



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Campus San Juan del Río

Área Electromecánica

**“Metodología basada en la transformada Wavelet para detección de múltiples
daños en armaduras”**

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el título de Ingeniero en
Electromecánica línea terminal Mecatrónica.

Presenta

Jonathan Martin Pérez Valdivia

Dirigido por:

Dr. Juan Pablo Amézquita Sánchez

San Juan del Río, Querétaro. Agosto de 2019

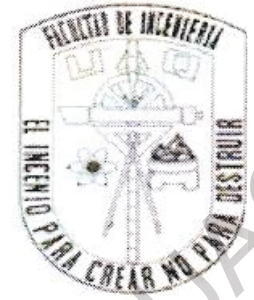




Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Electromecánica



“Metodología basada en la transformada Wavelet para detección de múltiples daños en armaduras”

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el título de Ingeniero Electromecánico línea terminal Mecatrónica.

Presenta:

Jonathan Martín Pérez Valdivia

Dirigido por:

Dr. Juan Pablo Amézquita Sánchez

Dr. Juan Pablo Amézquita Sánchez (11508)
Presidente

Dr. Martín Valtierra Rodríguez (11869)
Secretario

Dr. Miguel Trejo Hernández (6443)
Vocal

Dr. Ángel Pérez Cruz (8590)
Suplente



RESUMEN

Actualmente el monitoreo estructural es un tema de suma importancia en la ingeniería, además tiene una gran área de aplicación tal como en ingeniería civil, automotriz, aeronáutica, entre otras. Para el monitoreo estructural es de suma importancia evaluar la condición de la estructura y saber si tiene daños, ya que, si se detecta a tiempo, se pueden evitar tanto pérdidas humanas como reducción de los costos. La mayoría de las estructuras son afectadas por daños tales como corrosión, aflojamiento de uniones y grietas, las cuales son generadas por las condiciones a la que está sometida. En la vida real las estructuras civiles pueden presentar uno o múltiples daños. Por lo tanto, una metodología capaz de evaluar la condición de la estructura ante un daño o múltiples daños es necesaria.

En los últimos años se han realizado diversas investigaciones que demuestran que la respuesta vibratoria de la estructura se ve afectada si existen daños en la misma. Por esta razón, el presente trabajo de tesis presenta una metodología basada en la Transformada Wavelet Discreta (DWT), la cual permite descomponer la respuesta vibratoria de la armadura en diferentes bandas de frecuencia, a su vez las diferentes bandas de frecuencias son analizadas por fractales con el fin de estimar patrones o características dentro de estas bandas que permitan el poder ser asociadas al fenómeno estudiado, y finalmente, redes neuronales con el fin de clasificar los valores de fractalidad con el fin de evaluar la condición de la armadura de manera automática ante múltiples daños producidos en la armadura: corrosión, aflojamiento de uniones y grietas. Los resultados demuestran que la metodología propuesta es capaz de evaluar la condición de la armadura a través de los daños generados experimentalmente con una gran exactitud.

(Palabras claves: Monitoreo estructural, Grieta(crack), aflojamiento de unión, corrosión, Transformada Wavelet Discreta, Dimensión Fractal, ANOVA, Red Neuronal)

DEDICATORIA

*Dedico este trabajo de tesis
con tanto amor
a mis padres y abuelos.*

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

AGRADECIMIENTOS

A mi padre, Martin Pérez por su apoyo y motivación en todo momento, depositar su confianza en mí, a mi madre Lorena Valdivia por apoyarme y aconsejarme en todo momento, a mis hermanos Lucero y Aldair porque siempre estuvieron conmigo.

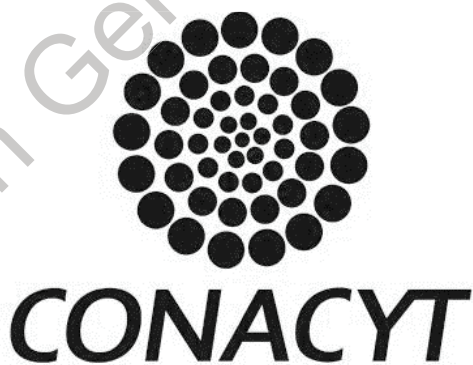
A mis abuelos Gonzalo Valdivia y Flora Esparza, por confiar en mí y guiarme por el buen camino, a mis tíos por brindarme sus conocimientos a lo largo de mis estudios.

A mi novia y mejor amiga, Roció Bautista por darme ánimos y consejos en momentos difíciles.

A mi asesor el Dr. Juan Pablo Amézquita Sánchez por su apoyo, consejos y enseñanzas a lo largo de la carrera, al Dr. Martín Valtierra Rodríguez por sus enseñanzas y consejos, y a todos mis maestros de carrera.

A mis amigos y compañeros de carrera por acompañarme, por saber arreglar todos nuestros problemas y encontrar una solución a todo.

También mi agradecimiento a Ciencia Básica SEP-CONACYT 2015/254697 (No. Reg: 28918), por la beca otorgada para el desarrollo de este trabajo de tesis llamado **“Metodología basada en la transformada Wavelet para detección de múltiples daños en armaduras”**



Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología



ÍNDICE GENERAL

Resumen.....	II
Dedicatoria.....	III
Agradecimientos.....	IV
Índice general.....	V
Índice de figuras.....	VII
Índice de tablas.....	X
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	2
1.2 ARMADURAS.....	2
1.3 ANTECEDENTES	4
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	6
1.5 HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	7
1.5.1 Hipótesis	7
1.5.2 Objetivo General:	7
1.5.3 Objetivos Particulares:.....	8
1.6 PLANTEAMIENTO GENERAL.....	8
CAPÍTULO 2: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	10
2.1 REVISIÓN DE LA LITERATURA.....	11
2.2 ESTRUCTURAS CIVILES	11
2.2.1 Daños en armaduras.....	12
2.3 EXCITACIÓN.....	13
2.4 SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS	15
2.4.1 Software LABVIEW.....	15
2.4.2 Sensor	16
2.4.3 Acondicionamiento, adquisición y envío de datos.....	16
2.5 PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES	17
2.5.1 MATLAB	17
2.5.2 Transformada wavelet discreta	18

2.5.3	Dimensión fractal	20
2.5.4	Análisis de varianza	23
2.5.5	Redes neuronales	23
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA.....		26
3.1	METODOLOGÍA.....	27
3.2	ARMADURA BAJO PRUEBA	28
3.3	SISTEMA DE EXCITACIÓN.....	30
3.3.1	Generador de señales.....	30
3.3.2	Amplificador	33
3.3.3	Excitador electrodinámico	34
3.4	SISTEMA DE ADQUISICIÓN	36
3.4.1	Sensor.....	36
3.4.2	Tarjeta de adquisición de datos	37
3.4.3	Software/interfaz de control para adquisición de datos.....	38
3.5	PROCESAMIENTO	39
CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA.....		41
4.1	PUESTA DE EXPERIMENTO.....	42
4.2	CASOS DE ESTUDIO.....	44
4.3	RESULTADOS.....	47
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y PROSPECTIVAS.....		58
5.1	CONCLUSIONES	59
5.2	PROSPECTIVAS	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1 Armadura tipo puente.....	3
Figura 1. 2 Armadura para una construcción.....	3
Figura 1. 3 Planteamiento general.....	9
Figura 2. 1 Daños por (a) corrosión, (b) aflojamiento en unión y (c) grietas.....	12
Figura 2. 2 Distribución Gaussiana.....	14
Figura 2. 3 Software LABVIEW (a) panel frontal y (b) panel de programación.....	15
Figura 2. 4 Software Matlab (a) Current folder, (b) Editor, (c) Command window, d) Workspace.....	18
Figura 2. 5 Algoritmo de Mallat.....	20
Figura 2. 6 Arquitectura de una PMC.....	24
Figura 2. 7 Arquitectura de una neurona procesando j	25
Figura 3. 1 Metodología.....	27
Figura 3. 2 Armadura (a) Modelo de la armadura bajo prueba y (b) elemento ensamblado.....	29
Figura 3. 3 Medidas de un cubo en la armadura.....	29
Figura 3. 4 Generador de señales.....	31
Figura 3. 5 Interfaz de control; Enmarcado en rojo la parte de excitación.....	32
Figura 3. 6 Código grafico en LabVIEW para la excitación.....	33
Figura 3. 7 Amplificador lineal de la marca Labworks modelo PA-138.....	33
Figura 3. 8 Shaker electrodinámico Labworks ET-126B.....	35
Figura 3. 9 Varilla roscada para la conexión del Shaker con la estructura.....	35
Figura 3. 10 Acelerómetro marca KISTLER modelo 8395A10.....	36

Figura 3. 11 Tarjeta DAQ NI-USB 6002.....	37
Figura 3. 12 Interfaz de control; enmarcado en color rojo la parte de adquisición de datos.	38
Figura 3. 13 Código grafico en LabVIEW para la adquisición.....	39
Figura 3. 14 Toolbox de la DWT en MatLab	40
Figura 3. 15 Toolbox para una Red Neuronal en MatLab.....	40
Figura 4. 1 Puesta de experimento.....	42
Figura 4. 2 Ubicación del acelerómetro en la estructura	43
Figura 4. 3 Señal triaxial de vibración obtenida por el acelerómetro.....	43
Figura 4. 4 Ubicación de zona de daño (zona verde) y localización del sensor.	44
Figura 4. 5 Barras usadas: (a) Barra sana y (b) barra con corrosión.....	45
Figura 4. 6 Condición de daño por grieta.....	45
Figura 4. 7 Aflojamiento de Unión.....	46
Figura 4. 8 Daños en la estructura.....	46
Figura 4. 9 Aproximaciones estimadas por la TWD para el eje X y la condición (a) sana y (b) aflojamiento de unión.....	47
Figura 4. 10 Detalles estimados por la TWD para el eje X y la condición (a) sana y (b) aflojamiento de unión.....	48
Figura 4. 11 Aproximaciones estimadas por la TWD para el eje Y y la condición (a) sana y (b) aflojamiento de unión.....	48
Figura 4. 12 Detalles estimados por la TWD para el eje Y y la condición (a) sana y (b) aflojamiento de unión.....	49

Figura 4. 13 Aproximaciones estimadas por la TWD para el eje Z y la condición (a) sana y (b) aflojamiento de unión.....	49
Figura 4. 14 Detalles estimados por la TWD para el eje Z y la condición (a) sana y (b) aflojamiento de unión.....	50
Figura 4. 15 Distribución de los datos para DFH del detalle nivel 4 eje X.....	52
Figura 4. 16 Distribución de los datos para DFH de la aproximación nivel 4 eje X.....	52
Figura 4. 17 Distribución de los datos para DFH de la aproximación nivel 5 eje X.....	53
Figura 4. 18 Distribución de los datos para DC de la aproximación nivel 5 eje Y.....	53
Figura 4. 19 Distribución de los datos para DC de la aproximación nivel 5 eje Z.....	54
Figura 4. 20 Distribución de los datos para DC de la aproximación nivel 6 eje Z.....	54
Figura 4. 21 Configuración de la red neuronal empleada para la evaluación de la condición de la armadura.....	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3. 1 Número de elementos que conforman la armadura.	30
Tabla 4. 1 Resultados de ANOVA para el eje, la banda de frecuencia, nivel y el algoritmo de dimensión fractal más discriminativos.....	51
Tabla 4. 2 Matriz de confusión de efectividad de la red neuronal.	56

CAPÍTULO 1

Introducción

1.1 INTRODUCCIÓN

A lo largo del tiempo se han desarrollado diversas estructuras civiles tales como puentes, edificios, etc., pero también han surgido diversos daños en estas mismas (por ejemplo, grietas, corrosión, aflojamiento de uniones, etc.), generando una reducción en su tiempo útil de vida. En este sentido, los daños son generados principalmente por vibraciones producidas por terremotos, paso vehicular y peatonal, entre otros y las condiciones ambientales tales como la humedad, temperatura, etc. (Amezquita-Sánchez & Adeli, 2015). Por lo tanto, la detección de daños en estructuras civiles de manera oportuna es de vital importancia, ya que esto podría evitar el colapso de estas, así como aminorar gastos económicos y evitar pérdidas de vidas humanas. Desafortunadamente, en el área de monitoreo estructural, las metodologías y sistemas de diagnóstico propuestos generalmente solo se enfocan en la detección de un solo daño, siendo que en la vida real estas pueden estar sometidas o manifestar múltiples daños.

Por lo tanto, el presente trabajo de tesis está enfocado en generar una metodología basada en la transformada Wavelet e indicadores no lineales, fractalidad, para detectar múltiples daños tales como corrosión, grietas y aflojamiento de uniones en una armadura de nueve cubos en configuración puente.

1.2 Armaduras

Actualmente, existen diferentes tipos de estructuras civiles a nivel mundial tales como edificios y puentes de concreto o acero con concreto, torres, edificios y puentes de armadura, entre otras, siendo las armaduras las más empleadas debido a sus grandes ventajas tales como: fácil armado, gran resistencia, gran estabilidad y alta rigidez, lo que le permite que sus elementos sean de gran longitud sin que exista alguna deflexión, además, estas requieren de poco material para su construcción lo que representa un ahorro económico (Beer et al. 2013). En particular, las armaduras son susceptibles principalmente a daños tales como lo son

la corrosión, aflojamiento en uniones y grietas, las cuales son objeto de estudio en este trabajo de tesis y estas serán descritas de manera detallada en el capítulo 2. Las Figuras 1.1 y 1.2 muestran un ejemplo de diferentes armaduras (a) un puente y (b) un marco empleado en edificios (Colina-Martínez et al. 2000; Pérez-Ramírez et al. 2016).



Figura 1. 1 Armadura tipo puente.

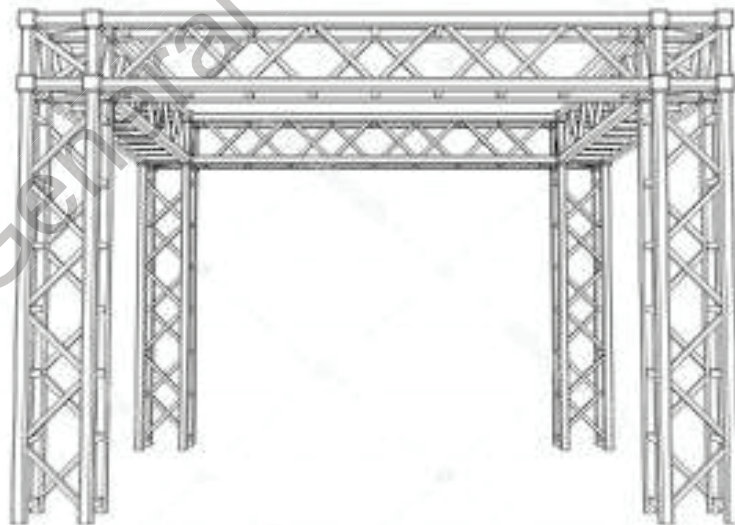


Figura 1. 2 Armadura para una construcción.

1.3 Antecedentes

En los últimos años, se han propuesto diversas metodologías para evaluar la condición de las estructuras civiles, los cuales se pueden dividir en 2 grandes ramas: métodos (a) visuales y (b) dinámicos. Los métodos visuales o de localización tales como Rayos-X (Gómez et al. 2017), procesamiento de imágenes (López-Ramírez et al. 2017), entre otros, han sido empleados para la detección de grietas (Ni et al. 2006), emisión acústica (Li et al. 2011), daños en uniones (Umesha et al. 2009), entre otros daños; sin embargo, estos métodos requieren frecuentemente un conocimiento *a priori* de la ubicación del daño, fácil acceso al área dañada y en ciertos casos cerrar temporalmente el paso a la estructura durante su inspección (Gul & Catbas, 2010; Osornio-Ríos et al. 2012). Por estas razones, una gran parte del monitoreo estructural en años recientes se ha enfocado en la detección de daños empleando el monitoreo/procesamiento de vibraciones, un método dinámico, ya que estas, han demostrado ser suficientemente sensitivas para detectar daños invisibles al ojo humano o localizados en áreas de difícil acceso (Lozano-Galant et al. 2013; Huang et al. 2014). En este sentido, se han propuesto diferentes métodos para identificar características en las señales de vibración que permitan una correcta evaluación de la condición estructural (Osornio-Ríos et al. 2012; García-Palencia & Santini-Bell et al. 2013; García-Perez et al. 2013; Su et al 2014; Amezquita-Sánchez y Adeli, 2016; Moreno-Gómez et al. 2017 & 2018). Por ejemplo, Osornio-Ríos et al. (2012) emplearon la transformada clasificación múltiple de señales para identificar corrosión en una armadura de cinco cubos sujeta a vibraciones forzadas producidas por un agitador (shaker) electrodinámico. Amezquita-Sánchez y Adeli (2015) fusionaron la transformada Wavelet llamada Synchrony y fractales para evaluar un ante la posibilidad de grietas en un edificio de 38 pisos sujeta a vibraciones ambientales (ruido aleatorio) producidas por una cama vibratoria. Recientemente, Moreno-Gómez et al. (2018) fusionó la descomposición empírica de nodos con la entropía de Shannon para detectar corrosión en una armadura de nueve cubos en configuración puente sujeta a ruido similar a la vibración ambiental producida por un agitador electrodinámico. Sin embargo, a pesar de los buenos resultados obtenidos

en los trabajos antes mencionados, estos se han enfocado en la detección de daños aislados (un solo daño); pero en la vida real, diferentes tipos de daños tales como corrosión, aflojamiento de uniones, entre otras pueden estar presentes en las estructuras; por lo tanto, es de gran importancia seguir investigando más métodos sobre el monitoreo estructural que permitan la identificación de múltiples daños.

