantenimiento. El foco de atención ha sido puesto en el monitoreo de la integridad estructural (SHM) basado en vibraciones, ya que los desarrollos de herramientas de detección son útiles para las comunidades vinculadas a la ingeniería civil, aeronáutica y mecánica.

Los daños en estructuras son la causa principal de fallas en la funcionalidad y servicio de las estructuras, sin embargo, los métodos de detección convencionales están lejos de ser predictivos mientras las estructuras se encuentran en funcionamiento. Varios desarrollos de técnicas han sido implementados para detectar cambios en las propiedades intrínsecas de la estructura, como parámetros modales.

En general, se han identificado cuatro estados principales de daño ([Tawie & Lee, 2010](#)):

- la determinación de la presencia de daño.
- la localización del daño.
- La intensidad de daño.
- el pronóstico de servicio.

Los tres primeros estados de daño representan el 75% de los principales efectos de los daños. Por lo tanto, los esfuerzos investigativos están centrados en estas áreas principalmente. Extensivos estudios han sido propuestos por (Doebbling et al., 1996) y otros revisados por (Giurgiutiu et al., 2016) en SHM aplicados a la detección de daños. Estos estudios han impactado directamente algunos sectores industriales (ingeniería civil y mecánica) para resolver dos de los primeros estados principales de daño.

El uso del método de la impedancia electromecánica ofrece varias ventajas con respecto a otros métodos, al medir directamente la impedancia electromecánica, a través del acoplamiento mecánico entre el transductor piezoeléctrico y la estructura evaluada, aprovechando que la impedancia estructural en el punto de medición se refleja directamente en la impedancia eléctrica medida en los terminales del transductor piezoeléctrico (Giurgiutiu, 2014b).

1.3 Planteamiento del problema

El mantenimiento correctivo de instalaciones e infraestructura, además del envejecimiento de estructuras, es un problema que causa preocupación, debido a los elevados costos relacionados con estos fenómenos (Giurgiutiu, 2014c). Adicionalmente, mientras que las tecnologías de monitoreo estructural abren la puerta para el mantenimiento basado en condición mediante el monitoreo frecuente o incluso continuo de las estructuras, su implementación se puede ver obstaculizada por limitaciones técnicas y de conocimiento en algunos tipos de estructuras (Ren et al., 2017). Los requerimientos actuales de la industria hacen indispensable la digitalización y capacidad de aprendizaje de las máquinas. Teniendo esto en cuenta, las tecnologías apuntan a la creación de sensores que puedan responder a diferentes condiciones ambientales como la temperatura y la humedad, entre otros, y mecánicas como tensión, flexión y cortante. Se sabe que la oposición al paso de corriente eléctrica en el sistema de monitoreo se ve afectada por los cambios en las propiedades mecánicas de la estructura, lo que hace posible el monitoreo de

integridad de la estructura a través de la técnica de la impedancia electromecánica ([Hamdan et al., 2019](#)).

Las tendencias actuales, tanto en construcción de estructuras civiles, como de maquinaria, exigen sistemas mediante los cuales se pueda monitorear en tiempo real la integridad de la estructura, con lo cual de optimizar actividades tanto de diseño como de mantenimiento de dichas estructuras.

En la última década, el desarrollo del monitoreo la integridad estructural (SHM) se ha disparado debido a las graves consecuencias que vienen con fallas estructurales. Las técnicas de detección de daños tradicionales, también conocidas como detección de daños locales, tales como la inspección visual y pruebas de ultrasonido, se han implementado desde mediados del siglo 20. Sin embargo, estas técnicas requieren conocimientos previos acerca de la localización de posibles daños y de equipos voluminosos. Con el desarrollo de la tecnología de los sensores piezoeléctricos, surgió la técnica de la impedancia electromecánica. Esta técnica evalúa el estado de la integridad de una estructura mediante la comparación de la línea base de la señal sin daño con la señal de daño y permite a los usuarios acceder de forma remota a la estructura, pero pierde su sensibilidad cuando el daño es significativo.

Para conservar la fiabilidad y seguridad de las estructuras, se realizan inspecciones costosas diariamente como parte del mantenimiento regular ([Olivier Cherrier et al., 2013](#)), lo que hace que el costo de operación de estas sea muy alto. Por lo tanto, la identificación de daños en estructuras es un área ampliamente estudiada en la actualidad. El uso de las técnicas convencionales como rayos x y pruebas de ultrasonido no son practicas o son muy costosas para grandes componentes como puentes y aviones por lo que la técnica de la impedancia electromecánica y su aplicación en línea hacen que esta técnica sea de gran interés para su estudio.

1.4 Antecedentes

En los últimos años los transductores piezoeléctricos han incrementado su popularidad en diferentes áreas de la mecánica estructural debido a las diversas aplicaciones que han sido encontradas en las estructuras civiles (Tawie & Lee, 2010), estructuras aeroespaciales (Staszewski et al., 2009), sistemas mecánicos, entre otras aplicaciones. Esto se debe a la capacidad que tienen los materiales piezoeléctricos para convertir energía mecánica en energía eléctrica y viceversa. Los transductores piezoeléctricos son pegados o integrados a las estructuras por medio de uniones adhesivas; estas uniones proporcionan el acoplamiento mecánico entre la estructura y el transductor piezoeléctrico (Tinoco et al., 2010), y ellos deben mantenerse unidos a éstas, para garantizar la aplicación de diferentes técnicas. Los transductores piezoeléctricos miden la respuesta dinámica local cuando son usados como sensores y deforman la estructura cuando son usados como actuadores. Bajo ciertas condiciones estructurales, estas mediciones y excitaciones pueden ser aplicadas para obtener información de la estructura y de esta forma utilizar algunas metodologías de monitoreo estructural, de aquí se deriva el nombre de estructura inteligente o activa ya que una estructura tiene la capacidad de obtener información y modificar su estado dinámico.

El monitoreo de la integridad estructural ha sido reconocido como una poderosa herramienta para mejorar la seguridad y la confiabilidad de la operatividad estructural con el objetivo de reducir los costos operacionales de las estructuras derivados de las actividades de mantenimiento. Muchas técnicas de monitoreo estructural han sido propuestas y desarrolladas para determinar, cuantificar y localizar daños (Kessler & Spearing, 2002). Algunas técnicas de monitoreo han mostrado que desastres aeronáuticos (accidente del Boeing 737 de Aloha Airlines en abril 28 de 1998) y civiles (colapso del puente in Minneapolis el 1 de agosto de 2007 en el estado de Minnesota en los Estados Unidos de América) pudieron ser prevenidos con las técnicas de detección de daño estructural desarrolladas actualmente. Una gran ventaja que proponen la técnicas de monitoreo de

estructuras es la disminución de costos del mantenimiento preventivo y predictivo, por ejemplo, los Estados Unidos de América gastan 200.000 millones de dólares cada año en el mantenimiento de plantas, equipos e instalaciones industriales (Giurgiutiu, 2014a) y el mantenimiento de las aeronaves comerciales representa el 25% del costo operacional aeronáutico (Giurgiutiu, 2014a). Es importante mencionar que la mayoría de las técnicas de detección expuestas en la literatura no han sido implementadas sobre las estructuras en estado operacional, por lo tanto, la comunidad científica está interesada en resolver muchos desafíos de esta área.

Con las tecnologías de transductores piezoeléctricos se han desarrollado 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 (Pandey et al., 1991; Zimmerman & Kaouk, 1994), técnicas de emisión acústica (Kessler & Spearing, 2002), técnicas de propagación de ondas Lamb (Ng & Veidt, 2009), técnicas con la impedancia electromecánica (EMI) de los piezo transductores (Annamdas & Soh, 2007; Panigrahi et al., 2010; Tinoco & Serpa, 2011). Sin embargo, las técnicas más estudiadas son la técnica EMI y la técnica de propagación de ondas Lamb, debido a que presentan mayores ventajas respecto de las otras (Giurgiutiu, 2014c). Estas herramientas todavía están en etapa de estudio y necesitan de un amplio espectro de investigación, ya que existe una gran dependencia de las técnicas desarrolladas para SHM con los transductores piezoeléctricos.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Identificar y localizar daños en estructuras activas con la técnica de la impedancia electromecánica (EMI) mediante el diseño de índices de daño.

1.5.2 Objetivos específicos

- Obtener señales confiables de impedancia electromecánica de transductores piezoeléctricos.
- Diseñar y realizar experimentos para la obtención de las señales de impedancia electromecánica de los especímenes de estudio.
- Analizar y sintetizar las diferencias en las señales de impedancia eléctrica de las estructuras activas.
- Aplicar técnicas probabilísticas y estadísticas para establecer una métrica de identificación y localización de daños en estructuras activas.

1.6 Estructura de la tesis

En los posteriores capítulos se expone el uso de la técnica de impedancia electromecánica (EMI) para la identificación y localización de daños en estructuras activas, bajo un enfoque de monitoreo estructural. En CAPÍTULO 2 se usan índices estadísticos para cuantificar los daños definidos como modificaciones estructurales practicadas en placas de acero inoxidable. En tres ensayos, se obtienen las mediciones de impedancia eléctrica antes y después de inducir los daños a la estructura. las mediciones de impedancia se realizan con transductores piezoeléctricos y un analizador de impedancia, en diferentes etapas de daño y niveles de adherencia del transductor (PZT) a la estructura. El uso de señales desacopladas de reactancia para la identificación de daños en placas se expone en el CAPÍTULO 3, en el que se explica el cálculo de un índice basado en estadística, por medio del cual se compara la reactancia de referencia (medida en la estructura sin daño) con las reactancias de monitoreo (medidas en diferentes etapas de daño). Por último, en el CAPÍTULO 4 se asume el daño estructural como la pérdida de torque de apriete en uniones pernadas, el cual se detecta por medio de la técnica de impedancia electromecánica (EMI).

CAPÍTULO 2

IDENTIFICACIÓN DE DAÑOS EN PLACAS ACTIVAS CON ÍNDICES BASADOS EN ELIPSES DE CONFIANZA GAUSSIANAS OBTENIDAS DE LA ADMITANCIA ELECTROMECAÁNICA

2.1 Introducción

En el monitoreo de la integridad estructural (SHM, por sus iniciales en inglés) han surgido diferentes técnicas para detectar, cuantificar, localizar y clasificar varias categorías de daños en las estructuras. La técnica de impedancia electromecánica (EMI, por sus iniciales en inglés), ha sido una fuerte opción para aportar al campo de la identificación de daños, porque es fácil de implementar experimentalmente, aunque, por otro lado, es muy exigente en cuanto a la instrumentación. La amplia aplicación de esta técnica se atribuye al hecho de que los cambios estructurales pueden ser captados en la impedancia eléctrica (EI, por sus iniciales en inglés) de los transductores piezoeléctricos (PZT, por sus iniciales en inglés) cuando estos se adhieren a las estructuras. Se sabe que la técnica EMI está acoplada a los parámetros mecánicos del sistema estructura-PZT fijo, como la rigidez, la masa y el amortiguamiento (Giurgiutiu, 2014a). Los fenómenos de acoplamiento fueron explicados por (Xu & Liu, 2002). La técnica de EMI tiene un gran potencial de aplicaciones en monitoreo de estructuras (Annamdas & Soh, 2010; Giurgiutiu & Rogers, 1997; Gresil et al., 2012).

Los PZT han comenzado a aumentar su reputación en diferentes áreas de la mecánica estructural en las últimas décadas, ya que pueden ser utilizados como sensores y como actuadores en estructuras (Giurgiutiu et al., 1999; Liu et al., 2006; Pavelko et al., 2011; Pereira & Serpa, 2015). Cuando un PZT se adhiere a una estructura, las impedancias mecánicas se incrustan en la impedancia eléctrica del PZT. Este principio ya ha sido descrito (Liang et al., 1994b). Sobre un modelo electromecánico simple, se ha demostrado que el fenómeno de acoplamiento EM correlaciona las propiedades mecánicas de ambas subestructuras cuando estas tienen una interfaz común. El modelo muestra que cuando un PZT actúa como actuador (tensión aplicada-campo eléctrico), deforma la estructura y es capaz de

leer la respuesta estructural en forma de corriente (Liang et al., 1996). En la técnica EMI, la respuesta espectral del PZT se visualiza a través de la impedancia eléctrica en espectros de alta frecuencia (> 10 kHz). Esta condición es necesaria porque las frecuencias de resonancia de un PZT se estimulan en este rango. Las señales eléctricas (voltaje-entrada/corriente-salida) se relacionan para obtener la admitancia eléctrica (el inverso de la impedancia eléctrica). Una descripción detallada sobre las aplicaciones y una base teórica se describe en (Adams, 2007; Giurgiutiu & Rogers, 1997; Xu & Liu, 2002). La aplicación de la técnica EMI presenta algunas ventajas sobre otras técnicas de detección basadas en SHM, siendo las más relevantes la rápida respuesta dinámica, la durabilidad a largo plazo, el despreciable envejecimiento, la alta sensibilidad y la inmunidad al ruido ambiental (Naidu, 2004).

Para identificar una modificación o daño estructural con los PZT, los cambios en la impedancia eléctrica pueden ser cuantificados mediante índices estadísticos o probabilísticos (Rosiek et al., 2010; Tinoco & Marulanda, 2014; Tseng & Naidu, 2002). Los cambios indican que las condiciones iniciales de la estructura fueron modificadas, y estos pueden ser evidenciados a través de los índices de daño (Ai et al., 2014; Moharana & Bhalla, 2015; Xu & Liu, 2002). Los índices de daño ayudan a establecer una clasificación de los cambios estructurales que en algunos casos pueden determinar la intensidad del daño (Pavelko et al., 2014; Tseng & Naidu, 2002). La mayoría de los índices se basan en principios estadísticos básicos; por ejemplo, la media, la raíz de la media cuadrática (RMS), la desviación cuadrática media (RMSD), la desviación porcentual absoluta media (MAPD), la desviación del coeficiente de correlación (CCD), entre otros (Giurgiutiu & Kropas-Hughes, 2003; Giurgiutiu & Zagrai, 2005; Park et al., 2003; Tawie & Lee, 2010; Tseng & Naidu, 2002). Sin embargo, los índices no son procesados convencionalmente con un tratamiento numérico refinado, por lo que existe la oportunidad de explorar diferentes alternativas para establecer métricas de daño (Pereira & Serpa, 2015; Tinoco & Marulanda, 2014).

En términos prácticos, no es una tarea fácil medir la impedancia eléctrica de los PZT, ya que es necesaria una instrumentación electrónica que garantice las mediciones de tensión y corriente en el mismo periodo. Sin embargo, existen muchas opciones para obtener mediciones fiables a partir de dispositivos electrónicos, como por ejemplo el medidor de LCR de precisión *Agilent E4980A* ([Keysight Technologies, 2021](#)), y los analizadores de impedancia *Precision Impedance Analyzer 6500B series* ([Wayne Kerr Electronics, n.d.](#)) y *HP 4192A* ([Hewlett Packard, 1996](#)). También se han desarrollado diferentes técnicas para medir la impedancia eléctrica, como el analizador de transformada rápida de Fourier (FFT) y el circuito de medición de pequeñas corrientes desarrollado por ([Peairs, Grisso, et al., 2004](#)). Estos dispositivos son más comunes y menos costosos que los analizadores de impedancia ([Peairs, Park, et al., 2004](#)). Además, esta alternativa tiene la ventaja de ser portátil y poder ser implementada fácilmente en un chip de computadora gracias a su tamaño. Una excelente opción es utilizar el circuito integrado *AD5933* desarrollado en 2005 por *Analog Devices*. Este circuito integrado permite el análisis directo de frecuencias inferiores a 100 kHz ([Analog Devices, 2014](#)). El sistema es adecuado para realizar espectroscopia de alta impedancia en el rango de 10–100 kHz. El software de comunicación es amigable y fácil de usar. En términos de coste, es una gran elección porque es barato. Por esta razón, se eligió el circuito integrado *AD5933* para medir la impedancia eléctrica y la fase en esta investigación. Algunas aplicaciones de la espectroscopia de impedancia con este analizador pueden verse en ([Berney & O’riordan, 2008](#); [Ferreira et al., 2010](#)).

Este capítulo presenta un análisis experimental para identificar el daño estructural con índices basados en elipses de confianza gaussianas calculadas a partir de la admitancia electromecánica de los PZT. El daño en este estudio se define como una modificación estructural (daño causado por una perforación). Se propone el uso de índices de daño para identificar las modificaciones estructurales de una placa activa (placa con PZT adherido). Se realizan tres pruebas experimentales para evaluar la viabilidad de los índices en un proceso de

identificación de daños. En cada prueba se representa una métrica de daño junto con la conductancia (G) y la susceptancia (B), que fueron analizadas desde diferentes puntos de vista. Los índices se diseñan con elipses gaussianas obtenidas a partir de la matriz de covarianza, la cual se calcula por medio de las mediciones de referencia y de monitoreo determinadas a partir de las distribuciones de admitancia que se suponen normales. Además, se establece un procedimiento para estimar las elipses probabilísticas para una estructura sin daños, con el objetivo de crear una línea base de alerta antes de que se produzca una modificación estructural.

2.2 Fundamentos teóricos

2.2.1 Impedancia electromecánica (EM) acoplada para transductores piezoeléctricos

La impedancia eléctrica $Z_p(\omega)$ de un circuito eléctrico se refiere a la oposición que hace a la corriente $i(\omega)$ cuando se aplica un voltaje armónico $V(\omega)$. Esto implica que existe una relación única entre ellos. En el espectro de frecuencias, un circuito eléctrico es una combinación de resistencia eléctrica (R), reactancia inductiva (X_L , inductancia L) o reactancia capacitiva (X_C , capacitancia C) conectadas entre sí, como se muestra en la Figura 2.1a. Las constantes eléctricas (R , L y C) actúan como un vector en el ancho de banda de frecuencias y, por lo tanto, es posible establecer un triángulo de impedancia, como se representa en la Figura 2.1b (Watkins & Kitcher, 2006), tal que ϕ es la fase y $Z_p(\omega)$ es la magnitud. Dependiendo de la dirección del vector, se puede observar la naturaleza del circuito. Así se pueden tener circuitos inductivos, circuitos capacitivos, circuitos resistivos, o una combinación de todos ellos. En un circuito se percibe que las propiedades intrínsecas no cambian y son independientes de la entrada de tensión y la salida de corriente o viceversa. Para simplificar la explicación

de la impedancia eléctrica, se puede mencionar que es una medida de la resistencia equivalente en un circuito, en el espectro de frecuencias. Se puede encontrar una explicación detallada en (Moharana & Bhalla, 2015).

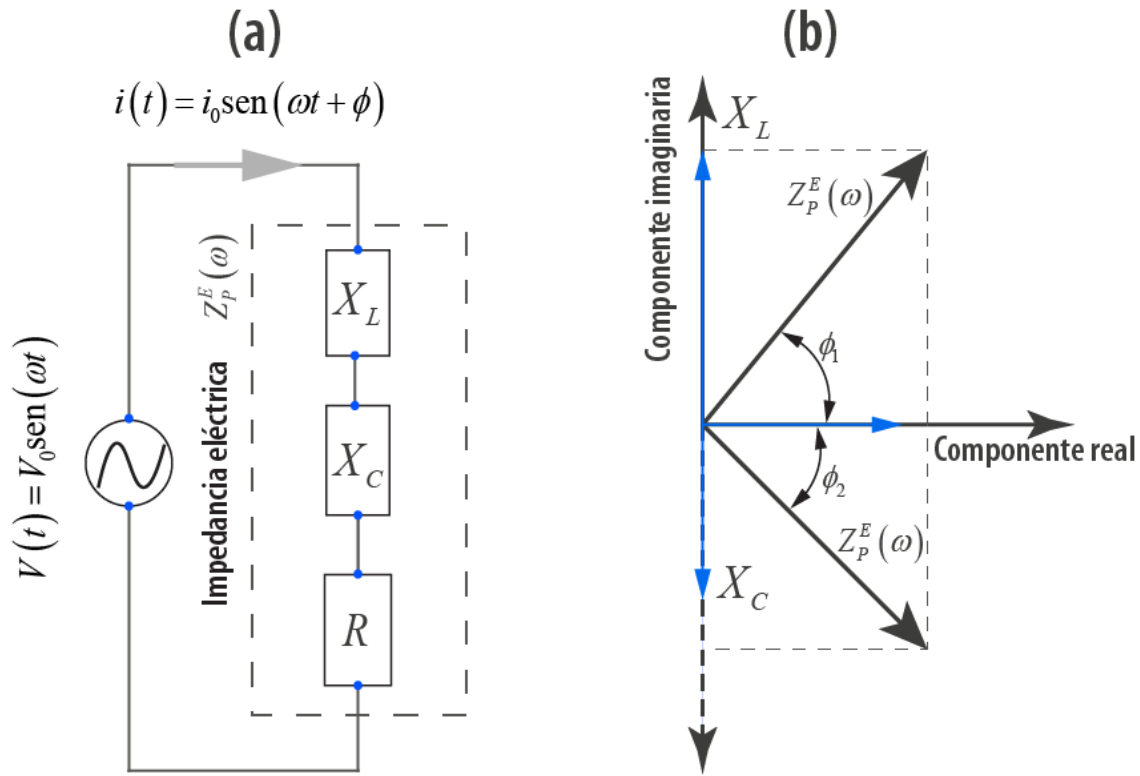


Figura 2.1. a. Combinación en serie del circuito RLC (resistencia R , inductancia L y capacitancia C). b. Triángulo de impedancia para circuito RLC

Los PZT tienen propiedades eléctricas que son aprovechadas por el fenómeno electromecánico. Estas propiedades ayudan a producir carga eléctrica cuando el PZT se deforma o cuando se le aplica un campo eléctrico para deformarlo (Tinoco & Serpa, 2012). Un PZT puede actuar como un circuito eléctrico abierto o como un cortocircuito. (Sirohi & Chopra, 2000). En consecuencia, si un PZT se conecta a un circuito, se le pueden aplicar todas las operaciones de la teoría de circuitos y se puede representar por medio de una resistencia y una capacitancia (Sirohi & Chopra, 2000). Esto significa que no hay inductancia en el circuito del PZT. Así, la admitancia eléctrica $Y_p^E(\omega)$ en un PZT, donde el superíndice E hace

referencia al dominio eléctrico, es la relación entre la corriente $i(\omega)$ y la tensión $V(\omega)$ que lo atraviesa. $Y_p^E(\omega)$ está compuesta por una parte real G y una parte imaginaria B llamadas conductancia y susceptancia. La inversa de $Y_p^E(\omega)$ es la impedancia eléctrica $Z_p^E(\omega)$, como se describe a continuación

$$Y_p^E(\omega) = \frac{i_0(\omega)}{V_0(\omega)} = \frac{1}{Z_p^E(\omega)} = \frac{1}{R + Xj} = G + Bj, \quad (2.1)$$

donde ω es la frecuencia y X es la reactancia. En este capítulo, el subíndice P hace referencia a variables del PZT. Las constantes interiores de G y B del PZT pueden determinarse mediante una identificación de parámetros.

En la Figura 2.2a se muestra un modelo simple que acopla un sistema mecánico con un sistema eléctrico. (Liang et al., 1994b) determinaron el acoplamiento de la admitancia electromecánica del sistema dinámico mostrado en la Figura 2.2b, y obtuvieron primero la admitancia eléctrica para el modelo unidimensional como sigue

$$Y_p^E(\omega) = \frac{2\omega j w_p}{h_p} \left[\bar{e}_{33} - d_{31}^2 \bar{y}^E + \left(\frac{Z_p^M(\omega)}{Z_p^M(\omega) + Z_S^M(\omega)} \right) d_{31}^2 \bar{y}^E \left(\frac{\tan(kl_p)}{kl_p} \right) \right], \quad (2.2)$$

donde, h_p es el espesor y w_p es el ancho del PZT, d_{31} es el coeficiente de deformación piezoeléctrica correspondiente a las coordenadas $x-z$, a las que hacen referencia los subíndices 1-3. El superíndice M hace referencia al dominio mecánico; el subíndice S indica variables de la estructura monitoreada. El módulo de Young complejo del PZT a campo eléctrico constante es $\bar{y}^E = y^E(1 + \eta)$ y la permitividad eléctrica compleja del material PZT a tensión constante es $\bar{e}^\sigma = e^\sigma(1 + \delta)$. η y δ denotan los factores de pérdida mecánica y pérdida dieléctrica. k es el número de onda y viene dado por

$$k = \omega \sqrt{\frac{\rho}{\bar{Y}^E}}, \quad (2.3)$$

donde ρ es la densidad del material piezoeléctrico, ω es la frecuencia angular y $Z_P^M(\omega)$ es la impedancia mecánica del PZT, que se puede calcular mediante

$$Z_P^M(\omega) = \frac{kh_p \bar{Y}^E w_p}{j\omega \tan(kl_p)}. \quad (2.4)$$

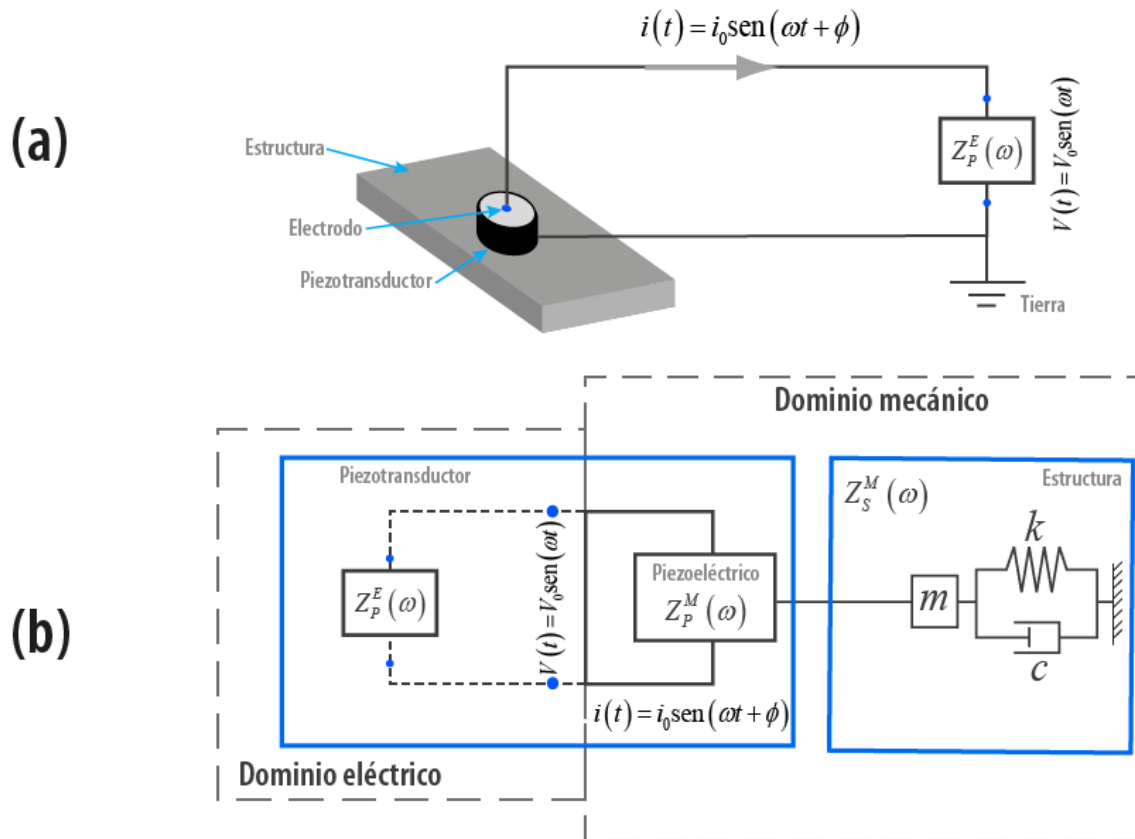


Figura 2.2. a. Impedancia eléctrica de un transductor piezoeléctrico unido a una estructura. **b.**

Sistema electromecánico acoplado de un grado de libertad (C. Liang et al., 1994b)

El modelo obtenido por (Liang et al., 1994b) (Ver Ecuación (2.1)) fue modificado por (Xu & Liu, 2002), de tal manera que el nuevo modelo incluía la interfaz adhesiva entre la estructura y el PZT. El modelo fue representado por una constante. Sin embargo, se ha determinado que el valor de la constante de

acoplamiento depende del espectro de frecuencias (Tinoco & Serpa, 2011), aunque el modelo simple es ampliamente aceptado todavía y los efectos adhesivos sobre la EMI de los PZT son actualmente estudiados. En la estructura, $Z_S^M(\omega)$ representa la impedancia mecánica, que se da en términos de frecuencia como

$$Z_S^M(\omega) = \frac{K_S^M(\omega)}{j\omega}, \quad (2.5)$$

donde $K_S^M(\omega)$ es la rigidez dinámica de la estructura y está representada por

$$K_S^M(\omega) = \frac{F_S(\omega)}{X_S(\omega)}. \quad (2.6)$$

Por tanto, $F_S(\omega)$ es la fuerza aplicada y $X_S(\omega)$ es el desplazamiento de un punto de la estructura. En el análisis modal, la impedancia mecánica de un sistema está representada por $Z_{S_{ij}}^M(\omega)$, que es una matriz simétrica. La impedancia mecánica refleja las propiedades de un sistema de vibración lineal, similar a las frecuencias naturales y formas modales del sistema; por lo tanto, no dependen de las fuerzas externas. La dependencia puede ocurrir solo si el sistema dinámico tiene un comportamiento no lineal (fricción, vibro-impacto y entre otros). Una descripción detallada del análisis modal se puede encontrar en (Fu & He, 2001).

2.2.2 Índices de daño basados en una distribución gaussiana normal

La distribución normal o gaussiana es conocida en la teoría de la probabilidad, y representa una función que describe la probabilidad de que un dato real se encuentre entre determinados intervalos. Una función de distribución gaussiana es una curva en forma de campana que es simétrica respecto a la media y se representa como

$$N(\mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (2.7)$$

donde μ es la media, σ es la desviación estándar y x son los datos (Ribeiro, 2004). Para establecer un índice que correlacione dos medidas, se plantea el siguiente caso: considérese x_R como la medida base (que puede ser la medida de conductancia inicial G_0 o la de susceptancia inicial B_0), y x_M es otra medida llamada G_i y B_i , $\forall i=1,2,3,\dots,n$ (mediciones de monitoreo). Las funciones de distribución se calculan como N_R (referencia) y N_M (monitoreo) y se correlacionan con la matriz de covarianza, que se determina como

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \sigma_R^2 & \sigma_{RM} \\ \sigma_{MR} & \sigma_M^2 \end{bmatrix}, \quad (2.8)$$

donde σ_R^2 , σ_M^2 son las varianzas y σ_{RM} , σ_{MR} son las covarianzas. Por medio de la matriz de covarianza, se establece un problema de valores propios como

$$\mathbf{C}x = \lambda x, \quad (2.9)$$

donde λ representa los valores propios. Cuando se resuelve, los valores propios λ_{\min} y λ_{\max} pueden delimitar una elipse orientada en la dirección principal definida por los vectores propios $\lambda = \lambda_x \mathbf{i} + \lambda_y \mathbf{j}$ de los datos, donde \mathbf{i} y \mathbf{j} son vectores unitarios. Entonces, es posible determinar la dirección principal de los datos de la siguiente manera

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{\lambda_y}{\lambda_x} \right). \quad (2.10)$$

Para un dominio de confianza elíptico del 95%, es decir, una elipse de error de 1σ , es necesario aumentar los ejes principales, de forma que λ_{\min} y λ_{\max} se incrementen en un factor de $\alpha = 2.4477$ (chi cuadrado), como se observa en la Figura 2.3a, donde se muestra la elipse obtenida con los valores propios de la matriz de covarianza.