Por otro lado, a nivel local, dentro de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ), en la última década, se han realizado diversos trabajos enfocados al monitoreo estructural. Por ejemplo, Paz (2009) diseñó y fabricó una armadura de tres secciones reconfigurables con el fin de estimar sus frecuencias naturales a través de un modelo de elemento finito y experimentalmente empleando acelerómetros. Posteriormente, Chávez (2010) expandió la armadura hecha por Paz (2009) a cinco cubos, con el objeto de estimar su condición a través de las frecuencias naturales estimadas por un modelo de elemento finito y experimentalmente a través de acelerómetros. El autor probó su método a través de una estructura con elementos sanos y con elementos que simulan corrosión. Empleando la misma estructura, Gallardo (2012) presentó una metodología basada en la transformada de Fourier para la detección de daños producidos por corrosión y daños en unión en una armadura de cinco módulos sujeta a impactos. En el mismo año, Amezquita (2012) propuso una metodología basada en la clasificación múltiple de señales y redes neuronales para la detección y localización de elementos con corrosión en la armadura sujeta a vibraciones dinámicas producidas por un shaker. Por otro lado, Pérez (2014) empleó la transformada Wavelet para la identificación de las frecuencias naturales y factores de amortiguamiento de la cafetería de la facultad de Ingeniería campus San Juan del Río de la UAQ empleando las aceleraciones producidas por excitaciones ambientales. Recientemente, Martínez (2018) estimó las frecuencias naturales y factores de amortiguamiento de un edificio de acero de cuatro niveles localizado en la Facultad de Ingeniería (UAQ), campus San Juan del Río empleando la transformada MUSIC y la transformada empírica Wavelet. La estructura fue instrumentada con varios acelerómetros y sometida a excitaciones forzadas provenientes de un martillo de impacto. Por otro lado, Pérez

(2018) logró localizar corrosión en una armadura de 9 módulos sometida a vibraciones forzadas, usando la transformada Wavelet, dimensión fractal y redes neuronales para clasificar.

A pesar de los buenos resultados a nivel local, estos trabajos de tesis se han enfocado a la obtención de los parámetros modales tales como frecuencias naturales, factores de amortiguamiento, entre otros, de las estructuras civiles, así como la detección de daños aislados; por lo tanto, es de gran importancia seguir investigando más métodos sobre el monitoreo estructural que permitan la identificación de múltiples daños, contribuyendo en el estado del arte sobre este tema dentro de la UAQ. También es importante mencionar que el desarrollo de un sistema capaz de generar y excitar de forma controlada a través de ruido Gaussiano, el cual es muy similar a las vibraciones ambientales y no ha sido abordado en los antecedentes antes mencionados es de suma importancia y será abordado en este trabajo de tesis.

1.4 Justificación

En todas partes del mundo son construidas diversas estructuras civiles con el fin de beneficiar a la sociedad, ya que estas permiten tener lugares de trabajo, vivienda, hospitales, así como trasladarnos entre diferentes lugares/ciudades, etc. Sin embargo, estas están completamente expuestas a cambios ambientales (temperatura, humedad, entre otros), así como movimientos producidos por terremotos, viento, entre otros, que pueden causar un daño (grietas, daños en uniones, corrosión, etc.) en la estructura. Por lo tanto, si estos daños no se atienden a tiempo pueden causar daños irreversibles en la integridad de la estructura pudiendo llegar a un colapso de esta, lo que implica no solo pérdidas materiales o económicas, sino también pérdidas de vidas humanas. Por estas razones, es de vital importancia desarrollar métodos/metodologías capaces de evaluar el estado de una estructura, que sean de carga computacional baja y que sean sencillas de

aplicar, lo que permitirá hacer el correspondiente mantenimiento de la estructura en caso de ser necesario.

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, la primera justificación de este trabajo de tesis es la aportación de fundamentos para el monitoreo de estructuras civiles. Como segunda justificación y la más importante de este trabajo de tesis es el desarrollo de una metodología para monitorear/evaluar armaduras empleando señales de vibración con el fin de detectar daños múltiples como corrosión, grieta y aflojamiento de unión, que son los más comunes en armaduras; ya que principalmente los métodos propuestos en la literatura se han enfocado a la detección de daños aislados (1 solo daño); sin embargo, en estructuras reales, dos o más daños pueden estar presentes al mismo tiempo. Finalmente, como tercera justificación el desarrollo de un sistema generador de señales arbitrarias para el control de un agitador que sea capaz de generar señales para poder excitar controladamente una estructura civil incluyendo ruido Gaussiano, similar a las vibraciones ambientales.

1.5 Hipótesis y objetivos

1.5.1 Hipótesis

Mediante el análisis de señales de vibración y técnicas de procesamiento avanzado de señales como la transformada Wavelet, fractales y redes neuronales es posible detectar múltiples daños en una armadura sujetas a vibraciones forzadas.

1.5.2 Objetivo General:

Proponer y desarrollar una metodología basada en la transformada Wavelet, dimensión fractal y redes neuronales para la detección de múltiples daños en armaduras sujetas a vibraciones forzadas.

1.5.3 Objetivos Particulares:

- Implementar el modelo matemático de ruido Gaussiano en LabVIEW para la creación de un generador de ondas arbitrarias que permita excitar de forma similar a las vibraciones ambientales mediante un excitador electrodinámico.
- Desarrollar las condiciones experimentales de elementos con características propias de daño (corrosión, daño en unión y grieta), que permitan analizar el comportamiento de la armadura bajo varias condiciones del daño.
- Instrumentar la armadura con un acelerómetro para obtener su comportamiento vibratorio ante las diferentes condiciones de daño.
- Desarrollar una metodología para la evaluación de la condición estructural de la armadura mediante técnicas avanzadas de procesamiento de señales, transformada Wavelet, dimensión fractal y redes neuronales en MATLAB, que sea capaz de detectar las diferentes condiciones de daño introducidas en la armadura.
- Evaluar los indicadores estimados por lo fractales a través de un análisis de varianza (ANOVA), en MATLAB con el fin de seleccionar los más discriminativos o capaces de evaluar la condición de la estructura.
- Evaluar la eficiencia de la metodología propuesta a través de las diferentes pruebas realizadas sobre la armadura.

1.6 Planteamiento General

El planteamiento general de este trabajo de tesis se muestra en la Figura (1.3) y se basa en cuatro etapas principales: (1) Excitación, (2) Adquisición de datos, (3) Procesamiento de la señal y (4) Diagnóstico.

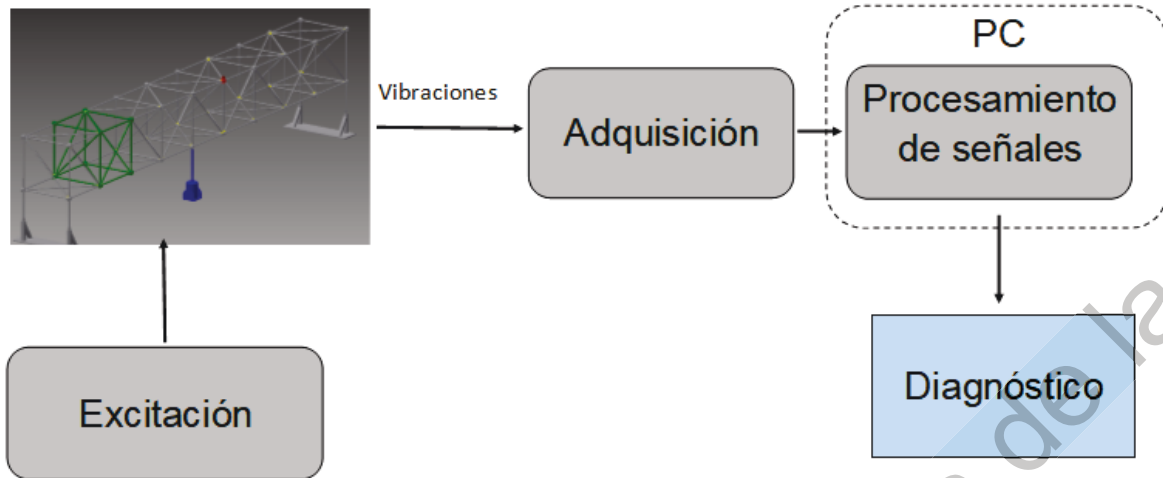


Figura 1. 3 Planteamiento general.

En el presente trabajo de tesis se desarrolla un sistema de monitoreo estructural a través del análisis de las vibraciones con el fin de evaluar la condición de una armadura de nueve cubos en configuración puente ante diferentes condiciones de daño (grietas, corrosión y aflojamiento de uniones). El sistema cuenta con una armadura, la cual es sometida a excitación forzada a través de un agitador (Shaker) electrodinámico, con el fin de extraer/monitorear su respuesta vibratoria mediante el uso de un sensor (acelerómetro). Una vez excitada la estructura, un sistema de adquisición de datos es empleado con el fin de adquirir y digitalizar las señales de vibración para enviarlas a la PC por medio del protocolo USB. Finalmente, los datos medidos son procesados por medio del software MATLAB con el fin de obtener características o patrones de cada señal que permitan evaluar la condición de la armadura.

CAPÍTULO 2

Fundamentación Teórica

2.1 REVISIÓN DE LA LITERATURA

En este capítulo se presentan los fundamentos matemáticos y los conceptos relacionados con el sistema de monitoreo estructural a desarrollar en este trabajo de tesis.

2.2 Estructuras civiles

Las estructuras civiles juegan un papel medular en diferentes áreas de ingeniería tales como civil, estructural, mecánica, entre otras, ya que estas tienen como fin el diseñar estructuras capaces de adecuarse a las necesidades de la vida actual. Estas se caracterizan por ser un conjunto de elementos que interactúan entre sí, con el fin de soportar cargas (Chopra, 2014), donde su comportamiento se rige por la ecuación general de movimiento, Ecuación (2.1), la cual involucra el equilibrio dinámico entre la inercia, elasticidad, amortiguamiento y fuerzas externas (Chopra, 2014):

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = f(t) \quad (2.1)$$

donde M representa la matriz de masa, C es la matriz de amortiguamiento y K es la matriz de rigidez del sistema estructural. $\ddot{x}(t)$, $\dot{x}(t)$, $x(t)$ y $f(t)$ son los vectores de aceleración, velocidad, posición y fuerza aplicada al sistema. Es muy importante mencionar que, para obtener la matriz de rigidez y masa de los elementos, se deben conjugar las matrices de deformación axial, flexión en los planos XY y XZ y torsión en el plano YZ, todo para conjuntarlo en una sola matriz, la cual puede ser consultada a detalle en la tesis de Chávez (2010). La matriz de amortiguamiento se puede obtener por el método de amortiguamiento proporcional, por lo cual se consideran los modos de vibración y frecuencias naturales, para el cálculo de este

método de forma detallada se pueden consultar los siguientes trabajos Hutton (2004) y Lui & Quek (2003).

2.2.1 Daños en armaduras

Diferentes tipos de daños pueden ocurrir a lo largo de la vida útil de las estructuras civiles; en particular, las armaduras son susceptibles principalmente a diferentes daños siendo los más comunes la corrosión, aflojamiento en uniones y grietas como se muestra en las Figura 2.1. Es por ello que este tipo de daños son estudiados en el presente trabajo de tesis.

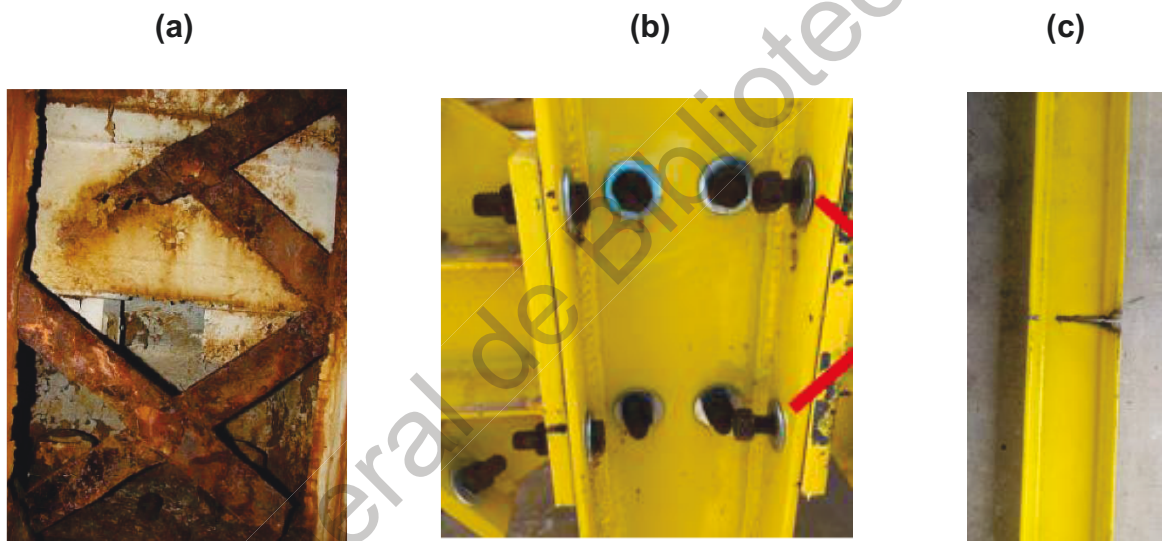


Figura 2. 1 Daños por (a) corrosión, (b) aflojamiento en unión y (c) grietas.

La corrosión es caracterizada por degradar los materiales, principalmente metales, resultando en un debilitamiento de los miembros estructurales, lo que afectaría principalmente su rigidez pudiendo producir el colapso de la estructura en ciertos casos (Moreno-Gómez et al. 2018).

El aflojamiento de uniones es un daño que se presenta con frecuencia en estructuras atornilladas, y esta se debe principalmente por las vibraciones a la que

es sometida la estructura. Es importante mencionar que este daño generalmente se desarrolla en los nodos produciendo un cambio en la rigidez de la estructura.

Las grietas o por su nombre en inglés “cracks” se deben principalmente por fatiga en los elementos de la estructura tales como en las barras o vigas que son sometidas a esfuerzos axiales, transversales y momentos flexionantes (Beer et al. 2013). La mayoría de estos esfuerzos son generados por objetos de gran peso, como: personas, vehículos, construcciones, etc. Estas se caracterizan por propagarse a través el material, afectando severamente el elemento que la o las contiene, reduciendo la vida útil de la estructura. Una grieta en un miembro estructural el cual induce flexibilidad local que afecta la respuesta vibratoria de la estructura, generando un cambio en las frecuencias naturales y los modos de vibraciones de la estructura (Pacheco-Ortega et al. 2018).

2.3 Excitación

La excitación es una parte fundamental en un sistema de monitoreo, ya que esta permite inducir la energía necesaria sobre la estructura con el fin de monitorear su comportamiento dinámico y en base a ello estimar valores tales como los parámetros modales o características que permitan evaluar la condición de la estructura (Perez-Ramirez, 2016).

En la actualidad, existen dos formas de excitar una estructura civil: natural y artificial. En el caso de la excitación de manera natural o vibraciones ambientales, estas son producidas principalmente por el paso vehicular y peatonal, micro terremotos y por el viento. Las vibraciones ambientales tienen la principal ventaja de permitir generar un sistema de monitoreo constante, ya que estos estímulos por lo general están casi siempre presentes en la vida útil de la estructura (Perez-Ramirez, et al. 2016). Por otro lado, las excitaciones artificiales o vibraciones forzadas se generan de manera artificial a través de un equipo mecánico o electromecánico tales como pesas, agitadores, camas vibratorias y martillos, siendo

su principal ventaja el control sobre las características de la excitación tales como fuerza y banda de frecuencia (Garcia-Perez et al. 2013).

Basado en las principales ventajas de los excitadores artificiales, estos pueden ser empleados para generar vibraciones tipo ambiental (las más empleadas para los sistemas de monitoreo estructural) a través del ruido Gaussiano con la ventaja de poder controlar la distribución de los datos y la banda de frecuencia de excitación impuesta sobre la estructura civil. El ruido Gaussiano se basa en la distribución normal (ver Figura 2.2) de un conjunto de datos aleatorios que tienen media cero y está representado por (Daniels, 2005):

$$d = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.2)$$

donde σ^2 es la varianza y μ es la media de los datos. Es muy importante mencionar que como el ruido Gaussiano tiene una media cero esta puede ser relacionada con la posición original de un agitador y la desviación estándar positiva y negativa con el desplazamiento hacia arriba y abajo del agitador, respectivamente.

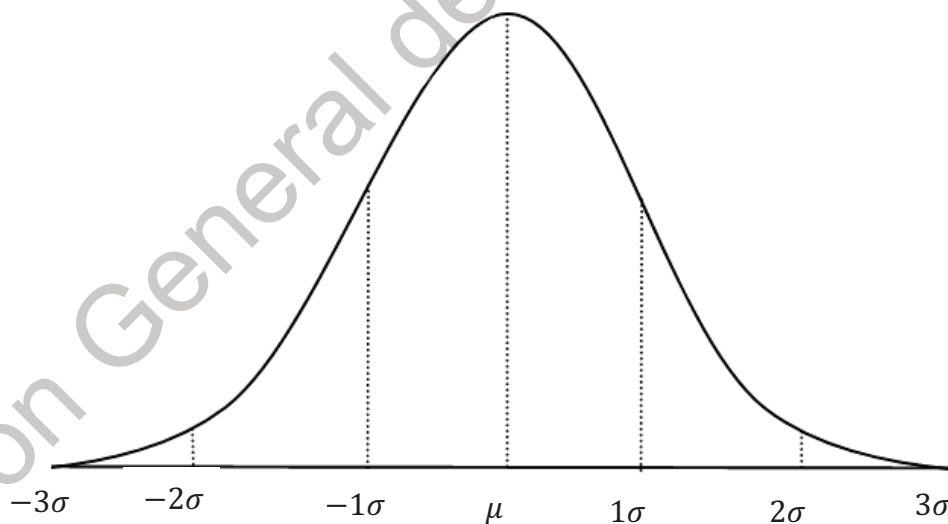


Figura 2. 2 Distribución Gaussiana.