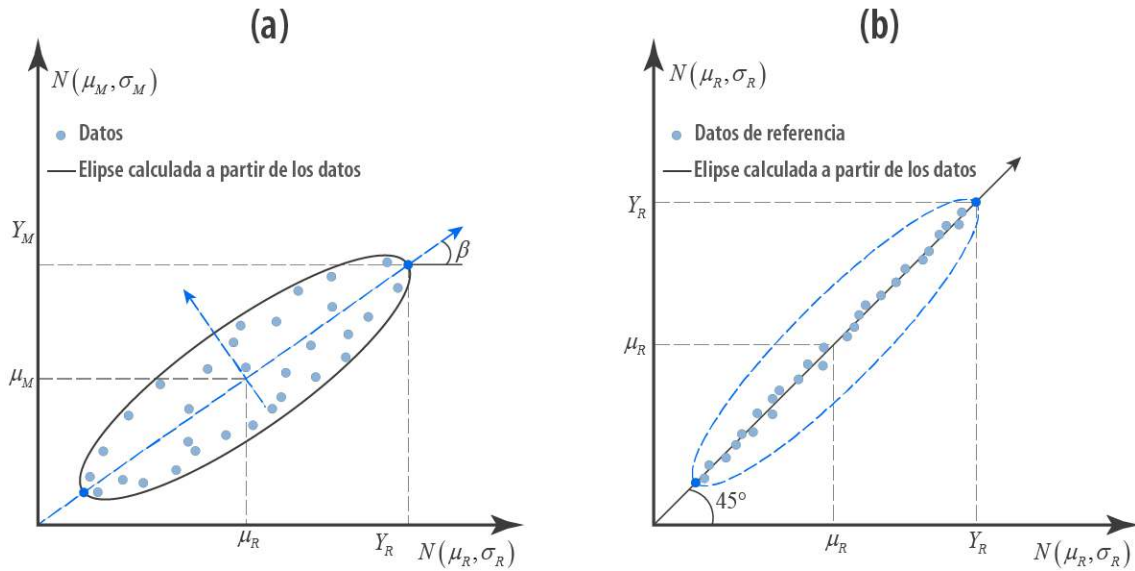


Figura 2.3. a. Elipses de error obtenidas a partir de la matriz de covarianza. b. Elipse probabilística

Para establecer un índice de daño a partir de la elipse, la siguiente expresión representará una métrica de daño en un espacio dimensional normalizado. El índice EDI se define como la relación entre el área de la elipse y el rectángulo máximo definido por los datos distribuidos normalmente (Tinoco & Marulanda, 2014), como sigue

$$EDI = 2.4477 \frac{\pi \lambda_{\min} \lambda_{\max}}{Y_R Y_M}, \quad (2.11)$$

siendo Y_R & Y_M los datos máximos de las distribuciones para las mediciones de referencia y de seguimiento. A partir de la dirección principal, se establece otra métrica de los daños y se propone el siguiente índice

$$\theta = 100 \frac{|\beta_M - \pi/4|}{\pi/4}, \quad (2.12)$$

donde β_M es el ángulo de la dirección principal de la medición de monitoreo. La siguiente expresión correlaciona los valores propios para determinar las variaciones de los datos con respecto a $\pi/4$. Ya que los valores propios dependen de las desviaciones estándar calculadas a partir de los datos, estos también pueden

correlacionarse mediante un índice que se basa en la relación de los valores propios y se define como

$$R_M = 100 \left| \frac{\lambda_{\min}}{\lambda_{\max}} \right|. \quad (2.13)$$

En esta sección se presentan tres índices diferentes como identificadores de daño, con el objetivo de evaluar la viabilidad en un caso concreto. Este trabajo se basa en una función de distribución utilizada habitualmente en la teoría de la probabilidad, concretamente en el uso de funciones de distribución normal y su correlación con una medida de referencia. Las funciones de distribución normal se utilizan en este estudio para homogeneizar los datos obtenidos de la admitancia, ya que estas medidas suelen ser ruidosas. Desde este punto de vista, las mediciones de admitancia pueden correlacionarse fácilmente, en concreto las mediciones de referencia y de monitoreo. Utilizando el procedimiento presentado en esta sección, se puede estimar una probabilidad de daño a partir de las elipses de error, así como calcular los índices de daño a partir de una medida de referencia, tal y como se ilustra en la Figura 2.3b. Esta afirmación se explicará en la siguiente sección.

2.2.3 Estimación de la línea base de daño

Como se ha explicado anteriormente (véase la sección 2.2.2), las elipses gaussianas se calculan a partir de las señales de admitancia. Sin embargo, no se puede establecer una línea base de daño a partir de estas señales si no se predice previamente un indicador de daños. Esto significa que podría emitirse una alerta de daño tomando como referencia una línea base (estructura sin daño), y en una etapa operativa, la estructura se monitorea constantemente en esos niveles. Para ello, se obtiene una medida de referencia de la estructura sin daño, de tal forma que se replica para calcular la medida de referencia (N_R) y la medida de monitoreo (N_M), que son básicamente las mismas señales ($N_R = N_M$). Con esta premisa, se determina la elipse mostrada en la Figura 2.3b, creando una función lineal (datos de referencia). Obsérvese que todos los datos se organizan en una dirección principal

orientada a 45° , pero la forma y orientación de la elipse cambiará si hay una modificación en los datos de monitoreo. $\lambda_{\max(\text{exp})}$ se obtiene en este paso y representa el eje mayor de la elipse, el cual se determinó con la matriz de covarianza como se explicó en la sección 2.2.2. En torno al valor de $\lambda_{\max(\text{exp})}$, se establece una probabilidad de daño, de manera que el eje menor se determina mediante

$$\lambda_{\min(\text{prob})} = 0.01\phi_{\text{est}}\lambda_{\max(\text{exp})}, \quad (2.14)$$

donde ϕ_{est} [%] es el porcentaje de probabilidad en que la elipse varía en dirección al eje menor. Con los dos ejes determinados para la elipse, se calcula un índice de daño, similar al mostrado en el apartado 2.2.2, que se expresa como sigue

$$EDI_{\text{prob}} = 2.4477 \frac{\phi_{\text{est}} \lambda_{\max(\text{exp})}^2}{Y_R^2}. \quad (2.15)$$

La Ecuación (2.15) muestra una manera fácil de estimar una probabilidad de daño utilizando el factor ϕ_{est} . Se puede proponer una variación de la elipse de daños con este factor para crear una línea base. Este factor representa la dispersión permitida para G_i y B_i , $\forall i = 1, 2, 3, \dots, n$. Se recomienda que el valor de ϕ_{est} se pueda estimar a partir de la media del sesgo obtenido del instrumento de medida utilizado para adquirir la admitancia eléctrica. Esto implica realizar un conjunto de pruebas a la estructura sin daños para establecer el valor del sesgo con el instrumento de adquisición.

2.2.4 Índices RMSD y MAPD para la técnica EMI

Cuando se monitorean las estructuras con PZT, los espectros de impedancia incluyen la información de su estado actual. Esto es posible por el acoplamiento electromecánico. Sin embargo, las señales de impedancia electromecánica presentan una gran dispersión para tomar decisiones sobre su comportamiento. Por ello, las métricas de daño se definen para calcular cantidades escalares que permitan establecer comparaciones cuando las señales están siendo perturbadas

por modificaciones estructurales, y la cuantificación debe revelar diferencias entre una señal de referencia y una de monitoreo. Se han propuesto varias métricas de daño para cuantificar y evaluar las modificaciones estructurales, entre las que se puede mencionar la RMSD, que se define para la conductancia (G) y la susceptancia (B) como

$$RMSD_G = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (G_{i(M)} - G_{i(R)})^2}{\sum_{i=1}^n (G_{i(R)})^2}}$$

(2.16)

$$RMSD_B = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (B_{i(M)} - B_{i(R)})^2}{\sum_{i=1}^n (B_{i(R)})^2}}$$

Otra métrica de daños que se utilizará para comparar el índice propuesto (véase la sección 2.2.2) es la MAPD, que se expresa como

$$MAPD_G = \sum_{i=1}^n \left| \frac{G_{i(M)} - G_{i(R)}}{G_{i(R)}} \right|$$

(2.17)

$$MAPD_B = \sum_{i=1}^n \left| \frac{B_{i(M)} - B_{i(R)}}{B_{i(R)}} \right|$$

En las Ecuaciones (2.16) y (2.17), $G_{i(M)}$ describe la conductancia de monitoreo y $G_{i(R)}$, la conductancia de referencia. Del mismo modo, $B_{i(M)}$ representa la susceptancia de monitoreo y $B_{i(R)}$, la susceptancia de referencia. Los índices

presentados en las secciones (2.16) y (2.17) pueden encontrarse en ([Giurgiutiu & Kropas-Hughes, 2003](#); [Giurgiutiu & Zagrai, 2005](#); [Overly et al., 2009](#); [Park et al., 2003](#); [Tawie & Lee, 2010](#); [Tseng & Naidu, 2002](#)). Se pueden calcular otros índices para el mismo objetivo, como CCD, CC, entre otros.

2.3 Montaje experimental

Para estudiar la viabilidad de la identificación de daños con los índices propuestos en la sección 2.2.2, se prepararon tres muestras para las pruebas experimentales. Estos ensayos se realizan en tres estructuras (placas) idénticas de acero inoxidable 304L con dimensiones de 152.2 mm, 47.5 mm y 1.2 mm (longitud, ancho y espesor). En cada placa se adhieren dos PZT y se ubican simétricamente como se ilustra en la Figura 2.4b. Para estas pruebas experimentales, se usaron los PZT SEN-10293, cuya hoja de datos puede ser consultada en ([Sparkfun electronics, 2014](#)). Las pruebas experimentales fueron diseñadas para dos PZT con el objetivo de mostrar regularidad en los procesos de identificación y reproducir la metodología. Esto implica que los resultados obtenidos de cada PZT deben tener el mismo significado, respectivamente. Los experimentos están diseñados para probar la metodología y no que la metodología valide los experimentos, ya que la caracterización de los daños se basa en dos estados; si hay daño o no lo hay. La metodología presentada debe validar la existencia del daño y no su severidad.

En cada muestra, los PZT están marcados con las etiquetas A y B y ubicadas como se muestra en la Figura 2.4a. Para medir la impedancia eléctrica y el ángulo de fase de los PZT, en las pruebas se utiliza una placa de evaluación AD5933 de *Analog Devices* ([Analog Devices, 2014](#)). Esta placa de evaluación es básicamente un analizador de impedancia eléctrica fabricado por *Analog Devices*. La primera prueba está diseñada para seis intensidades de daño, de manera que la placa se marcó superficialmente con una esfera con un diámetro de 4.76 mm, por medio de un mototool, presionando esta herramienta durante 30 s sobre la superficie de la placa; esto, con el objetivo de observar la sensibilidad de los índices de daño en

cada etapa. Cada etapa no es considerada como un incremento en la severidad del daño, porque no está caracterizada. Por esta razón, se utilizó un elemento esférico y no un elemento cónico, como lo son las brocas.

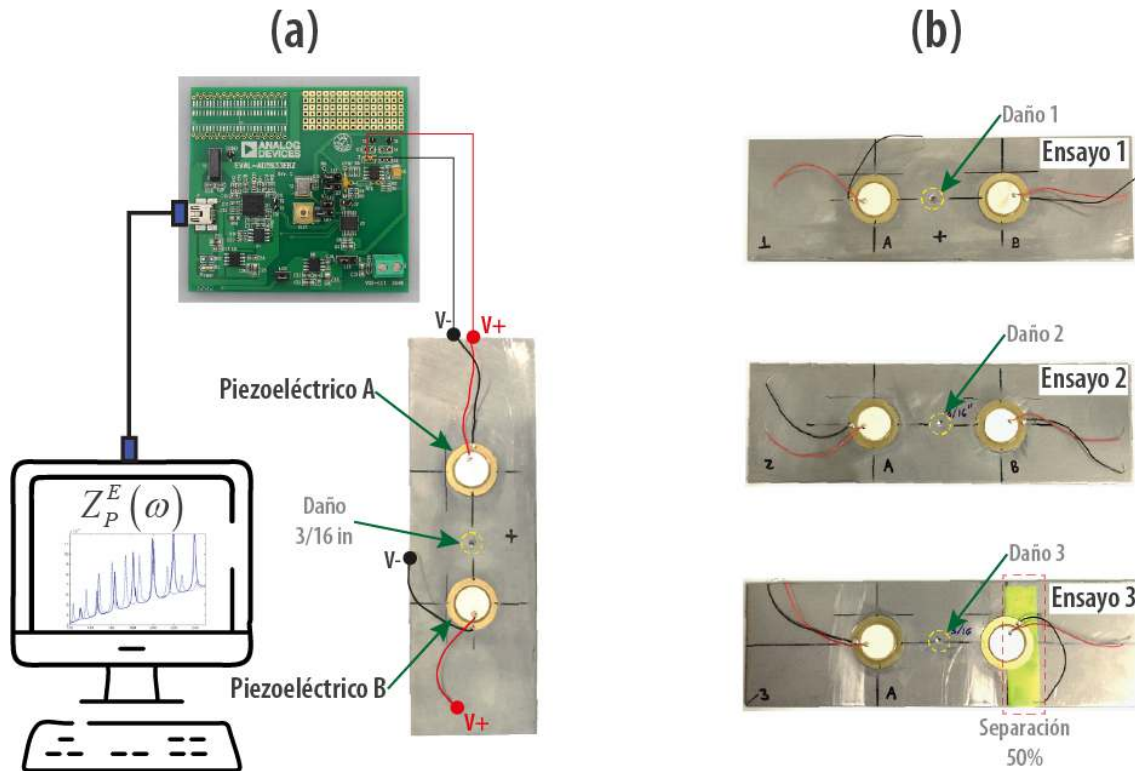


Figura 2.4. a. Montaje experimental. b. Probetas para los ensayos

En la segunda prueba, el daño es inducido en dos etapas; primero se hace una marca con un cono de 60° con 4.76 mm de diámetro a una profundidad de 1 mm en el mismo lugar de daño de la muestra 1; en la segunda etapa, el daño es una perforación con un diámetro de 4.76 mm sobre la marca cónica. Una ilustración del daño se representa en la Figura 2.5.

En la tercera prueba, las condiciones del daño son las mismas que en la segunda prueba, pero el PZT B se adhiere a la estructura sólo un 50% de la superficie. Los ensayos se ejecutan sobre una pieza de madera sin ningún tipo de restricción para que la placa quede libre. Esto denota que la placa está simplemente apoyada en la madera. El esquema de conectividad del montaje experimental se

representa en la Figura 2.4a, donde cada PZT se conecta a la placa AD5933 para medir la impedancia eléctrica. Se aplicó un procedimiento de adherencia para unir los PZT a las placas. Los PZT fueron adheridos con *Loctite 495* en la estructura y la superficie se preparó con *Loctite 7649* para garantizar la unión.

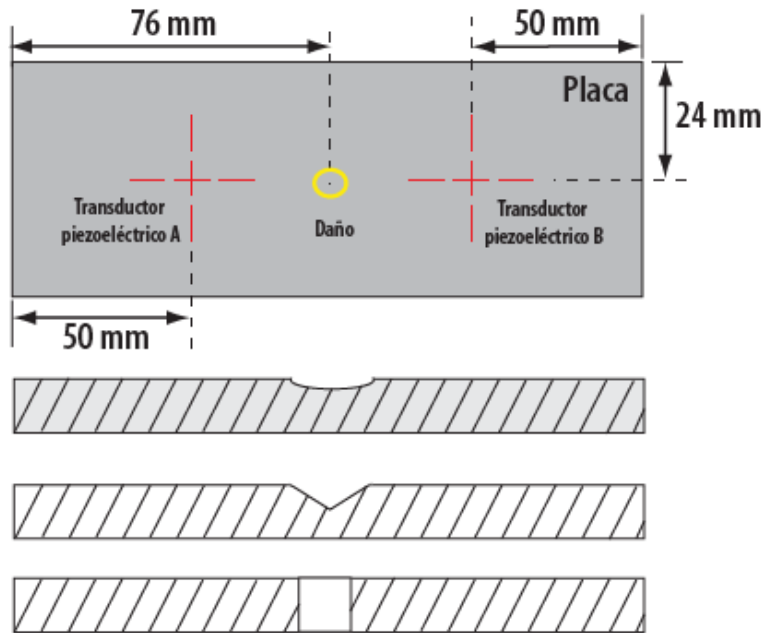


Figura 2.5. Dimensiones y daños en las muestras

Los procedimientos de medición se establecen en el manual de usuario elaborado por *Analog Devices* ([Analog Devices, 2014](#)). En las pruebas experimentales, el daño se refiere a una modificación estructural causada por una discontinuidad cilíndrica sobre la placa.

2.4 Resultados y discusión

2.4.1 Prueba 1: Identificación de daños superficiales con el índice EDI

Para la primera prueba experimental (véanse las Figura 2.4b y Figura 2.5), se adquirieron 16 medidas de los PZT A y B. Las medidas están compuestas por el ángulo de fase y la magnitud (PZT libre, sin daño; daño I, II, II, IV, V, VI) de impedancia eléctrica en un rango de 1–50 kHz cada 0.5 kHz. Estas fueron leídas con la tarjeta de evaluación AD5933 de *Analog Devices*, como se mencionó

anteriormente. La conductancia (G) y la susceptancia (B) se determinan a partir de la impedancia eléctrica, aplicando la Ecuación (2.1) (véase la representación de la Figura 2.1b).

Las mediciones se clasifican en PZT libre (PZT totalmente despegado), estructura sin daños con PZT totalmente adherido y estructura dañada. El daño corresponde a seis marcas realizadas en la estructura con una esfera metálica colocada en un mototool a 35000 rpm y puesta sobre la estructura durante 30 s. El daño se clasifica como I, II, III, IV, V y VI según la fase de aplicación. Las medidas tomadas para este ensayo se recogen en la Figura 2.6 y se organizan de la siguiente manera: las Figura 2.6a y Figura 2.6b representan G_A y B_A del PZT A, y las Figura 2.6c y Figura 2.6d representan las mismas variables (G_B y B_B) para el PZT B. En la literatura ([Giurgiutiu & Rogers, 1997](#); [Tawie & Lee, 2010](#)) se utilizan los espectros de conductancia (G) y susceptancia (B) para cuantificar las variaciones de dichas medidas respecto a una línea base o señal de referencia que corresponde a una señal obtenida para una estructura sin daños.

En la Figura 2.6 se observa que las medidas G_i y B_i , $\forall i=1, 2, \dots, 8$ son similares a primera vista, pero presentan pequeñas variaciones que deben ser cuantificadas en todo el espectro de frecuencias. Por ejemplo, cuando el PZT está libre, aparecen unos picos pronunciados en los espectros G y B . Sin embargo, cuando el PZT está unido, las señales bajan en G (0–45 kHz) y B (0–30 kHz), y en el resto del espectro, suben. Esto significa que los espectros G y B están acoplados electromecánicamente con la estructura ([Liang et al., 1996](#)). Esto permite que cualquier cambio en la estructura pueda ser registrado por la impedancia eléctrica.

Como se explicó en la sección 2.2.2, se propusieron diferentes índices de daño para determinar los cambios en las señales (véase la Figura 2.6) con respecto a una referencia. Para el propósito de este estudio, las referencias se establecen a

partir de las señales adquiridas (G_0 y B_0) de la estructura sin daños que están resaltadas en color rojo en la Figura 2.6. En esta prueba se utiliza el índice EDI para cuantificar la sensibilidad al daño. Sin embargo, antes de calcular el índice, es necesario refinar las señales de admitancia con funciones de distribución normal para definir las matrices de covarianza en cada etapa de daño. Este procedimiento mejora las señales para calcular los valores propios de las matrices de covarianza a partir de las señales de admitancia sin ruido.

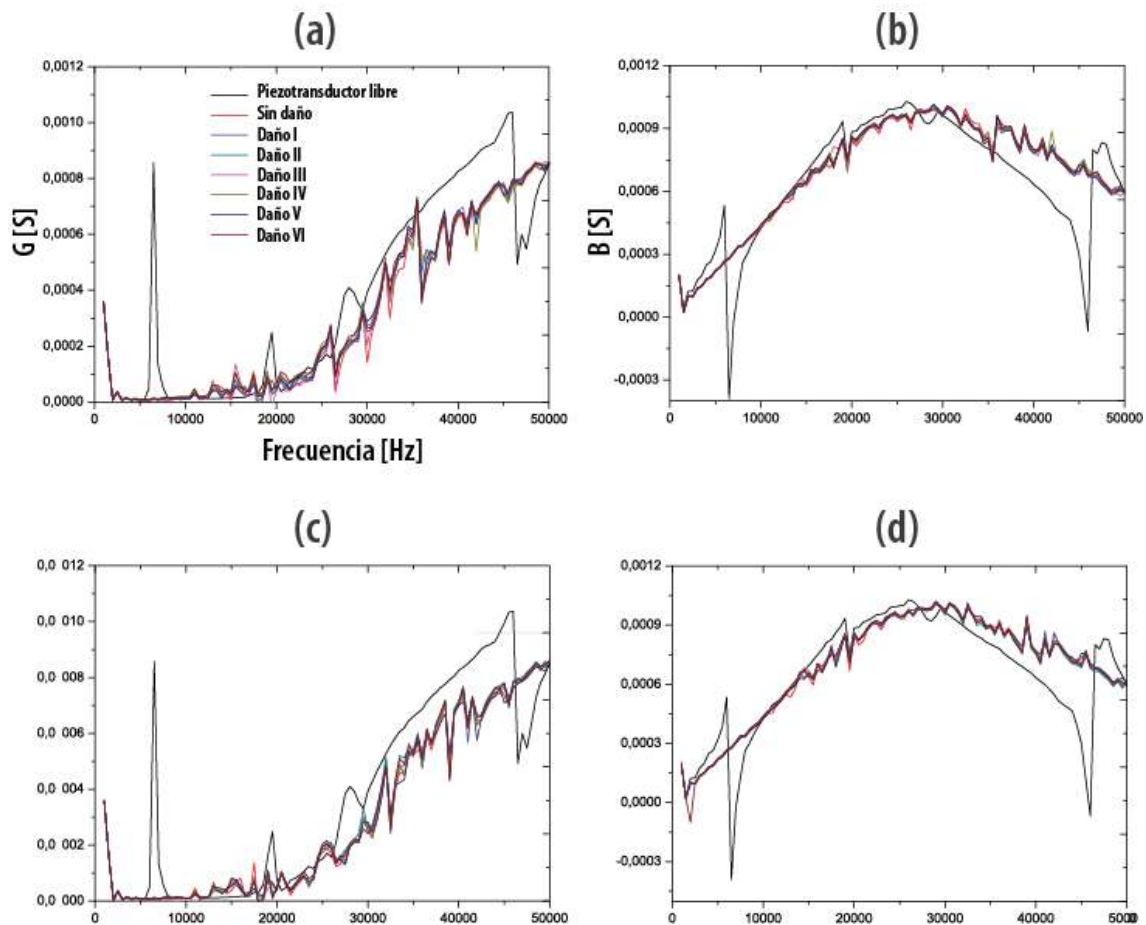


Figura 2.6. a. G_A , b. B_A , c. G_B , d. B_B

Por otro lado, cuando el daño es inducido, las elipses se construyen correlacionando $G_0 | G_i$ y $B_0 | B_i$, $\forall i=1, 2, \dots, 6$ en cada condición de daño. Esto

sugiere que las distribuciones están correlacionadas entre G_0, B_0 (sin daños) y G_i, B_i (estructura dañada).

En la Figura 2.7 se observa que cuando el estado de daño aumenta, la forma de cada elipse comienza a aumentar su área, así como a variar angularmente. Por ejemplo, en la Figura 2.7a, la elipse del daño IV no está en fase con las demás. Un comportamiento similar se observa en la Figura 2.7b; se percibe que las elipses crecen en dirección a λ_{\min} en ambas mediciones $G_0 | G_i$ y $B_0 | B_i$. Esto implica que las variaciones son causadas por una dispersión en los datos medidos de la admitancia.

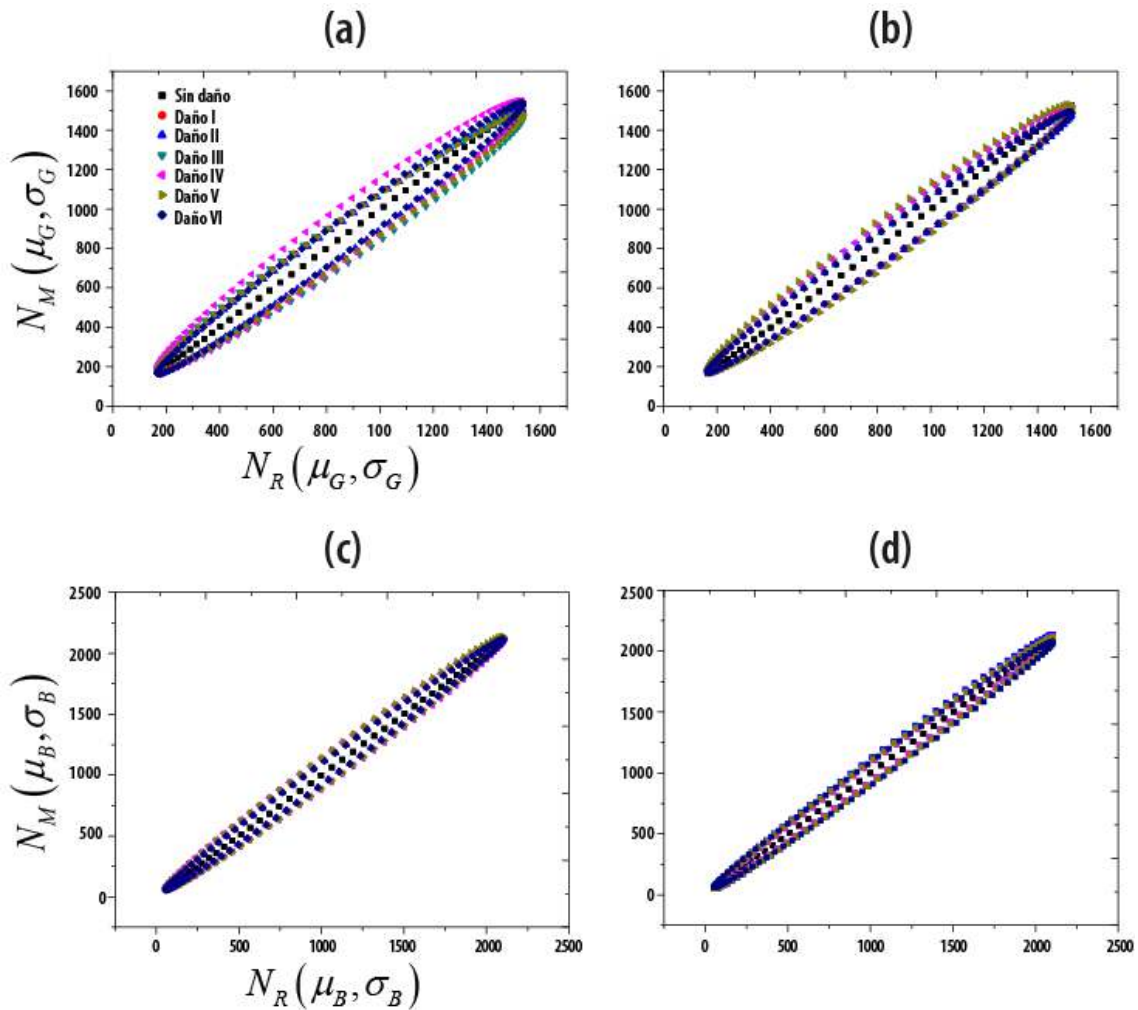


Figura 2.7. Elipses para: a. $G_{0A} | G_A$. b. $G_{0B} | G_B$. c. $B_{0A} | B_A$ A. d. $B_{0B} | G_B$

Sin embargo, se nota una diferencia en la dirección perpendicular a λ_{\min} ; se observa que $\lambda_{\max}^{(B_i)}$ (eje mayor en susceptancia) es mayor que $\lambda_{\max}^{(G_i)}$ (eje mayor en conductancia), en ambos casos. Se percibe que la variación de las elipses de Gauss cuantifica los cambios de G_i y B_i respecto a G_0 y B_0 , y estos, a su vez, cuantifican los cambios en el índice EDI.

Para ilustrar las variaciones de las señales, se calculó el índice EDI para $G_0 | G_i$ y $B_0 | B_i$ de los PZT A y B. En la Figura 2.8 se muestra una representación del índice.

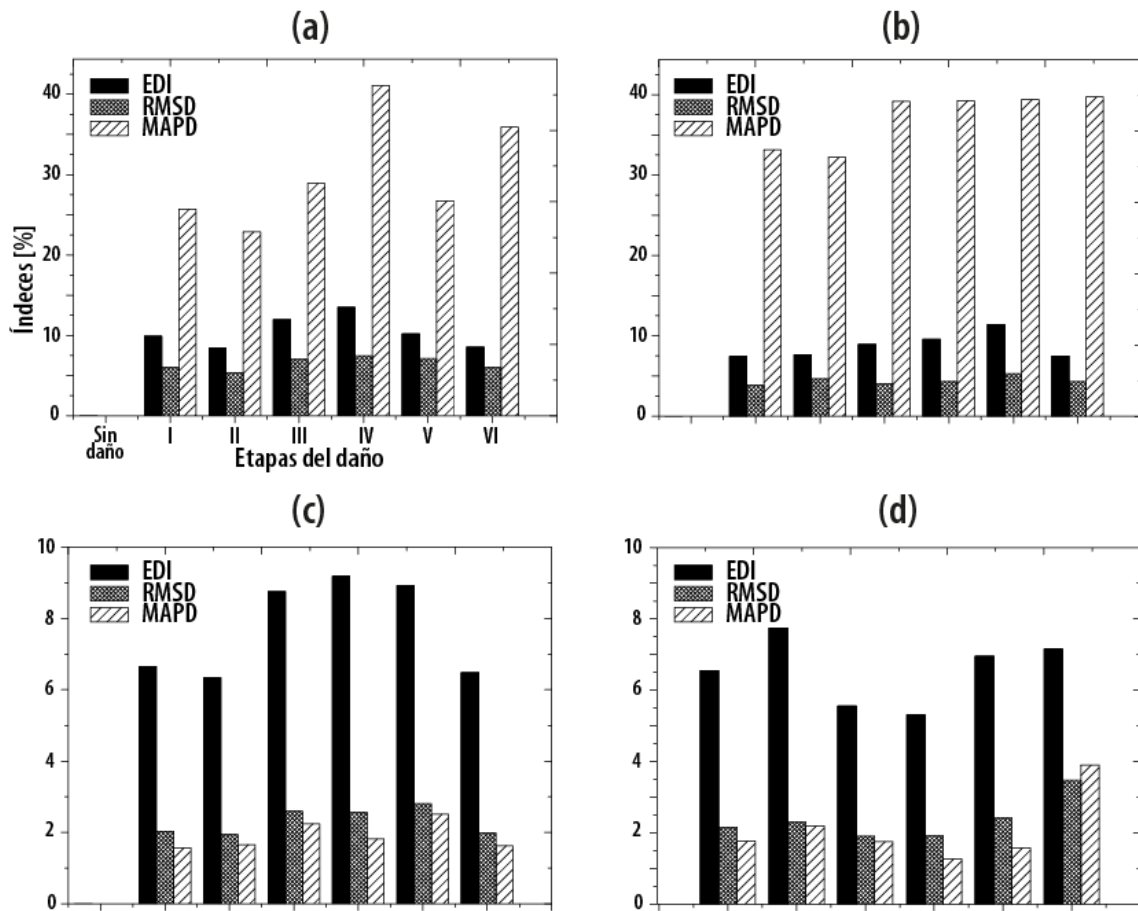


Figura 2.8. Comparación de índices para: **a.** $G_0 | G_i$ PZT A, **b.** $G_0 | G_i$ PZT B, **c.** $B_0 | B_i$ PZT A, **d.** $B_0 | B_i$ PZT B

Para tener un punto de comparación, se calcularon los índices RMSD y MAPD, que también pueden verse en la misma figura. El cálculo de los índices se presenta en (Park et al., 2003; Tawie & Lee, 2010; Tseng & Naidu, 2002), así como en la sección 2.2.4. En este caso, los índices pueden ser muy útiles para interpretar y cuantificar la información de los diferentes conjuntos de datos medidos. En las Figura 2.8a, Figura 2.8b, Figura 2.8c y Figura 2.8d, se observa que la primera columna representa la línea base (estructura sin daño) y las etapas de daño se representan a partir de la segunda columna.