2.4 Sistema de adquisición de datos

Un sistema de adquisición de datos (SAD) se encarga de (a) monitorear el comportamiento físico de un fenómeno a través de sensores, (b) acondicionar la información provista por el sensor y (c) almacenar y enviar la información a través de un protocolo de comunicación tal como USB, RS-232, entre otros. Por lo tanto, el SAD es conformado por un software de control, sensores y una tarjeta de acondicionamiento, almacenamiento y envío de datos a través de un protocolo de comunicación para su posterior procesamiento.

2.4.1 Software LABVIEW

LABVIEW, Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench, es un software de alto nivel, el cual se basa en un entorno de programación gráfico, donde se pueden desarrollar programas de forma rápida y sencilla. Debido a su gran versatilidad el software LABVIEW permite el procesamiento de datos, la adquisición de datos y el control de instrumentos y equipos.

Este software se basa en dos ventanas principales llamadas (a) panel frontal, el cual permite operar y visualizar los resultados del procesamiento y (b) el panel de programación o panel de bloques, el cual permite crear o programar las operaciones que realizarán los datos, como se muestra en la Figura (2.3).

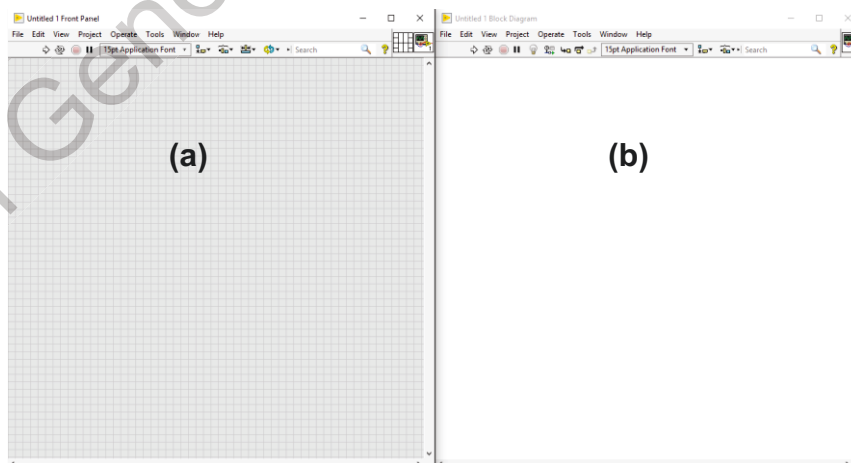


Figura 2. 3 Software LABVIEW (a) panel frontal y (b) panel de programación.

2.4.2 Sensor

El sensor es un dispositivo capaz de medir/detectar eventos o cambios en un su ambiente (fenómeno monitoreado), y esta información a su vez es enviada a otros dispositivos para su almacenamiento y procesamiento (Bolton, 2001). En los últimos años, diferentes sensores han sido empleados para monitorear la condición de las estructuras civiles tales como velocímetros, galgas extensiométricas, acelerómetros, sistemas de posicionamiento global, entre otros, siendo, los acelerómetros los más empleados ya que permiten medir la respuesta dinámica de la estructura de forma eficiente (Moreno-Gomez et al. 2017).

Un acelerómetro se caracteriza por ser un dispositivo creado para medir los movimientos oscilatorios causados por las excitaciones ambientales o dinámicas en las estructuras civiles. Existen tres tipos de acelerómetros que han sido empleados para el monitoreo de estructuras civiles: capacitivos, piezoeléctricos y micro-electromecánicos (Amezquita-Sanchez et al. 2018). Los acelerómetros capacitivos se caracterizan por producir un voltaje o corriente eléctrica de acuerdo con la variación de la distancia que existe entre dos placas. Este tipo de sensor permite medir un gran rango de frecuencias, especialmente bajas frecuencias. Los acelerómetros piezoeléctricos generan un voltaje o corriente eléctrica de acuerdo a la presión que se aplica a un material piezoeléctrico. Finalmente, los acelerómetros micro-electromecánicos producen una pequeña corriente eléctrica proporcional al desplazamiento de una pequeña masa grabada en la superficie de silicona del circuito integrado y suspendida por pequeñas vigas. Los sensores piezoeléctricos y micro-electromecánicos son pequeños y ligeros, pero presentan problemas para monitorear frecuencias bajas, las cuales son principalmente encontradas en las estructuras civiles. Por esta razón, en este trabajo de tesis es empleado un sensor capacitivo.

2.4.3 Acondicionamiento, adquisición y envío de datos.

El acondicionamiento de la señal depende principalmente de la salida que provee un sensor: analógica o digital. Si la salida del sensor es analógica como es el

caso de muchos sensores, esta debe ser procesada a través de diversas etapas tales como amplificación, filtrado, convertidor, etc., con el fin de adecuarla al sistema de adquisición (Amézquita-Sanchez et al. 2018). Una vez que la señal es acondicionada, esta señal se puede adquirir/almacenar por el sistema/tarjeta de adquisición para su posterior envío por medio de un protocolo de comunicación para su procesamiento en un sistema digital tal como una computadora.

Por otro lado, si la salida de la señal es digital, esta puede ser transmitida directamente a la tarjeta de adquisición para su posterior envío a un procesador tal como una computadora.

2.5 Procesamiento digital de señales

El procesamiento digital de señales es una rama de la ingeniería que se encarga de procesar las señales ya sean en tiempo o imágenes con el fin de estimar o identificar características dentro de estas con el fin de asociarlas a los fenómenos estudiados (Perez-Ramirez et al. 2016), en este caso de la condición de una armadura de nueve cubos en configuración puente.

2.5.1 MATLAB

MATLAB es caracterizado por ser un software especializado para el análisis/manipulación de datos matriciales o vectoriales. Gracias a la forma de manipular los datos y con las herramientas/funciones que cuenta, MATLAB es muy usado para el procesamiento de señales e imágenes digitales. MATLAB consta de 4 ventanas principales como se muestra en la Figura 2.4, donde (a) señala el folder actual o Current folder, el cual muestra el directorio/dirección actual donde se guarda el archivo o script, (b) muestra el Editor, en el cual se realiza la programación del algoritmo de procesamiento, (c) señala la venta de comandos o Command window, la cual permite realizar una programación básica, además de mostrar si

existe algún error en el código y (d) el espacio de trabajo o Workspace muestra las variables y sus valores que han utilizado en el programa.

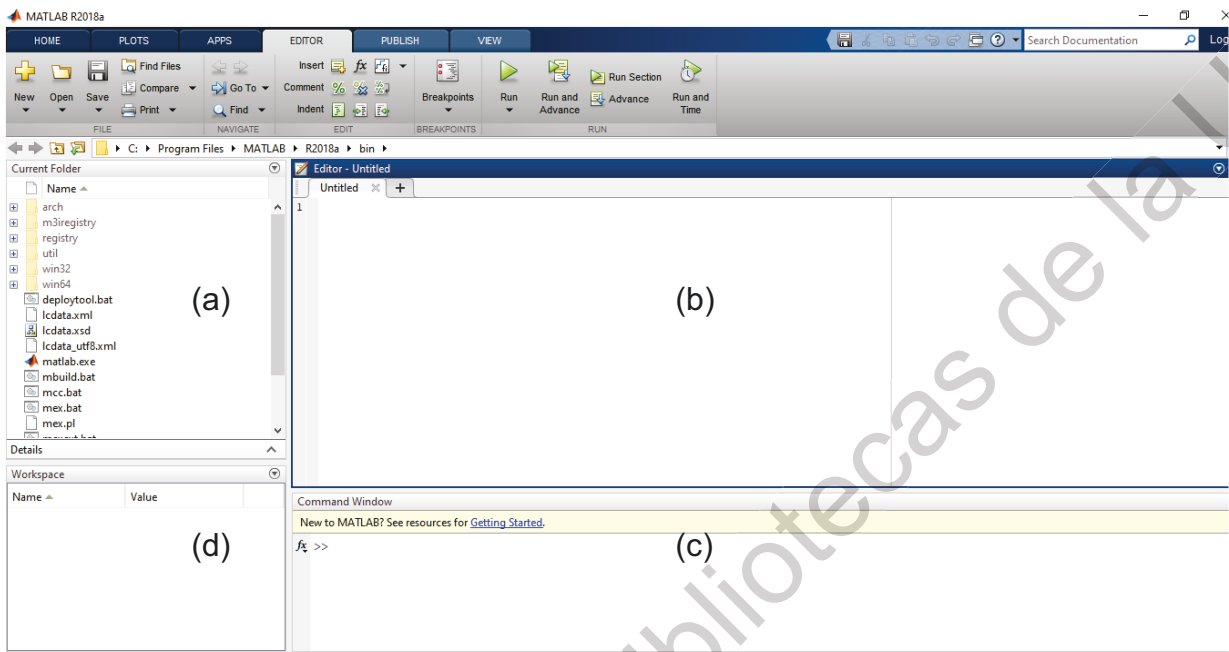


Figura 2. 4 Software Matlab (a) Current folder, (b) Editor, (c) Command window, (d) Workspace

2.5.2 Transformada Wavelet Discreta

La Transformada Wavelet Discreta (TWD) es una técnica capaz de procesar/analizar señales con propiedades estacionarias y no estacionarias, como las monitoreadas en estructuras civiles. La TWD descompone una señal, $x(n)$ de longitud o muestras N , en diferentes bandas de frecuencia llamadas aproximaciones (filtros pasa-bajas) y detalles (filtros pasa altas), de acuerdo con la Ecuación (2.3) y al algoritmo de Mallat:

$$TWD_{j,k} = \sum_N x(n) \overline{L_{j,k}(n)} \quad (2.3)$$

donde $L(n)$ es la función Wavelet o Wavelet madre, j y k representan el escalamiento y movimiento de la Wavelet madre, respectivamente. Existen diversas Wavelets madre: Haar, Daubechies, Mexican Hat, Coiflets, Meyer, entre otras, las cuales se dilatan y contraen para obtener las aproximaciones y detalles de la TWD (Amezquita-Sanchez & Adeli 2016). Es muy importante mencionar que la Daubechies orden 44 es la más recomendada para el análisis de señales no estacionarias como las provenientes de estructuras civiles, ya que permite una descomposición correcta de la información (Pérez, 2018). Por lo tanto, esta Wavelet madre es empleada en este trabajo de tesis.

El algoritmo de Mallat se basa en la descomposición de la señal en una aproximación y detalle en cada nivel y el nuevo nivel es creado a partir de la aproximación calculada con anterioridad como se muestra en la Figura (2.5). En otras palabras, cuando la señal, $x(n)$, entra a la TWD, esta es dividida en dos bandas de frecuencia a través de un filtro pasa-bajas (aproximación) y a un filtro pasa altas (detalle) y estas bandas de frecuencias son numeradas de acuerdo con el nivel analizado; por ejemplo, en el nivel 1 se llamaría aproximación 1 (AC_1) y detalle 1 (DC_1). Adicionalmente, también es importante mencionar que el ancho de frecuencia que corresponde a cada banda o descomposición es dividida por mitad; por ejemplo, si la señal tiene una frecuencia de muestreo de 100 Hz, la aproximación 1 tendrá un ancho de banda de 0-25Hz y el detalle 1 tendrá un ancho de banda de 25 a 50Hz.

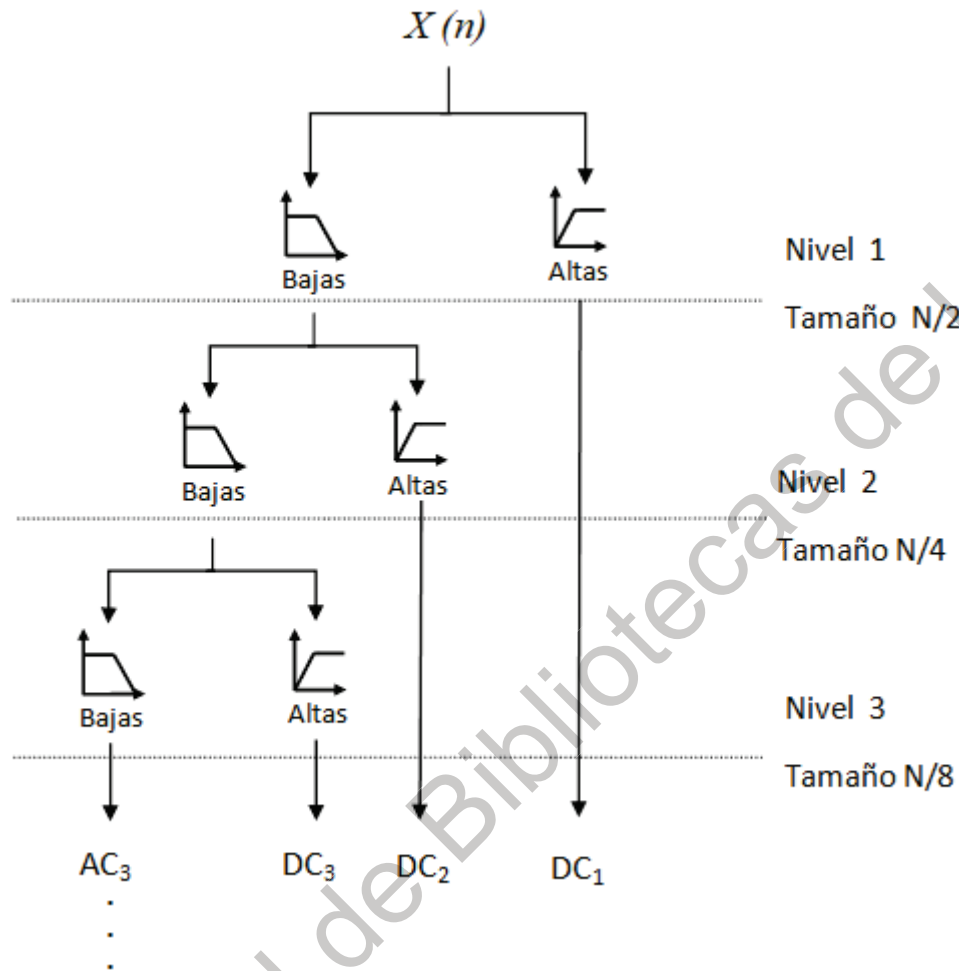


Figura 2. 5 Algoritmo de Mallat.

2.5.3 Dimensión fractal

La Dimensión Fractal (DF) es un concepto proveniente de la teoría del caos, el cual se enfoca a estudiar el comportamiento de los sistemas dinámicos y no lineales. La DF es una medida de la regularidad y similitud geométrica de una señal y varía entre 1 y 2 de acuerdo a la similitud geométrica encontrada a lo largo de la señal. Si el valor de DF tiende a 1 indica que la señal tiene baja repetitividad geométrica, por el contrario, si el valor de DF tiende a 2 indica que la señal es repetitiva geoméricamente (Amezquita-Sanchez & Adeli, 2015).

Con el fin de medir la DF de una señal, existen diferentes algoritmos tales como la DF de Katz, Higuchi y la dimensión de caja, los cuales son descritos en las siguientes secciones y explorados en la tesis con el fin de determinar cuál de ellos permiten una correcta evaluación de la condición estructural.

2.5.3.1 La Dimensión fractal de Katz

La dimensión fractal de Katz (DFK) estima la regularidad geométrica, fractalidad, de una señal midiendo la distancia Euclidiana entre muestras sucesivas (Katz, 1988):

$$DFK = \frac{\ln(\frac{L}{a})}{\ln(\frac{d}{a})} \quad (2.4)$$

donde L es la suma de la distancia Euclidiana entre muestras sucesivas de la señal x :

$$L = \sum_{i=2}^N |x_i - x_{i-1}| \quad (2.5)$$

a representa la media de la distancia Euclidiana entre puntos sucesivos. d es el valor máximo de la distancia Euclidiana entre la primera muestra x_1 y las subsecuentes x_i .

2.5.3.2 Dimensión de caja

El algoritmo llamado dimensión caja (DC) estima la fractalidad de una señal de la siguiente forma (Wang, 2005):

$$DC \cong - \frac{\ln(\sum_{i=1}^{N-1} |x_i - x_{i-1}|) / \Delta t}{\ln(\Delta t)} \quad (2.6)$$

donde el número muestras de la señal x esta dado por N , y el tiempo de muestreo está dado por Δt .

2.5.3.3 Dimensión Fractal Higuchi

La Dimensión Fractal de Higuchi (DFH) mide la fractalidad de una señal de acuerdo con los siguientes 4 pasos (Higuchi, 1988).

Paso 1: se descompone la señal original x , con número de muestras N en una nueva señal x_k^m :

$$x_k^m = x_m, x_{m+k}, x_{m+2k}, \dots, x_{m+\lfloor \frac{N-m}{k} \rfloor k} \quad (m = 1, 2, \dots, k) \quad (2.7)$$

donde k y m son números integradores, que representan un valor escalar para determinar el tiempo entre la sucesión de cada muestra y el tiempo inicial, respectivamente.