Cuando la estructura es modificada por el daño superficial, el EDI varía entre 8–13 y 8–12% para $G_0 | G_i$, en ambos PZT, A y B. Esto muestra que, para la misma medición, el espacio métrico del índice EDI es similar. En el caso de la conductancia (G), el índice muestra una ligera tendencia cuando se aumenta el estado de daño hasta el estado V. Para $B_0 | B_i$, el EDI varía entre 6–9 y 6–8% en ambos PZT, mostrando una variabilidad homogénea en el índice, como en el primer caso.

Para mostrar una comparación entre los índices (EDI, RMSD y MAPD), se determinaron la media y la desviación estándar para los datos G y B (etapas I–VI). Estos figuran en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Media y desviación estándar para los índices EDI, RMSD y MAPD (etapas I a IV)

Índices	Media [%]				Desviación estándar [%]			
	G_A	G_B	B_A	B_B	G_A	G_B	B_A	B_B
EDI	10.40	9.29	7.72	6.54	1.98	1.66	1.35	0.94
RMSD	6.49	4.71	2.32	2.36	0.81	0.53	0.37	0.58
MAPD	30.89	39.37	1.90	2.07	6.91	3.69	0.38	0.94

De acuerdo con los resultados, la media de G muestra que el índice EDI presenta una menor variación en los valores medios obtenidos de ambos PZT, que es de 1.11%. Para el RMSD, se determina una variación de 1.78% (entre G_A y G_B

). Sin embargo, se observa que el MAPD es más sensible a los cambios en su magnitud G (30.89% para G_A y 39.37% para G_B), pero presenta una mayor variación en los valores medios, que es del 8.48% aproximadamente. En este sencillo análisis, se comprueba que el índice EDI presenta menores variaciones entre las medidas tomadas de cada PZT (A y B), concretamente en la conductancia. Esto indica que los resultados computados de ambos PZT son básicamente iguales, ya que el índice EDI presentó una menor variación que los índices RMSD y MAPD.

En las mediciones de B (susceptancia), la media muestra una mayor magnitud para el índice EDI con una variación de 1.18% entre B_A y B_B . Las variaciones en torno a la media son muy similares en ambos casos. Esto señala que existe una regularidad en el espacio métrico definido por el índice, ya que los valores obtenidos para G y B presentan una dispersión del 1.1%. Se observó que el RMSD presenta un comportamiento similar al del índice EDI. Además, los índices RMSD y MAPD no son sensibles en el caso de B , ya que la media es básicamente la misma para ambos y la desviación estándar es casi nula.

Para verificar la sensibilidad en la prueba experimental, se consideraron dG_i y $dB_i \forall i=1, 2, \dots, 5$ como los cambios en la magnitud de G y B surgidos entre cada etapa de daño, respectivamente. Así, los valores medios de dG_i y dB_i se calculan y se muestran en la Figura 2.9. En el eje horizontal se enumeran los índices, y en el eje vertical, la media de la magnitud dG_i y dB_i . En la Figura 2.9a, se observa que la sensibilidad del índice EDI está en torno al 2% en ambos PZT, y en la Figura 2.9b, en torno al 1%. Esto confirma que ambas señales reflejan los mismos cambios cuando se inducen las etapas de daño. Claramente, se percibe que el MAPD presenta una sensibilidad diferente en cada PZT. El caso contrario ocurre con el índice RMSD, que tiene una menor sensibilidad. De la Figura 2.9 se concluye, a partir de las desviaciones estándar, que las variaciones del índice EDI son básicamente las mismas en ambos PZT.

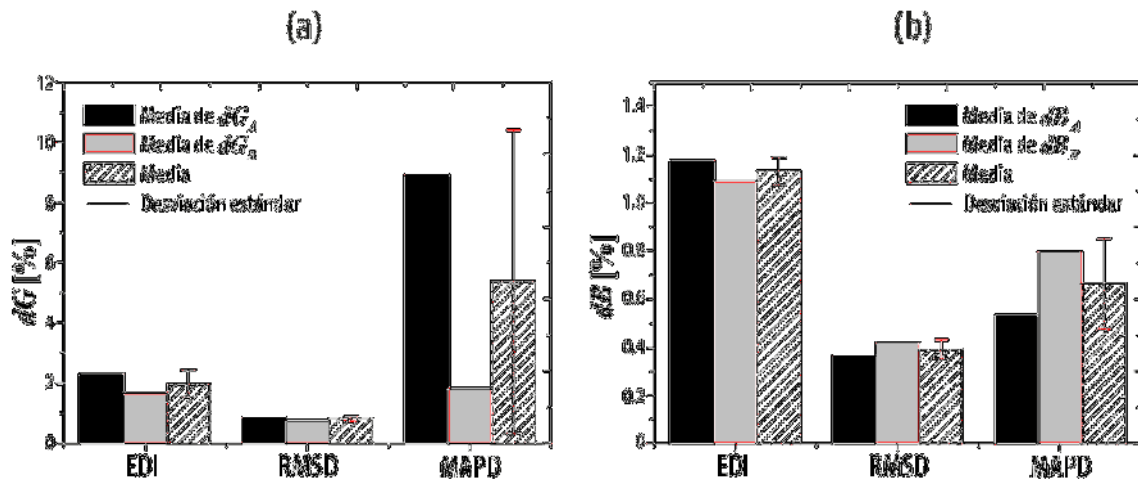


Figura 2.9. a. Variación para dG_i . b. Variación para dB_i

En la literatura suelen definirse los índices de daño a partir de las medidas de $G_0 | G_i$, ya que presenta mayores variaciones cuando se modifica la estructura (Ai et al., 2014; Moharana & Bhalla, 2015; Pavelko et al., 2011; Xu & Liu, 2002). En el presente caso, el argumento anterior podría ser una ventaja, debido a que el índice propuesto (EDI) puede ser calculado a partir de ambas mediciones: $G_0 | G_i$ y $B_0 | B_i$. Desde un punto de vista sencillo, la identificación de daños puede llevarse a cabo cuando los incrementos del índice son continuos durante el monitoreo, por lo que se pueden observar cambios en las señales de la estructura monitorizada. Sin embargo, para diagnosticar un cambio estructural, debe definirse una línea base de daños antes de detectar cualquier modificación en un estado operativo. En un contexto real, es factible diferenciar cuándo una estructura presenta una modificación estructural, ya que estas se reflejan en la admitancia eléctrica, y consecuentemente, en el índice EDI.

2.4.2 Prueba 2: Identificación de daños con diferentes índices (EDI, R_M y θ_N)

En la segunda prueba experimental (ver Figura 2.4b), se produjo un daño en la placa en dos etapas: daño superficial y placa totalmente perforada. La localización del daño en la placa igual que en la prueba experimental 1. En esta prueba se

obtienen las medidas de admitancia del PZT B. Para la estructura sin daño, las mediciones de referencia se establecen con G_0 y B_0 , que se marcan con color rojo en las Figura 2.10a y Figura 2.10b. Cuando se induce el daño en la placa, se miden G_i y $B_i \forall i=1, 2$, que también se muestran en la Figura 2.10.

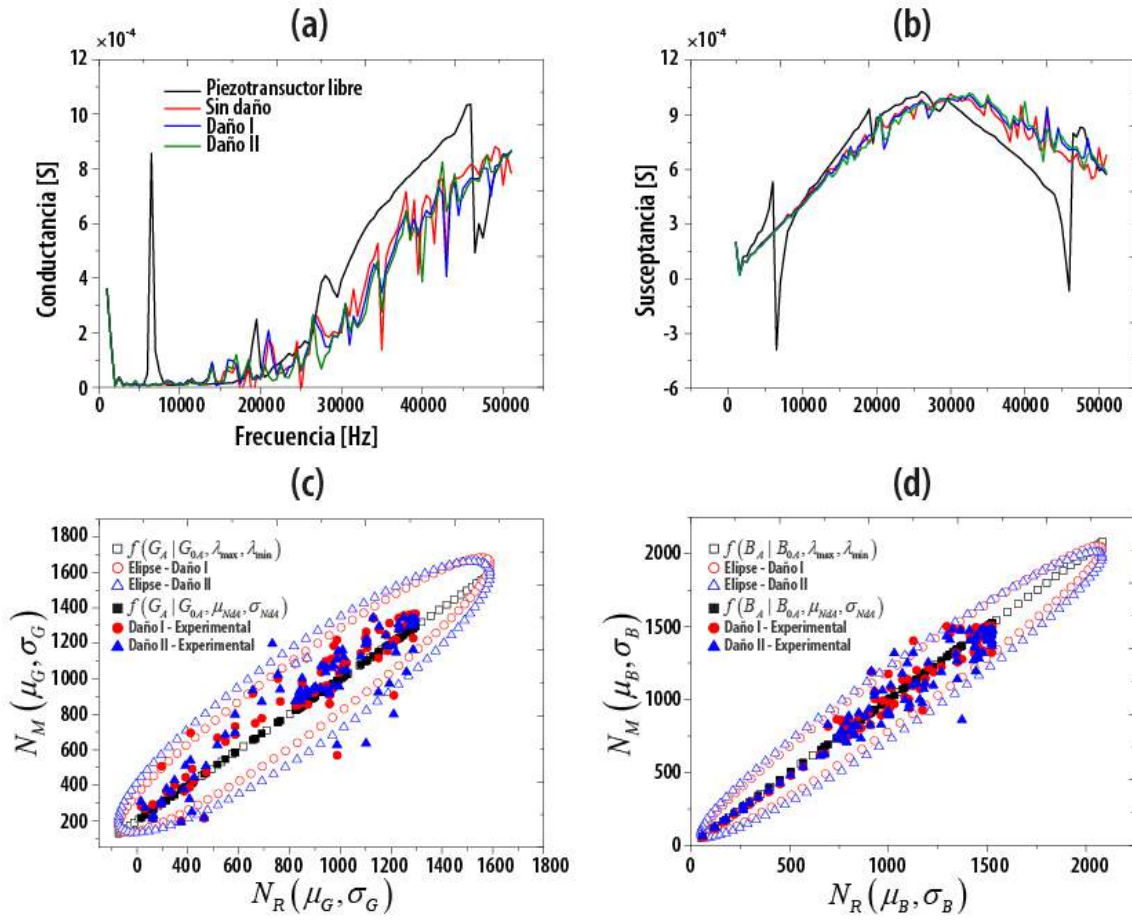


Figura 2.10. a. $G_i, \forall i=0, 1, 2$. b. $B_i, \forall i=0, 1, 2$. c. Elipses de G_i . d. Elipses de B_i

Se observa que G_i y $B_i \forall i=0, 1, 2$ son señales ruidosas. Por esa razón, deben ser suavizadas con distribuciones normales (N_R y N_M), como se explica en la sección 2.2.2. Se sabe que las distribuciones de los datos medidos no son necesariamente distribuciones normales, ya que debe verificarse. Sin embargo, el procedimiento se realiza para eliminar el ruido de las señales de admitancia. Se

puede mencionar un algoritmo ampliamente usado para determinar si un conjunto de datos está distribuido normalmente, conocido como Kolmogorov-Smirnov (Berger & Zhou, 2014; Dimitrova et al., 2020; Lilliefors, 1967).

En las Figura 2.10c y Figura 2.10d se ilustran las elipses gaussianas determinadas a partir de los valores propios de las matrices de covarianza, que se calcularon con las distribuciones hechas para G_i y B_i a partir de los datos experimentales. Las distribuciones corresponden a las señales suavizadas, es decir, sin ruido.

En las figuras se puede apreciar que la forma de las elipses de referencia $f(G_{B(R)} | G_{B(R)}, \lambda_{\max}^R, \lambda_{\min}^R)$ y $f(B_{B(R)} | B_{B(R)}, \lambda_{\max}^R, \lambda_{\min}^R)$ presentan un comportamiento lineal, ya que las dos distribuciones gaussianas de referencia están correlacionadas. La correlación sugiere que $\lambda_{\min} = 0$. Se encontró que mientras el estado de daño se incrementa, el área y la posición angular de cada elipse comienza a cambiar sistemáticamente, como se evidencia en las Figura 2.10c y Figura 2.10d. Esto Implica que las señales varían con respecto a las distribuciones de referencia G_R y B_R con una clara tendencia, de tal manera que para el daño I, las elipses aumentan su área en ambos casos. Sin embargo, es menor que el área de las elipses que representan el daño II, indicando que los valores propios mínimos mantienen la siguiente relación: $\lambda_{\min}^I < \lambda_{\min}^{II}$. En el enfoque usado en esta investigación, las elipses representan la probabilidad en la que los datos se encuentran dentro del dominio delimitado por ella con un 95% de confianza, tal y como se expuso en la sección. 2.2.2. Las funciones $f(G|B, \lambda_{\max}, \lambda_{\min})$ se refieren a las elipses construidas a partir de los valores propios λ_{\max} y λ_{\min} , obtenidos de las señales suavizadas para G y B , en cada estado de daño (I y II). Los subíndices R corresponden a la señal de referencia (sin daño).

En las Figura 2.10c y Figura 2.10d, se percibe que las direcciones principales de cada elipse no están alineadas con respecto a la dirección principal de la referencia, que es a 45° . Todas las direcciones medidas se enumeran en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Variaciones de las direcciones principales β de las señales suavizadas

Estado	Dirección principal β	
	G_B	B_B
Sin daño	45°	45°
Daño I	46.75°	44.54°
Daño II	46.42°	43.95°

Se puede apreciar en la tabla que las elipses obtenidas a partir de G giran en sentido contrario a las agujas del reloj y las obtenidas a partir de B giran en sentido de las agujas del reloj. Desde un punto de vista simple, se concluye que el daño inducido modifica el valor propio mínimo y la dirección principal de las elipses. Para cuantificar las diferencias comentadas anteriormente, se definieron tres índices en la sección 2.2.2 que se muestran en la Figura 2.11a y Figura 2.11b. En esta figura, se ve que el índice EDI presenta una variación del 20.91% (daño I) al 28.85% (daño II) para la distribución de G_B , y una variación del 15.38% (daño I) al 19.41% (daño II) para la distribución de B_B . Se observa claramente que las señales son modificadas por los estados de daño, específicamente las obtenidas de G . Además, los índices RMSD y MAPD son graficados como punto de comparación en las Figura 2.11a y Figura 2.11b. Se observa que se verifican desviaciones significativas en el índice EDI entre los estados de daño I y II; esto indica que la modificación estructural está siendo registrada por las mediciones tomadas con respecto a la referencia (estructura sin daño). Se puede mencionar que el índice muestra una tendencia al alza cuando el daño se incrementa; esto indica que la intensidad se capta en él. Esto ocurre en ambos casos para las distribuciones G y

B . La Tabla 2.3 muestra los incrementos de cada índice (EDI, RMSD, MAPD) desde la etapa I a la etapa II, para G y B respectivamente. Se observa que el EDI presentó el mayor incremento en ambas componentes de la admitancia (G y B). Se evidencia que el índice EDI tiene gran sensibilidad a la modificación estructural ya que en ambos casos presentó un mayor incremento. El análisis realizado en esta investigación muestra que utilizando este enfoque se puede realizar una identificación de daños.

Tabla 2.3. Incremento de los índices desde la etapa I hasta la III

Índices	G_B	B_B
EDI	7.94%	4.03%
RMSD	3.17%	0.62%
MAPD	3.60%	1.03%

En la Figura 2.11c se muestra el índice de relación de valores propios R_M para los estados de daño I y II. Por ejemplo, el índice R_M es de 15.91 y 22.26% para la distribución de G_B , y de 10.37 y 13.13% para la distribución de B_B , respectivamente.

Estas cantidades expresan cuánto crece el eje menor perpendicular a la dirección principal, después de inducir los daños. Examinando la Figura 2.11c, es fácil ver que hay dos estados de daño, si se considera la severidad. Además, se observa que el índice R_M es más sensible en G_B . Esto indica que la conductancia muestra una mayor sensibilidad que la susceptancia. Esto es comúnmente mencionado en la literatura (Annamdas & Soh, 2010; Giurgiutiu et al., 1999; Giurgiutiu & Kropas-Hughes, 2003; Giurgiutiu & Zagrai, 2005; Liang et al., 1996; Tinoco & Marulanda, 2014), ya que la conductancia se utiliza para establecer la métrica de los daños cuando se aplica la técnica EMI.

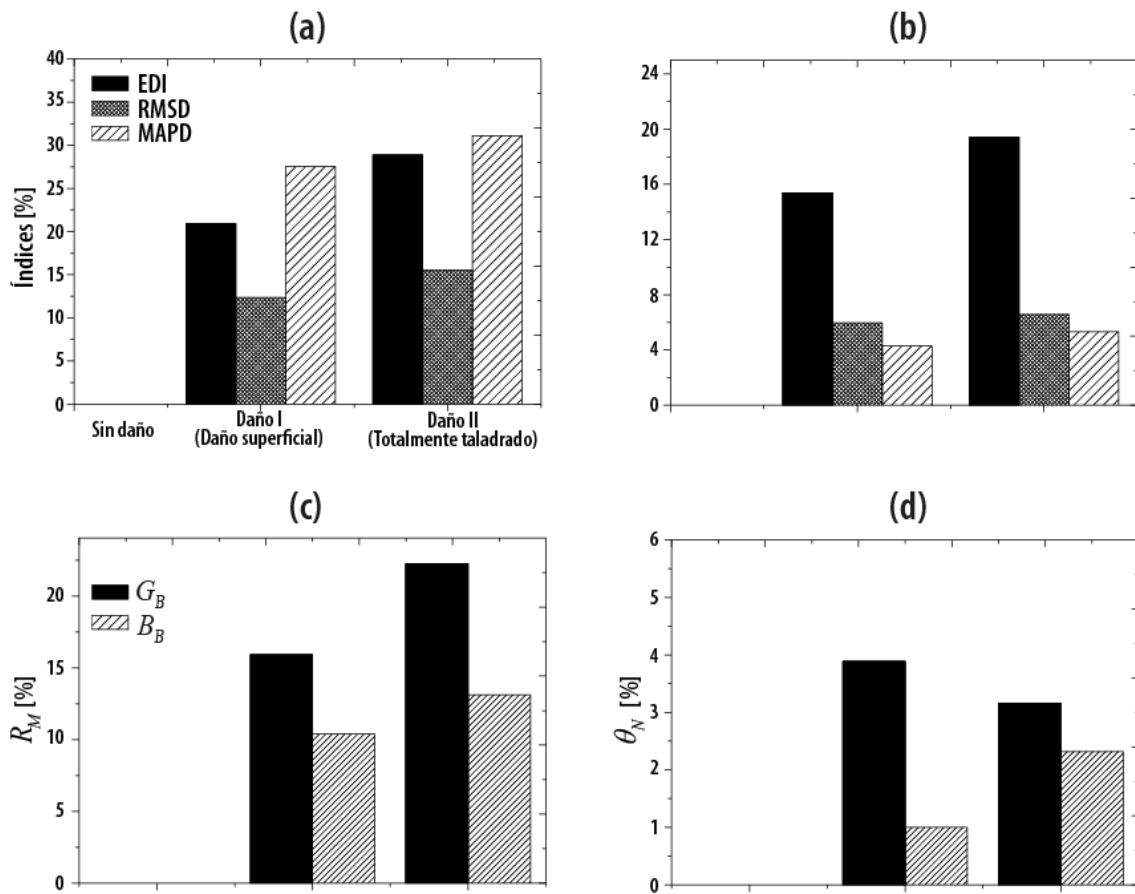


Figura 2.11. a. Comparación de los índices determinados a partir de G_B . b. Comparación de los índices determinados a partir de B_B . c. Índice R_M . d. Índice θ_N .

El análisis demuestra que este aspecto es una ventaja, atribuible a que ambas distribuciones (G_B y B_B) pueden ser utilizadas para identificar cambios en la estructura monitoreada. Por lo tanto, es posible detectar el daño con el índice R_M en esta prueba experimental. En la Figura 2.11d se presenta el índice θ_N para los estados de daño I y II, el cual muestra cuánto cambia el ángulo de la dirección principal con respecto a los 45° (elipse de referencia), que se calcula con la Ecuación (2.12). Para G_B . Los cambios determinados en la dirección principal son del 3.89% (daño I) y del 3.16% (daño II) respectivamente; para B_B , son del 1% (daño I) y del 2.32% (daño II) respectivamente. Los valores mencionados

anteriormente muestran pequeños cambios en el índice θ_N cuando se produce el daño en la estructura, especialmente los obtenidos de B_B . La desviación del índice en ambos casos es de alrededor del 1% entre los daños. Esto significa que el índice θ_N presenta una baja sensibilidad después de la primera modificación o daño estructural (ver Figura 2.11d). Se pudo identificar que no hay un movimiento claro de θ_N en los estados entre daños, pero se ve claramente una identificación del daño.

En la presente sección se ha visto que todos los índices mostraron variaciones diferentes de las distribuciones de G_B y B_B , que se representaron en la Figura 2.11. Como conclusión, los índices fueron capaces de indicar los estados de daño practicados en la placa, así como su intensidad.

2.4.3 Prueba 3: Identificación de daños a partir de una línea de base probabilística

En esta sección se presenta un procedimiento experimental para estimar una línea base de alerta de una placa sin daños. Para esta prueba experimental, se adhieren dos PZT en diferentes condiciones: una totalmente adherida (PZT A), y la segunda, parcialmente adherida (50%, PZT B). Las medidas tomadas en la placa sin daños se utilizan para establecer y calcular una medida de referencia, tal y como se realiza en los ensayos experimentales 1 y 2. Para definir la elipse probabilística con la referencia, se calcula un valor propio máximo $\lambda_{\max(\text{exp})}$, utilizando la matriz de covarianza, y a partir de ella, se estima un valor propio probabilístico denominado $\lambda_{\min(\text{prob})}$ a mediante la Ecuación (2.14). La elipse de referencia es una función lineal y, en consecuencia, el valor propio mínimo es cero. Sin embargo, utilizando la Ecuación (2.14), se obtiene el valor propio mínimo ($\lambda_{\min(\text{prob})}$) para establecer la elipse probabilística. Este procedimiento es necesario porque se debe definir previamente un porcentaje probabilístico para crear la elipse probabilística. Para ello, se aplica la relación expresada en la Ecuación (2.14). En un caso particular; se

propone una elipse probabilística de $\phi_{est} = 5\%$, que se ilustra en la Figura 2.12 y se marca en color negro. Se sabe que a partir de la admitancia se determinan dos medidas (G y B). Por lo tanto, se construyen dos elipses probabilísticas de cada PZT. Las elipses mostradas en las Figura 2.12a y Figura 2.12c se determinaron a partir del PZT A, y las elipses ilustradas en las Figura 2.12b y Figura 2.12d, se obtuvieron a partir del PZT B.

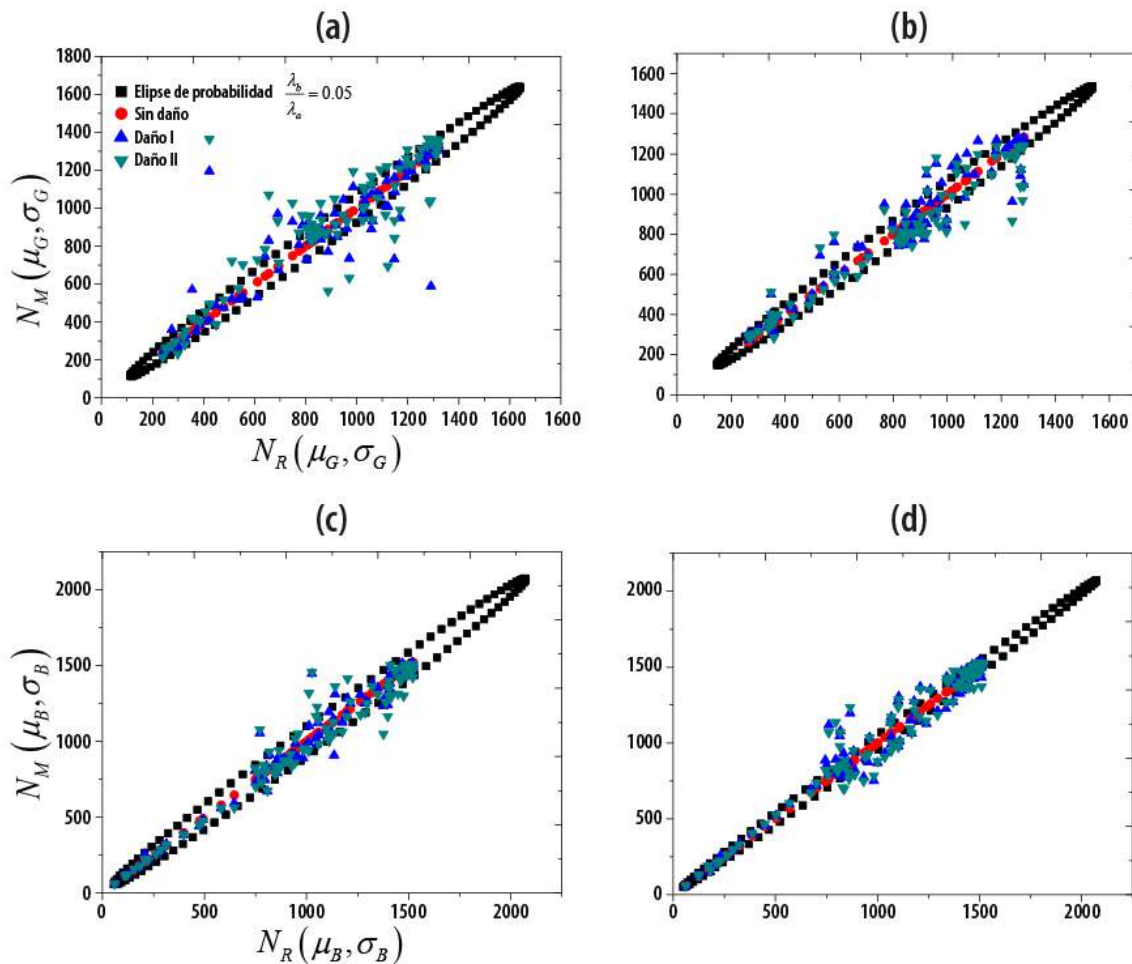


Figura 2.12. Índices probabilísticos para: **a.** G_A . **b.** G_B . **c.** B_A . **d.** B_B

Se observa que los datos experimentales presentan dispersión alrededor de las elipses, ya que estos se encuentran dentro y fuera de la elipse probabilística en ambas etapas de daño (I y II). Esto significa que existe una desviación y que puede ser evaluada para emitir una alerta. Por lo tanto, se estima un índice para cada

medición, mientras se conocen las elipses. Así, el índice EDI calculado para G_A es de 10.47%, para B_A es de 13.77%, para G_B es de 9.18% y para B_B es de 13.96%. Esta información se puede evidenciar en la Figura 2.13a. Los valores mencionados anteriormente muestran una desviación estándar de 0.91 y 0.13% respecto a la media de los PZT A y B, respectivamente. Esto indica que el espacio dimensional del índice EDI para este caso presenta resultados similares en ambos PZT.

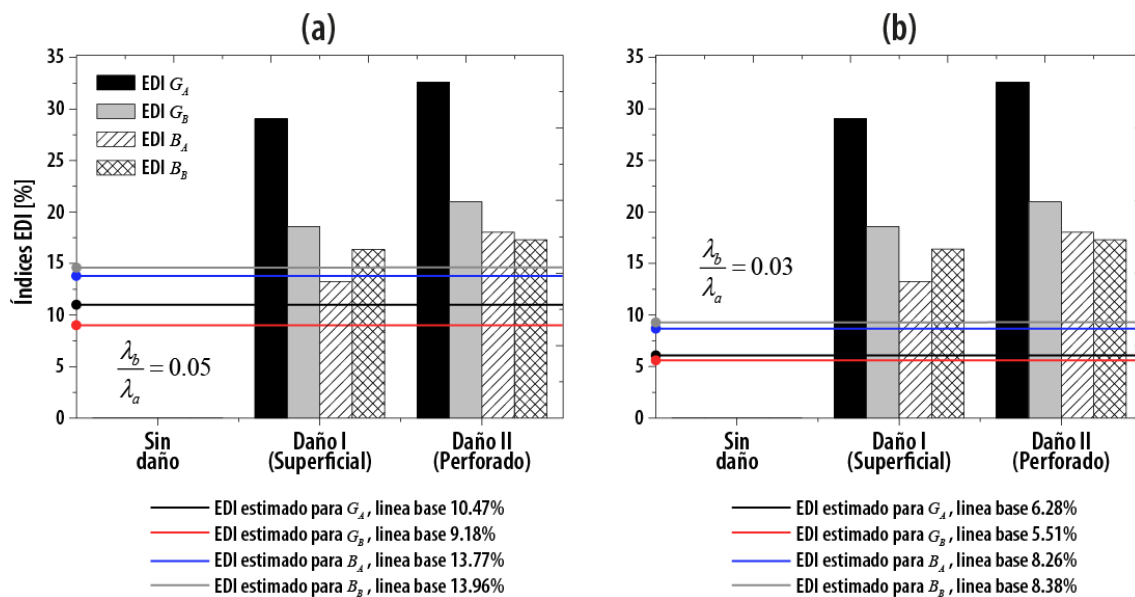


Figura 2.13. Índice probabilístico EDI para la identificación de daños. **a.** $\phi_{est} = 5\%$, **b.** $\phi_{est} = 3\%$

Para analizar los resultados expuestos en la Figura 2.13a, se discutirá lo siguiente: se observa que el EDI estimado define un intervalo entre 9.18% y 13.96%, que puede ser delimitado como intervalo de alerta de daños. Se observa que la medición experimental cruza el intervalo de alerta de daños en todos los casos. Esto implica que algo está ocurriendo en la estructura cuando se monitorea. En un contexto real, las mediciones en la estructura realizadas in situ podrían utilizarse como una alerta temprana de daños, ya que la línea base de los daños está previamente definida. Para establecer una alerta inferior, se estima una elipse probabilística de $\phi_{est} = 3\%$ como la que se muestra en la Figura 2.13b. Para este

caso, se observa que todas las mediciones están por encima de la línea base de daño, y por lo tanto se concluye que la estructura presenta alguna modificación. Con esta estrategia, es posible predecir una línea base, así como monitorear las variaciones de conductancia y susceptancia al mismo tiempo. Se considera que ϕ_{est} puede ser estimada por la expectativa del mínimo valor propio obtenido de la matriz de covarianza. Sin embargo, hay dos formas de estimar el valor propio mínimo en un contexto real. Una es a partir del sesgo del instrumento de medición. Esto significa que cada medición presenta una variación cuando el instrumento realiza dos mediciones para la misma referencia. Entonces, es posible calcular el valor propio mínimo y establecer una referencia a partir de la desviación de esas mediciones. El segundo método para estimar el valor propio mínimo es a partir de una estimación probabilística, que puede calcularse a partir de simulaciones previas, por ejemplo, a partir de un análisis de elementos finitos (FEA), ya que es posible caracterizar el tipo de daño y su severidad. Cuando se define ϕ_{est} previamente, se permiten variaciones que pueden provenir de diferentes fuentes, no sólo de los daños.

En la Figura 2.13 se puede observar que hay diferencias entre los resultados obtenidos para el PZT totalmente adherido y el parcialmente adherido. Por ejemplo, los índices EDI para G_A y G_B (parcialmente adherido) son 29 y 18.6% para la etapa de daño I, y de 32.6 y 21% para la etapa de daño II. En ambos casos se percibe que el índice EDI perdió cerca del 10% de su magnitud, lo que significa que la magnitud de G_B (parcialmente adherido) es menor en ambas etapas de daño. A simple vista, se concluye que la cuantificación del EDI se ve afectada por el desprendimiento del PZT B. La conclusión anterior puede ser apoyada a partir del índice calculado para el estado de daño II en la prueba 2. Se observa que la variabilidad entre las conductancias es del 1.87% (alrededor de $(G_A^{III} + G_B^{II})/2$) para los PZT totalmente adheridos, respectivamente. Entonces, es posible asociar la pérdida en la magnitud como un efecto de la desconexión, aunque hay que tener en

cuenta que los efectos de la unión deben ser estudiados en profundidad. Sin embargo, en el caso de la susceptancia, los valores no se ven afectados por el desprendimiento en el PZT B. Estos indicios son evidentes porque la magnitud de la susceptancia en el estado de daño II es de aproximadamente 17.5% para ambos PZT. Como conclusión, se advierte que el desprendimiento afecta a la magnitud del índice EDI en la conductancia, pero esta no se ve afectada en la susceptancia. El efecto del desprendimiento en el PZT B no afecta el proceso de identificación, ya que es posible diferenciar los resultados obtenidos para la placa afectada por el daño practicado.

En esta prueba hay una motivación para estudiar el efecto del desprendimiento, porque este podría ser monitoreado con la conductancia, y la estructura, con la susceptancia.

En el estudio experimental presentado en este capítulo, se analizó la viabilidad de utilizar tres índices de daño diferentes, aplicando la técnica EMI orientado al SHM con el objetivo de identificar el daño estructural en placas activas. Se prepararon tres pruebas experimentales con el propósito de probar los índices propuestos y explorar nuevas alternativas de identificación. Los índices propuestos se basaron en las elipses de confianza gaussianas de la admitancia eléctrica, y estos índices ayudaron a identificar las modificaciones estructurales en los casos de estudio. En los resultados expuestos, se puede realizar la identificación de los daños utilizando la conductancia y la susceptancia de los PZT. Este aspecto se considera una ventaja, ya que la susceptancia no suele utilizarse para la identificación en el análisis convencional. En dos pruebas experimentales, el índice EDI se comparó con otros índices más conocidos (RMSD y MAPD), y mostró ventajas en términos de dispersión. Esto significa que para ambos PZT los resultados fueron básicamente iguales en todas las pruebas. Un aspecto interesante se observó en la tercera prueba experimental, ya que el índice EDI calculado a partir de un PZT parcialmente adherido se vio afectado en su magnitud a partir de la conductancia. Sin embargo, no se vio perturbado en la susceptancia.

Se identifica una motivación para estudiar este efecto, gracias al cual el desprendimiento podría ser monitoreado con la conductancia y la estructura con la susceptancia. Sin embargo, es necesario realizar más pruebas experimentales para verificar la afirmación anterior. Además, en la última prueba experimental se propuso un procedimiento para estimar elipses probabilísticas con el fin de definir una línea base de daños. Se demostró que es posible crear una alerta de daño diseñada antes de que se produzca una modificación estructural. Esto puede ser una alternativa interesante para delimitar las líneas base, fundamentándose en dos aspectos: el sesgo del instrumento de medición y los valores predichos para ϕ_{est} a partir de simulaciones, por ejemplo, utilizando un FEA.

Como consideración final, se puede señalar que este estudio puede ser extrapolado a otras aplicaciones para llevar a cabo la identificación de daños y así comprobar la viabilidad de los índices en otro contexto.

CAPÍTULO 3

DETECCIÓN DE DAÑOS EN PLACAS ACTIVAS MEDIANTE LA TÉCNICA DE IMPEDANCIA ELECTROMECAÁNICA BASADA EN MEDICIONES DESACOPLADAS DE TRANSDUCTORES PIEZOELÉCTRICOS

3.1 Introducción

Los transductores piezoeléctricos (PZT) pueden ser adheridos a las estructuras para monitorear y evaluar su condición por medio de las señales eléctricas proporcionadas por el acoplamiento electromecánico. Por lo tanto, se pueden utilizar para evaluar, identificar, clasificar y estimar las condiciones estructurales, y como consecuencia, se han descrito diferentes aplicaciones de los PZT, especialmente en los campos de la evaluación no destructiva (NDE, por sus iniciales en inglés), el monitoreo estructural (SHM) y el control, entre otros ([Chen & Yan, 2010](#); [Park et al., 2000](#); [Tseng & Wang, 2004](#)). En general, los sistemas integrados de monitoreo, si se implementan in situ, podrían disminuir los costos operativos de mantenimiento, y aumentar la confiabilidad y seguridad de las estructuras ([Annamdas & Soh, 2010](#); [Giurgiutiu, 2014a](#)). Las metodologías implementadas con los PZT tienen un papel importante en el servicio de las estructuras, específicamente, en el diagnóstico y pronóstico ([Baptista et al., 2011](#); [Yu et al., 2011](#)).

Las metodologías de detección de daños se basan en tecnologías de sensores y actuadores que pueden aplicar métodos activos y pasivos. Los métodos pasivos utilizan un conjunto de sensores para monitorear diferentes magnitudes físicas como aceleración, velocidad, tensiones y deformaciones, entre otras. En este tipo de métodos, los sensores no deben modificar las propiedades mecánicas de la estructura, es decir, no deben ser invasivos. Por otro lado, los métodos activos pueden proceder mediante variables cinemáticas (desplazamientos y deformaciones) que pueden cambiar el estado de la estructura monitoreada, con el objetivo de obtener información de esta y modificar su dinámica. Algunos métodos activos que utilizan PZT son la técnica de impedancia electromecánica (EMI), el pulso-eco, el «pitch-catch», los métodos «phased array», las ondas Lamb y la

detección multimodo, entre otros (Annamdas et al., 2014; Giurgiutiu, 2014a; Lingyu & Giurgiutiu, 2008; Purekar & Pines, 2010).

En los últimos años, la técnica EMI se ha convertido en una parte esencial en el desarrollo del campo de la detección de daños, ya que muchas aplicaciones han demostrado que esta técnica presenta una gran capacidad para captar cambios estructurales (Ai et al., 2014; Chen & Yan, 2010; Overly et al., 2009; Tawie & Lee, 2010; Wang et al., 2015). Los parámetros mecánicos y geométricos de un PZT se acoplan electromecánicamente con la estructura anfitriona (Madgav & Soh, 2007; Sun et al., 1995; Wetherhold et al., 2003; Xu & Liu, 2002). El acoplamiento se establece mediante el siguiente principio de funcionamiento: el PZT se deforma armónicamente en un espectro de frecuencias deseado cuando se le aplica un campo eléctrico armónico en una dirección de polarización. De este modo, excita la estructura anfitriona mediante vibraciones. Al mismo tiempo, el PZT recibe una respuesta estructural que convierte la energía mecánica en energía eléctrica, concretamente en forma de corriente. Esto se debe al efecto electromecánico (Liang et al., 1994a). Desde sus inicios, la técnica EMI ha mostrado un gran potencial en el campo del monitoreo (Chen & Yan, 2010; Madgav & Soh, 2007; Tin; Yang et al., 2008; Zagrai & Giurgiutiu, 2001).

Para monitorear la integridad de una estructura con la técnica EMI, es necesario cuantificar las variaciones en las señales eléctricas obtenidas del proceso de monitoreo. Estas variaciones se cuantifican con respecto a una línea base mediante índices que reflejan las modificaciones estructurales. Con este fin, se han desarrollado diferentes métricas de daño para definir los umbrales y observar los cambios en los índices. Los índices de daño establecen una categorización de las modificaciones estructurales que en algunos casos pueden determinar la intensidad y el tipo de daño (Ai et al., 2014; Annamdas & Soh, 2010; Giurgiutiu, 2014a; Tawie & Lee, 2010; Yu et al., 2011). Comúnmente, los índices en la técnica EMI se construyen sobre principios estadísticos, de los cuales se destacan algunas valoraciones cuantitativas que establecen una métrica de daño escalar. Diferentes

índices estadísticos han sido implementados para cuantificar las diferencias entre las líneas base y las señales monitoreadas. Particularmente, estos se basan en la RMSD, la media cuadrática (RMS), la MAPD y el CCD, entre otros (Annamdas et al., 2014; Giurgiutiu, 2014a; Hu et al., 2014; Liang et al., 1994a). Los cambios identificados señalan que la estructura inicial fue modificada por superar el umbral de daño establecido. La mayoría de estos índices se calculan a partir de la admitancia eléctrica, porque ha demostrado ser más efectiva en el proceso de identificación (Annamdas et al., 2007; Cuc & Giurgiutiu, 2004; Giurgiutiu & Zagrai, 2005; Hu et al., 2014; C. Liang et al., 1994b; Tinoco & Marulanda, 2014). Esto significa que se prefiere la admitancia eléctrica para cuantificar las variaciones, específicamente utilizando su parte real, que se denomina conductancia. La aplicación de la parte imaginaria (susceptancia) se ha descuidado por su baja sensibilidad a las modificaciones estructurales (Cuc & Giurgiutiu, 2004; Giurgiutiu & Zagrai, 2005; G. Park & Inman, 2005; Zagrai & Giurgiutiu, 2001). A pesar de esta desventaja, existen estudios que exploraran la sensibilidad de la susceptancia (Tinoco & Marulanda, 2014), aunque son pocos. Además, algunos índices basados en la admitancia se consideran mejores que otros, dependiendo de sus aplicaciones (Ai et al., 2014; Zagrai & Giurgiutiu, 2001), lo que indica que cada tratamiento de la información presenta una influencia en la sensibilidad de cada índice construido.

A la fecha, se han explorado nuevas métricas de daño en diferentes aplicaciones. Por ejemplo, se ha implementado un índice basado en elipses de confianza gaussianas que demostró ser sensible en ambas componentes de la admitancia (Tinoco & Marulanda, 2014). También se ha demostrado que la susceptancia también puede utilizarse para identificar daños mediante un análisis experimental, a través el cual se puede estimar un índice basado en elipses de confianza gaussianas, como se puede apreciar en el CAPÍTULO 2. (Ai et al., 2014) propuso una metodología para identificar y localizar un tipo de daño mediante un índice establecido a partir de impedancias mecánicas unidas (UMI, por sus iniciales en inglés). La técnica se aplicó para monitorear una viga de acero con daños por

corrosión. Se investigó la sensibilidad de la UMI mediante la comparación con los índices convencionales obtenidos a partir de la admitancia electromecánica. El estudio considera que la admitancia tiene una parte activa y otra pasiva, que puede descomponerse para aumentar la sensibilidad del daño en las señales medidas (Yang et al., 2008). (Hu et al., 2014) diseñó un nuevo índice para identificar daños en losas de hormigón. El estudio realizado predijo variaciones en el índice propuesto cuando la intensidad del daño se incrementó en las losas de hormigón armado. El índice presentó una variación regular con respecto a la distancia de los daños inducidos. Esto significa que la localización de los daños puede ser determinada con esta nueva métrica.

En este capítulo se expone un nuevo enfoque que considera las señales de impedancia eléctrica emitidas por los PZT como señales eléctricas acopladas. Esto implica que cuando un PZT está unido a una estructura, las impedancias eléctricas actúan regidas por un circuito en paralelo. Desde la perspectiva abordada en este estudio, cada PZT libre presenta propiedades mecánicas únicas, y esto implica que dichas propiedades tienen pequeñas diferencias geométricas que pueden influir en el conjunto de las señales eléctricas medidas. De hecho, se ha demostrado que cuando un PZT está libre, la impedancia eléctrica contiene su información mecánica de forma intrínseca (Liang et al., 1994b). Por lo tanto, la impedancia eléctrica se desacopla de las señales adquiridas cuando se adhiere a una estructura sin daños. El objetivo principal del desacoplamiento es capturar únicamente las contribuciones eléctricas realizadas por la estructura dentro de la impedancia eléctrica. Para mostrar las ventajas de este procedimiento, en este capítulo se derivan dos metodologías de identificación de daños a partir de las mediciones de la impedancia eléctrica. La resistencia (R) y la reactancia (X) se utilizan para la identificación y localización del daño inducido durante las pruebas. Para ello, se preparan cuatro placas para evaluar los daños con dos índices diferentes, que se basan en elipses gaussianas de confianza previamente estudiadas, cuya base teórica fue explicada en el CAPÍTULO 2.

3.2 Fundamentos teóricos

3.2.1 Desacople de la impedancia electromecánica (EM) considerando un circuito en paralelo

Un sistema mecánico equivalente para el conjunto estructura-PZT descrito inicialmente por (Tinoco & Serpa, 2012) se puede apreciar en la Figura 3.1. Se asume que cada grado de libertad de la estructura puede representarse mediante sistemas mecánicos en serie, en los que la conexión entre ellos viene dada por puntos conducidos en el PZT (Ai et al., 2014; Bhalla & Soh, 2004a, 2004b). En el sistema mecánico considerado, se desprecia la unión adhesiva, ya que el acoplamiento entre ellos puede suponerse rígido, tal como se representa en el esquema de la Figura 3.1b. Se sabe que cuando un PZT está libre, la impedancia eléctrica contiene su información mecánica de forma implícita. Sin embargo, cuando está acoplado a una estructura, las impedancias mecánicas se combinan bajo reglas físicas en la impedancia eléctrica (Liang et al., 1994b). Estos principios fueron expuestos en el CAPÍTULO 2.

Desde el punto de vista eléctrico, la impedancia eléctrica acoplada puede desacoplarse mediante una equivalencia eléctrica, similar a la mecánica. En la Figura 3.1a se representa un esquema de desacoplamiento. Esta noción se apoya en la siguiente idea; considérense diferentes PZT con pequeñas variaciones geométricas entre ellos y unidos a una estructura. Esto implica que las impedancias mecánicas son ligeramente diferentes. Cuando los PZT están unidos a la misma estructura, como consecuencia, todas las señales eléctricas serán influenciadas por las variaciones geométricas de cada uno de ellos, induciendo una perturbación en la impedancia eléctrica acoplada.

Bajo el enfoque abordado en esta investigación, se asume que las impedancias eléctricas pueden expresarse como un circuito eléctrico en paralelo, esto con el fin de desacoplar la señal de la estructura de las señales principales. Dichas respuestas incluyen ambas señales (la señal del PZT y la de la estructura).

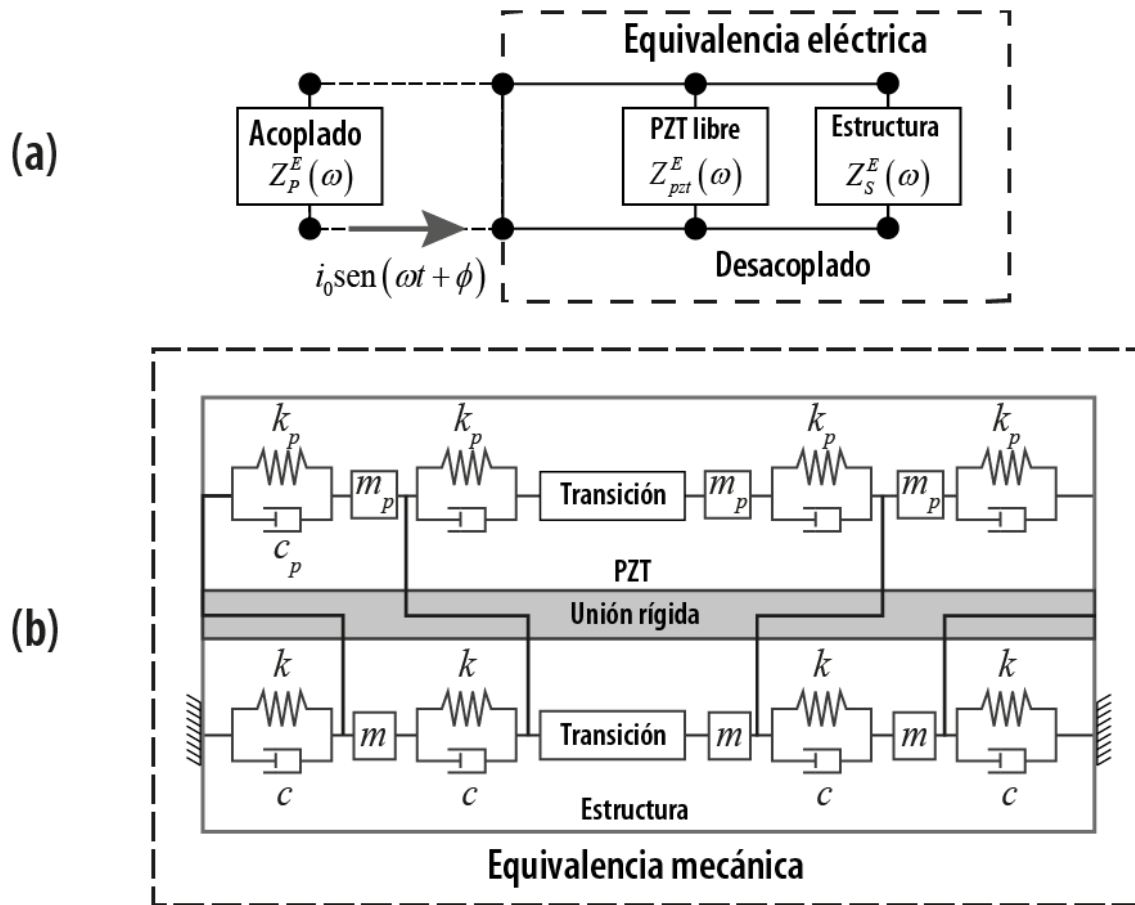


Figura 3.1. a. Equivalencia eléctrica de la impedancia eléctrica acoplada. b. Equivalencia mecánica del sistema estructura-piezotransductor acoplado.

En la Figura 3.1a se presenta una equivalencia eléctrica del sistema eléctrico acoplado y desacoplado con respecto a la impedancia eléctrica global. A partir de este esquema, se establece el siguiente modelo

$$\frac{1}{Z_P^E(\omega)} = \frac{1}{Z_S^E(\omega)} + \frac{1}{Z_{pzt}^E(\omega)}, \quad (3.1)$$

donde $Z_P^E(\omega)$ es la impedancia eléctrica acoplada, $Z_S^E(\omega)$ es la contribución de la estructura a la impedancia eléctrica y $Z_{pzt}^E(\omega)$ es la impedancia eléctrica del piezotransductor libre. El superíndice E hace referencia al dominio eléctrico. La

idea principal es determinar la contribución de la estructura a la señal acoplada medida por $Z_P^E(\omega)$. Esto se puede obtener de la Ecuación (3.1) de esta manera

$$Z_S^E(\omega) = \frac{Z_P^E(\omega)Z_{pzt}^E(\omega)}{Z_{pzt}^E(\omega) - Z_P^E(\omega)}. \quad (3.2)$$

Pero $Z_P^E(\omega) = R_P + X_P i$ y $Z_{pzt}^E(\omega) = R_{pzt} + X_{pzt} i$, donde i es el número imaginario. Sustituyendo estas ecuaciones en la Ecuación (3.2), se determina la contribución de la estructura a la impedancia eléctrica acoplada, de la siguiente manera

$$Z_S^E(\omega) = \frac{(R_P + X_P i)(R_{pzt} + X_{pzt} i)}{(R_{pzt} - R_P) + (X_{pzt} - X_P) i}. \quad (3.3)$$

Reorganizando la Ecuación (3.3) y eliminando el número imaginario del denominador, se obtiene la siguiente expresión

$$Z_S^E(\omega) = \frac{(R_P R_{pzt} - X_P X_{pzt}) + (R_{pzt} X_P + R_P X_{pzt}) i}{(R_{pzt} - R_P)^2 + (X_{pzt} - X_P)^2} \left[(R_{pzt} - R_P) - (X_{pzt} - X_P) i \right]. \quad (3.4)$$

A partir de la Ecuación (3.4), es posible aislar las partes real e imaginaria, de manera que el valor de la resistencia se obtiene de

$$R_S^E(\omega) = \frac{(R_P R_{pzt} - X_P X_{pzt})(R_{pzt} - R_P) + (R_{pzt} X_P + R_P X_{pzt})(X_{pzt} - X_P)}{(R_{pzt} - R_P)^2 + (X_{pzt} - X_P)^2}, \quad (3.5)$$

y la reactancia se calcula mediante

$$X_S^E(\omega) = \frac{(X_P R_{pzt} - R_P X_{pzt})(R_P - R_{pzt}) - (R_{pzt} R_P + X_P X_{pzt})(X_P - X_{pzt})}{(R_{pzt} - R_P)^2 + (X_{pzt} - X_P)^2}. \quad (3.6)$$

Las Ecuaciones (3.5) y (3.6) representan las componentes real e imaginaria de las contribuciones a la respuesta eléctrica de $Z_S^E(\omega)$, sabiendo que $Z_S^E(\omega) = R_S(\omega) + X_S(\omega)i$. Las impedancias eléctricas se ven afectadas por los parámetros mecánicos de cada PZT. Por lo tanto, cuando las señales están desacopladas, la estructura se monitorea sin perturbaciones de los sensores.

3.2.2 Índice H_r basado en una elipse de confianza gaussiana

Usando la misma metodología del CAPÍTULO 2, se establecieron índices de daño para el análisis de los resultados de las pruebas experimentales del presente capítulo. Estos índices fueron usados para la identificación y localización de cada daño después del cálculo de la matriz de covarianzas \mathbf{C} , los valores propios λ_{\min} y λ_{\max} , los vectores propios $\lambda = \lambda_x \mathbf{i} + \lambda_y \mathbf{j}$ (que determinan una elipse de confianza del 95%), y del ángulo β_M de la dirección principal de la medición de monitoreo, como se explica en la sección 2.2.2, además del índice θ , que describe la desviación de la dirección del eje principal de la elipse probabilística de los datos de monitoreo con respecto a la dirección del eje principal de la elipse de los datos de referencia.

El primer índice de daño propuesto en este capítulo se define como la relación entre el área de la elipse y el rectángulo máximo delimitado por los datos normalmente distribuidos (Tinoco & Marulanda, 2014) de la siguiente manera

$$I_0 = 2.4477 \frac{\pi \lambda_{\min} \lambda_{\max}}{Y_R Y_M}, \quad (3.7)$$

donde Y_R & Y_M son los datos máximos de las distribuciones gaussianas obtenidas de las mediciones de referencia y de monitoreo respectivamente. Para determinar las variaciones de los datos de monitoreo con respecto a $\pi/4$, que es el ángulo de comparación para dos mediciones iguales, el siguiente índice correlaciona los valores propios a través del índice I_0

$$H_r = 100 \left(\frac{I_0 \theta}{I_0 + \theta} \right). \quad (3.8)$$

El significado del índice se justifica por el hecho de que los valores propios varían con los datos, así como con la dirección principal. Por lo tanto, esas variaciones pueden correlacionarse mediante esta simple expresión.

Los índices propuestos en esta sección se basan en funciones de distribución normal y en su correlación con una medición de referencia. Es importante tener en cuenta que las funciones de distribución normal se utilizan para suavizar los datos obtenidos de la impedancia eléctrica, ya que estas mediciones suelen ser ruidosas. De esta manera, las mediciones pueden correlacionarse fácilmente, si se distribuyen normalmente. Una descripción similar a los índices presentados puede encontrarse en [\(Tinoco & Marulanda, 2014\)](#).

3.3 Metodologías de detección de daños

3.3.1 Metodología de identificación de daños usando la reactancia (X)

En esta sección se explicará un procedimiento para identificar una modificación estructural o un daño en una estructura que tiene un PZT unido a ella. El procedimiento de identificación se divide en dos etapas: el cálculo de la reactancia y la identificación del daño. En este estudio, el daño se refiere a un cambio superficial o a una discontinuidad realizada en la estructura. Básicamente, puede representarse como una superficie perforada. Para identificar el daño, se propone un conjunto de procedimientos o pasos para calcular un indicador de daño

llamado H_r (véase la sección 3.2.2), que se basa en una elipse gaussiana obtenida a partir de señales de reactancia desacopladas. El desacoplamiento (explicado en la sección 3.2.1) es la principal contribución de este estudio. Además, en la Figura 3.2 se muestra y describe un esquema para determinar el índice H_r .

Previo a la etapa de monitoreo, se deben medir las impedancias eléctricas de cada PZT libre, ya que este se unirá a la estructura anfitriona. Antes de realizar el monitoreo, se elige un rango de frecuencias. Este rango se puede establecer a partir de la sensibilidad de la señal. A veces, la selección del ancho de banda se basa en el lugar donde las señales eléctricas presentan mayores picos en el dominio de la frecuencia. La recomendación es excitar el PZT en el rango de los ultrasonidos, superior a 10 kHz (Bhalla & Soh, 2004a, 2004b; Tinoco & Marulanda, 2014). El segundo paso es adherir el PZT a la estructura y medir las impedancias eléctricas con el objetivo de desacoplar la contribución de cada PZT libre aplicando la Ecuación (2.7) de la sección 2.2.2. Entonces, se puede determinar la reactancia desacoplada de la estructura $X_S^E(\omega)$. Esta reactancia desacoplada se considera como la medida de referencia (estructura sin daños). El mismo procedimiento debe repetirse para la reactancia de monitoreo, que también debe estar desacoplada.

La reactancia de referencia es una medida fija que se utiliza para realizar comparaciones. Por otro lado, la reactancia de monitoreo se cambia en cada estado de medición. En el siguiente paso, las funciones de densidad de probabilidad (PDF, por sus iniciales en inglés) se aproximan para cada medición de monitoreo aplicando la Ecuación (2.7), e incluyendo la reactancia de referencia. Por lo tanto, cada reactancia de monitoreo se compara con $X_S^E(\omega)$ mediante una matriz de covarianza según la Ecuación (2.8), como se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 3.2. A partir de la matriz de covarianza, se definirán los valores y vectores propios para establecer una métrica del daño.

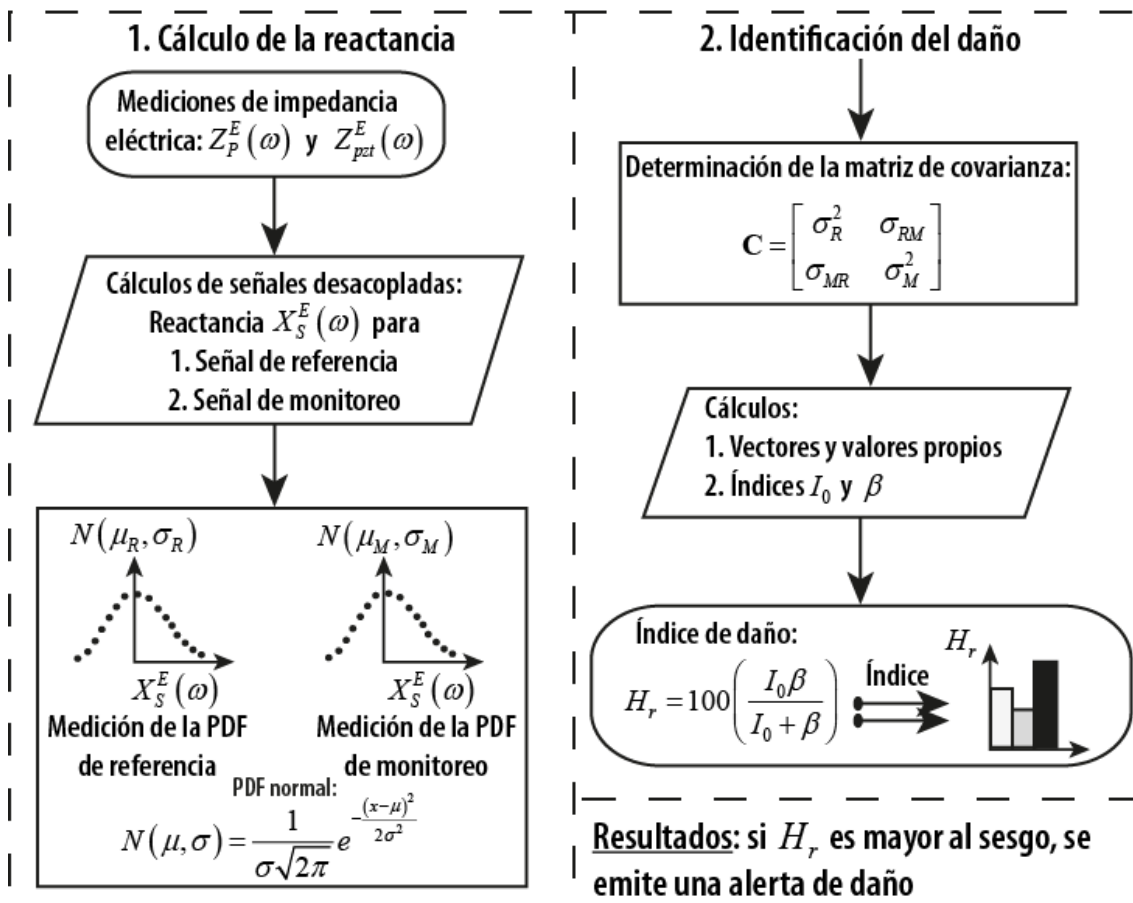


Figura 3.2. Procedimientos de identificación de daños

Utilizando las Ecuaciones (2.12) y (3.7), es posible calcular la Ecuación (3.8), que representa el índice propuesto H_r . Para establecer una línea de base utilizando el índice, es necesario medir el sesgo del sistema de adquisición para poder determinar si hay un cambio en el índice cuando se realiza una modificación en la estructura.

La metodología presentada en esta sección es considerada como una estrategia sencilla para cuantificar las contribuciones realizadas por la estructura a las señales de reactancia. Las ventajas y desventajas de la metodología se muestran en la prueba experimental descrita en la siguiente sección.

3.3.2 Metodología de localización de daños mediante la resistencia (R)

En esta sección se presentará una metodología para la localización de daños superficiales en una estructura activa. Como se mencionó anteriormente, el daño es definido como una modificación estructural realizada por una perforación. La metodología propuesta para la localización de daños está diseñada y organizada en tres etapas: normalización de la resistencia, identificación del patrón y localización del daño. Estas etapas se describen en un diagrama que se muestra en la Figura 3.3.