Paso 2: se calcula la longitud promedio normalizada para cada secuencia utilizando la Ecuación 2.8:

$$L_m(k) = \frac{N-1}{k \lfloor \frac{N-m}{k} \rfloor} \sum_{i=1}^{\lfloor \frac{N-m}{k} \rfloor} |x_{m+ik} - x_{m+(i-1)k}| \quad (2.8)$$

donde $\frac{N-1}{k \lfloor \frac{N-m}{k} \rfloor}$ representa el factor de normalización.

Paso 3: se calcula la longitud total $L(k)$, promediando la longitud de todas las secuencias $L_m(k)$ para un valor k dado de la siguiente manera:

$$L(k) = \sum_{m=1}^k L_m(k). \quad (2.9)$$

Paso 4: se modifica $k=k+1$. Si $k < k_{max}$ se debe de repetir los pasos de 1 a 3. El valor máximo de k_{max} . Se selecciona para ser el número cuando la pendiente de la mejor línea ajustada al trazado del plano $\ln[l(k)]$ contra $\ln[1/k]$ permanece constante. La pendiente obtenida de esta línea representa el valor del fractal.

2.5.4 Análisis de varianza

El análisis de varianza o ANOVA es un método empleado para valorar la capacidad de la o las características calculadas por mediciones no lineales tales como los fractales para evaluar la condición de la estructura civil. Como resultado del análisis de varianza se obtiene un valor de probabilidad, valor p , que rechaza la hipótesis de que no haya probabilidad entre poblaciones específicas, es decir que los datos sean muy similares. El valor P varía entre 0 a 1, donde un valor cercano a cero indica que los conjuntos de datos no comparten información y pueden ser empleados para asociarlos al fenómeno(s) estudiado; por otro lado, si el valor tiende a 1 significa que los conjuntos comparten o presentan la misma información, limitando que puedan ser asociados al fenómeno estudiado (Amezquita-Sánchez, 2018).

2.5.5 Redes neuronales

Las redes neuronales artificiales (RNA) son modelos matemáticos inspiradas en las neuronas del ser humano capaces de aprender patrones que pueden ser asociados a un fenómeno(s) (Deperlioglu y Kose ,2011; Hernandez-Vargas, 2014). Una neurona es conocida como un nodo en una RNA, la cual realiza una función no lineal para procesar la información. Las conexiones de la neurona se encargan de trasladar los pesos o ponderaciones a lo largo de la red de conexiones. Estos pesos son ajustados en la etapa de entrenamiento de la RNA de acuerdo a los datos de entrada y salidas deseadas. Neuronas específicas son dedicadas a las funciones de entrada y salida, y otras a la capa oculta o neuronas internas, las cuales forman la configuración llamada perceptrón multicapas (PMC), como se muestra en la Figura 2.6 (Lopez-Ramirez, 2016).

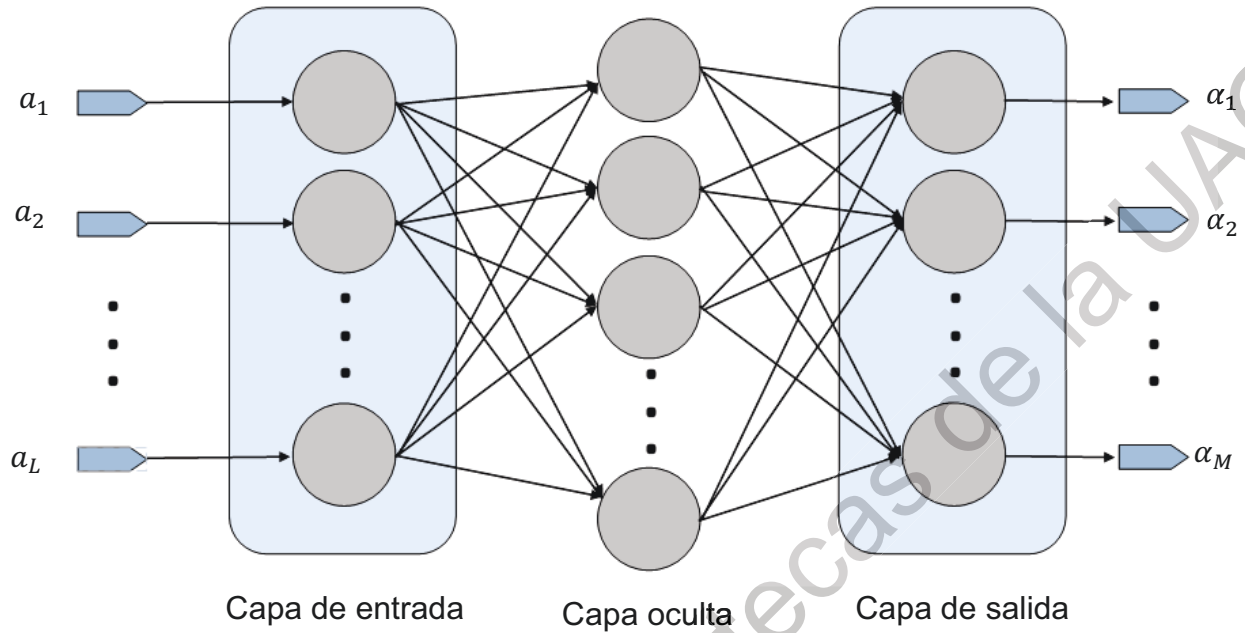


Figura 2. 6 Arquitectura de una PMC.

En una red neuronal cada unidad o neurona como se muestra en la Figura 2.7, es considerada un nodo S_j generando una sumatoria no lineal:

$$S_j = \sum_{i=0}^n \omega_{ji} a_i \quad (2.10)$$

donde ω_{ji} es el factor de ponderación de la unidad i a la neurona j ($j = 1, 2, \dots, 52$), y α_j es el valor de activación definido por:

$$\alpha_j = \frac{1}{1 + e^{-s_j}} \quad (2.11)$$

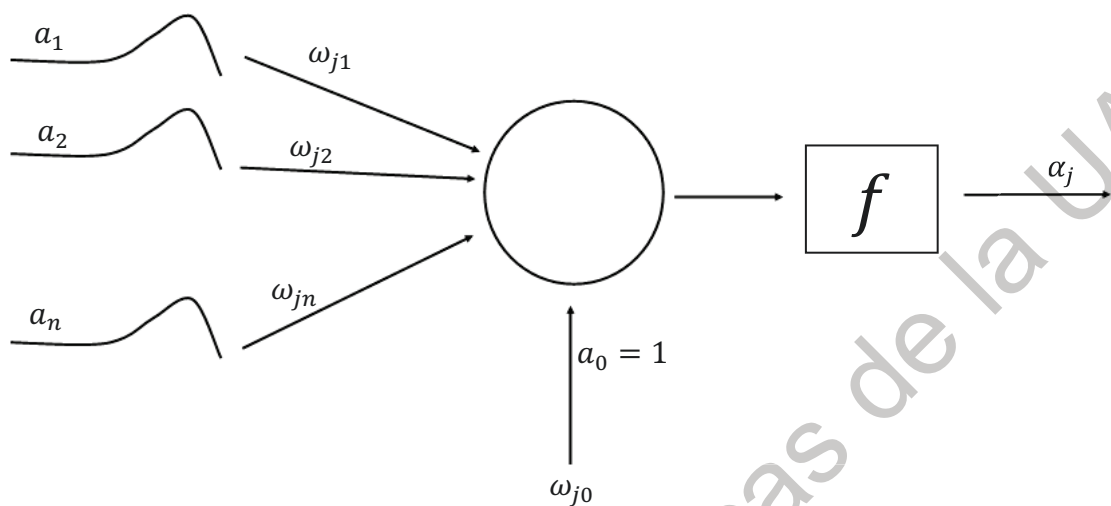


Figura 2. 7 Arquitectura de una neurona procesando j .

CAPÍTULO 3

Metodología

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

3.1 Metodología

La Figura 3.1 muestra la metodología planteada en este trabajo de tesis con el fin de detectar múltiples daños en una armadura en configuración puente, la cual se basa en 4 etapas principales

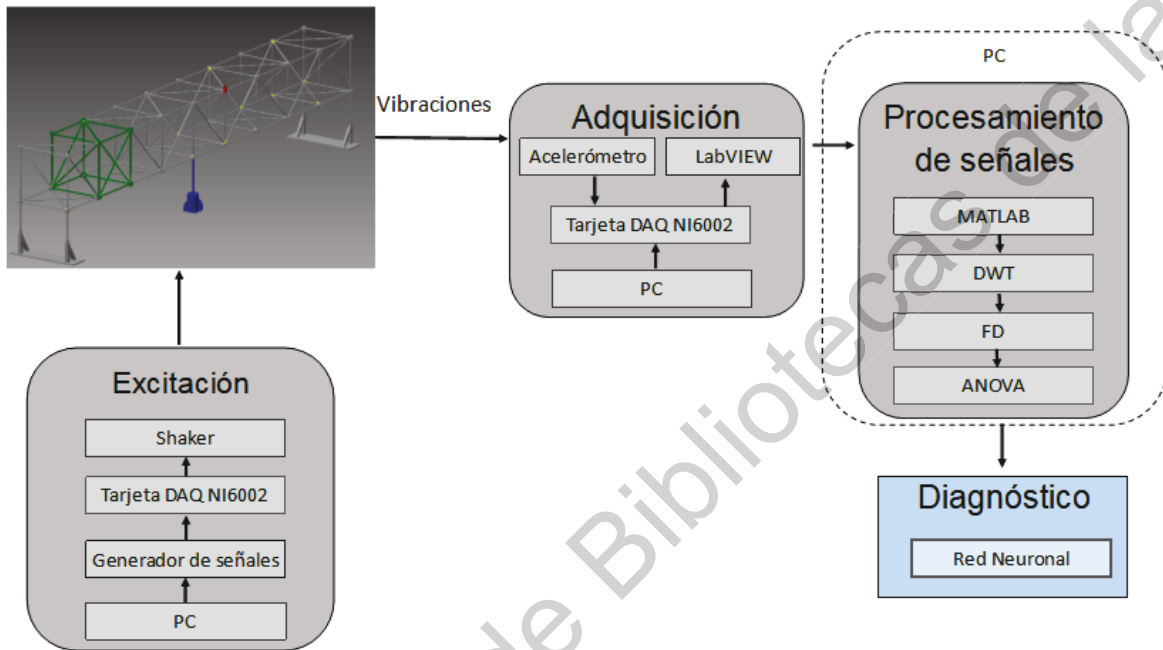


Figura 3. 1 Metodología.

Etapas 1: Excitación. A través de un generador de señales arbitrarias diseñado en el software LabVIEW y una tarjeta de National Instruments es alimentado un excitador/agitador (shaker) electrodinámico, el cual es capaz de reproducir la señal generada y esta a su vez transmitirla o inyectarla a la armadura con el fin de que esta vibre o se desplace para monitorear su dinámica ante diferentes condiciones: sano y dañada. Con el fin de tener una muestra representativa de cada condición se realizaron 20 pruebas para cada condición: sana, aflojamiento de unión, corrosión, grieta y sus combinaciones (Grieta-unión, corrosión-grieta, corrosión-unión, corrosión-grieta-unión), resultando un total de 160 pruebas.

Etapas 2: Adquisición. Una vez que la estructura es excitada, su respuesta dinámica es monitoreada a través de un sensor, acelerómetro, donde los datos del sensor serán adquiridos y digitalizados con la ayuda de un sistema de adquisición basado en el software LabVIEW y una tarjeta de National Instruments, permitiendo enviar la información a la computadora a través de un protocolo de comunicación USB para su posterior procesamiento.

Etapas 3: Procesamiento. La información monitoreada durante la etapa de adquisición se procesa a través de la transformada Wavelet discreta, dimensión fractal (Katz, Dimensión de caja e Higuchi) y ANOVA, con el fin de seleccionar las características más discriminantes en la señal que permitan ser asociadas al fenómeno estudiado, que en este caso es asociarlo al monitoreo de la condición de la armadura (condición sana, daño por corrosión, grietas, aflojamiento de uniones y sus combinaciones).

Etapas 4: Diagnóstico. Finalmente, una vez seleccionadas las bandas de frecuencia y los algoritmos de fractalidad más discriminantes capaces de evaluar la condición estructural, se emplea un clasificador de redes neuronales para diagnosticar la condición de la estructura, sana o presentar un daño por corrosión, grietas, aflojamiento de uniones o sus combinaciones, de forma automática con el fin de que esta pueda ser reparada por el ingeniero civil lo más pronto posible.

3.2 Armadura bajo prueba

La armadura que se analiza en este trabajo de tesis es una armadura en configuración puente hecha de aluminio 6061, la cual cuenta o está diseñada con 9 cubos reconfigurables como se muestra en el modelo de la Figura 3.2(a). Esta estructura está conformada por 18 elementos (entre diagonales y rectos) por cada cubo; por lo tanto, la estructura cuenta con 162 elementos en total, los cuales en su totalidad pueden ser remplazados por otros elementos, esto debido a su forma de armado como se muestra en la Figura 3.2(b). La estructura presenta las siguientes dimensiones: 6.4m de largo, 0.71m de alto y 0.71m de ancho. Cada una de sus

diagonales mide 1m y sus elementos rectos miden 0.71m como se muestra en la Figura 3.3. Es muy importante mencionar que con el fin de que la armadura tenga una configuración estilo puente se emplean dos bases de 1.05 m de largo, 0.402 m de ancho y 0.425 m de espesor para soportar la estructura en sus extremos. La Tabla 3.1 resume todos los elementos con los que cuenta la armadura.

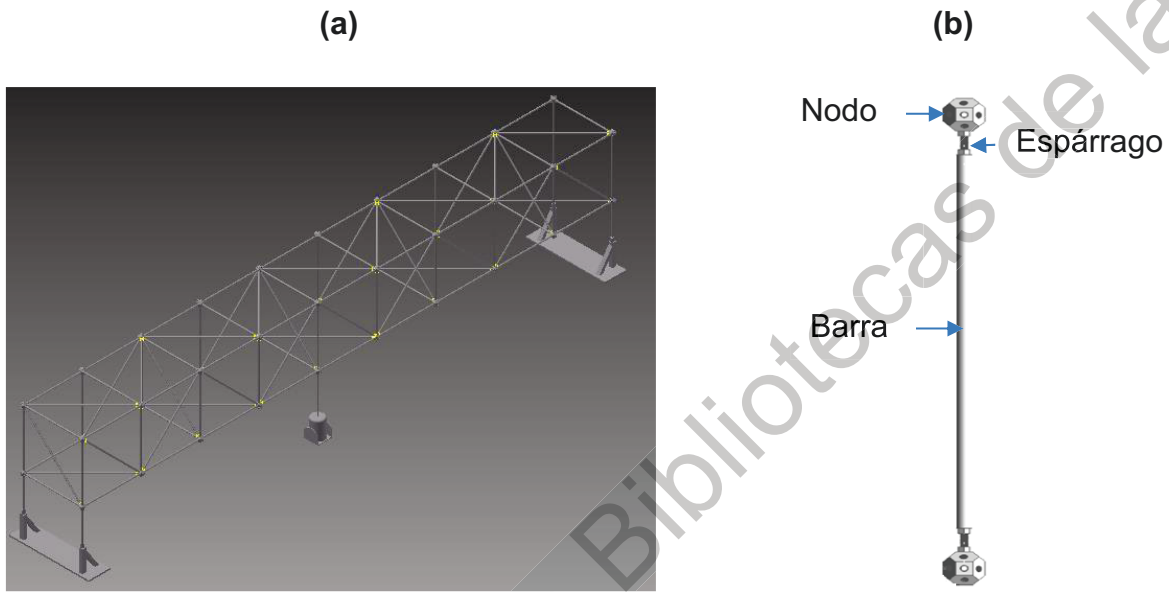


Figura 3. 2 Armadura (a) Modelo de la armadura bajo prueba y (b) elemento ensamblado.

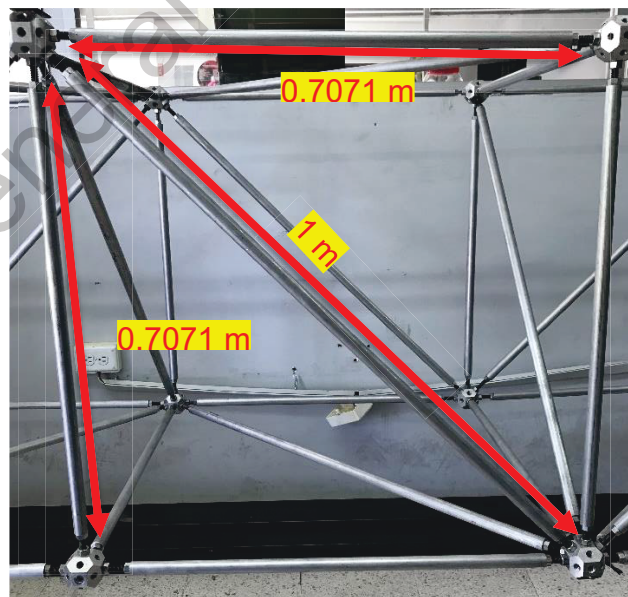


Figura 3. 3 Medidas de un cubo en la armadura

Tabla 3. 1 Número de elementos que conforman la armadura.

Pieza	Material	Cantidad de material por pieza	Número de piezas empleadas
Nodo	Barra cuadrada de aluminio de 5.08 cm	5.08 cm	44
Barra corta	Barra cilíndrica de aluminio de 1.905 cm	58.42 cm	84
Barra larga	Barra cilíndrica de aluminio de 1.905 cm	87.63 cm	51
Esparrago	Varilla roscada de acero de 0.9525 cm	6.985 cm	270
Tuerca	Tuerca de 0.9525 cm con rosca estándar	-----	540

3.3 Sistema de excitación

El sistema de excitación propuesto en este trabajo de tesis se basa en 3 etapas principales: generador de señales, amplificador y agitador (shaker) electrodinámico, los cuales son descritos a detalles en las siguientes subsecciones.

3.3.1 Generador de señales

El generador de señales es una parte esencial en un sistema de excitación ya que esta etapa es la encargada de diseñar la señal que será reproducida por el sistema electromecánico o el agitador (shaker) con el fin de excitar correctamente la estructura a analizar. Para el diseño del generador de ondas arbitrarias se debe tomar en cuenta que las señales provenientes de ruido Gaussiano se consideran similares a las vibraciones ambientales, siendo las vibraciones ambientales las más empleadas por el monitoreo de la condición de estructuras civiles (Perez-Ramirez

et al. 2016); por lo tanto, el sistema generador de señales es basado en la creación de señales de ruido Gaussiano haciendo uso del software LabVIEW y la tarjeta de National Instruments modelo NI-USB 6002 para convertir la señal digital generada en el software a una señal analógica (ver Figura 3.4) capaz de ser interpretada por el amplificador lineal del sistema de excitación.



Figura 3. 4 Generador de señales.

La Figura 3.5 muestra la parte gráfica de la interfaz de control del sistema generador de señales, el cual está señalado por un cuadro de color rojo. El generador de señales en la parte de la interfaz gráfica permite su visualización a través de la ventana gráfica, además de su configuración de cantidad de muestras que se generarán por segundo. Es muy importante resaltar que la interfaz gráfica permite al usuario seleccionar 2 opciones: (1) generar una nueva señal y (2) carga de señal, esto con el fin de que el usuario sea capaz de excitar con una señal distinta en cada prueba o repetir la misma señal en cada prueba. Finalmente, la parte de la interfaz gráfica con un botón de encendido, el cual permite tener un control sobre el inicio de la transmisión de la señal hacia la etapa de conversión para su posterior amplificación.



Figura 3. 5 Interfaz de control; Enmarcado en rojo la parte de excitación.

La Figura 3.6 muestra la ventana de programación con las rutinas empleadas para la generación de las señales, así como las instrucciones para su envío hacia la tarjeta para su conversión. Para el desarrollo del generador de señales se emplea la función llamada “flat secuencia”, el cual consta de 4 cuadros. El primer cuadro se enfoca en el control del botón de inicio, si el botón permanece sin moverse o en la posición de apagado indica que la señal no puede ser enviada o generada; pero, si el botón cambia de posición a encendido, esto permitirá ir al segundo cuadro. El segundo cuadro se encuentra una función de comparación con el fin de decidir si el usuario selecciona generar una señal nueva o cargar una señal generada previamente. Si es seleccionado un archivo, este solo se lee y el código se pasa al tercer cuadro, pero, si el usuario selecciona generar una nueva señal, el programa requiere el número de muestras, posteriormente la señal se escribe en un block de texto y al mismo tiempo se manda a la tercera ventana. El tercer cuadro se encarga de mandar la señal a la salida analógica de la tarjeta por medio del “DAQ Assistant” y mostrar la señal enviada en el visualizador de la interfaz gráfica. Finalmente, una vez que la señal es enviada por la tarjeta, el último cuadro se encarga de mandar un valor de cero con el fin de que el shaker se quede en su posición original y no sufra algún daño.

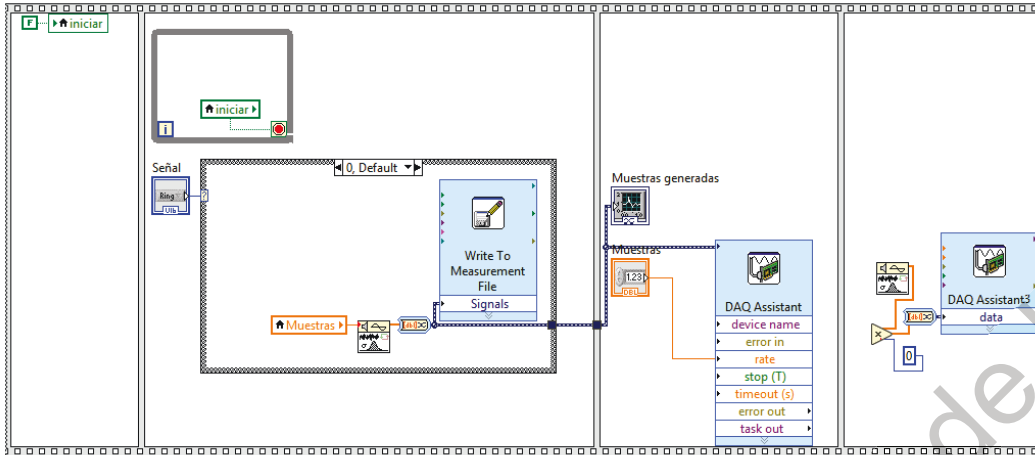


Figura 3. 6 Código grafico en LabVIEW para la excitación.

3.3.2 Amplificador

Con el fin de acondicionar la señal enviada por el generador de señales, se usa el amplificador lineal de la marca Labworks modelo PA-138 es empleado (ver Figura 3.7). Este amplificador se caracteriza por contar con las siguientes características:

- Protección por sobre corriente.
- Operación de voltaje en corriente directa con el acople directo de entradas y salidas.
- Niveles bajos de ruido y distorsión.
- Permite una amplificación de hasta 40 V y 16 A.



Figura 3. 7 Amplificador lineal de la marca Labworks modelo PA-138.

Gracias a las ventajas antes mencionadas, este amplificador es el ideal para el control del shaker empleado en este trabajo de tesis, el cual es descrito en la siguiente sección.

3.3.3 Excitador electrodinámico

Finalmente, la señal acondicionada por el amplificador es interpretada por el shaker con el fin de generar una excitación en la estructura bajo prueba. En otras palabras, el agitador/excitador electrodinámico se encarga de inyectar una fuerza a través del desplazamiento de la plataforma del shaker, lo que genera que la estructura bajo prueba empiece a vibrar con el fin de evaluar su dinámica ante tal excitación. El excitador usado en este trabajo de tesis es de la marca Labworks modelo ET-126B, el cual se muestra en la Figura 3.8. Entre sus características principales se encuentran las siguientes:

- Peso de 5 KG.
- Rango de frecuencias desde DC hasta 14 KHz
- Fuerza máxima de 11.5 kgf.
- Desplazamiento máximo de 1.9cm hacia arriba y hacia debajo desde su punto de origen.



Figura 3. 8 Shaker electrodinámico Labworks ET-126B.

Para poder lograr la excitación en la estructura, en el shaker es colocado un esparrago (varilla roscada), el cual permite la unión del shaker con la estructura como se muestra en la Figura 3.9.



Figura 3. 9 Varilla roscada para la conexión del Shaker con la estructura.

3.4 Sistema de adquisición

El sistema de adquisición propuesto en este trabajo de tesis se basa en 3 etapas principales: sensor, tarjeta de adquisición de datos y control del sistema de adquisición, los cuales son descritos a detalles en las siguientes subsecciones.

3.4.1 Sensor

Para poder monitorear la dinámica de la estructura, un acelerómetro triaxial de la marca KISTLER modelo 8395A10 es empleado (ver Figura 3.10). Este acelerómetro del tipo industrial cuenta con una banda de frecuencia de sensado desde 0 a 1000 Hz, una resolución es de 400 mV/g, un rango de medición de ± 10 g, nivel de ruido bajo, rango de temperatura de operación desde -54°C hasta los 125°C y fácil anclaje.



Figura 3. 10 Acelerómetro marca KISTLER modelo 8395A10.

Este acelerómetro es usado principalmente o recomendado para la medición de vibraciones tanto de amplitud baja como de frecuencia baja, las cuales son características en estructuras civiles excitadas por vibración ambiental (Daniels, 2005). Gracias a las características que presenta este sensor, es el ideal para este trabajo de tesis.

Es muy importante mencionar que el acelerómetro brinda una salida analógica en el rango de ± 4 V, lo que indica que no se requiere de un acondicionamiento previo a la adquisición de la señal.

3.4.2 Tarjeta de adquisición de datos

Para adquirir y transferir la información proporcionada por el sensor, se emplea la tarjeta de National Instruments modelo DAQ NI-USB 6002 (ver Figura 3.11). Esta tarjeta cuenta con 8 entradas analógicas, las cuales se pueden convertir en 4 entradas de voltaje diferencial, cuenta con 2 pines analógicos de salida, y 13 pines digitales: 8 de entrada y 5 de salida. La tarjeta cuenta con un convertidor de 16 bits, el cual se puede configurar para trabajar a una frecuencia máxima de muestreo de 50 mil muestras por segundo.



Figura 3. 11 Tarjeta DAQ NI-USB 6002.

Es muy importante mencionar que las entradas analógicas permiten señales de ± 10 v, lo que indica que la señal proveniente del sensor puede ser adquirida y transferida a la computadora por medio del protocolo USB sin ningún acondicionamiento previo.

3.4.3 Software/interfaz de control para adquisición de datos

Para poder configurar la adquisición y transmisión de la señal proveniente del sensor, la tarjeta de National Instruments debe ser controlada/configurada a través del software LabVIEW. Esta tarea se realiza por medio la interfaz gráfica y la interfaz de programación mostradas en las Figuras 3.12 y 3.13, respectivamente. Con respecto a la interfaz gráfica denotada por el cuadro rojo en la Figura 3.12, esta permite la visualización de la señal adquirida por los tres ejes del sensor, además cuenta con dos cajas de texto o datos, los cuales permiten configurar la frecuencia de muestreo, así como la cantidad de datos a adquirir.

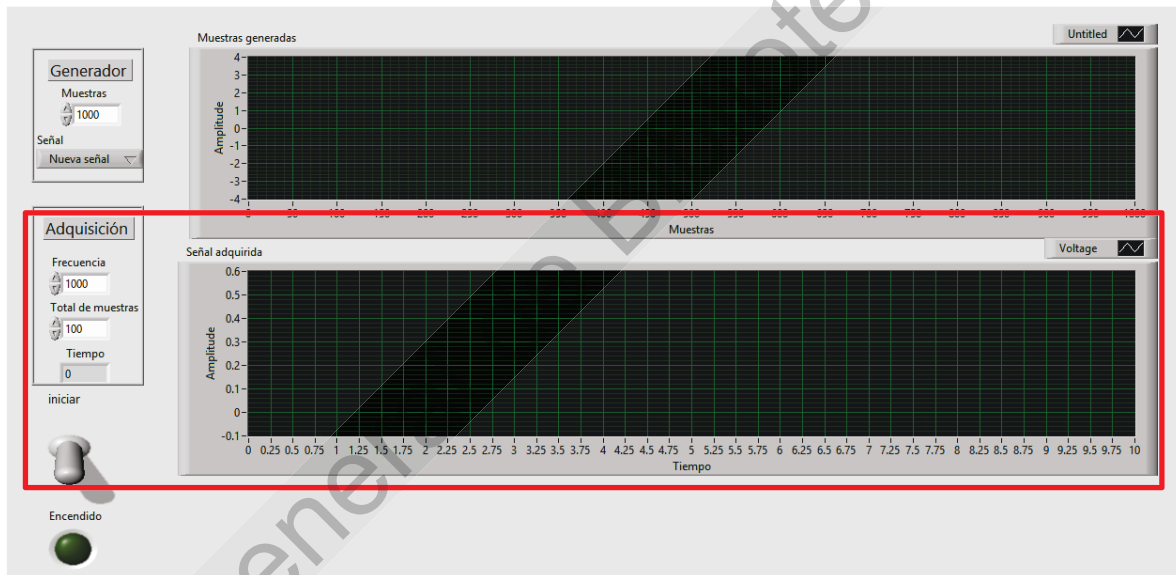


Figura 3. 12 Interfaz de control; enmarcado en color rojo la parte de adquisición de datos.

Por otro lado, la interfaz de programación mostrada en la Figura 3.13 se basa en la función llamada “flat secuencia”, la cual permite un control adecuado de la adquisición y transmisión de los datos en 3 cuadros/operaciones. El primer cuadro se encarga de revisar si el botón de encendido fue activado indicando que la estructura está siendo excitada. El segundo cuadro se encarga del control de la cantidad de muestra y su frecuencia de muestreo con el fin de adquirir la información

provista por el sensor a través del DAQ Assistant, el cual permite ayudar a configurar la tarjeta con los datos proporcionados por el usuario. Finalmente, el tercer cuadro se encarga de archivar la señal adquirida/monitoreada en un archivo de texto, el cual pueda ser leído para el procesamiento de la señal.

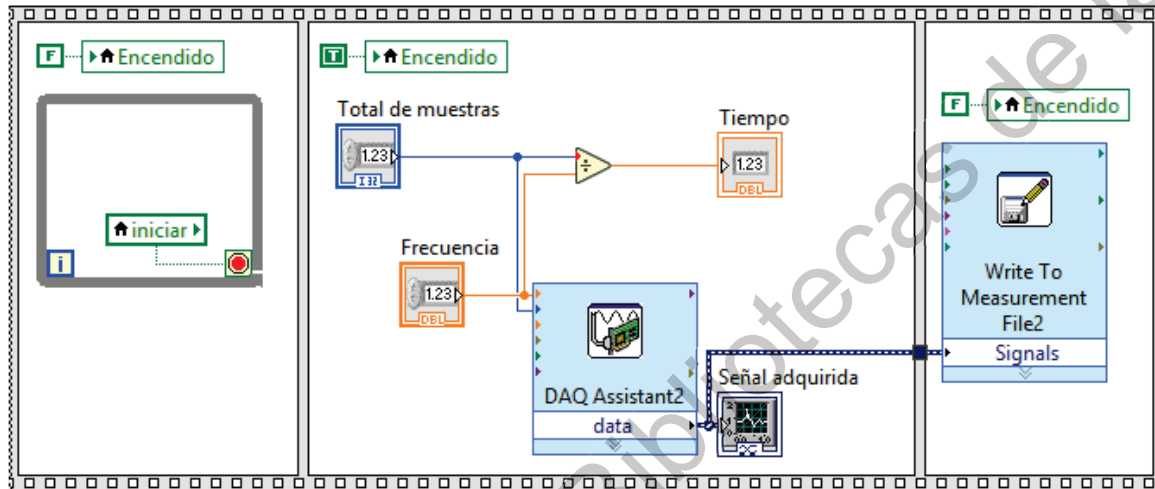


Figura 3. 13 Código grafico en LabVIEW para la adquisición.

3.5 Procesamiento

La metodología propuesta requiere de descomponer las señales de vibración de la armadura por lo que se hace uso del Toolbox de la transformada Wavelet mostrada en la Figura 3.14 para realizar esta tarea. Se puede observar en esta figura que el toolbox permite seleccionar el nivel de descomposición, así como la selección de la ondoleta madre.

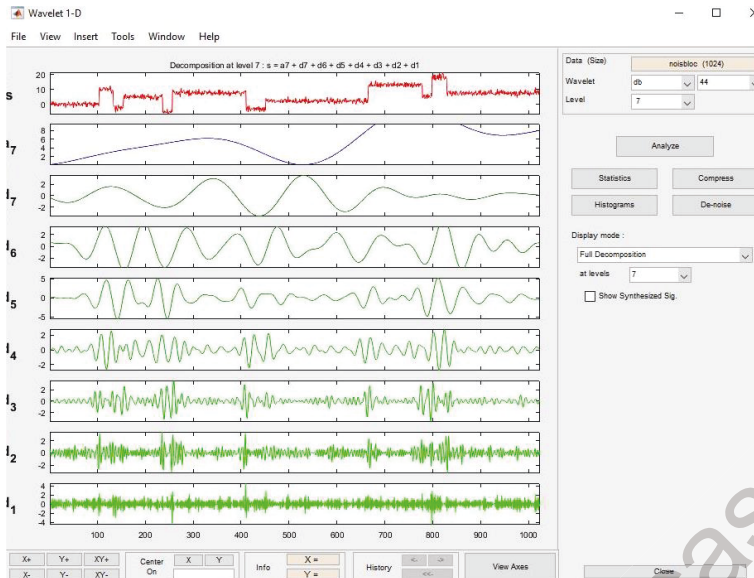


Figura 3. 14 Toolbox de la DWT en MatLab

Por otro lado, para la clasificación de los patrones o características obtenidas por las mediciones no lineales, fractales, se emplea el toolbox de redes neuronales para generar una red con el fin de determinar la condición de la estructura de manera automática. En la Figura 3.15 se muestra la interfaz de operación de la red neuronal en MatLab.

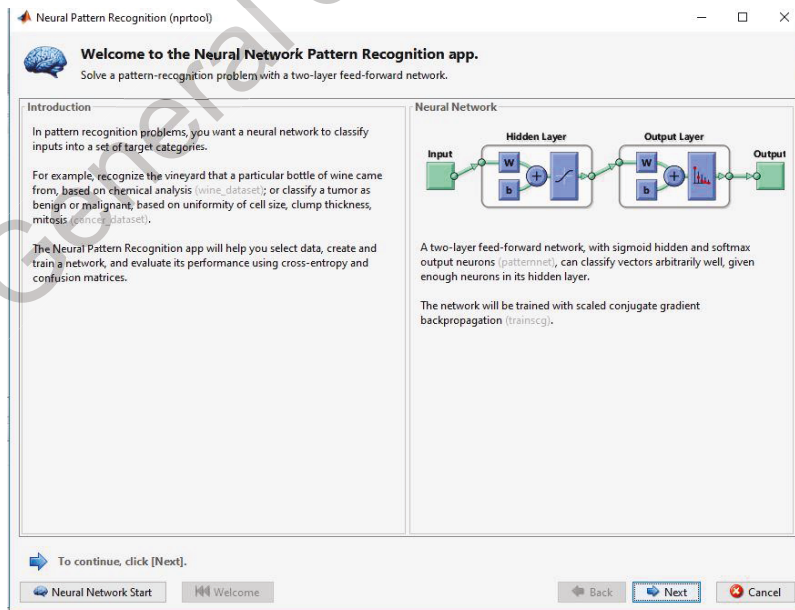


Figura 3. 15 Toolbox para una Red Neuronal en MatLab.