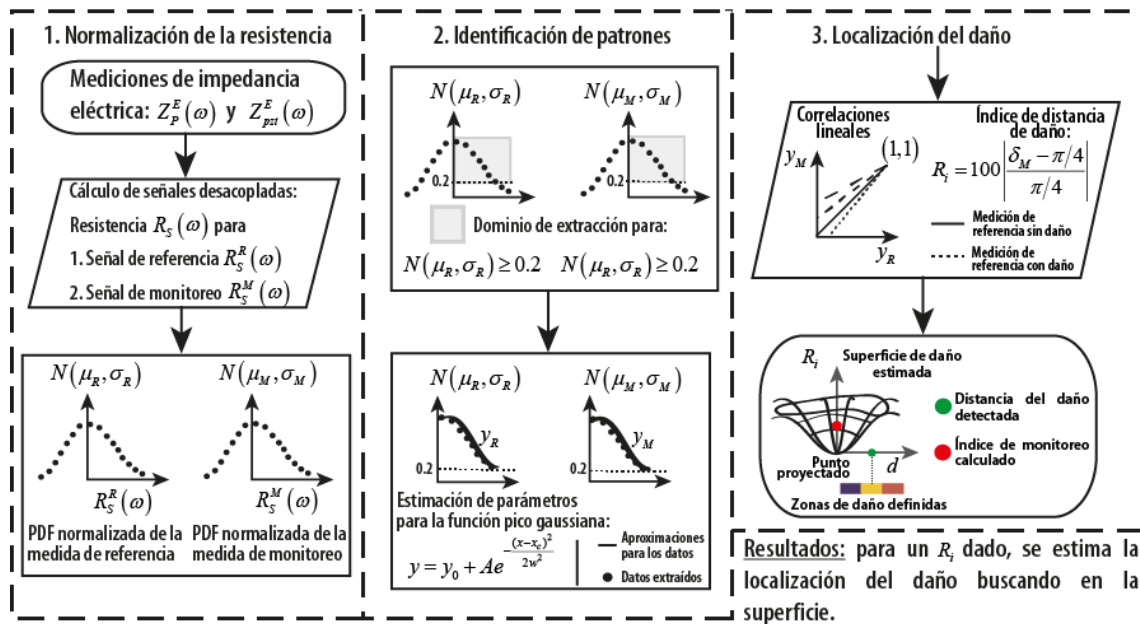


Figura 3.3. Procedimiento de localización de daños

La primera etapa se basa en tres pasos; el desacoplamiento de las señales de resistencia obtenidas de cada PZT libre, el cálculo de las resistencias desacopladas, y el tercer paso se estructura en una aproximación y normalización mediante funciones gaussianas. En el primer paso, el procedimiento de desacoplamiento es el mismo que el descrito en la Figura 3.2. Esto denota el proceso de identificación de daños. En el segundo paso, se determinan las resistencias desacopladas para las señales de referencia y de monitoreo referidas a una estructura sin daños y a una estructura en estado operativo. Estas señales se

aproximan mediante las PDF normalizadas y aproximadas por una función gaussiana como se explica en la sección 3.2.2. En la segunda etapa, el análisis de la señal se estructura mediante un análisis exploratorio de datos. Esto significa que se han realizado pruebas experimentales previas para definir el procedimiento. Por lo tanto, utilizando las resistencias normalizadas (de referencia y de monitoreo), se delimita un dominio para establecer una comparación de patrones. El dominio está acotado para extraer las principales características de las señales suavizadas por las PDF que están constreñidas por los siguientes límites

$$N(\mu_R, \sigma_R) \geq 0.2 \text{ y } N(\mu_M, \sigma_M) \geq 0.2 \text{ para } \bar{R}_S^R(\omega) \geq 0 \text{ y } \bar{R}_S^M(\omega) \geq 0. \quad (3.9)$$

En la Ecuación (3.9), \bar{R}_S^R y \bar{R}_S^M son resistencias normalizadas, donde los subíndices R y M significan referencia y monitoreo. Los datos identificados a partir de las desigualdades establecidas deben ser ordenados y ajustados mediante una función. La función elegida es una función de pico gaussiano y se escribe de la siguiente manera

$$y = y_0 + ae^{-\frac{(x-x_c)^2}{2b^2}}. \quad (3.10)$$

En la Ecuación (3.10), y_0 , a , e y x_c son constantes y x se refiere a los datos ordenados. Para estimar las constantes y resolver la Ecuación (3.10), se pueden usar varios métodos. En esta investigación se optó por utilizar el ajuste de mínimos cuadrados no lineales para ajustar la función elegida. Se pueden encontrar diferentes técnicas de aproximación de funciones mediante mínimos cuadrados en [\(Draper & Smith, 2014\)](#). Después de aplicar los procedimientos de ajuste de los datos, sigue la última etapa. La idea principal de esta última etapa es definir la localización del daño. Sin embargo, primero es necesario establecer un conjunto de condiciones para conseguir ese objetivo. A partir de la tercera etapa, se debe realizar una correlación entre las funciones aproximadas, de manera que la referencia se compare con cada señal de monitoreo. Si de las comparaciones no se desprende una correlación lineal, se predicen aproximaciones lineales para estas

señales. Este procedimiento fue diseñado porque es posible comparar cada función de monitoreo con la función de referencia de forma sencilla. Para la nueva comparación, se diseña un índice basado en la variación de la pendiente de la correlación lineal y se construye sobre la siguiente proposición

$$R_i = 100 \left| \frac{\delta_m - \pi/4}{\pi/4} \right|, \quad (3.11)$$

donde δ_m es el valor angular de la pendiente calculada para la resistencia de monitoreo. El índice R_i indica en qué medida la correlación lineal se ve afectada por el daño. El índice se propone para establecer una curva estándar que representará la distancia aproximada a la que se produce el daño. En este caso, la idea es construir una curva de daños a partir de ensayos anteriores. Una vez caracterizada la curva de daños, el procedimiento de localización de daños se realiza en la etapa de monitoreo, de manera que el índice R_i^M se busca en la curva para estimar la distancia en la que se indujo el daño. De acuerdo con el análisis exploratorio de datos realizado por los ensayos experimentales anteriores, la distancia del daño se discretiza en zonas que cubren el dominio de la estructura. Como consecuencia, se conocerá la zona en la que existe el daño en lugar del valor exacto de la distancia. La curva puede crearse a partir de dos fuentes; una de ellas viene dada por las pruebas experimentales y otra puede estimarse mediante simulaciones numéricas. En este estudio, la curva se basará en las pruebas experimentales.

3.4 Montaje experimental

Para probar el procedimiento de identificación y localización de daños, se preparó un conjunto de cuatro placas de aluminio como parte de las pruebas experimentales. Para llevar a cabo las pruebas, se adhieren los PZT a las placas, y cada PZT se localiza en el centro de cada placa, como se muestra en la Figura 3.4. Para estas pruebas experimentales, se usaron los PZT SEN-10293, cuya hoja de datos puede ser consultada en ([Sparkfun electronics, 2014](#)).

En la fase experimental, se eligió una tarjeta de evaluación *AD5933* de *Analog Devices* ([Analog Devices, 2014](#)) para medir la impedancia eléctrica y el ángulo de fase de cada PZT adherido a cada placa. Esta tarjeta de evaluación es básicamente un analizador de impedancia eléctrica de bajo costo. Un esquema de conectividad del montaje experimental se representa en la Figura 3.4, donde cada PZT se conecta independientemente a la placa *AD5933* para medir la impedancia eléctrica en todos los casos de estudio.

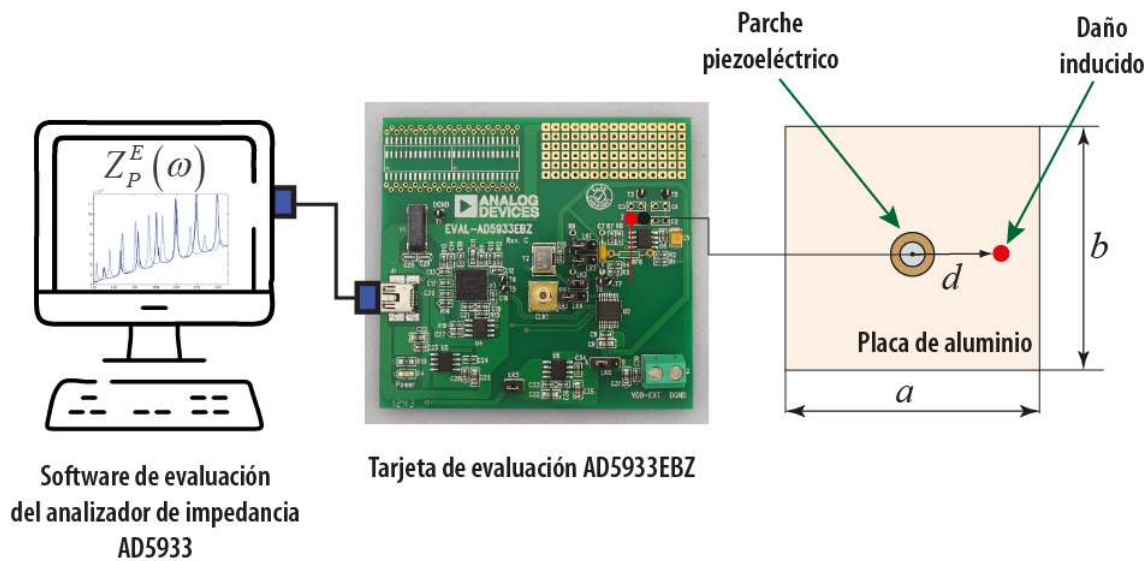


Figura 3.4. Montaje experimental

En la Tabla 3.1 se enumeran las dimensiones de cada placa utilizada en los ensayos. El espesor de la unión es un parámetro fijo controlado por un micrómetro.

Tabla 3.1. Dimensiones de las placas experimentales

Placa	Dimensiones [mm]			Distancia del daño [mm]
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>t</i>	<i>d</i>
1	150	153	1.5	20
2	153	149	1.5	30
3	152	152	1.5	50
4	149	149	1.5	70

Para unir los PZT a las placas, se aplicó un método de adhesión. Estos se adhirieron con *Loctite 495* a las placas y la superficie se preparó con *Loctite 7649* para garantizar una unión sin impurezas que pudieran afectar la medición. El procedimiento de medición se establece en el manual de usuario elaborado por *Analog Devices* ([Analog Devices, 2014](#)).

Las pruebas experimentales se realizaron en las siguientes condiciones: las placas se encuentran en un banco de pruebas a temperatura ambiente (20°C - 25°C). De acuerdo con las metodologías expuestas en las secciones anteriores, inicialmente se lee la medición eléctrica de la impedancia para cada PZT libre (sin adhesión). Este procedimiento se realiza antes de adherir cada PZT a las placas. Cuando los PZT están unidos a la estructura, se miden las impedancias eléctricas. Después de establecer las mediciones de referencia, se realizan perforaciones en cada placa a una distancia *d*, de acuerdo con la descripción presentada en la Figura 3.4 y con los valores enumerados en la Tabla 3.1. En cada ensayo se ejecutan dos etapas de daño para cada placa: una perforación de 1/32 in y otra de 5/64 in. El rango de medición en la frecuencia está determinado por las limitaciones del instrumento de medición usado, que se define en 10 kHz y 100 kHz. Para medir frecuencias más altas, es necesario un equipo especial. Sin embargo, la medición en alta frecuencia presenta ventajas, ya que se pueden excitar los modos de espesor de las vibraciones de los PZT ([Malinowski et al., 2015](#); [Park et al., 2005](#)).

3.5 Resultados y discusión

3.5.1 Identificación de los daños

Para aplicar la metodología de identificación de daños propuesta en la sección 3.3.2, se prepararon cuatro pruebas experimentales. En la Tabla 3.1, se enumeran las dimensiones de cada placa. El daño en cada placa se induce mediante una perforación a una distancia d del centro de cada placa. El tamaño de la perforación se controla en dos estados de severidad, $1/32$ in y $5/64$ in. Las descripciones detalladas de los experimentos se mencionan en la sección 3.4.

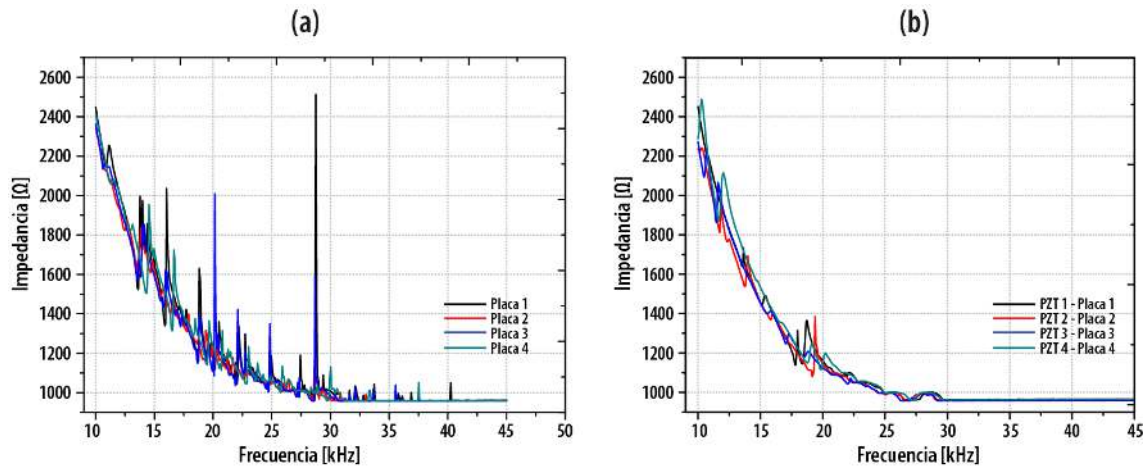


Figura 3.5. a. Impedancia eléctrica del PZT acoplado a la placa (sin daños). b. Impedancia eléctrica del PZT libre

En la Figura 3.5 se muestran las impedancias obtenidas de las placas (PZT adheridos) y del PZT libre utilizadas en los ensayos experimentales. El rango de frecuencias elegido para los experimentos fue de 10–45 kHz con incrementos de 70 Hz. Este espectro se debe a las limitaciones en las tasas de muestreo que presenta el analizador de impedancia. En la Figura 3.5b se observa que todas las señales de la impedancia eléctrica determinadas son diferentes. Esto indica que las variaciones geométricas caracterizan las señales de la impedancia eléctrica en cada PZT, tal y como se expuso en la sección 3.2.1, aunque el comportamiento principal de la señal se mantiene en todos los PZT y es similar a una función exponencial

decreciente. En la Figura 3.5a, se percibe que la impedancia eléctrica acoplada se rige por la tendencia de las señales tomadas para el PZT libre.

En las Figura 3.5a y Figura 3.5b se pueden diferenciar las variaciones, ya que estas se deben a las contribuciones de cada placa (PZT unido a las placas). Esencialmente, aparecen algunos picos en las señales acopladas (véase la Figura 3.5a), como el pico claramente visible a 28 kHz, los cuales son anexos a las frecuencias de resonancia mecánica de la estructura, introducidas por el acoplamiento electromecánico (Bhalla & Soh, 2004a, 2004b; Liang et al., 1994b; Tinoco & Serpa, 2011; Xu & Liu, 2002).

Para analizar la impedancia eléctrica, las señales se descomponen en sus proyecciones, parte real (resistencia) e imaginaria (reactancia). Estas se obtienen a partir del ángulo de fase y la magnitud de la impedancia eléctrica, aplicando reglas vectoriales simples (véase la Figura 2.1). Los resultados se ilustran en las Figura 3.6a y Figura 3.6b (sin daño), y en las Figura 3.6c y Figura 3.6d (con daño de $1/32$ in). En la Figura 3.6 se puede observar que la resistencia es una función positiva y la reactancia es una función negativa, en ambos casos. Esto denota que la impedancia eléctrica tiene una naturaleza capacitiva, porque la señal se encuentra en el cuarto cuadrante, como se explica en la sección 2.2.1. Por lo tanto, la señal confirma que el PZT presenta una reactancia capacitiva (Sirohi & Chopra, 2000). Se pudo observar que la resistencia es una señal ruidosa, en la que se distinguen algunos picos de la tendencia central de la señal. Sin embargo, no es fácil observar las variaciones entre las Figura 3.6a y Figura 3.6b, que corresponden a la estructura sin y con daños. En el caso de la reactancia, es una señal menos ruidosa, pero las variaciones son implícitas a ella (entre estructura sin y con daño), porque los cambios estructurales no son perceptibles a simple vista.

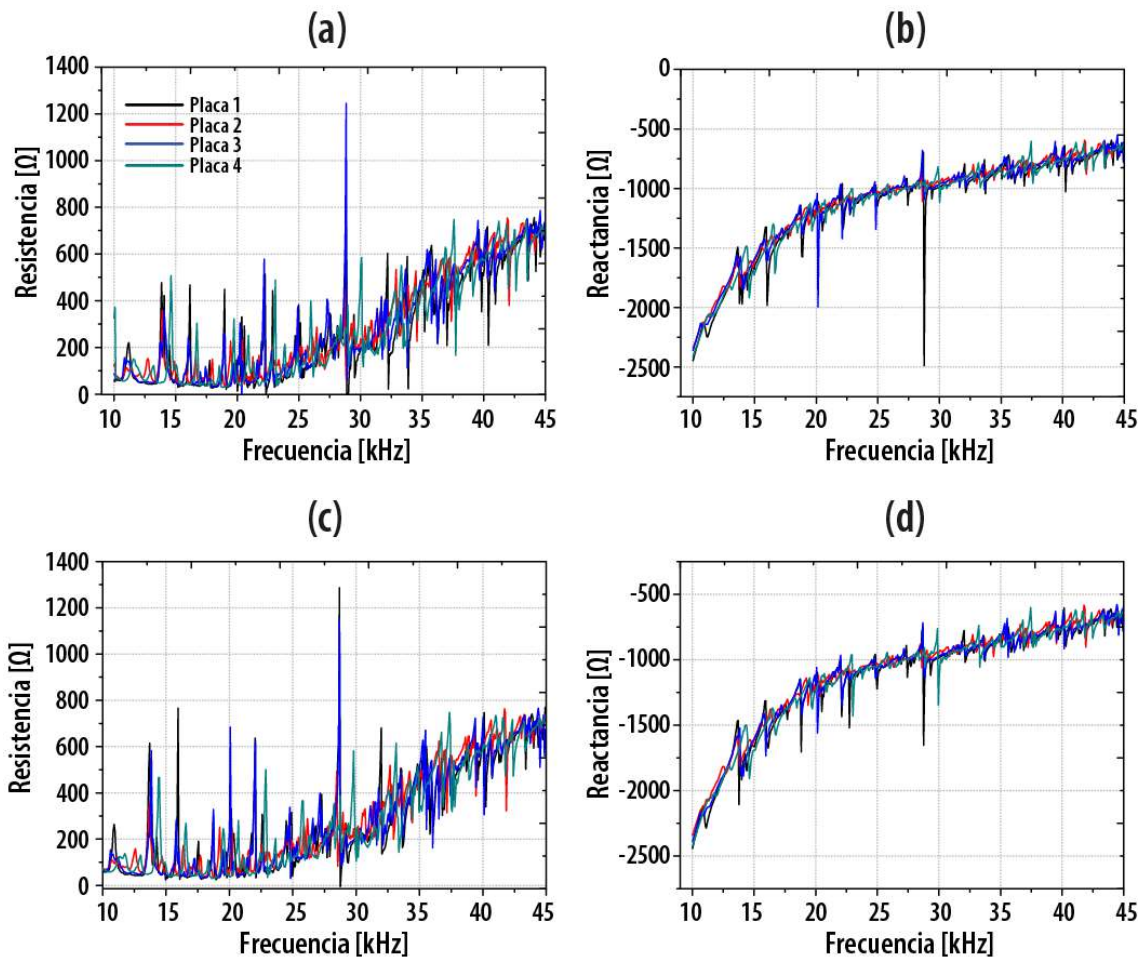


Figura 3.6. Estructura sin daños: **a.** Resistencia. **b.** Reactancia. Estructura con daños, perforada $1/32$ in: **c.** Resistencia **d.** Reactancia

Para cuantificar las variaciones en las señales medidas, es necesario aplicar una métrica que determine los cambios entre las señales obtenidas para la estructura con y sin daño. En la mayoría de los estudios que aplican la técnica EMI, la métrica del daño se basa en índices calculados a partir de cuantificaciones estadísticas de la admitancia, como se muestra en (Bhalla & Soh, 2004a, 2004b; Fu & He, 2001; Xu & Liu, 2002), y como se mencionó en la sección 2.2.2. En este estudio no se considera necesario realizar una comparación con otros índices, ya que el objetivo principal en esta sección es probar la metodología de identificación de daños propuesta.

La contribución de esta investigación se centra en desacoplar la señal de un PZT libre para calcular las variaciones añadidas por la estructura directamente desde la impedancia eléctrica. Siguiendo esta idea, la Figura 3.7 muestra las señales desacopladas recogidas para las placas sin y con daños. La resistencia y la reactancia desacopladas se determinaron mediante las Ecuaciones (2.7) y (3.6). En las secciones anteriores se explicaron las consideraciones y los conceptos teóricos sobre el desacoplamiento. En la Figura 3.7 se observa que las señales desacopladas son menos ruidosas que las acopladas, mostradas en la Figura 3.6. Esto confirma que las señales están dominadas por los fenómenos electromecánicos del PZT, lo que significa que las señales acopladas y desacopladas son totalmente diferentes en su forma y, por lo tanto, se confirma la validez de la idea del desacoplamiento.

Se percibe que las señales desacopladas presentan pequeñas variaciones entre ellas. Por ejemplo, en ambas reactancias (Figura 3.6b y Figura 3.6d), las diferencias se observan a partir de los 25 kHz, y se notan en las amplitudes de pico de cada una. Esto implica que, en las señales, los cambios estructurales son tomados por la impedancia eléctrica.

Para medir los cambios introducidos por el daño, perforación de $1/32$ in y $5/64$ in, se toma la reactancia como señal de referencia para el proceso de identificación. La decisión de tomar la reactancia se basa en la naturaleza capacitiva del PZT, por lo que se calcula un índice basado en elipses de confianza gaussianas para registrar las variaciones de la reactancia. El índice propuesto en la sección 3.2.2 es una modificación de los índices presentados en el CAPÍTULO 2.

La principal idea de cuantificar los cambios mediante un índice es capturar las variaciones introducidas en la señal de monitoreo con respecto a la señal de referencia tras producirse un daño en la estructura. Para ello, se aplicó la metodología expuesta en la sección 3.3.1.

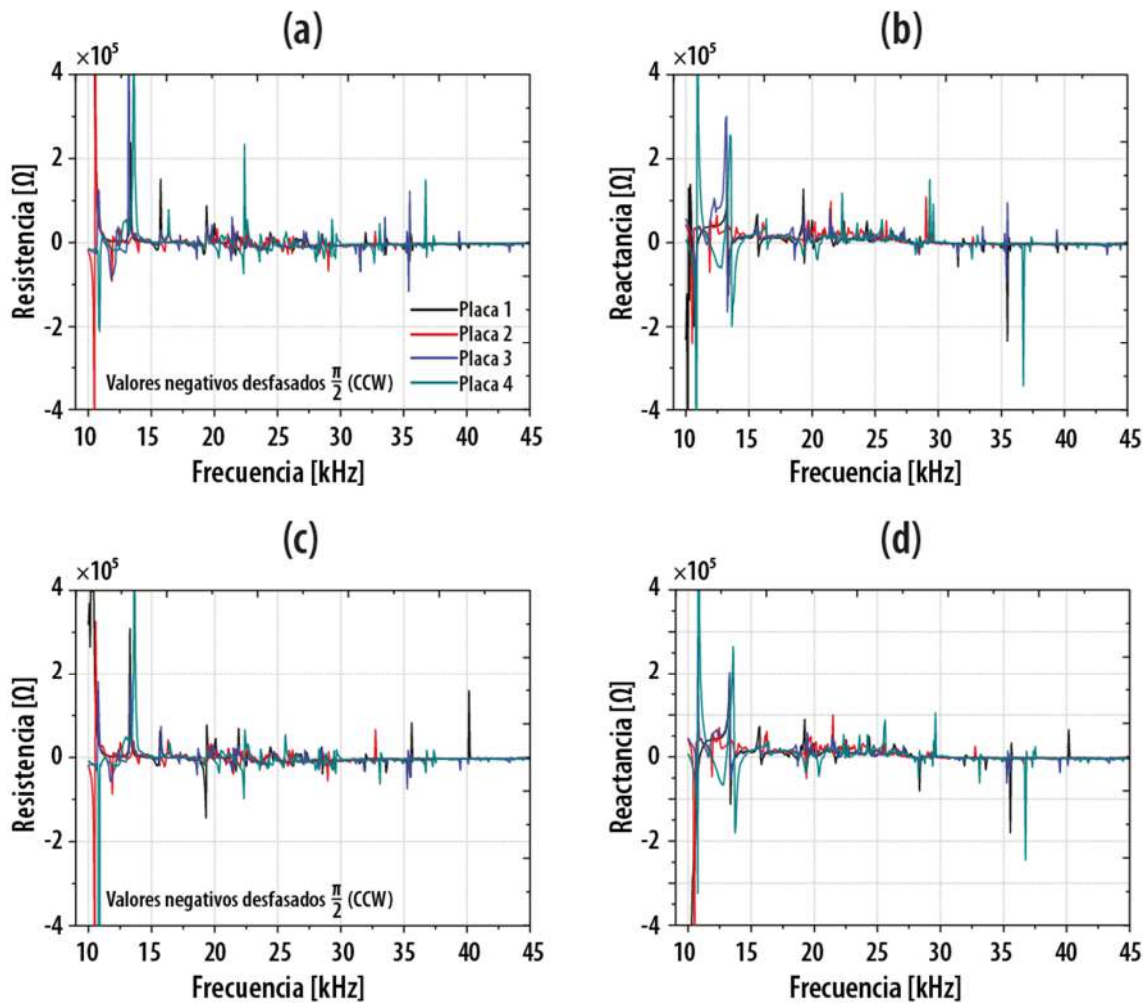


Figura 3.7. Estructura sin daños: **a.** Resistencia desacoplada. **b.** Reactancia desacoplada.

Estructura con daños, perforada $1/32$ in: **c.** Resistencia desacoplada. **d.** Reactancia desacoplada

La Figura 3.8a muestra el cálculo del índice H_r a partir de las reactancias acopladas. En el eje horizontal están representadas las placas (ver Tabla 3.1), y para cada placa hay cuatro indicadores obtenidos con H_r ; sin daño (medición de referencia), y la media de las mediciones sin daño para las perforaciones de $1/32$ in y $5/64$ in. El sesgo se refiere a una comparación de mediciones sin daño. En este caso, se tomaron 20 datos para cada placa antes de inducir el daño y realizar el proceso de identificación. El sesgo es la variación inducida por el instrumento de medición y se asume que se pueden identificar daños por encima de este valor.

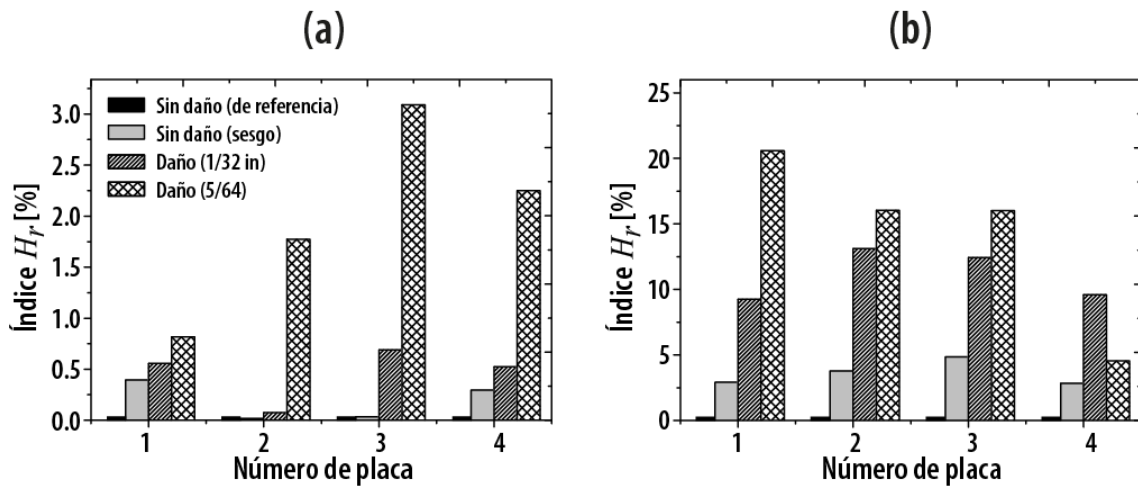


Figura 3.8. Índice H_r de: a. Reactancia acoplada. b. Reactancia desacoplada

En la Figura 3.8a se observa que el índice exhibe una tendencia solo para la perforación de 5/64 in. Por otro lado, con la perforación de 1/32 in, no es evidente un procedimiento de identificación, lo cual sugiere que los índices parecen tener valores arbitrarios. En los cuatro casos, se concluye que la reactancia acoplada no es una medida para cuantificar las modificaciones estructurales, ya que los índices no muestran un significado concreto y parecen obtenerse al azar. Según la teoría de circuitos, la reactancia está directamente asociada a la susceptancia (parte imaginaria de la admitancia). En la técnica EMI, se indica que la sensibilidad del índice debe ser baja. En este caso el índice se encuentra entre el 1% y el 3%. Como conclusión, se observa que el índice no muestra una regularidad para realizar un proceso de identificación de forma clara.

Sin embargo, la Figura 3.8b muestra que los índices calculados con las reactancias desacopladas cuantifican la modificación estructural de forma sistemática. En primer lugar, se observa que el sesgo (barras grises) tiene una media de 3.59% y una desviación estándar de 0.94%. Como se ha mencionado anteriormente, el sesgo se establece como referencia, ya que a partir de este valor es posible identificar los daños. Esto se debe a la repetibilidad del instrumento de medición, dado que el índice es ciego hasta el valor del sesgo, que se considera un

umbral. Las variaciones del sesgo no implican que deba tener el mismo valor, puesto que las dimensiones de cada placa varían ligeramente entre sí, como se muestra en la Tabla 3.1. En consecuencia, el objetivo principal es demostrar que un proceso de identificación es factible considerando cada placa como independiente.

La Figura 3.8b muestra que para la perforación de $1/32$ in, el proceso de identificación es bastante claro en todas las placas. Por ejemplo, en cada placa el valor calculado de H_r es de 9.24% (placa 1), 13.10% (placa 2), 12.43% (placa 3) y 9.60% (placa 4), respectivamente. Los resultados indican una mayor sensibilidad (cambio en el valor de H_r) a la modificación estructural realizada en la placa sin daños. Los valores mencionados anteriormente denotan que en cada caso de estudio es posible ver los cambios en la reactancia desacoplada, lo que valida el proceso de identificación. Se observa que cuando la perforación es más lejana, la magnitud de H_r decrece. Se obtuvieron resultados similares para el daño de $1/32$ in. Por ejemplo, se evidencia que el índice presenta mayores cambios en las placas 1, 2 y 3 que en la placa 4, aunque en la placa 4 el daño se produjo a una distancia de 2.75 in desde su centro. Sin embargo, se puede mencionar que el índice CCD disminuye linealmente cuando el daño está más lejos de la placa (Giurgiutiu & Zagrai, 2005).

Para la segunda etapa de daños, los valores de H_r son de 20.57% (placa 1), 16.04% (placa 2), 16.01% (placa 3) y 4.54% (placa 4), respectivamente. Según el primer caso (daño $1/32$ in), se pueden destacar los efectos de la distancia, de forma que H_r tenía un valor más alto para el daño más cercano y un valor más bajo para el daño más lejano, como se evidencia en (Giurgiutiu & Zagrai, 2005). Sin embargo, se observa que el proceso de identificación es factible porque, en todos los casos es posible diferenciar la placa en buenas condiciones de la placa con daños. A partir de los resultados mostrados en la Figura 3.8, surge la oportunidad

de estudiar los efectos del tamaño de la perforación (severidad) sobre la magnitud de H_r , así como los efectos de la distancia del daño.

Se presentó el proceso de validación de la identificación de daños propuesto en la sección 3.3.1. La identificación se aplicó a cuatro placas en dos etapas de daño, perforaciones de $1/32$ in y $5/64$ in. Los resultados parecen ser viables para la identificación de daños, ya que en todos los casos fue posible identificar la perforación con el uso de reactancias desacopladas. Es interesante ver como la sensibilidad aumenta para las señales desacopladas, mostrando que el desacoplamiento magnifica las contribuciones eléctricas cuando se modifica la estructura. El desacoplamiento es considerado entonces como una contribución relevante ya que la sensibilidad de los índices se ve afectada con este procedimiento.

3.5.2 Identificación y localización de daños

En esta sección se presenta una aplicación del enfoque propuesto en la sección 3.3.2, que se basa en la definición de un patrón de daño que se calcula a partir de una estructura similar a la que se va a monitorear. Por lo tanto, se realizan pruebas experimentales previas para establecer una superficie de daño en la que se buscará el daño en el proceso de monitoreo mediante un índice. Para comprobar el rendimiento y la viabilidad de la metodología, se realizan pruebas experimentales en las cuatro placas presentadas en la sección 3.4 y descritas en la Tabla 3.1, para las cuales las señales de impedancia se midieron barriendo una banda de frecuencia de 10-45 kHz cada 70 Hz. Siguiendo los procedimientos definidos en la Figura 3.3, se deben seguir tres etapas para determinar la localización del daño. Estas corresponden a la normalización de la resistencia, la identificación del patrón y la localización del daño.

Es necesario esbozar una caracterización del tipo de daño en la metodología propuesta, ya que se construirá una referencia sobre el mismo. Para los

experimentos, el tipo de daño se demarca mediante una perforación, como se ha mencionado anteriormente. En las pruebas experimentales, el daño se introduce en dos etapas: perforaciones de $1/32$ in y $5/64$ in para diferentes distancias, que se miden desde el centro de cada placa (véanse la Figura 3.4 y la Tabla 3.1). Siguiendo el esquema de la Figura 3.3, las resistencias medidas se desacoplan para obtener $R_S(\omega)$, lo que implica que la resistencia R_{pzt} (PZT libre) se desacopla de $R_P(\omega)$ (resistencia acoplada) mediante la Ecuación (3.6). Posteriormente, los datos de resistencia se aproximan mediante funciones gaussianas $N(\mu_R, \sigma_R)$ para $R_S^R(\omega)$ y $N(\mu_M, \sigma_M)$ para $R_S^M(\omega)$ con el objetivo de suavizarlos, y adicionalmente, estos datos también se normalizan. Los procedimientos anteriormente citados corresponden a la primera etapa de localización de daños que se describe en la Figura 3.3.

La Figura 3.9 muestra los valores normalizados para la perforación de $1/32$ in $\hat{N}(\mu_M, \sigma_M)$ (Figura 3.9a) y $5/64$ in $\hat{N}(\mu_R, \sigma_R)$ (Figura 3.9b). Se puede observar que las normalizaciones están centradas en cero con un valor máximo de 1. Los procedimientos de normalización suavizan las señales ruidosas, por lo que es más fácil procesar las variaciones de las señales monitoreadas. Se puede observar una diferencia en las señales sin daños y con daños, ya que las mediciones están desfasadas entre sí. En las Figura 3.9a ($1/32$ in) y Figura 3.9b ($5/64$ in) se identifican diferencias significativas, como el tamaño de las distribuciones. Las distribuciones con daños presentan una mayor área bajo curva que las señales de referencia (sin daño), y las variaciones identificadas son consideradas patrones para establecer correlaciones.

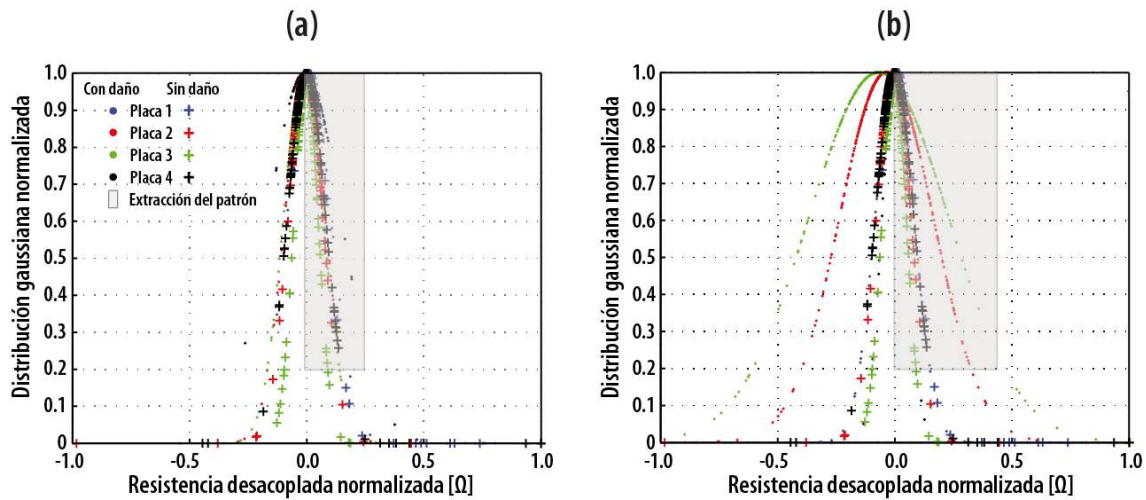


Figura 3.9. Homogeneización de datos con funciones gaussianas para $R_s^R(\omega)$ y $R_s^M(\omega)$.

a. 1/32 in . b. 5/64 in

De acuerdo con la Sección 3.3.2, se definió un dominio para la extracción de patrones en la Ecuación (3.9), que se demarca en la Figura 3.9. El objetivo principal es aproximar la información extraída para correlacionar $R_s^M(\omega)$ con $R_s^R(\omega)$. Con este fin, se utiliza la Ecuación (3.10) para ajustar los datos experimentales extraídos, utilizando los mínimos cuadrados entre los datos y el modelo gaussiano presentado en la Ecuación (3.10). Es necesario ajustar los datos porque se puede hacer una correlación entre ellos. Los datos elegidos para conformar la Ecuación (3.10) muestran aproximaciones casi perfectas como se evidencia en la Tabla 3.2. Todos los modelos calculados presentan una buena concordancia con los datos experimentales, ya que el valor de R-cuadrado es 1 en todas las aproximaciones excepto una: la placa 4. El mismo resultado se puede verificar para la suma de los residuos. En total se determinan 11 modelos para establecer 9 correlaciones lineales: 2 referencias y 7 medidas de monitoreo.

A partir de los modelos gaussianos (véase la Tabla 3.2), se establece una regresión lineal entre las señales de referencia y cada una de las mediciones de monitoreo. La Figura 3.10a muestra los resultados de las correlaciones lineales

obtenidas para ambos casos de daños, que se pueden calcular aproximando funciones lineales. Se observa que las correlaciones sin daños presentan la misma pendiente, ya que las señales comparadas son las mismas. Además, se observa que en ambos casos, las correlaciones realizadas con respecto a las señales de monitoreo están fuera de las correlaciones de referencia.

Tabla 3.2. Cálculo del R-cuadrado y de la suma de los residuos para los modelos aproximados a la Ecuación (3.10)

Placa	Modelo para $R_s^R(\omega)$		1/32 in		5/64 in	
	R	Suma de residuales	R	Suma de residuales	R	Suma de residuales
1	1	1.14×10^{-25}	1	3.63×10^{-26}	1	2.44×10^{-25}
2	1	2.21×10^{-25}	1	5.09×10^{-26}	1	6.53×10^{-26}
3	1	5.53×10^{-26}	1	2.23×10^{-26}
4	1	1.09×10^{-25}	0.995	4.52×10^{-3}	1	3.76×10^{-26}

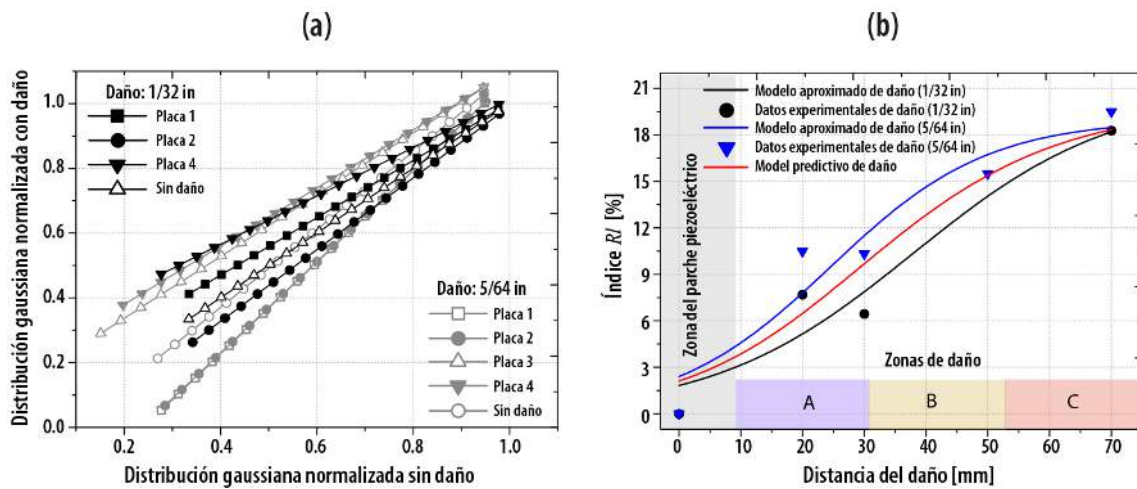


Figura 3.10. Modelo de daño previsto a partir de a. 1/32 in y b. 5/64 in

Se infiere que cuando se introduce un daño en las placas, la relación angular o pendiente varía. Con el fin de capturar esas variaciones, se aplica el índice propuesto en la Ecuación (3.11) para medir la variación de la pendiente que está directamente relacionada con la distancia de perforación. En la Tabla 3.3 se listan

los valores de R_i correspondientes a los daños realizados a una distancia determinada en cada placa. Cuando la distancia de perforación es mayor, la magnitud de R_i también aumenta para ambos casos. De hecho, la diferencia de severidad de los daños (entre la perforación de 1/32 in y la de 5/64 in) también se capta en R_i , ya que para el mismo estado de daño (distancia), el valor de R_i es mayor para 5/64 in que para 1/32 in. Sin embargo, la sensibilidad se ve afectada por el incremento del tamaño de la perforación, ya que el rango de $R_i \in (7.7, 18.28)$ es mayor que $R_i \in (10.49, 19.50)$ cuando aumenta el tamaño de la perforación. Este efecto también se analizó en el proceso de identificación que se discute en la sección 3.5.1.

Tabla 3.3. Relación entre R_i y d

Placa	Daño de 1/32 in		Daño de 5/64 in	
	d [mm]	R_i [%]	d [mm]	R_i [%]
1	20	7.700	20	10.487
2	30	6.447	30	10.323
3	50	15.497
4	70	18.279	70	19.504

A partir de la Tabla 3.3, se puede concluir que es posible realizar un proceso de identificación de daños con esta metodología. Concretamente, esta permite identificar tanto los daños, como la severidad de cada uno. Sin embargo, dicha metodología debe estudiarse detenidamente para comprender los efectos de la distancia y la severidad del daño (tamaño de la perforación) en los índices.

La Figura 3.10b muestra los valores de R_i para ambos casos de perforación, datos que están marcados con azul y negro. En la Figura 3.7b también se definen y

se grafican tres zonas de daño, que representan el dominio de la distancia de daño, siendo la zona A la delimitada por $d \in (10, 31]$ mm; la zona B, la delimitada por $d \in (31, 53)$, y la zona C, la definida por $d \geq 53$ mm. La zona en la que se adhiere el piezotransductor es una zona ciega. El objetivo es construir una superficie que represente la distancia en la placa y así aplicar una estrategia sencilla de localización de daños. Se encontró que el comportamiento de los datos experimentales cuantificados R_i ilustra una tendencia similar en los casos estudiados. Por lo tanto, se propone un modelo que represente al parámetro R_i en una curva de daño. Se trata de un modelo logístico conocido (Christensen, 1997), que se representa mediante

$$y = \frac{a}{1 + e^{-k(x-x_c)}}, \quad (3.12)$$

donde a , k y x_c son constantes que se estiman en el proceso de aproximación. En la Tabla 3.4 se enumeran los valores de las constantes para los dos modelos calculados.

Tabla 3.4. Modelos aproximados para R_i

Coeficiente	Modelo de 1/32 in	Coeficiente	Modelo de 5/64 in
a	20.717	a	18.99755
x_c	3.791	x_c	2.457
k	0.616	k	0.785
Chi cuadrado	11.857		8.448
R cuadrado	0.793		0.842
P > F (ANOVA)	0.200		0.029

A partir de un simple análisis estadístico, se calcula R-cuadrado para ambos modelos, donde se esperan valores entre 0.7 y 1, que son comúnmente válidos en

aplicaciones de ingeniería. Los modelos determinados son aceptables, ya que se observa una buena concordancia con los datos experimentales. En ambos casos, los valores de R-cuadrado son 0.793 y 0.842. Además, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para validar el modelo, como segundo criterio. Se sabe que el ANOVA se basa en una hipótesis nula que establece que las medias del grupo de datos deben ser las mismas. Una descripción completa se puede revisar en (Miller Jr, 1997; Ross, 2021). Para el modelo de $5/64$ in, se obtuvo una probabilidad $p < 0.05$, lo cual sugiere que los residuos son bajos entre los datos y el modelo, aunque para el modelo de $1/32$ in, esta condición no se cumple. Como decisión final, se optó por aprobar ambos modelos, ya que la correlación R-cuadrado es aceptable para la aplicación buscada. Se observó una buena correlación para la perforación de $1/32$ in, teniendo en cuenta que solo se utilizaron 4 datos para establecer el modelo aproximado, lo que repercute considerablemente en el ANOVA.

En la Figura 3.10b se observa que ambos modelos indican una afinidad similar que se asemeja a una curva de histéresis. No obstante, a partir de ambas aproximaciones, se estima un modelo predictivo para establecer una curva de daño. Se determinó que el valor medio entre los modelos es una buena estimación porque ambos modelos presentan la misma tendencia. El modelo predictivo está marcado en color rojo en la figura. Hay dos cosas interesantes a destacar en la Figura 3.10b; al principio ($d = 10$ mm) y al final ($d = 70$ mm), los valores de R_i muestran una clara convergencia, lo que denota que el tamaño de la perforación no afectó al índice en esos lugares. Sin embargo, para $d \in (15, 60)$ mm, el índice mostró ser sensible al tamaño del daño. Se puede destacar que la curva de daño presenta aparentemente un efecto de histéresis. Un resultado similar fue discutido en la Figura 3.8b, específicamente en los resultados ilustrados para la placa 4. En el proceso de identificación, este aspecto se muestra interesante para evaluar los

efectos de intensidad en los índices de daño teniendo en cuenta la localización. La afirmación anterior puede tomarse como tema para un futuro trabajo a realizar y explorar.

Para evaluar la curva de daño, se ejecuta un nuevo experimento en las placas, introduciendo una perforación de 1/16 in . El tamaño está entre 1/32 in y 5/64 in , y la ubicación de la perforación es la misma que la definida en la Tabla 3.1. Para ver la curva de daño predictiva como una superficie, se calcula una aproximación axisimétrica que se ilustra en la Figura 3.11 en la parte izquierda, y se denomina superficie de daño. El propósito es determinar en qué zona se encuentra la perforación. Se han definido tres zonas: zonas A, B y C. El dominio de cada una de ellas se representa en la Figura 3.10b. El procedimiento de localización requiere que se calcule inicialmente R_i , y posteriormente se busque en la curva de daño. Para ello, se implementó un algoritmo en MATLAB (lenguaje M) para buscar la zona del daño mediante una proyección normal sobre el modelo predictivo (ver Figura 3.10). De esta manera, se asigna la zona donde la posición corresponde a la R_i buscada. En la Figura 3.11 se representan los resultados obtenidos. Se evidencia que en todos los casos las zonas de daño fueron identificadas correctamente.

En este estudio se aprecia una oportunidad para explorar las curvas de daño en diferentes aplicaciones. Las curvas de daño también pueden ser obtenidas computacionalmente utilizando el análisis de elementos finitos u otras metodologías.

Como conclusión, la metodología expuesta demostró ser viable para localizar las perforaciones practicadas en las placas.

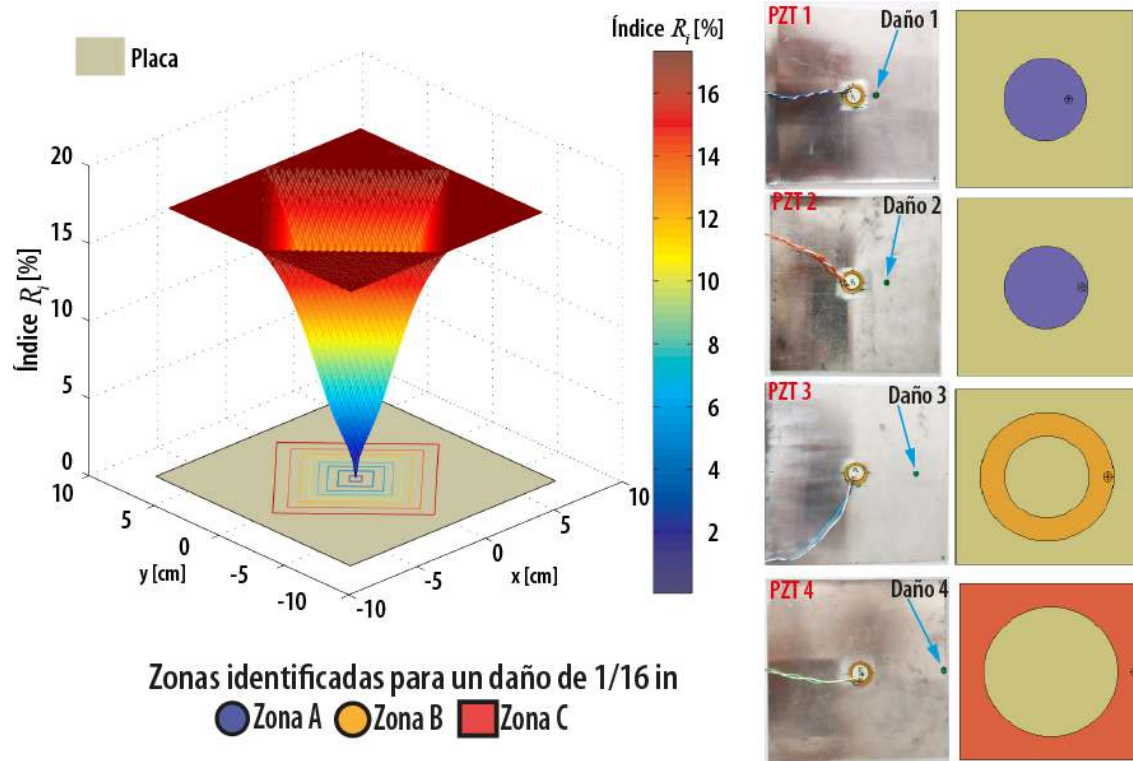


Figura 3.11. Validación de la localización de daños mediante la metodología de la sección 3.2

En este capítulo se presentó un nuevo enfoque para la detección de daños en estructuras activas basado en el desacoplamiento de las señales eléctricas obtenidas de un PZT en un proceso de monitoreo con la técnica EMI. Básicamente, el desacoplamiento consiste en extraer de la señal principal solo las contribuciones eléctricas de la estructura. Este trabajo examina la viabilidad de monitorear una estructura con las dos componentes de la impedancia eléctrica que normalmente se realiza solo con la componente real.

Se diseñaron y probaron dos metodologías para localizar y cuantificar las modificaciones estructurales mediante índices de daño. Para cada parte de la impedancia eléctrica, se diseñaron índices utilizando elipses de confianza gaussianas que demostraron ser efectivas en la identificación de daños. Sin embargo, se utilizó la reactancia para identificar el daño y la resistencia para identificar y localizar dicho daño. El procedimiento muestra que el desacoplamiento aumenta la sensibilidad del índice diseñado para la reactancia. Además, el índice

basado en la resistencia fue efectivo para localizar el daño inducido por medio de zonas. Las metodologías de identificación mostraron que es posible utilizar ambas partes de la impedancia eléctrica para el proceso de identificación y localización del daño en la estructura activa.

CAPÍTULO 4

DETECCIÓN DE PÉRDIDA DE TORQUE EN UNIONES PERNADAS USANDO LA TÉCNICA DE LA IMPEDANCIA ELECTROMECAÁNICA

4.1 Introducción

Desde hace siglos, la fijación con pernos se ha utilizado ampliamente en las áreas aeroespacial, civil y de ingeniería mecánica para lograr la unión de piezas en estructuras y máquinas, y aunque este método de fijación presenta muchas ventajas, como la facilidad de desmontaje y que no requiere una preparación especial de las superficies, diversos estudios han demostrado que las vibraciones durante el periodo de servicio pueden causar aflojamiento en los pernos. Por esta razón, los escenarios de daño catastrófico pueden ser ocasionados en estructuras y máquinas cuando las vibraciones presentes no son monitoreadas y exceden la capacidad de carga dinámica del sistema.

Hasta la fecha, varios autores han investigado sobre el monitoreo de uniones atornilladas para garantizar la seguridad del sistema en servicio. Estos estudios incluyen métodos de emisión acústica, inspecciones ópticas, sensores de fibra de rejilla de Bragg (FBG, por sus iniciales en inglés), conductividad eléctrica y métodos basados en la vibración (Amerini & Meo, 2011). Estos autores desarrollaron un índice confiable para evaluar el estado de aflojamiento de una unión pernada basado en parámetros acústicos/ultrasónicos. (Guarino et al., 2009) demostraron una técnica sencilla para adquirir datos de una prueba de impacto utilizando un estetoscopio electrónico básico para identificar pernos aflojados. (Huang et al., 2009) utilizaron una arandela como transductor óptico de fuerza para la medición directa de la tensión en uniones atornilladas. (Khomenko et al., 2016) desarrollaron unos sensores FBG reutilizables para conseguir un monitoreo preciso del apriete del perno. (Argatov & Sevostianov, 2010) propusieron un método que utiliza la resistencia eléctrica de la interfaz de contacto entre dos miembros conductores sujetos por un perno. Además, se han implementado transductores piezoeléctricos como actuadores y láseres sin contacto como sensores para identificar cambios en las frecuencias naturales de las estructuras que permiten identificar cuándo hay

aflojamiento en uniones pernadas. Aunque las técnicas mencionadas presentan ventajas, también pueden tener ciertas limitaciones; por ejemplo, el uso de equipos sofisticados de análisis de vibraciones como un vibrómetro láser puede producir resultados con alta precisión y exactitud, pero su implementación resulta compleja en campos reales. El uso de métodos de vibración de baja frecuencia puede maximizar el área de detección, pero resulta difícil detectar cambios estructurales en una etapa incipiente de daño.

Por otra parte, la investigación sobre el uso de la técnica EMI para la detección de daños en estructuras se describe en varias literaturas, incluyendo (Na, 2022; Samantaray et al., 2018), donde los autores llevaron a cabo experimentos para supervisar las uniones atornilladas mediante el uso de la técnica EMI con transductores PZT. En el estudio de (Liang et al., 2018) también mostraron la detección exitosa de aflojamiento en una conexión roscada de una tubería mediante la técnica EMI, empleando el índice RMSD para construir una métrica de aflojamiento a partir de las señales de impedancia medidas.

Este capítulo presenta el desarrollo un sistema de detección de pérdida de torque en uniones pernadas. Para ello, se utiliza un método basado en la técnica EMI y el índice RMSD para determinar la pérdida de par o el aflojamiento de cinco pernos $M10 \times 20$ mm que están sujetos a un perfil en L. Las señales de impedancia eléctrica durante las condiciones de apriete y aflojamiento de los pernos se obtienen con el analizador de impedancia KEYSIGHT E4990. Posteriormente, el conjunto de datos obtenido es transferido a un computador, donde se grafican las señales de impedancia y conductancia para los estados de daño y se calcula el índice de pérdida de par con el RMSD para determinar el aflojamiento en las uniones pernadas.

4.2 Fundamentos teóricos

4.2.1 Técnica de impedancia electromecánica

Los fundamentos teóricos aplicados en este capítulo fueron expuestos en la sección 2.2.1.

4.2.2 Rango de frecuencia

La sensibilidad de las técnicas NDE en la detección de daños está estrechamente relacionada con la banda de frecuencia seleccionada. Para detectar daños de tipo incipiente, que no dan lugar a ningún cambio mensurable en las propiedades de rigidez global de la estructura, es necesario que la longitud de onda de la excitación sea menor que la longitud característica del daño a detectar. (Park et al., 2005.) demostraron que el rango de frecuencias típicamente utilizado en los métodos de impedancia está entre 10 y 250 kHz para la excitación, ya que en este rango hay sensibilidad suficiente para detectar pequeños cambios en propiedades estructurales.

4.3 Índices de identificación de pérdida de par o aflojamiento

Dado que el principio de la técnica EMI es medir cualquier cambio en las señales de impedancia eléctrica de la estructura monitoreada con respecto a un estado inicial o de referencia para identificar la presencia de daño, se necesita cuantificar este cambio para evaluar la gravedad de dicho daño.

Cuando se monitorean las estructuras con la técnica EMI mediante PZT, los espectros de la impedancia eléctrica incluyen la información de la integridad estructural vigente; esto es posible por el acoplamiento electromecánico que existe entre el sistema mecánico de la estructura y el circuito eléctrico del PZT. Sin embargo, las señales de impedancia eléctrica presentan una gran dispersión para tomar decisiones sobre su comportamiento. En este contexto, se definen las métricas de daño para calcular cantidades escalares que permitan establecer comparaciones cuando las señales están siendo perturbadas por modificaciones

estructurales, y revelar la diferencia entre una señal de referencia y una de monitoreo para determinar la presencia de un daño estructural. Se pueden mencionar tres métricas estadísticas diferentes que se utilizan en general para cuantificar la gravedad de los daños cuando se utiliza la técnica EMI. Estas son RMSD, MAPD y CCD. En un estudio de (Tseng & Naidu, 2002), se demostró que los índices RMSD y MAPD definidos para la conductancia $G_p(\omega)$ eran más adecuados para localizar y caracterizar el crecimiento o aparición de un daño, mientras que el índice CCD (definido también para la conductancia) era más adecuado para identificar el aumento de un daño localizado en una ubicación fija. De acuerdo con lo anterior, y dada la naturaleza del problema de estudio donde se pretende determinar la aparición de un cambio estructural que refleje la pérdida de par a aflojamiento en uniones pernadas, en este estudio se utiliza el índice RMSD, que se define para la conductancia $G_p(\omega)$.

Una revisión de los índices tratados arriba puede encontrarse de manera detallada en la sección 2.2.4.

4.4 Montaje experimental

Se desarrolló un experimento para evaluar el aflojamiento en uniones pernadas, usando medidas de impedancia eléctrica tomadas de transductores piezoeléctricos. El montaje se realizó con un perfil en L implementado como espécimen de prueba, cinco pernos de cabeza hexagonal M10×20 mm, que operan como interfaz de acoplamiento y cinco PZT adheridos en el centro de cada una de las cabezas de los pernos, como se muestra en la Figura 4.1. El perfil es de aleación de aluminio 6061-T6, y tiene las siguientes propiedades geométricas: Altura 50.8 mm, espesor 3.18 mm y longitud de 300 mm, y se encuentra apoyado sin sujeción en una superficie plana, como se muestra en la Figura 4.2. En este estudio, se utilizaron los PZT en forma de disco, SP-5H (Sparkler Ceramics Pvt. Ltd) de 12 mm diámetro y 0.4 mm de espesor, con cables de plomo soldados en sus terminales positivo y negativo.

El montaje experimental implementado para este estudio es mostrado en la Figura 4.2. Para medir la impedancia eléctrica y el ángulo de fase de cada uno de los PZT que se encuentran adheridos a los pernos, se usó un analizador de impedancia KEYSIGHT E4990. Cada PZT se conectó de manera independiente para medir las señales en todos los niveles de torque, aquí definidos como estados de daño, como se puede ver en la Figura 4.3a. El equipo analizador activa el PZT y lee sus propiedades eléctricas de manera simultánea, estando acoplado a la estructura (Cabeza de los pernos). Los PZT se adhirieron con Loctite 495 a la cabeza de los pernos y la superficie de adhesión se preparó con Loctite 7649, para garantizar una unión sin pérdida significativa de la junta y un curado rápido del adhesivo. Las mediciones se realizaron teniendo en cuenta las recomendaciones del manual de usuario elaborado por *Analog Devices* ([Analog Devices, 2014](#)). Todas las pruebas se realizaron en un rango de temperatura de 22-25 °C y una humedad relativa entre 40 y 60% .

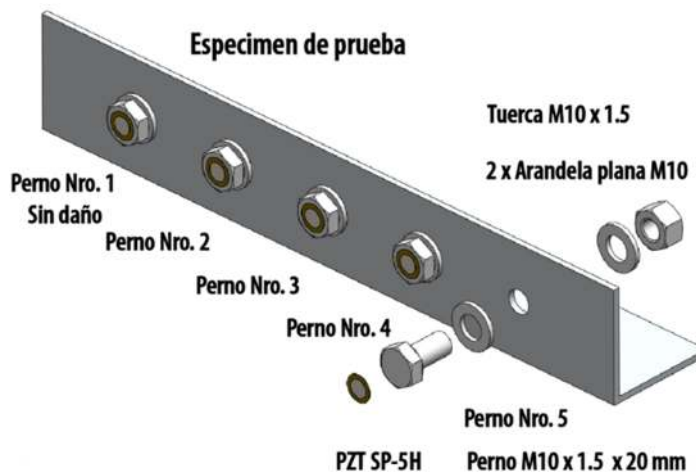


Figura 4.1. Espécimen de prueba con la vista explosionada de un perno

Los estados de daño fueron garantizados mediante la utilización de una llave dinamométrica marca SATA referencia 96311, con la cual se dio a cada perno un torque de magnitud determinada, como se muestra en la Figura 4.3b. En la Tabla 4.1 se enumeran los pares de apretamiento en cada perno y la nomenclatura utilizada para los estados de daño establecidos en el estudio. Para realizar la

prueba, se utilizó el perno Nro. 1 como elemento para extraer la señal de referencia o estado de daño cero, es decir, como una línea base que corresponde al perno sin desapriete.