CAPÍTULO 4

Pruebas y resultados

4.1 Puesta de experimento

La puesta de experimento se muestra en la Figura 4.1, donde es posible observar las partes principales herramientas/elementos empleados para el monitoreo de la condición de la armadura. La estructura analizada o bajo prueba es una estructura del tipo armadura reconfigurable de 9 cubos, la cual está sujeta al suelo en sus extremos con el fin de simular un puente. Esta a su vez es sometida a vibraciones del tipo ambiental, ruido Gaussiano, producidas por un agitador electrodinámico de la marca Labworks modelo ET127 localizado bajo el cubo 4 de la estructura y alimentado por un amplificador lineal de Labworks modelo PA-141, el cual es controlado por el generador de señales arbitrarias propio diseñado a través de la tarjeta DAQ NI-USB6002. La señal de ruido Gaussiano tiene una frecuencia de muestreo de 1 kHz, esto con la finalidad de generar una señal muy semejante a las vibraciones ambientales (Pérez, 2014).

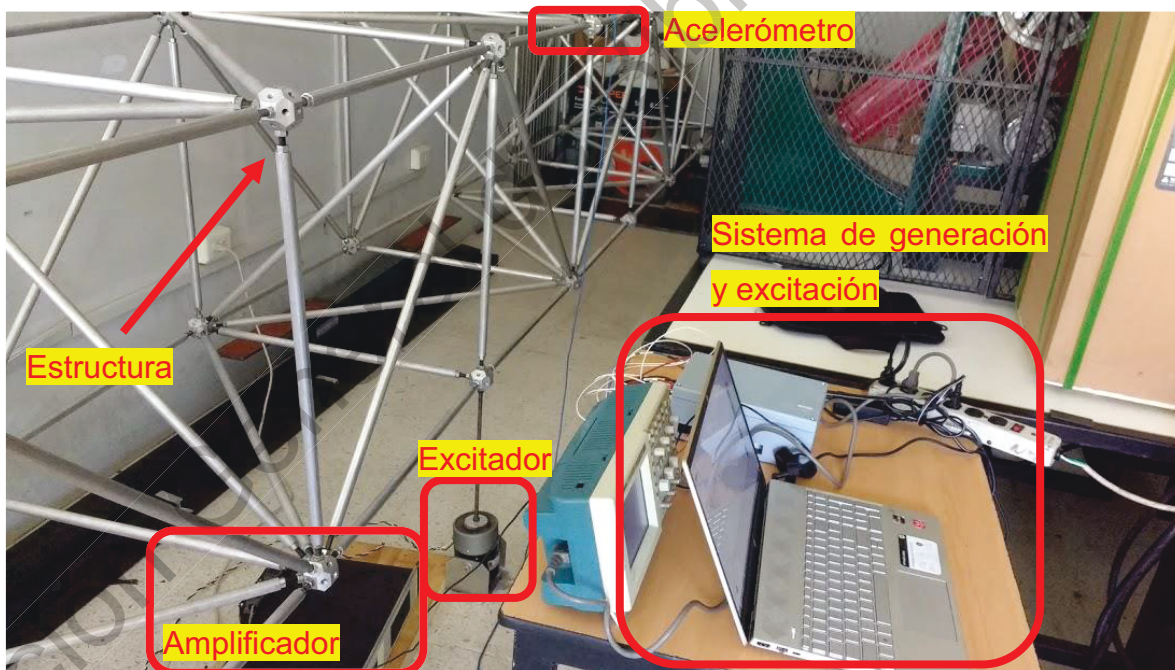


Figura 4. 1 Puesta de experimento.

Con el fin de adquirir/monitorear la dinámica de la estructura ante dicha excitación, un acelerómetro de tres ejes de la marca KISTLER modelo 8395A10

localizado en la parte superior del cubo 5 de la estructura como se muestra en la Figura 4.2 es empleado, además de una tarjeta de adquisición de la marca National Instruments modelo NI-USB 6002. Para la adquisición de los datos se emplea una frecuencia de muestro de 1 kHz, durante 10 segundos, dando un total de 10,000 datos por cada prueba realizada. La Figura 4.3 muestra un ejemplo de una señal monitoreada por los tres ejes.

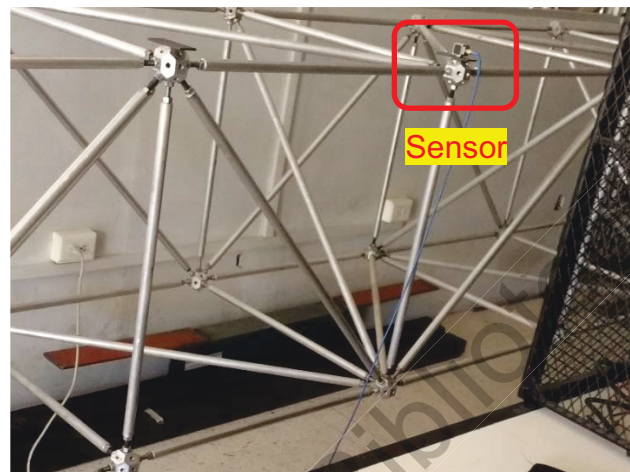


Figura 4. 2 Ubicación del acelerómetro en la estructura

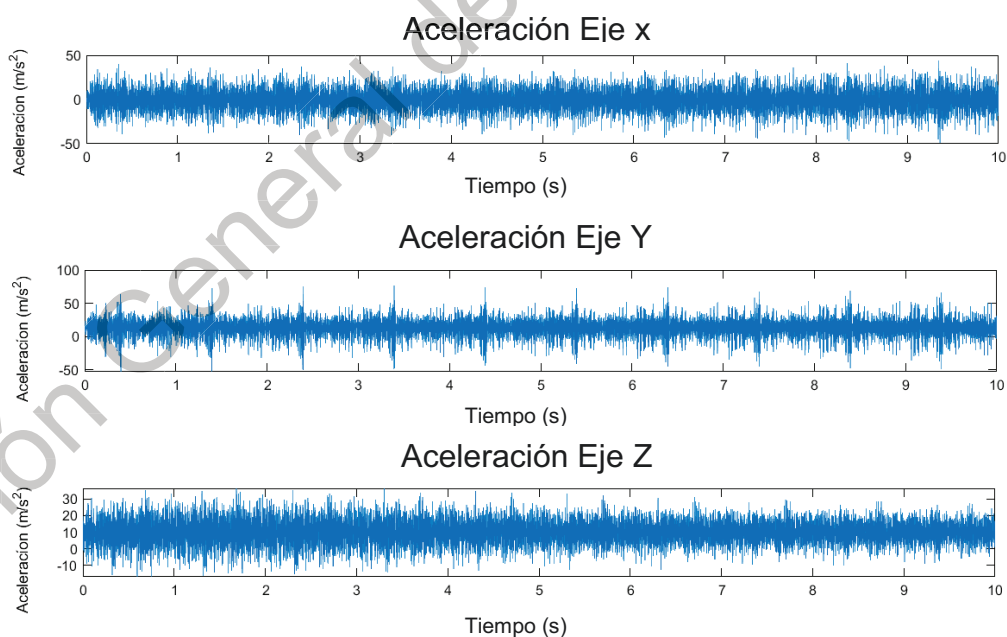


Figura 4. 3 Señal triaxial de vibración obtenida por el acelerómetro.

Es muy importante mencionar que la estructura fue sometida a diferentes daños tales como corrosión, grieta, aflojamiento de unión y sus uniones, las cuales fueron introducidas en el cubo 2 (zona verde en la Figura 4.4) con el fin de tener una distancia considerable con respecto al sensor y se tuviera un mayor reto en poder evaluar la condición de la estructura (ver Figura 4.4).

Con el fin de tener una muestra representativa de cada condición, se realizaron 20 pruebas para cada una éstas: sana, aflojamiento de unión, corrosión, grieta y sus combinaciones, resultados en un total de 160 pruebas.

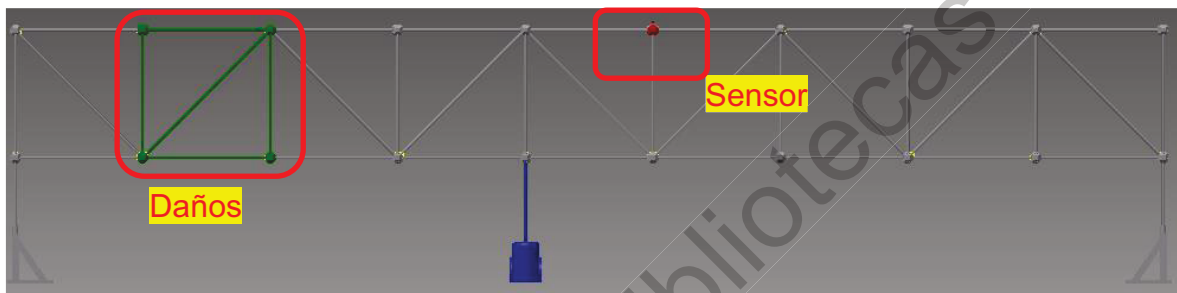


Figura 4. 4 Ubicación de zona de daño (zona verde) y localización del sensor.

4.2 Casos de estudio

Diferentes tipos de daños pueden ocurrir a lo largo de la vida útil de las armaduras, ya que son susceptibles principalmente a daños por corrosión, aflojamiento en uniones y grietas (Umesha et al. 2009; Moreno-Gómez et al. 2018). Es por lo que, en este trabajo de tesis, este tipo de daños y sus combinaciones son estudiados.

La corrosión se caracteriza por generar una reducción en el material con el que está construido una estructura. Debido a que la corrosión normalmente se produce en un periodo prolongado de tiempo y con el fin de simular este daño y acelerar este proceso, una de las barras de la armadura es sumergida en ácido clorhídrico en ambos extremos, siendo este proceso muy similar a la corrosión

uniforme que ocurre generalmente en algunas estructuras civiles (Moreno-Gómez et al. 2018). En la Figura 4.5 se muestra la comparación entre una barra sana y la barra que fue sometida al ácido con el fin de generar el daño por corrosión en ella. La barra en condición sana tiene un diámetro de 19 mm y la barra en la que se presenta el daño por corrosión tiene un diámetro 17 mm, por lo tanto, es generada una reducción de 2 mm, resultado de un daño que se considera en su estado inicial, esto genera un ligero cambio en la respuesta vibratoria con respecto a la respuesta vibratoria de la estructura en su estado sano, y por ello representa un gran reto para la metodología propuesta su detección dentro de una estructura. Es importante mencionar que la severidad de daños se considera ligero, ya que solo se hace una reducción de 2 mm, representando un 10.5% de su sección transversal (Moreno-Gómez et al. 2018).



Figura 4. 5 Barras usadas: (a) Barra sana y (b) Barra con corrosión.

Con respecto al daño por grieta, esta fue generada haciendo uso de una segueta para generar un corte en la mitad de la barra con una profundidad de 9.5 mm, lo que representa un daño de grado moderado, ya que un 50% de reducción del grosor de la barra es en el centro es generado como se muestra en la Figura 4.6 (Pacheco-Ortega et al. 2018).

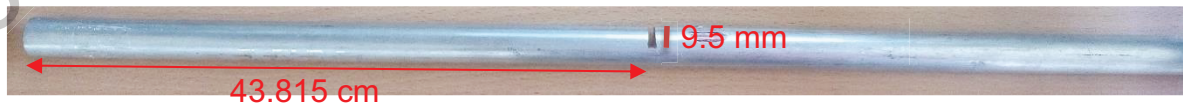


Figura 4. 6 Condición de daño por grieta.

Finalmente, el daño por aflojamiento de unión se genera dentro de la armadura dejando sin conexión un elemento que va al nodo de esta misma como se muestra en la Figura 4.7. Este daño se considera severo debido a la separación del esparrago del nodo, ya que, si no se separa, no representaría un aflojamiento de unión, porque la barra está unida por un esparrago y este evitaría su desplazamiento.



Figura 4. 7 Aflojamiento de Unión.

Es muy importante mencionar que, en este trabajo de tesis, todas las condiciones de daño generadas reemplazan a un elemento sano de la estructura cuando son estudiadas de forma individual, pero cuando estas son combinadas de varios elementos, 2 o 3, son reemplazados al mismo tiempo en el cubo número 2 como se muestran en Figura 4.8.

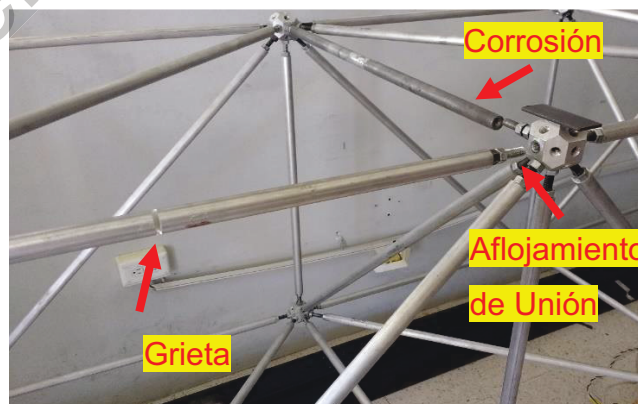


Figura 4. 8 Daños en la estructura.

4.3 Resultados

Siguiendo la metodología propuesta, las señales de vibración adquiridas para cada condición de la estructura son analizadas a través de la TWD desde un nivel 1 hasta un nivel 6, alcanzando un ancho de banda de 7.81825 Hz, con el fin de separar las señales en diferentes bandas de frecuencia que permitan identificar características en ellas que puedan ser asociadas al fenómeno estudiado.

Es muy importante mencionar que ya no se analiza un nivel más bajo; por ejemplo, el nivel 7, con la TWD ya que esto representaría que los anchos de banda tengan muy poca información frecuencial, además de que la primera frecuencia natural se encuentra alrededor de 10 Hz (Pérez, 2018). Las Figuras 4.9 a la 4.14 muestra un ejemplo de la señal descompuesta por la TWD, aproximaciones y detalles, respectivamente, para la condición sana y cuando existe un daño en la unión de la armadura para el eje X, Y, y Z. Observando estas figuras es imposible diferenciar o asociar alguna(s) característica(s) al fenómeno estudiado ya que ambas son muy similares, por lo tanto, una análisis no lineal tal como la dimensión fractal es empleado para estimar características en las diferentes bandas de frecuencia estimadas por la TWD.

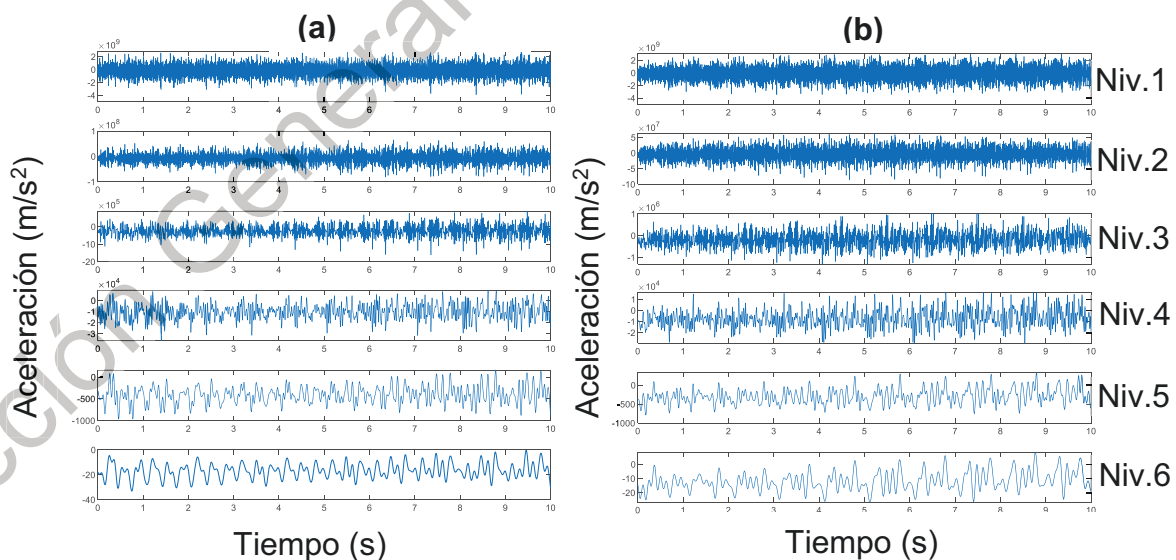


Figura 4. 9 Aproximaciones estimadas por la TWD para el eje X y la condición (a) sana y (b) aflojamiento de unión.