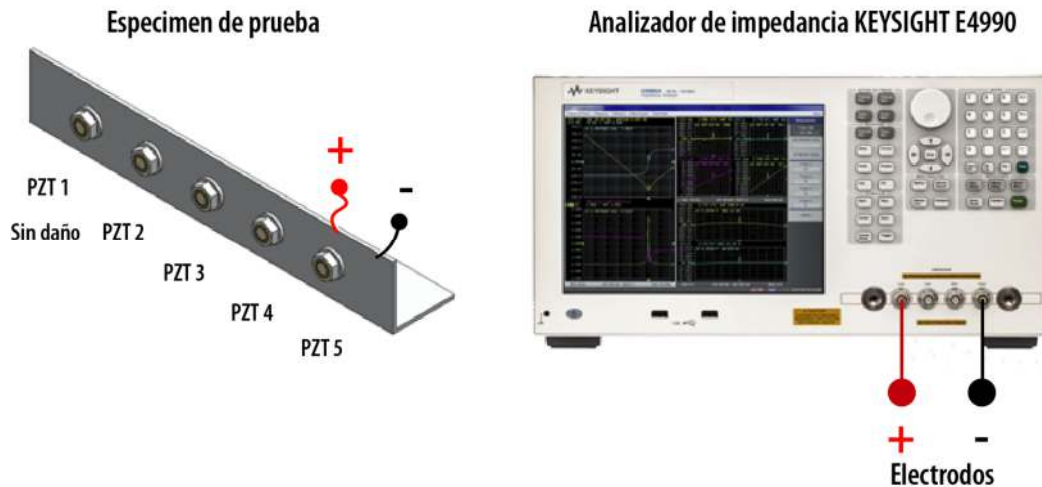


Figura 4.2. Montaje experimental propuesto

Para la ejecución de la prueba se seleccionó de manera experimental una señal de frecuencia de barrido de 10 a 60 kHz, con un incremento de 0.5 kHz, para localizar los picos de las frecuencias correspondientes a los cinco estados de daño, y determinar ventanas de frecuencia más pequeñas para el análisis de los datos y el cálculo de las métricas de pérdida de par de apriete.

Para la prueba experimental (ver la Figura 4.3), se adquirieron cinco medidas de los PZT, que corresponden a los estados de daño establecidos. Estas medidas están compuestas por el ángulo de fase y la magnitud de la EI.

Tabla 4.1. Par de apriete de los pernos

Estado de daño	Nro. Perno	Nro. PZT	Torque de apriete [N.m]	Perdida de par [%]
0 (Sin daño)	1	1	30	0
I	2	2	25	16.6
II	3	3	20	33.3
III	4	4	15	50.0
IV	5	5	10	66.6

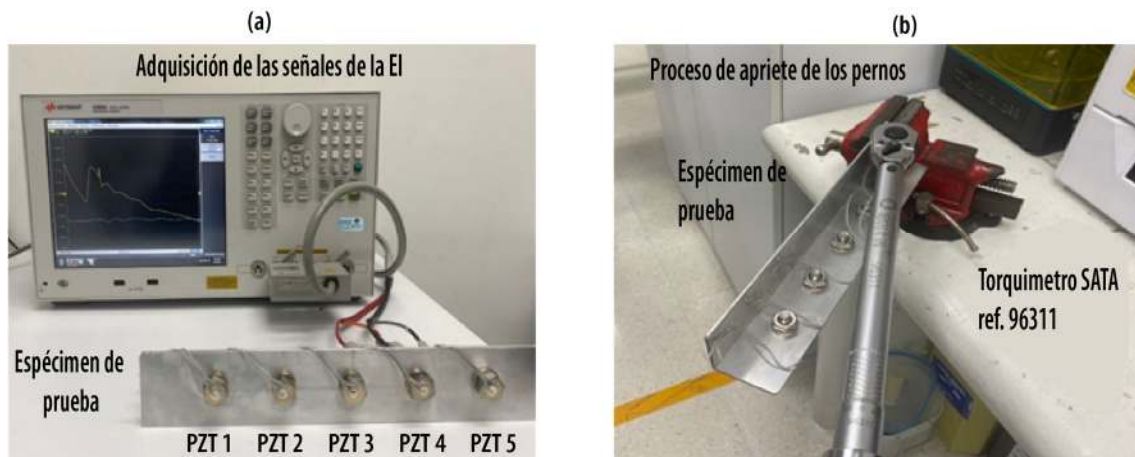


Figura 4.3. a. Adquisición de las señales de la EI. b. Proceso de apriete de los pernos

El diagrama de flujo del proceso experimental es presentado en la Figura 4.4.

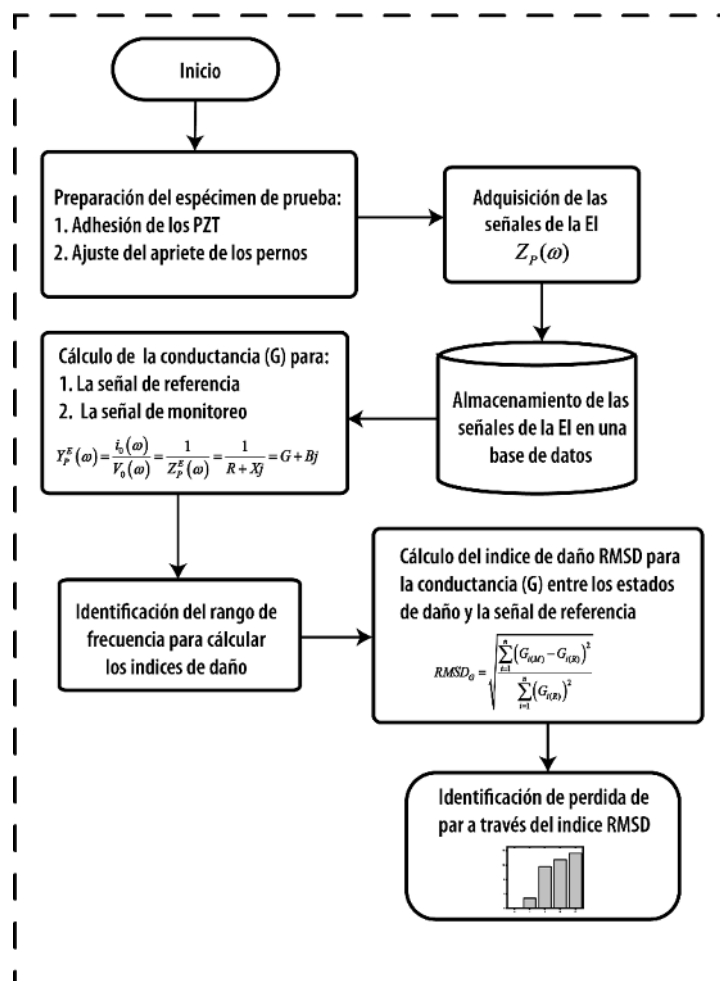


Figura 4.4. Diagrama de flujo del proceso experimental

4.5 Resultados y discusión

Las señales del espectro de la impedancia eléctrica $Z_p(\omega)$ se obtuvieron para los cinco estados de daño, como se muestra en la Figura 4.5. Las señales de conductancia $G_p(\omega)$ para cada estado de daño se muestran en la Figura 4.6. y se determinaron a partir de las señales de EI, aplicando la Ecuación (2.1).

Las medidas tomadas para este ensayo se recogen en la Figura 4.6, donde se grafican las conductancias $G_1(\omega)$, $G_2(\omega)$, $G_3(\omega)$, $G_4(\omega)$ y $G_5(\omega)$, correspondientes a los cinco PZT utilizados en la prueba, como se describe arriba. En la Figura 4.6 se observa que las medidas de $G_i \forall i = 1, 2, 3, \dots, 5$ son similares a primera vista, pero presentan pequeñas disminuciones en amplitud en la mayoría del rango de frecuencia a medida que los pernos tienen mayor par de apriete, siendo más apreciable este comportamiento en las cuatro ventanas de frecuencia listadas en la Tabla 4.2, y que se resaltan entre recuadros en la Figura 4.6. Esto significa que el espectro de la conductancia $G_p(\omega)$ está acoplado electromecánicamente con la estructura, como se ha mencionado anteriormente, lo que permite que cualquier cambio estructural pueda ser registrado en la señal de la EI.

Tabla 4.2. Ventanas de frecuencia para la comparación del índice RMSD

Ventana de frecuencia Nro.	Rango [kHz]
1	32.5 - 39.5
2	42.0 - 49.0
3	47.5 - 54.5
4	52.0 - 59.0

Como se explicó en la sección 4.3, se propuso el índice de daño RMSD para determinar los cambios en las señales con respecto a una referencia. Para este propósito, la referencia se establece a partir de las señales adquiridas de $G_p(\omega)$

de la estructura con el perno sin desapriete, y se muestra en color negro en la Figura 4.6.

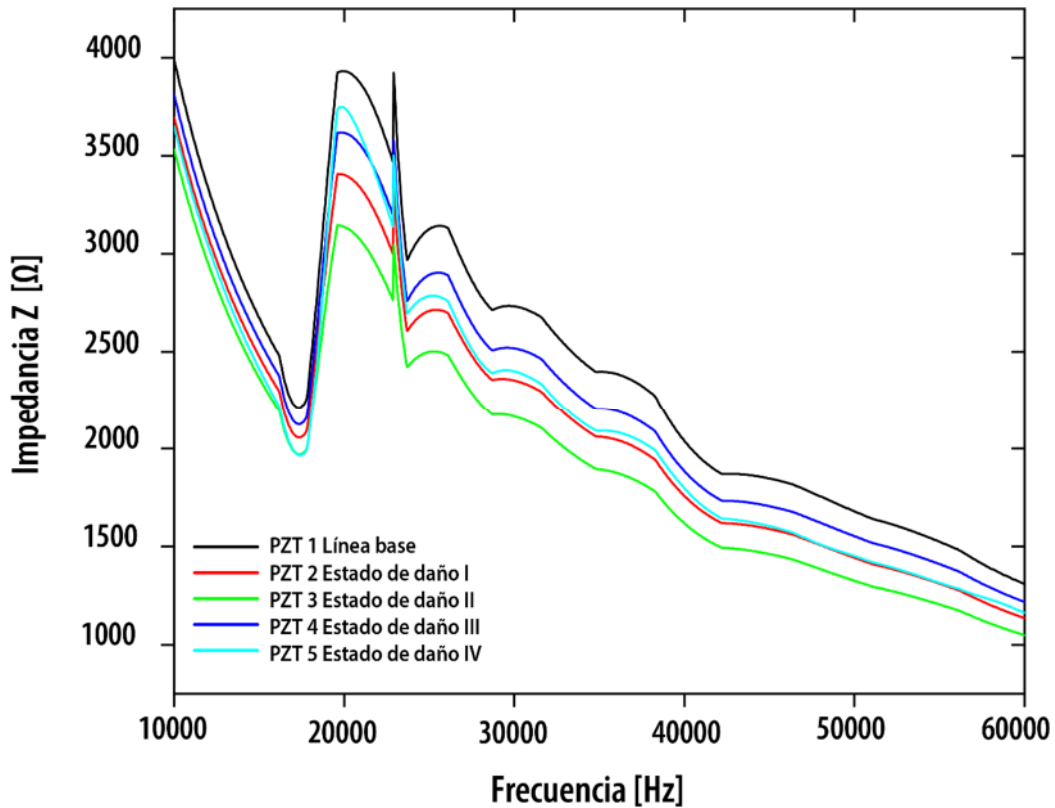


Figura 4.5. Señales de impedancia $Z_p(\omega)$ obtenidas de los cinco pernos

Para ilustrar las variaciones de las señales, se calculó el índice RMSD para $G_1 | G_i \forall i = 2, 3, \dots, 5$ y los cuatro rangos de señales listados en la Tabla 4.2, tal y como se muestra en la en la Figura 4.7. El cálculo de los índices se presenta en la sección 4.3. En este caso, el índice RMSD se convierte en una herramienta muy útil para cuantificar la información de los diferentes conjuntos de datos medidos. En la Figura 4.7 se muestra el RMSD para cada estado de daño en cada una de las cuatro ventanas de frecuencias, en donde la primera columna representa la línea base de daño (perno sin desapriete) y las etapas de daño (pernos con desapriete) se representan a partir de la segunda columna, en cada gráfico. En esta figura se puede observar que el RMSD tiene un comportamiento creciente que en la ventana de frecuencia Nro. 1 va desde un 2.8% para el estado de daño I (menor desapriete)

hasta un 15.3% para el estado IV (mayor desapriete) (Figura 4.7a); en la ventana de frecuencia Nro. 2, desde un 4.9% para el estado de daño I hasta un 12.8% para el estado IV (Figura 4.7b); en la ventana de frecuencia Nro. 3, desde un 11.3% para el estado de daño I hasta un 31.2% para el estado IV (Figura 4.7c); en la ventana de frecuencia Nro. 4, desde un 12.7% para el estado de daño I hasta un 35% para el estado IV (Figura 4.7d). Esto muestra que para la conductancia $G_p(\omega)$, el rango de frecuencia en el que se presenta la mayor sensibilidad a la pérdida de par o aflojamiento es la ventana de frecuencias Nro. 4 (52 - 59 kHz), donde el índice muestra una mayor diferencia entre el primero y el último de los estados de daño. En consecuencia, los resultados presentados en esta investigación demuestran la eficacia de la implementación de los PZT junto con la técnica EMI para detectar la pérdida de par de apriete de uniones pernadas.

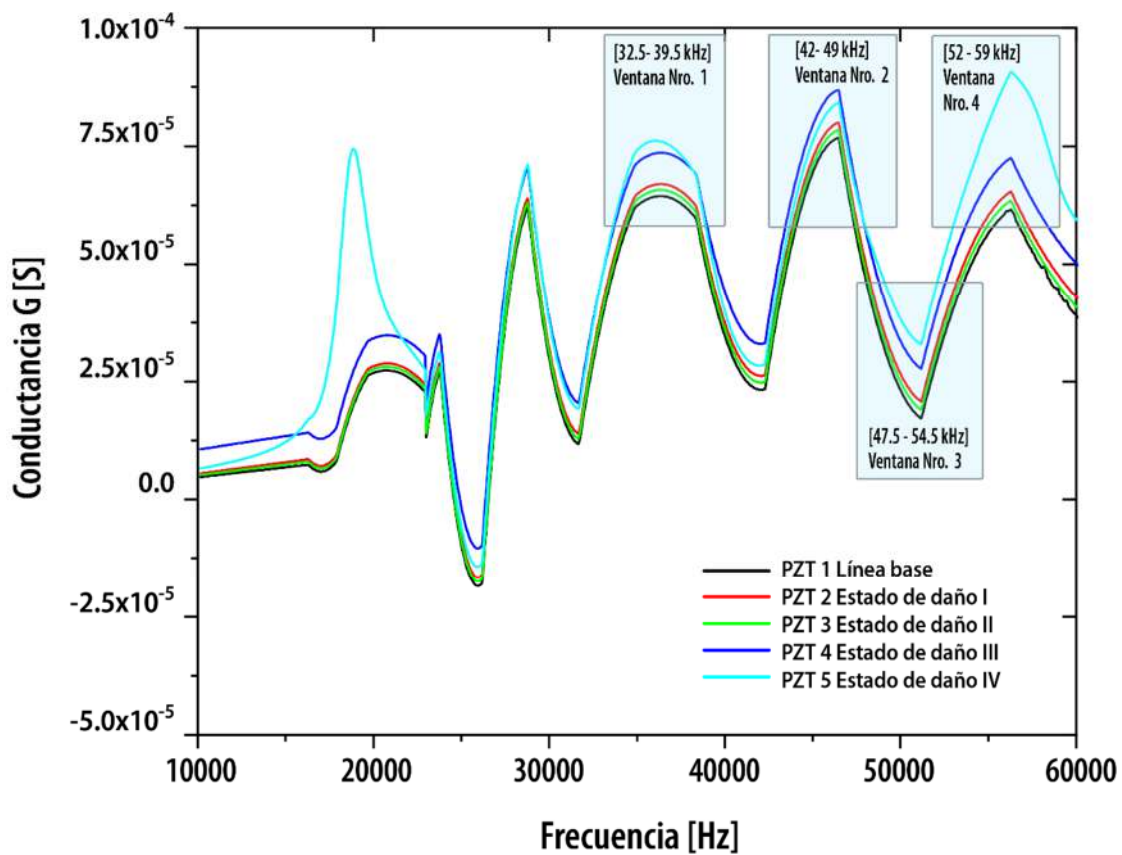


Figura 4.6. Señales de conductancia $G_p(\omega)$ obtenidas de los cinco pernos

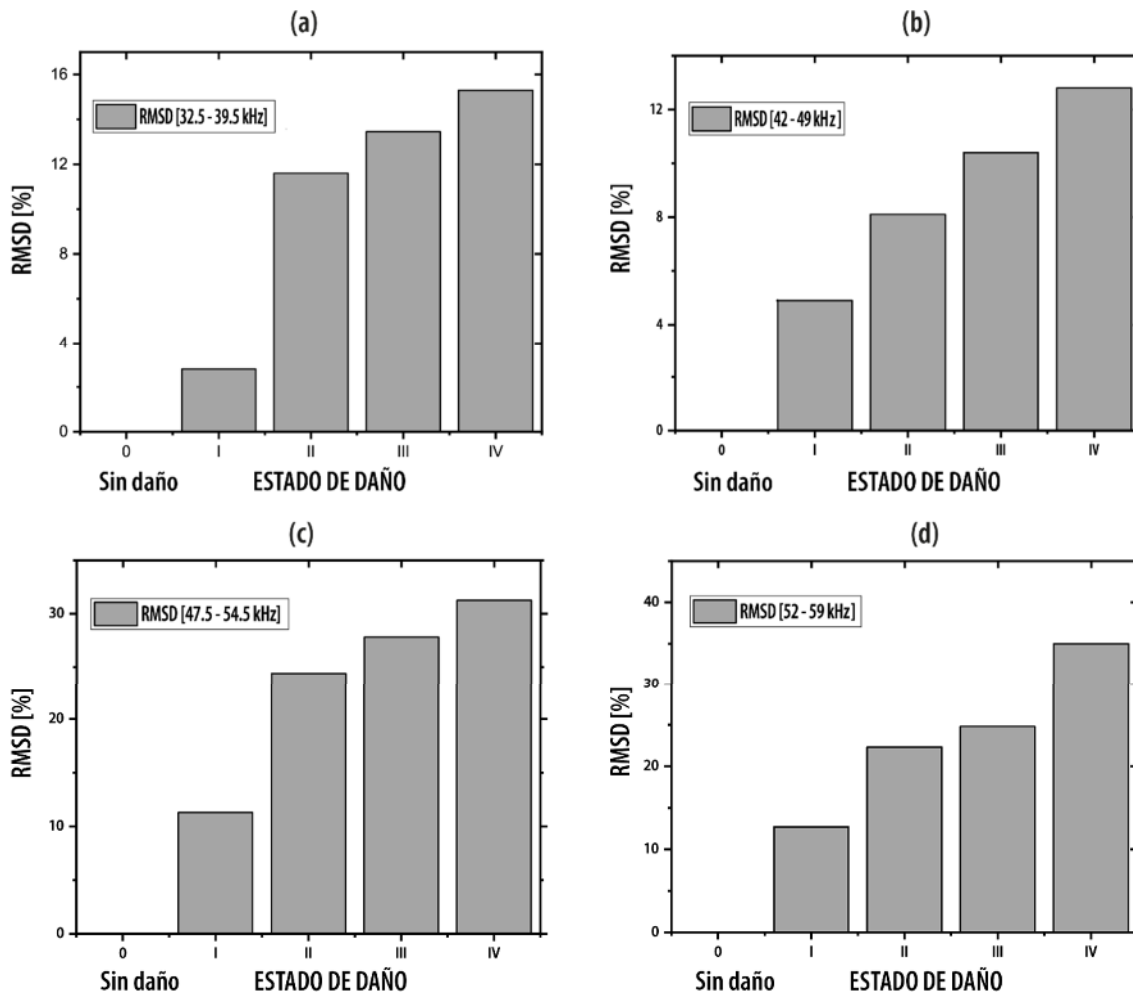


Figura 4.7. Índice RMSD para: $G_i|G_i \quad \forall i = 2, 3, \dots, 5$

En la Figura 4.8 se presenta una correlación lineal de los datos calculados de pérdida de par o aflojamiento contra los RMSD determinados para la ventana de frecuencias Nro. 4, en la cual se observó la mayor sensibilidad de la métrica.

El ajuste lineal permite identificar el aflojamiento de los pernos del sistema estudiado a través del cálculo del índice RMSD, estableciéndose un modelo lineal que relaciona el RMSD con la pérdida de torque, y que puede ser usado en el diagnóstico de desapriete en uniones pernadas.

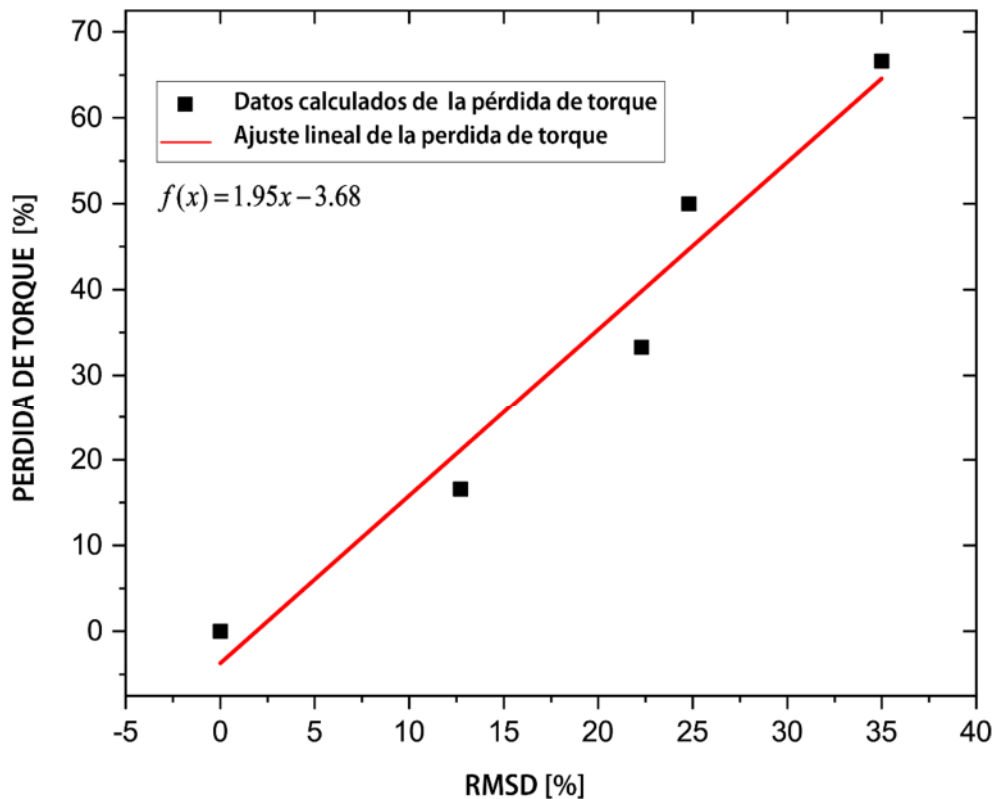


Figura 4.8. Correlación de pérdida de torque contra RMSD

En este capítulo se utilizó un método basado en la impedancia eléctrica para detectar la pérdida de par o aflojamiento en uniones pernadas, en el que se utilizó el analizador de impedancia KEYSIGHT E4990 para obtener las señales de impedancia eléctrica de los especímenes de prueba, y posteriormente calcular y graficar la conductancia $G_p(\omega)$ de las señales obtenidas. Posteriormente, se identificaron varios rangos de frecuencia sensibles alrededor de una frecuencia pico y se calcularon los índices RMSD entre los estados de daño planteados y la señal de referencia, para determinar el aflojamiento de cada perno.

Las pérdidas de par en las uniones pernadas del espécimen de prueba fueron detectadas con éxito en una ventana de frecuencia de 52 - 59 kHz, utilizando el índice RMSD. Este índice determinado con la conductancia $G_p(\omega)$ muestra una tendencia creciente a medida que aumenta el aflojamiento de cada perno respecto a la señal de referencia, y una alta sensibilidad frente a una pequeña pérdida del

par de apretamiento, como se aprecia para el estado de daño I, donde hubo una pérdida de par de 5 Nm y el valor porcentual del cambio del índice RMSD fue del 12.7%. Se ha demostrado que la técnica EMI aplicada tiene un gran potencial para determinar el aflojamiento temprano de las de las uniones pernadas, así como para supervisar el estado de la salud de las estructuras pernadas durante su vida útil.

En este estudio se realizaron las pruebas de detección de pérdida de par bajo factores ambientales controlados, por lo que en un trabajo futuro sería interesante estudiar cómo se afectan las señales de conductancia $G_p(\omega)$ por efecto de cambios en los factores ambientales.

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES

En esta tesis se presentó una metodología experimental para la detección de diferentes tipos de daños estructurales mediante la técnica de la impedancia electromecánica. Las mediciones realizadas en la estructura sin daños se denominan señales de referencia, mientras que las mediciones de la estructura en diferentes estados de daño son comparadas con las de referencia y nombradas señales de monitoreo. Se usaron índices estadísticos como EDI, RMSD y MAPD para cuantificar los daños en las estructuras, comparando por medio de estos las impedancias eléctricas de referencia y de monitoreo.

Las señales fueron suavizadas por medio de funciones de distribución normal debido al alto ruido que presentaban inicialmente, y se determinaron elipses de confiabilidad del 95% para los datos medidos. En este sentido, los cambios en las direcciones de elipses gaussianas de las medidas de impedancia eléctrica y sus componentes también mostraron variaciones entre la estructura sin daños y los diferentes estados de daño. El índice R_M , basado en los valores propios de las elipses gaussianas de las mediciones de impedancia también mostró una notoria sensibilidad a los daños en la estructura, por lo que también puede utilizarse para detectar e incluso para cuantificar los estados de daño estructural con respecto a un estado de referencia, que se considera estado inicial o sin daño. Por otro lado, el índice θ_N no fue tan útil como los anteriormente mencionados para cuantificar la severidad del daño, ya que no mostró considerables variaciones entre los diferentes estados de afectación de la estructura, pero sí se puede usar para detectar la presencia del daño.

En la prueba experimental realizada con un desprendimiento parcial del PZT, se observó que esta condición puede estar presente y ser detectada sin afectar la identificación de daños, de manera que la vigilancia de la adherencia de los PZT a la estructura puede ser incluida en el proceso de monitoreo.

El uso de la técnica EMI con mediciones desacopladas de impedancia eléctrica mostró que el índice basado en la reactancia eléctrica es más sensible a los daños en la estructura monitoreada, mientras que los índices basados en la resistencia eléctrica fueron útiles para identificar y localizar el daño. De esta manera, las dos componentes de la impedancia eléctrica pueden ser usadas con éxito en la identificación de daños en una estructura activa y en su localización.

Los resultados obtenidos validan la impedancia electromecánica como técnica de monitoreo estructural. Con montajes experimentales de fácil implementación, se encontró que las señales de impedancia eléctrica presentan diferencias considerables entre distintos estados de daño de una misma estructura. Para la aplicación de la técnica EMI, es de vital importancia establecer una línea base de la estructura sin daño, que se toma como referencia para cuantificar los daños cuando un sistema presenta cambios en sus propiedades estructurales.

En la práctica, esta técnica puede ser usada para supervisar la condición de una estructura en campos como las ingenierías civil, mecánica y aeroespacial.

PUBLICACIONES

- Tinoco, H., & Marulanda, D. (2015). Damage Identification in Active Plates with Indices Based on Gaussian Confidence Ellipses Obtained of the Electromechanical Admittance. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 34. <https://doi.org/10.1007/s10921-015-0299-3>. SPRINGER
- Tinoco, H.A., & Marulanda, D. (2014). A new index for damage identification in active beams with electromechanical impedance technique (EMI) approach to SHM. *Proceedings of II International Conference on Advanced Mechatronics, Design, and Manufacturing Technology*, 1–6.
- Tinoco, H.A., et al. (2016), Damage detection in plates using the electromechanical impedance technique based on decoupled measurements of piezoelectric transducers, *Journal of Sound and Vibration* (2016), ELSEVIER. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2016.08.011>

REFERENCIAS

- Adams, D. E. (2007). Health Monitoring of Structural Materials and Components: Methods with Applications. In *Health Monitoring of Structural Materials and Components: Methods with Applications*.
<https://doi.org/10.1002/9780470511589>
- Ai, D., Zhu, H., Luo, H., & Yang, J. (2014). An effective electromechanical impedance technique for steel structural health monitoring. *Construction and Building Materials*, 73, 97–104. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.09.029>
- Amerini, F., & Meo, M. (2011). Structural health monitoring of bolted joints using linear and nonlinear acoustic/ultrasound methods. *Structural Health Monitoring*, 10(6), 659–672. <https://doi.org/10.1177/1475921710395810>
- Analog Devices. (2014). *Datasheet AD5933*.
- Annamdas, V. G. M., Chew, Y., Pang, J. H. L., Hoh, H. J., Zhou, K., & Song, B. (2014). Fatigue Growth Analysis of Pre Induced Surface Defects Using Piezoelectric Wafer Based Impedance Method and Digital Image Correlation System. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 33(3), 413–426. <https://doi.org/10.1007/S10921-014-0237-9>
- Annamdas, V. G. M., & Soh, C. K. (2007). Three-Dimensional Electromechanical Impedance Model. I: Formulation of Directional Sum Impedance. *Journal of Aerospace Engineering*, 20(1), 53–62. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0893-1321\(2007\)20:1\(53\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0893-1321(2007)20:1(53))
- Annamdas, V. G. M., & Soh, C. K. (2010). Application of Electromechanical Impedance Technique for Engineering Structures: Review and Future Issues. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 21(1), 41–59. <https://doi.org/10.1177/1045389X09352816>
- Annamdas, V. G. M., Yang, Y., & Soh, C. K. (2007). Influence of loading on the electromechanical admittance of piezoceramic transducers. *Smart Materials and Structures*, 16(5), 1888. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/16/5/045>
- Argatov, I., & Sevostianov, I. (2010). Health monitoring of bolted joints via electrical conductivity measurements. *International Journal of Engineering Science*, 48(10), 874–887. <https://doi.org/10.1016/J.IJENGSCI.2010.05.009>
- Baptista, F. G., Filho, J. V., & Inman, D. J. (2011). Real-time multi-sensors measurement system with temperature effects compensation for impedance-based structural health monitoring. *Structural Health Monitoring*, 11(2), 173–186. <https://doi.org/10.1177/14759217111414234>

- Berger, V. W., & Zhou, Y. (2014). Kolmogorov–Smirnov Test: Overview. *Wiley StatsRef: Statistics Reference Online*. <https://doi.org/10.1002/9781118445112.STAT06558>
- Berney, H., & O’riordan, J. J. (2008). Impedance measurement monitors blood coagulation. *Analog Dialogue*, 42(3), 42–48.
- Bhalla, S., & Soh, C. K. (2004a). Structural Health Monitoring by Piezo-Impedance Transducers. I: Modeling. *Journal of Aerospace Engineering*, 17(4), 154–165. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0893-1321\(2004\)17:4\(154\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0893-1321(2004)17:4(154))
- Bhalla, S., & Soh, C. K. (2004b). Structural Health Monitoring by Piezo-Impedance Transducers. II: Applications. *Journal of Aerospace Engineering*, 17(4), 166–175. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0893-1321\(2004\)17:4\(166\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0893-1321(2004)17:4(166))
- Chen, W. Q., & Yan, W. (2010). Structural health monitoring using high-frequency electromechanical impedance signatures. *Advances in Civil Engineering*, 2010. <https://doi.org/10.1155/2010/429148>
- Chou, J. H., & Ghaboussi, J. (2001). Genetic algorithm in structural damage detection. *Computers & Structures*, 79(14), 1335–1353. [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(01\)00027-X](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(01)00027-X)
- Chou, J. Y., & Chang, C. M. (2022). Low-story damage detection of buildings using deep neural network from frequency phase angle differences within a low-frequency band. *Journal of Building Engineering*, 55, 104692. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2022.104692>
- Christensen, R. (1997). Log-Linear Models and Logistic Regression. In *Log-Linear Models and Logistic Regression* (2nd ed.). Springer New York. <https://doi.org/10.1007/B97647>
- Cuc, A., & Giurgiutiu, V. (2004). Disbond detection in adhesively bonded structures using piezoelectric wafer active sensors. *SPIE 5394, Health Monitoring and Smart Nondestructive Evaluation of Structural and Biological Systems III*, 5394, 66–77. <https://doi.org/10.1117/12.540358>
- Dimitrova, D. S., Kaishev, V. K., & Tan, S. (2020). Computing the Kolmogorov-Smirnov Distribution When the Underlying CDF is Purely Discrete, Mixed, or Continuous. *Journal of Statistical Software*, 95, 1–42. <https://doi.org/10.18637/JSS.V095.I10>
- Doebling, S. W. S., Farrar, C. R. C., Prime, M. B. M., & Shevitz, D. W. D. (1996). Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: A literature review. In *Los Alamos National Laboratory*. <https://doi.org/10.2172/249299>

- Draper, N. R., & Smith, H. (2014). *Applied Regression Analysis* (3rd ed.). Wiley.
- Ferreira, J., Seoane, F., Ansedede, A., & Bragos, R. (2010). AD5933-based spectrometer for electrical bioimpedance applications. *Journal of Physics: Conference Series*, 224(1), 012011. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/224/1/012011>
- Fu, Z.-F., & He, J. H. (2001). *Modal analysis* (Z.-F. Fu & J. H. He (eds.); 1st ed.). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-5079-3.X5000-1>
- Giurgiutiu, V. (2014a). *Structural health monitoring with piezoelectric wafer active sensors* (V. Giurgiutiu (ed.); 2nd ed.).
- Giurgiutiu, V. (2014b). High-Frequency Vibration SHM with PWAS Modal Sensors – the Electromechanical Impedance Method. In V. Giurgiutiu (Ed.), *Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Active Sensors* (pp. 509–572). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-418691-0.00011-3>
- Giurgiutiu, V. (2014c). Introduction. In V. Giurgiutiu (Ed.), *Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Active Sensors* (2nd ed., pp. 1–19). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-418691-0.00001-0>
- Giurgiutiu, V., & Kropas-Hughes, C. V. (2003). Comparative study of neural-network damage detection from a statistical set of electro-mechanical impedance spectra. *NDE for Health Monitoring and Diagnostics*, 108–119. <https://doi.org/10.1117/12.484050>
- Giurgiutiu, V., Reynolds, A., & Rogers, C. A. (1999). Experimental Investigation of E/M Impedance Health Monitoring for Spot-Welded Structural Joints. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 10(10), 802–812. <https://doi.org/10.1106/N0J5-6UJ2-WLGV-Q8MC>
- Giurgiutiu, V., & Rogers, C. A. (1997, September). Electro-Mechanical (E/M) Impedance Method for Structural Health Monitoring and Non-Destructive Evaluation. *International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford University, CA*.
- Giurgiutiu, V., & Zagrai, A. (2005). Damage Detection in Thin Plates and Aerospace Structures with the Electro-Mechanical Impedance Method. *Structural Health Monitoring*, 4(2), 99–118. <https://doi.org/10.1177/1475921705049752>
- Giurgiutiu, V., Zagrai, A., & Bao, J. J. (2016). Piezoelectric Wafer Embedded Active Sensors for Aging Aircraft Structural Health Monitoring. *Structural Health Monitoring*, 1(1), 41–61. <https://doi.org/10.1177/147592170200100104>
- Gresil, M., Yu, L., Giurgiutiu, V., & Sutton, M. (2012). Predictive modeling of

electromechanical impedance spectroscopy for composite materials. *Structural Health Monitoring*, 11(6), 671–683. <https://doi.org/10.1177/1475921712451954>

Guarino, J., Hamilton, R., & Fischer, W. (2009). Acoustic detection of bolt detorquing in structures. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 6(1), 065002. <https://doi.org/10.1121/1.3167485>

Hamdan, A., Sultan, M. T. H., & Mustapha, F. (2019). Structural health monitoring of biocomposites, fibre-reinforced composites, and hybrid composite. In *Structural Health Monitoring of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites* (pp. 227–242). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102291-7.00011-3>

Hewlett Packard. (1996). *HP LF 4192A: Impedance Analyzer Operation Manual...* - Google Académico.

Hu, X., Zhu, H., & Wang, D. (2014). A Study of Concrete Slab Damage Detection Based on the Electromechanical Impedance Method. *Sensors*, 14(10), 19897–19909. <https://doi.org/10.3390/S141019897>

Huang, Y. H., Liu, L., Yeung, T. W., & Hung, Y. Y. (2009). Real-time monitoring of clamping force of a bolted joint by use of automatic digital image correlation. *Optics & Laser Technology*, 41(4), 408–414. <https://doi.org/10.1016/J.OPTLASTEC.2008.08.010>

Inman, D. J., Farrar, C. R., Lopes, V., & Steffen, V. (2005). Damage Prognosis: For Aerospace, Civil and Mechanical Systems. In D. J. Inman, C. R. Farrar, V. Lopes Junior, & V. Steffen Junior (Eds.), *Damage Prognosis: For Aerospace, Civil and Mechanical Systems*. John Wiley and Sons. <https://doi.org/10.1002/0470869097>

Kessler, S. S., & Spearing, S. M. (2002). Design of a piezoelectric-based structural health monitoring system for damage detection in composite materials. In P. Davis (Ed.), *Smart Structures and Materials 2002: Smart Structures and Integrated Systems* (Vol. 4701, pp. 86–96). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.474649>

Keysight Technologies. (2020). *Impedance Measurement Handbook*.

Keysight Technologies. (2021). *A data sheet of Agilent E4980A precision LCRmeter*.

Khadour, A., & Waeytens, J. (2018). Monitoring of concrete structures with optical fiber sensors. In *Eco-efficient Repair and Rehabilitation of Concrete Infrastructures* (pp. 97–121). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102181-1.00005-8>

- Khomenko, A., Koricho, E. G., Haq, M., & Cloud, G. L. (2016). Bolt tension monitoring with reusable fiber Bragg-grating sensors. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 51(2), 101–108. <https://doi.org/10.1177/0309324715598265>
- Liang, C., Sun, F. P., & Rogers, C. A. (1994a). An Impedance Method for Dynamic Analysis of Active Material Systems. *Journal of Vibration and Acoustics*, 116(1), 120–128. <https://doi.org/10.1115/1.2930387>
- Liang, C., Sun, F. P., & Rogers, C. A. (1994b). Coupled Electro-Mechanical Analysis of Adaptive Material Systems — Determination of the Actuator Power Consumption and System Energy Transfer. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 5(1), 12–20. <https://doi.org/10.1177/1045389X9400500102>
- Liang, C., Sun, F., & Rogers, C. A. (1996). Electro-mechanical impedance modeling of active material systems. *Smart Materials and Structures*, 5(2), 171. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/5/2/006>
- Liang, Y., Feng, Q., Li, D., & Cai, S. (2018). Loosening monitoring of a threaded pipe connection using the electro-mechanical impedance technique—experimental and numerical studies. *Sensors (Switzerland)*, 18(11). <https://doi.org/10.3390/s18113699>
- Lilliefors, H. W. (1967). On the Kolmogorov-Smirnov Test for Normality with Mean and Variance Unknown. *Journal of the American Statistical Association*, 62(318), 399–402. <https://doi.org/10.1080/01621459.1967.10482916>
- Lingyu, Y., & Giurgiutiu, V. (2008). Multi-mode Damage Detection Methods with Piezoelectric Wafer Active Sensors. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 20(11), 1329–1341. <https://doi.org/10.1177/1045389X08096665>
- Liu, S. C., Tomizuka, M., & Ulsoy, G. (2006). Strategic issues in sensors and smart structures. *Structural Control and Health Monitoring*, 13(6), 946–957. <https://doi.org/10.1002/STC.88>
- Madgav, A. V. G., & Soh, C. K. (2007). Uniplexing and Multiplexing of PZT Transducers for Structural Health Monitoring. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 19(4), 457–467. <https://doi.org/10.1177/1045389X06075523>
- Malinowski, P., Wandowski, T., & Ostachowicz, W. (2015). The use of electromechanical impedance conductance signatures for detection of weak adhesive bonds of carbon fibre-reinforced polymer. *Structural Health Monitoring*, 14(4), 332–344. <https://doi.org/10.1177/1475921715586625>

- Martowicz, A., & Rosiek, M. (2013). Electromechanical Impedance Method. In *Advanced Structural Damage Detection: From Theory to Engineering Applications* (pp. 141–176). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118536148.CH6>
- Miller Jr, R. G. (1997). *Beyond ANOVA: Basics of Applied Statistics*. CRC Press.
- Moharana, S., & Bhalla, S. (2015). Influence of adhesive bond layer on power and energy transduction efficiency of piezo-impedance transducer. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 26(3), 247–259. <https://doi.org/10.1177/1045389X14523858>
- Na, W. S. (2022). A portable bolt-loosening detection system with piezoelectric-based nondestructive method and artificial neural networks. *Structural Health Monitoring*, 21(2), 683–694. <https://doi.org/10.1177/14759217211008619>
- Naidu, A. S. K. (2004). *Structural damage identification with admittance signatures of smart PZT transducers*. Nanyang Technological University.
- Ng, C. T., & Veidt, M. (2009). A Lamb-wave-based technique for damage detection in composite laminates. *Smart Materials and Structures*, 18(7), 074006. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/18/7/074006>
- Olivier Cherrier , Valérie Budinger , Frédéric Lachaud, J. M. P. S. (2013). Smart monitoring of aeronautical composites plates based on electromechanical impedance measurements and artificial neural networks. *Engineering Structures*, 794–804.
- Overly, T. G., Park, G., Farinholt, K. M., & Farrar, C. R. (2009). Piezoelectric active-sensor diagnostics and validation using instantaneous baseline data. *IEEE Sensors Journal*, 9(11), 1414–1421. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2009.2018351>
- 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. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(91\)90595-B](https://doi.org/10.1016/0022-460X(91)90595-B)
- Panigrahi, R., Bhalla, S., & Gupta, A. (2010). A low-cost variant of electro-mechanical impedance (EMI) technique for structural health monitoring. *Experimental Techniques*, 34(2), 25–29. <https://doi.org/10.1111/J.1747-1567.2009.00524.X>
- Park, G., Cudney, H. H., & Inman, D. J. (2000). Impedance-Based Health Monitoring of Civil Structural Components. *Journal of Infrastructure Systems*, 6(4), 153–160. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0342\(2000\)6:4\(153\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0342(2000)6:4(153))

- Park, G., & Inman, D. J. (2005). Impedance-Based Structural Health Monitoring. In *Damage Prognosis: For Aerospace, Civil and Mechanical Systems* (pp. 275–292). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/0470869097.CH13>
- Park, G., Sohn, H., Farrar, C. R., & Inman, D. J. (n.d.). *Overview of Piezoelectric Impedance-Based Health Monitoring and Path Forward*.
- Park, G., Sohn, H., Farrar, C. R., & Inman, D. J. (2003). Overview of piezoelectric impedance-based health monitoring and path forward. *Shock and Vibration Digest*, 35(6), 451–463. <https://doi.org/10.1177/05831024030356001>
- Park, S., Yun, C.-B., Roh, Y., & Lee, J.-J. (2005). Health monitoring of steel structures using impedance of thickness modes at PZT patches. *Smart Structures and Systems*, 1(4), 339–353. <https://doi.org/10.12989/SSS.2005.1.4.339>
- Pavelko, V., Ozolinsh, I., Kuznetsov, S., & Pavelko, I. (2011). Structural health monitoring of aircraft structure by method of electromechanical impedance. *Proc. of the VI International Workshop of NDT Experts*, 223–239.
- Pavelko, V. P., Kuznetsov, S., Ozolinsh, I., & Pavelko, I. (2014, October). Some applications of electromechanical impedance technology for SHM. *Proceedings of 11th European Conference on Non-Destructive Testing*.
- Peairs, D. M., Grisso, B. L., Margasahayam, R. N., Page, K. R., & Inman, D. J. (2004). Impedance-based health monitoring of space shuttle ground structures. *Proc. SPIE 5394, Health Monitoring and Smart Nondestructive Evaluation of Structural and Biological Systems III*, 5394, 99–107. <https://doi.org/10.1117/12.539771>
- Peairs, D. M., Park, G., & Inman, D. J. (2004). Improving Accessibility of the Impedance-Based Structural Health Monitoring Method. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 15(2), 139. <https://doi.org/10.1177/1045389X04039914>
- Pereira, D. A., & Serpa, A. L. (2015). Bank of H^∞ filters for sensor fault isolation in active controlled flexible structures. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 60–61, 678–694. <https://doi.org/10.1016/J.YMSSP.2015.01.036>
- Purekar, A. S., & Pines, D. J. (2010). Damage Detection in Thin Composite Laminates Using Piezoelectric Phased Sensor Arrays and Guided Lamb Wave Interrogation. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 21(10), 995–1010. <https://doi.org/10.1177/1045389X10372003>
- Ren, H., Chen, X., & Chen, Y. (2017). Structural Health Monitoring and Influence on Current Maintenance. In *Reliability Based Aircraft Maintenance Optimization*

and Applications (pp. 173–184). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812668-4.00009-5>

Ribeiro, M. I. (2004). Gaussian Probability Density Functions: Properties and Error Characterization. In *ipac.caltech.edu*.

Rosiek, M., Martowicz, A., Uhl, T., Stępiński, T., & Łukomski, T. (2010). Electromechanical impedance method for damage detection in mechanical structures. *11th IMEKO TC 10 Workshop on Smart Diagnostics of Structures*, 18–20.

Ross, S. M. (2021). Analysis of variance. In *Introduction to Probability and Statistics for Engineers and Scientists* (pp. 453–498). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824346-6.00019-3>

Samantaray, S. K., Mittal, S. K., Mahapatra, P., & Kumar, S. (2018). An impedance-based structural health monitoring approach for looseness identification in bolted joint structure. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 8(5), 809–822. <https://doi.org/10.1007/S13349-018-0307-2>

Sirohi, J., & Chopra, I. (2000). Fundamental Understanding of Piezoelectric Strain Sensors. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 11(4), 246–257. <https://doi.org/10.1106/8BFB-GC8P-XQ47-YCQ0>

Sparkfun electronics. (2014). *Datasheet of Piezoelectric Sound Components*. <https://doi.org/10.1.28>

Staszewski, W. J., Mahzan, S., & Traynor, R. (2009). Health monitoring of aerospace composite structures – Active and passive approach. *Composites Science and Technology*, 69(11–12), 1678–1685. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSCITECH.2008.09.034>

Sun, F. P., Chaudhry, Z. A., Rogers, C. A., Majmundar, M., & Liang, C. (1995). Automated real-time structure health monitoring via signature pattern recognition. *Conference on Smart Materials and Structures*, 2443, 236–247. <https://doi.org/10.1117/12.208261>

Tawie, R., & Lee, H. K. (2010). Monitoring the strength development in concrete by EMI sensing technique. *Construction and Building Materials*, 24(9), 1746–1753. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2010.02.014>

Tinoco, H. A., & Marulanda, D. (2014). A new index for damage identification in active beams with electromechanical impedance technique (EMI) approach to SHM. *Proceedings of II International Conference on Advanced Mechatronics, Design, and Manufacturing Technology*, 1–6.

- Tinoco, H. A., & Marulanda, D. J. (2015). Damage Identification in Active Plates with Indices Based on Gaussian Confidence Ellipses Obtained of the Electromechanical Admittance. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 34(3). <https://doi.org/10.1007/s10921-015-0299-3>
- Tinoco, H. A., & Serpa, A. L. (2011). Bonding influence in the electromechanical (EM) admittance of piezoelectric sensors bonded to structures based on EMI technique. *Proceedings of the 14th International Symposium on Dynamic Problems of Mechanics (DINAME XIV)*, 335–344. <https://doi.org/10.13140/2.1.5150.4967>
- Tinoco, H. A., & Serpa, A. L. (2012). Voltage relations for debonding detection of piezoelectric sensors with segmented electrode. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 31, 258–267. <https://doi.org/10.1016/J.YMSSP.2012.03.018>
- Tinoco, H. A., Serpa, A. L., & Ramos, A. M. (2010). Numerical Study of the Effects of Bonding Layer Properties on Electrical Signatures of Piezoelectric Sensors. *Mecánica Computacional*, 29(86), 8391–8409.
- Tseng, K. K. H., & Naidu, A. S. K. (2002). Non-parametric damage detection and characterization using smart piezoceramic material. *Smart Materials and Structures*, 11(3), 317. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/11/3/301>
- Tseng, K. K., & Wang, L. (2004). Smart piezoelectric transducers for in situ health monitoring of concrete. *Smart Materials and Structures*, 13(5), 1017. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/13/5/006>
- Uhl, T., Stepinski, T., & Staszewski, W. (2013). Introduction. In *Advanced Structural Damage Detection: From Theory to Engineering Applications* (pp. 1–15). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118536148.CH1>
- Wang, D., Zhang, J., & Zhu, H. (2015). Embedded electromechanical impedance and strain sensors for health monitoring of a concrete bridge. *Shock and Vibration*, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/821395>
- Watkins, A. J., & Kitcher, C. (2006). Electrical Installation Calculations. In *Electrical Installation Calculations Volume 2* (6th ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780080460611>
- Wayne Kerr Electronics. (n.d.). *Precision Impedance Analyzers Technical data sheet*.
- Wetherhold, R., Messer, M., & Patra, A. (2003). Optimization of Directionally Attached Piezoelectric Actuators. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 125(2), 148–152. <https://doi.org/10.1115/1.1555653>

- Xu, Y. G., & Liu, G. R. (2002). A Modified Electro-Mechanical Impedance Model of Piezoelectric Actuator-Sensors for Debonding Detection of Composite Patches. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 13(6), 389–396. <https://doi.org/10.1177/104538902761696733>
- Yang, Y., Hu, Y., & Lu, Y. (2008). Sensitivity of PZT Impedance Sensors for Damage Detection of Concrete Structures. *Sensors*, 8(1), 327–346. <https://doi.org/10.3390/S8010327>
- Yu, L., Pollock, P., Gresil, M., & Sutton, M. (2011). Progressive Damage Detection/Diagnosis on Composite Using Electromechanical Impedance Spectroscopy. *ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 1, 255–262. <https://doi.org/10.1115/IMECE2011-63914>
- Zagrai, A. N., & Giurgiutiu, V. (2001). Electro-Mechanical Impedance Method for Crack Detection in Thin Plates. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 12(10), 709–718. <https://doi.org/10.1177/104538901320560355>
- Zimmerman, D. C., & Kaouk, M. (1994). Structural Damage Detection Using a Minimum Rank Update Theory. *Journal of Vibration and Acoustics*, 116(2), 222–231. <https://doi.org/10.1115/1.2930416>

ANEXOS

Anexo A. Códigos en Matlab Capítulo 2

```
clear all
close all
load('Datos3.mat')

nn=3;

TAd1=Susc;

for i=1:nn
D(:,2*i-1:2*i)=[TAd1(:,2) TAd1(:,i+1)];
M1(2*i-1:2*i,1:2)=cov([TAd1(:,2),TAd1(:,i+1)]);
[e1(2*i-1:2*i,1:2), eival1(2*i-1:2*i,1:2)] = eig(M1(2*i-1:2*i,1:2));
I1(i)=(norm(eival1(2*i-1:2*i,1:2)));

X(i,:)=TAd1(:,i+1);
Y(i,:)=normpdf(X(i,:),mean(X(i,:)),std(X(i,:)));

theta(i)=abs((0.5*atan(M1(2*i,1)/(M1(2*i-1,1)-M1(2*i,2))))*180/pi);
end
Datos(:,1)=[Y(1,:)]';

for j=1:nn

hold on
data=[Y(1,:) Y(j,:)]';

Datos(:,j)=[Y(j,:)]';% [X1,X2] = meshgrid(x1,x2);
% F = mvnpdf([X1(:) X2(:)],mu,Sigma);
% F = reshape(F,length(x2),length(x1));

covariance = cov(data);
[eigenvec, eigenval] = eig(covariance);

% Get the index of the largest eigenvector
[largest_eigenvec_ind_c, r] = find(eigenval == max(max(eigenval)));
largest_eigenvec = eigenvec(:, largest_eigenvec_ind_c);

% Get the largest eigenvalue
largest_eigenval = max(max(eigenval));

% Get the smallest eigenvector and eigenvalue
if(largest_eigenvec_ind_c == 1)
    smallest_eigenval = max(eigenval(:,2))
    smallest_eigenvec = eigenvec(:,2);
end
```

```

else
    smallest_eigenval = max(eigenval(:,1))
    smallest_eigenvec = eigenvec(1,:);
end

% Calculate the angle between the x-axis and the largest eigenvector

angle = atan2(largest_eigenvec(2), largest_eigenvec(1));

% This angle is between -pi and pi.
% Let's shift it such that the angle is between 0 and 2pi
if(angle < 0)
    angle = angle + 2*pi;
end

% Get the coordinates of the data mean
avg = mean(data);

Fav(j)=100*smallest_eigenval/largest_eigenval;

% Get the 95% confidence interval error ellipse
chisquare_val = 2.4477;
theta_grid = linspace(0,2*pi);
phi = angle;
x0=avg(1);
y0=avg(2);

Anlo(j)=angle*180/pi;

a=chisquare_val*sqrt(largest_eigenval);
b=chisquare_val*sqrt(smallest_eigenval);

aa(j)=a;
bb(j)=b;

% the ellipse in x and y coordinates
ellipse_x_r = a*cos( theta_grid );
ellipse_y_r = b*sin( theta_grid );

%Define a rotation matrix
R = [ cos(phi) sin(phi); -sin(phi) cos(phi) ];

%let's rotate the ellipse to some angle phi
r_ellipse = [ellipse_x_r;ellipse_y_r]' * R;

% Draw the error ellipse
plot(r_ellipse(:,1) + x0,r_ellipse(:,2) + y0, '-')
hold on;

Xd(:,2*j-1)=r_ellipse(:,1) + x0;
Xd(:,2*j)=r_ellipse(:,2) + y0;

```

```

Z(j)=100*abs(trapz(Xd(:,2*j-1),Xd(:,2*j)))/max(Xd(:,2*j-1).*Xd(:,2*j))

% Plot the original data
plot(data(:,1), data(:,2), 'or');
mindata = min(min(data));
maxdata = max(max(data));
Xlim([mindata-0.5*mindata, maxdata+0.5*maxdata]);
Ylim([mindata-0.5*mindata, maxdata+0.5*maxdata]);
hold on;

% Plot the eigenvectors
quiver(X0, Y0, largest_eigenvec(1)*sqrt(largest_eigenval),
largest_eigenvec(2)*sqrt(largest_eigenval), '-m', 'Linewidth',2);
quiver(X0, Y0, smallest_eigenvec(1)*sqrt(smallest_eigenval),
smallest_eigenvec(2)*sqrt(smallest_eigenval), '-g', 'Linewidth',2);
hold on;

% Set the axis labels
hXLabel = xlabel('x');
hYLabel = ylabel('y');

end

theta=100*abs(theta'-45)/45;
Ra=100*bb./aa;
Z=Z';

Lmin=0.03*aa(1);
Lmax=aa(1);

R = [cos(pi/4) sin(pi/4); -sin(pi/4) cos(pi/4) ];

x_r = Lmax*cos(theta_grid);
y_r = Lmin*sin(theta_grid);

C0=mean(Y(1,:));

Re11 = [x_r;y_r]' * R ;

Xe=Re11(:,1)'+C0;
Ye=Re11(:,2)'+C0;

Edi=100*(pi*Lmin*Lmax)/(max(Y(1,:))^2)

hold on

plot(Xe,Ye, '-r')

```

Anexo B. Códigos en Matlab Capítulo 3

```
function [posx rc]=Distmodel2(a,fs)

load('DamModel2.mat')

Dxx=Dx;
Dyy=Dy;

X=[Dxx(:,1);Dyy(:,1);-Dxx(:,1);Dyy(:,1)];
Y=[Dxx(:,2);Dyy(:,2);Dxx(:,2);-Dyy(:,2)];
Z=[Dxx(:,3);Dyy(:,3);Dxx(:,3);Dyy(:,3)];

F = TriScatteredInterp(X,Y,Z);
[xi,yi] = meshgrid(-max(Dxx(:,1)):max(Dxx(:,1))/50:max(Dxx(:,1)), -
max(Dyy(:,2)):2*max(Dyy(:,2))/50:max(Dyy(:,2)));
zi = F(xi,yi);

[posx posy]=find(isnan(zi));

for i=1:length(posx)

    zi(posx(i),posy(i))=max(max(zi));
end
if fs==0
figure
surfc(xi,yi,zi,'edgecolor','interp');
colorbar
set(gcf,'Renderer','zbuffer')
end
AA=15;%cm;
BB=15;%cm
XX=[AA/2 AA/2 -AA/2 -AA/2];
YY=[-BB/2 BB/2 BB/2 -BB/2];
patch(XX,YY,[0.75 0.75 0.5]);

figure
patch(XX,YY,[0.75 0.75 0.5]);
set(gcf,'Renderer','OpenGL')
hold on

teta=0:pi/180:2*pi;
A=[0 0 a];
[m n]=size(xi);

for i=1:m
    for j=1:n
B=[xi(i,j) yi(i,j) zi(i,j)];
M(i,j)=sqrt(abs((a^2)-dot(A,B)/norm(B)));
    end
end
```

```
end
```

```
[m1 xx]=min(M);  
[Vm yy]=min(m1);
```

```
posZ=Vm;
```

```
if posZ>=0&&posZ<=10  
xc=3.1;  
yc=0;  
rc=norm([xc yc]);  
Rc=[xc yc rc];  
XR=Rc(3)*cos(teta);  
YR=Rc(3)*sin(teta);  
ZR(1:length(YR))=0;  
P1=patch(XR,YR,ZR,[18 22 236]/255);  
set(P1,'FaceAlpha',0.5);  
text(0,(-BB/2-0.1*BB/2),'Identified Damage Zone A')  
set(gcf,'Renderer','OpenGL')
```

```
Zc='Zona A';  
elseif posZ>10&&posZ<=16  
xc=5.3;  
yc=0;  
rc=norm([xc yc]);  
Rc=[xc yc rc];  
XR=Rc(3)*cos(teta);  
YR=Rc(3)*sin(teta);  
ZR(1:length(YR))=0;  
P1=patch(XR,YR,ZR,[255 128 0]/255) ;  
set(P1,'FaceAlpha',0.5);  
hold on  
xc=3.1;  
yc=0;  
rc=norm([xc yc]);  
Rc=[xc yc rc];  
XR=Rc(3)*cos(teta);  
YR=Rc(3)*sin(teta);  
ZR(1:length(YR))=0.1;  
P1=patch(XR,YR,ZR,[0.75 0.75 0.5]) ;  
text(0,-BB/2-0.1*BB/2,'Identified Damage Zone B')  
set(gcf,'Renderer','OpenGL')  
Zc='Zona B';  
elseif posZ>16&&posZ<=25  
xc=7.1;  
yc=0;  
rc=norm([xc yc]);  
Rc=[xc yc rc];  
XR=Rc(3)*cos(teta);  
YR=Rc(3)*sin(teta);  
ZR(1:length(YR))=0;
```

```

P1=patch(XX,YY,[250 18 18]/255) ;
set(P1,'FaceAlpha',0.5)
hold on
xc=5.3;
yc=0;
rc=norm([xc yc]);
Rc=[xc yc rc];
XR=Rc(3)*cos(teta);
YR=Rc(3)*sin(teta);
ZR(1:length(YR))=0.1;
P1=patch(XR,YR,ZR,[0.75 0.75 0.5]) ;
text(0,-BB/2-0.1*BB/2,'Identified Damage Zone C')
set(gcf,'Renderer','OpenGL')

Zc='Zona C';
end
axis equal
axis off

```

```

clear all, close all

load('DamModel2.mat')

Dxx=Dy;
Dyy=Dx;
X=[Dxx(:,1);Dyy(:,1);-Dxx(:,1);Dyy(:,1)];
Y=[Dxx(:,2);Dyy(:,2);Dxx(:,2);-Dyy(:,2)];
Z=[Dxx(:,3);Dyy(:,3);Dxx(:,3);Dyy(:,3)];

F = TriScatteredInterp(X,Y,Z);
[xi,yi] = meshgrid(-max(Dxx(:,1)):max(Dxx(:,1))/100:max(Dxx(:,1)), -
max(Dyy(:,2)):2*max(Dyy(:,2))/100:max(Dyy(:,2)));
zi = F(xi,yi);
mesh(xi,yi,zi)
colorbar

A=[0 0 4.5];

vp=(abs(zi*A(3)-A(3)*A(3)));

[m1 xx]=min(sqrt(vp));
[Vm yy]=min(m1);

PosD=[xi(xx(yy),yy) yi(xx(yy),yy)]
R=norm(PosD)

```


Anexo C. Códigos en Matlab Capítulo 4

```
clc, clear all
close all
load('impedancias.mat')
frecuencia_inicial=52000;
frecuencia_final=59000;
f_i=(frecuencia_inicial/50)-199;
Base_datos_p1=perno1;
Base_datos_p2=perno2;
Base_datos_p3=perno3;
Base_datos_p4=perno4;
Base_datos_p5=perno5;
signal_1=[Base_datos_p1(f_i:f_f,9)];
signal_2=[Base_datos_p2(f_i:f_f,9)];
signal_3=[Base_datos_p3(f_i:f_f,9)];
signal_4=[Base_datos_p4(f_i:f_f,9)];
signal_ref=[Base_datos_p5(f_i:f_f,9)];
RMSD1 = sqrt(sum((signal_1-signal_ref).^2)/sum(signal_ref.^2))*100;
RMSD2 = sqrt(sum((signal_2-signal_ref).^2)/sum(signal_ref.^2))*100;
RMSD3 = sqrt(sum((signal_3-signal_ref).^2)/sum(signal_ref.^2))*100;
RMSD4 = sqrt(sum((signal_4-signal_ref).^2)/sum(signal_ref.^2))*100;
figure
y=[0 RMSD1 RMSD2 RMSD3 RMSD4];
c = categorical({'SIN DAÑO 30 N.m';'RMSD1 10 N.m';'RMSD2 15 N.m';'RMSD3 20 N.m'; 'RMSD4 25 N.m'});
b = bar(c,y,'FaceColor',[0.8 0.8 0.8],'EdgeColor',[0.95 .95 .95],'Linewidth',1.5);
title('RMSD')
ylabel('Indice RMSD [%]')
```