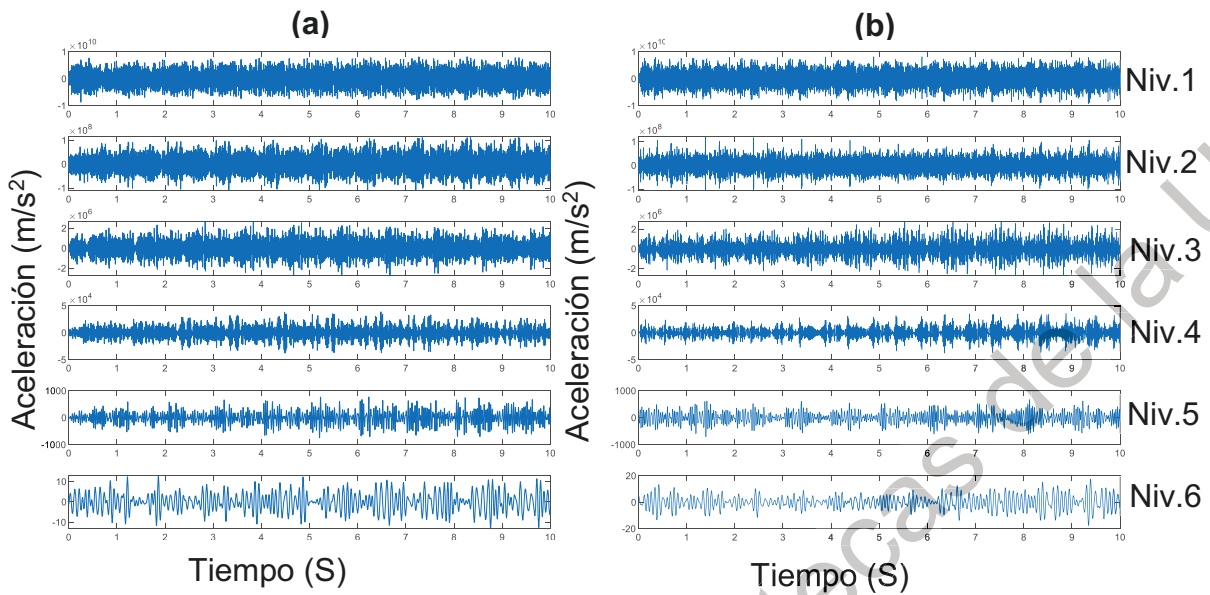


Figura 4. 10 Detalles estimados por la TWD para el eje X y la condición (a) sana y (b) aflojamiento de unión.

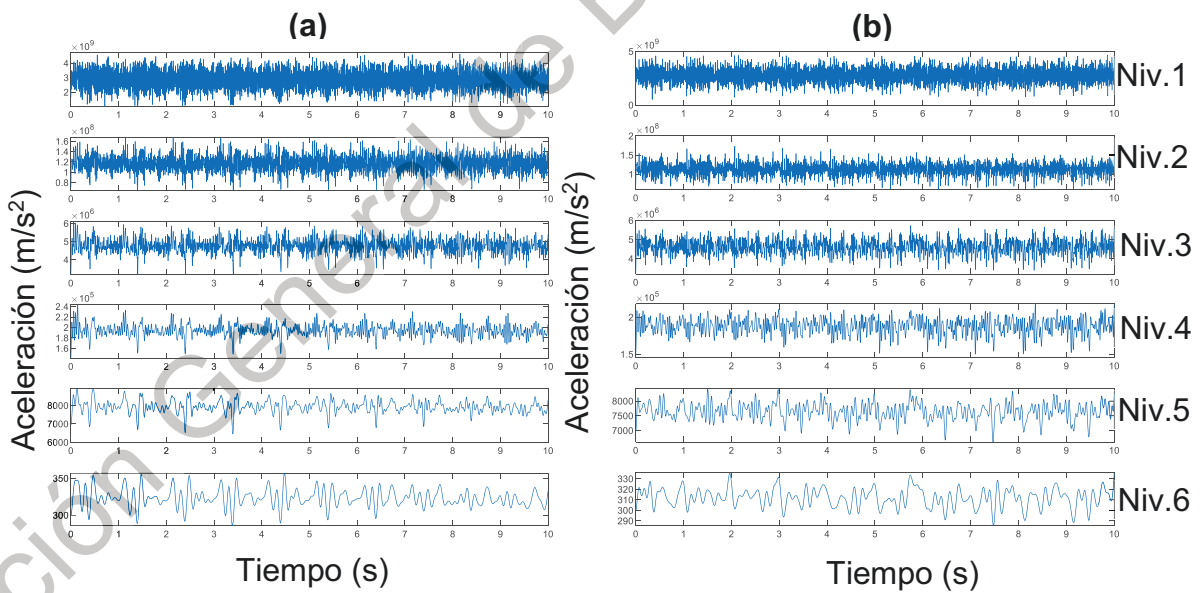


Figura 4. 11 Aproximaciones estimadas por la TWD para el eje Y y la condición (a) sana y (b) aflojamiento de unión.

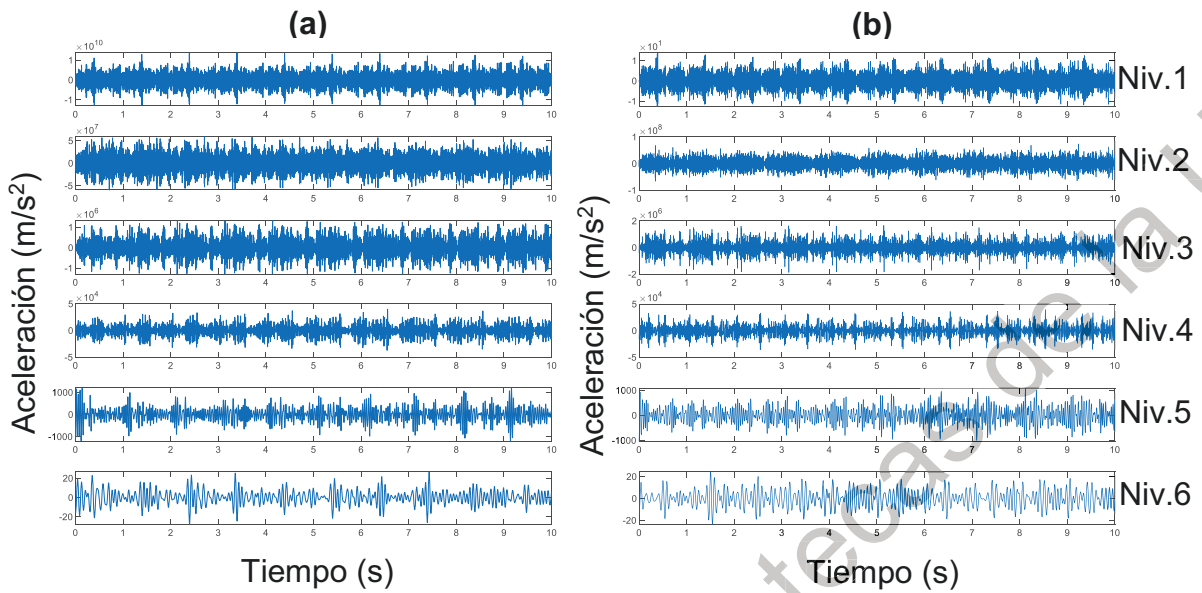


Figura 4. 12 Detalles estimados por la TWD para el eje Y y la condición (a) sana y (b) aflojamiento de unión.

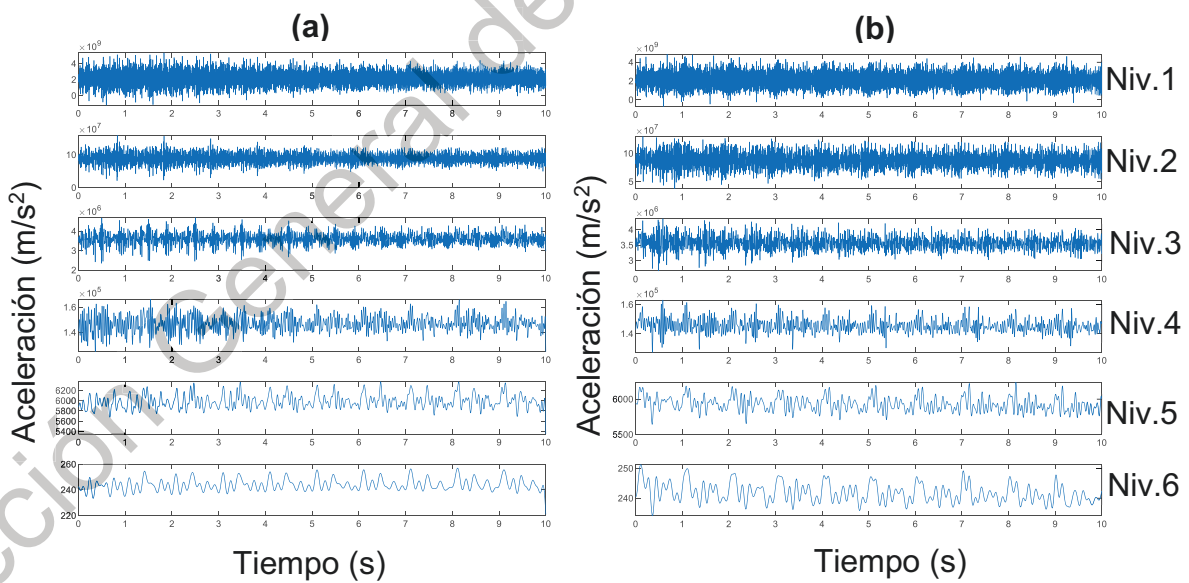


Figura 4. 13 Aproximaciones estimadas por la TWD para el eje Z y la condición (a) sana y (b) aflojamiento de unión.

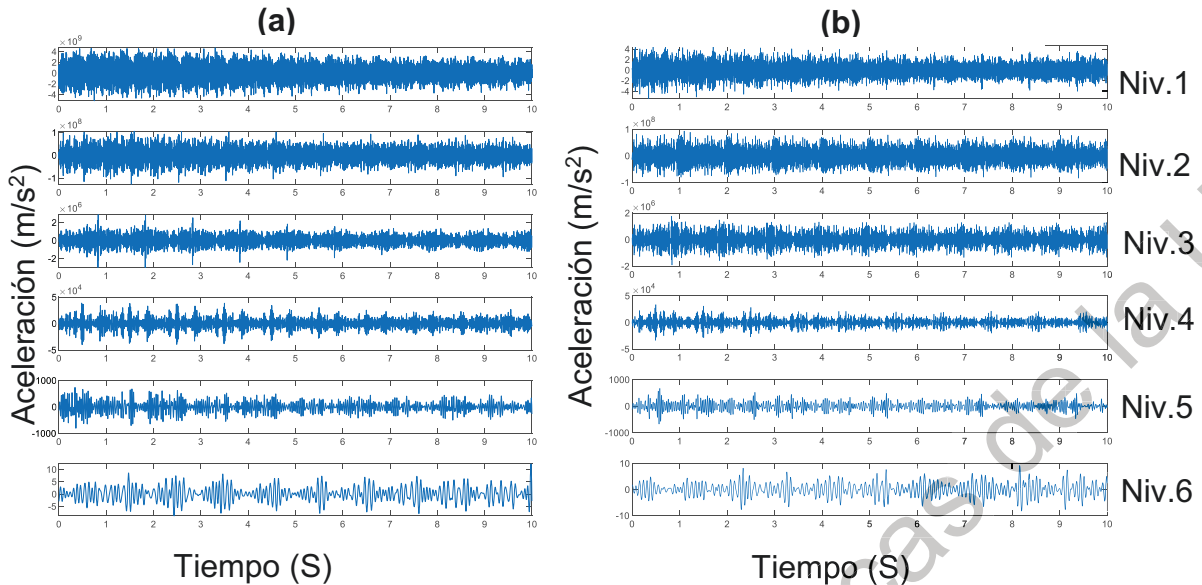


Figura 4. 14 Detalles estimados por la TWD para el eje Z y la condición (a) sana y (b) aflojamiento de unión.

Una vez descompuestas las señales en sus diferentes bandas de frecuencia por medio de la TWD, estas son analizadas por los diferentes algoritmos de dimensión fractal: Higuchi, Katz y dimensión de caja con el fin de estimar características geométricas que permitan la evaluación de la condición estructural. Para seleccionar la o las bandas de frecuencia, así como el o los algoritmos de dimensión fractal más discriminantes para poder ser asociados al fenómeno estudiado, esto son evaluados a través del método estadístico llamado ANOVA. Este análisis muestra los datos almacenados en una caja de bigotes, donde dentro de la caja se encuentra el 50% de los datos y en los extremos o bigotes se encuentra el otro 50% de los datos. En base a la distribución de los datos se estima un valor de probabilidad que entre más cercano a cero significa que no hay similitud entre los datos. Después de un análisis exhaustivo de los resultados estimados por ANOVA el detalle y la aproximación del nivel 4 con DFH del eje X, la aproximación del nivel 5 con DFH del eje X, la aproximación del nivel 5 con DC del eje Y y la aproximación del nivel 5 y 6 con DC del eje Z son los más discriminativos y permiten evaluar la condición de la armadura. Es muy importante mencionar que el nivel 4 (0 a 62.5 Hz, incluyendo aproximación y detalle), nivel 5 (0 a 31.75 Hz, incluyendo

aproximación y detalle) y nivel 6 (0 a 15.87 Hz, incluyendo aproximación y detalle) presentan los mayores cambios debido a que en estas regiones se encuentran la mayoría de las frecuencias naturales, principalmente las primeras que son las que contienen la mayor energía o amplitud (Pérez et al 2018). La Tabla 4.1 muestra el eje, la banda de frecuencia (detalle o aproximación), nivel y el algoritmo de dimensión fractal con las mejores aptitudes para evaluar la condición de la armadura basado en el análisis de ANOVA. Además, se muestra el valor de probabilidad (valor-p), el cual permite establecer la diferencia/similitud de los diferentes conjuntos de datos (condiciones).

Tabla 4. 1 Resultados de ANOVA para el eje, la banda de frecuencia, nivel y el algoritmo de dimensión fractal más discriminativos.

Eje	BF	Nivel	DF	Valor-P
X	Aproximación	4	DFH	4.45387e-15
X	Detalle	4	DFH	3.08281e-13
X	Aproximación	5	DFH	3.84940e-57
Y	Aproximación	5	DC	6.55589e-45
Z	Aproximación	5	DC	2.24902e-56
Z	Aproximación	6	DC	1.63923e-34

BF: banda de frecuencia (detalle o aproximación) y DF: método de dimensión fractal

Las Figuras 4.15 a la 4.20 muestra la distribución de los datos estimados por ANOVA para las características más discriminantes, donde 1 representa los datos de la condición sana, 2 la distribución de los datos del daño de unión, 3 la distribución de los datos del daño de grieta, 4 la distribución de los datos del daño de corrosión, 5 la distribución de los datos del daño combinada de grieta-unión, 6 la distribución de los datos del daño combinada de corrosión-grieta, 7 la distribución de los datos del daño combinada de corrosión-unión y 8 la distribución de los datos del daño combinado de corrosión-grieta-unión.

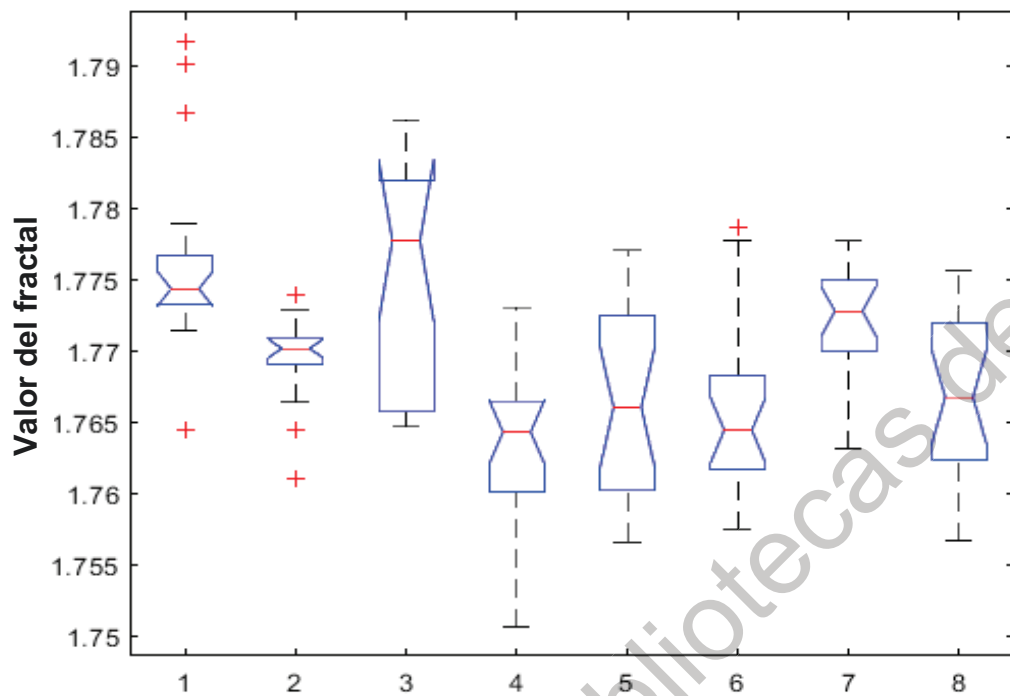


Figura 4. 15 Distribución de los datos para DFH del detalle nivel 4 eje X.

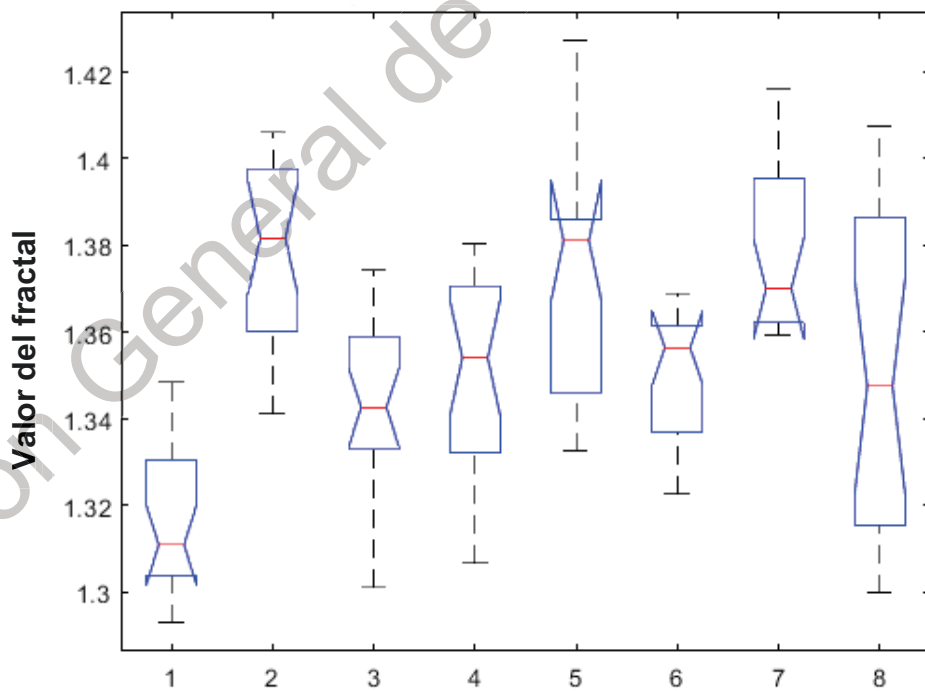


Figura 4. 16 Distribución de los datos para DFH de la aproximación nivel 4 eje X.

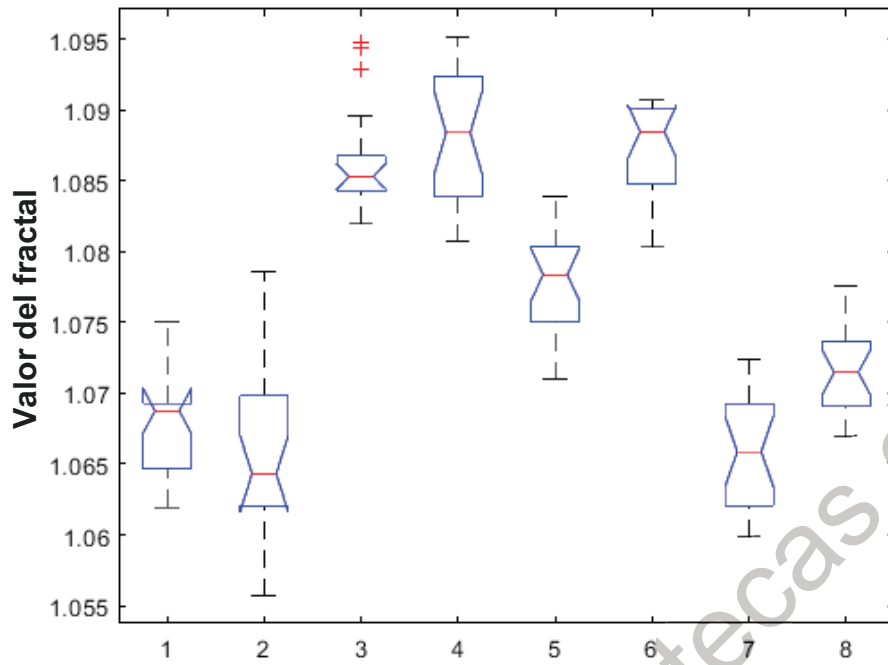


Figura 4. 17 Distribución de los datos para DFH de la aproximación nivel 5 eje X.

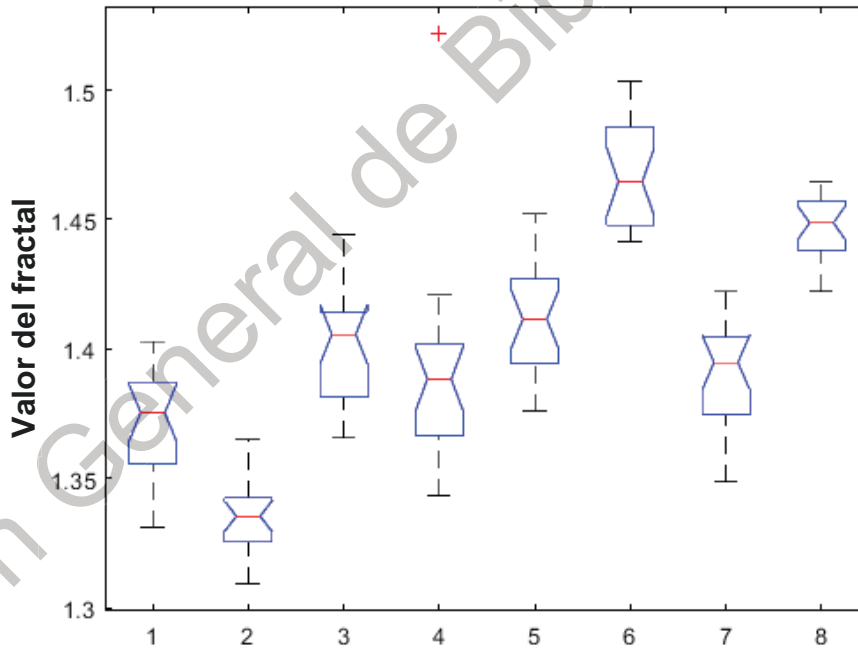


Figura 4. 18 Distribución de los datos para DC de la aproximación nivel 5 eje Y.

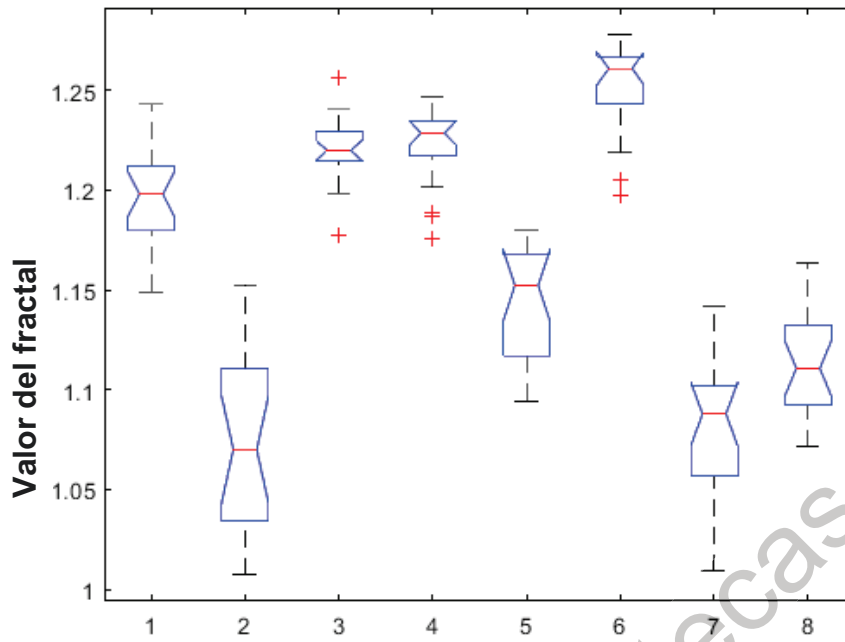


Figura 4. 19 Distribución de los datos para DC de la aproximación nivel 5 eje Z.

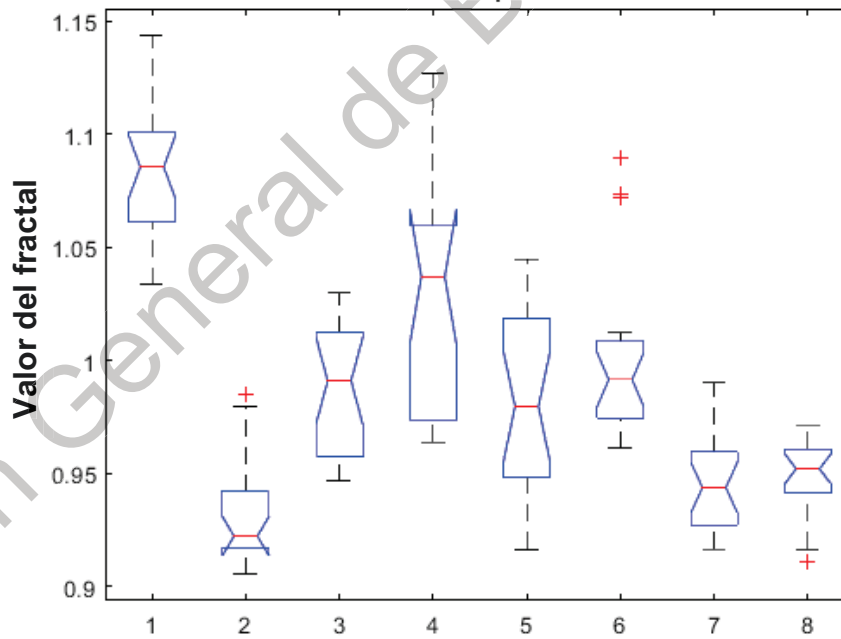


Figura 4. 20 Distribución de los datos para DC de la aproximación nivel 6 eje Z.

Finalmente, una vez determinadas las características más discriminantes, sus valores son empleados para entrenar y validar una red neuronal con el fin de diagnosticar la condición de la armadura de forma automática. Primeramente, con el fin de entrenar la red neuronal se generan 400 datos por cada condición entre los valores de los extremos (bigotes) estimados por ANOVA para las características más discriminantes. La red neuronal cuenta con 6 entradas las cuales corresponden al número de características estimadas de acuerdo con ANOVA, 30 neuronas en la capa oculta y 4 neuronas en la capa de salida, las cuales corresponden con la condición de la estructura (ver Figura 4.21). Es muy importante mencionar que la cantidad de neuronas en la capa oculta es un trabajo de prueba y error; sin embargo, este valor se recomienda que mínimo sea el doble de las entradas (Lopez-Ramirez et al. 2016), mínimo 12, pero después de un análisis experimental exhaustivo, en el que se incrementaba poco a poco el número de neuronas en la capa oculta se encontró que el valor adecuado es de 30 neuronas.

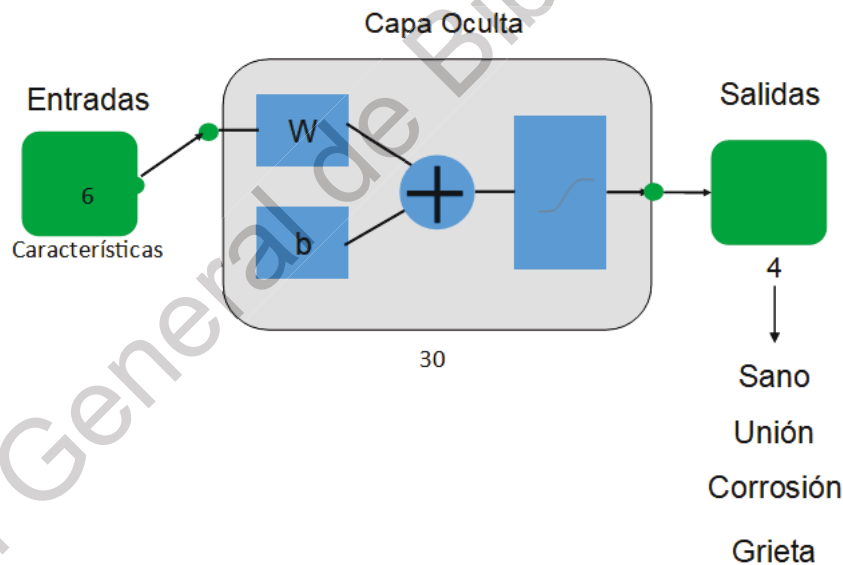


Figura 4. 21 Configuración de la red neuronal empleada para la evaluación de la condición de la armadura.

Una vez que la red neuronal es entrenada, se procede a su validación con los datos reales (los datos obtenidos por las características más discriminantes) de

las diferentes condiciones. La Tabla 4.2 muestra una matriz de confusión con los resultados estimados cuando se introducen los datos reales a la red neuronal de cada condición (20 pruebas por cada condición). Adicionalmente, es mostrado el porcentaje de eficiencia de cada condición (pruebas acertadas/total de pruebas* 100%) y la eficiencia total (promedio de las eficiencias de cada condición)

Tabla 4. 2 Matriz de confusión de efectividad de la red neuronal.

Condición	Sana	U	G	C	GU	CG	CU	CGU	%
Sana	19	1	0	0	0	0	0	0	95
U	0	20	0	0	0	0	0	0	100
G	0	0	18	2	0	0	0	0	90
C	0	0	2	18	0	0	0	0	90
GU	0	0	0	0	19	1	0	0	95
CG	0	0	0	0	0	16	4	0	80
CU	0	0	0	0	2	0	18	0	90
CGU	0	0	0	0	0	0	3	17	85
Efectividad Total									90.625

Daños, U: unión, G: grieta, C: corrosión.

De acuerdo con los resultados mostrados en la Tabla 4.2 la metodología propuesta tiene una gran eficiencia al evaluar la condición de la armadura ya que la propuesta presenta un 95% para identificar una estructura sana. Para daños aislados se tiene una eficiencia del 90%, pero cuando la propuesta es evaluada ante daños combinados esta presenta una eficiencia mínima del 85% debido a la dificultad para poder detectarlas, ya que todas estas presentan una reducción en la rigidez de la estructura, pero aun así la propuesta tiene una eficiencia global del 90.625%, por lo que se puede considerar que es una buena propuesta para evaluar la condición de la armadura ante diferentes daños aislados y combinados. Adicionalmente, es importante mencionar que los daños propuestos en este trabajo de tesis van desde un nivel ligero (corrosión), moderado (grieta) y severo (falla de unión) y en base a ello la metodología propuesta es más eficiente para detectar daños con mayor nivel de severidad ya que la falla en unión presenta un 100% de eficiencia para su detección, así como un 90% de eficiencia para detectar un daño por grieta, pero presenta un 80% para la detección de una corrosión de nivel ligero

y esto debido principalmente a que el daño no cambia significativamente la señal de vibración medida (Moreno-Gomez et al. 2018)

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

CAPÍTULO 5

Conclusiones y perspectivas

5.1 Conclusiones

La evaluación de la condición estructural basado en el análisis de vibraciones representa un reto debido a la naturaleza no estacionaria de la señal. En este trabajo de tesis, se presenta una metodología basada en la combinación de la transformada Wavelet discreta, fractales y redes neuronales para evaluar la condición de una armadura en configuración puente sujeta a ruido Gaussiano, similar a una vibración ambiental.

Con el fin de evaluar la efectividad de la propuesta, la armadura fue sometida a diferentes fallos tanto individuales, corrosión, grieta y daño de unión, así como sus combinaciones, donde los niveles 5 y 6 de la TWD en conjunto con la dimensión fractal de Higuchi y Box dimensión fueron los que mejores resultados dieron para poder evaluar la condición de la armadura, dando como resultado una propuesta bastante eficaz para determinar la condición de la estructura, sin importar si tiene un solo daño o múltiples con un 90.625% de eficiencia.

Adicionalmente, el sistema de adquisición y generación de señales generado/propuesto funciona de manera eficiente ya que permite de manera paralela la adquisición de las señales, así como generar la señal de excitación sin la necesidad de usar dos tarjetas o dos computadoras como el trabajo previo a esta nueva propuesta (Pérez, 2018), permitiendo ahorrar espacio y recursos.

5.2 Prospectivas

A pesar de que la metodología propuesta se puede considerar eficiente para evaluar la condición de la armadura, es importante que en un futuro se evalúe la posibilidad de determinar umbral determinar la condición de la estructura, además la propuesta queda como base para un siguiente trabajo para poder localizar el daño o múltiples daños, así como su cuantificación a través de daños con diferentes grados de severidad. Adicionalmente, la implementación de la metodología

propuesta en un sistema hardware tal como un FPGA (Field Programmable Gate Arrays), DSP (Digital Signal Processor), entre otras plataformas permitiría una evaluación de la estructura en tiempo real, por lo que otra prospectiva es su implementación.

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

Referencias

Amezquita, J. (2012). Monitoreo de vibraciones en tiempo real para detectar daños en estructuras (*Doctoral dissertation, Tesis de Doctorado en Ingeniería: Universidad Autónoma de Querétaro*)

Amezquita-Sanchez, J. P., & Adeli, H. (2015). Synchrosqueezed wavelet transform-fractality model for locating, detecting, and quantifying damage in smart highrise building structures. *Smart Materials and Structures*, 24(6), 065034.

Amezquita-Sanchez, J. P., & Adeli, H. (2016). Signal processing techniques for vibration-based health monitoring of smart structures. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 23(1), 1-15.

Amezquita-Sanchez, J. P., Valtierra-Rodriguez, M., & Adeli, H. (2018). Wireless smart sensors for monitoring the health condition of civil infrastructure. *Scientia Iranica*, 25(6), 2913-2925.

Beer, F. P., Johnston, E. R., & García, J. A. G. J. (2013). Mecánica vectorial para ingenieros (No. 968-422-565-2. 04-A1 LU. CG-12.). McGraw-hill.

Buyu, W. (2005). Detection of structural damage using fractal dimension technique. *Journal of vibration and shock*, 24(2), 87-88.

Chávez, R (2010). Estudio de Daños en estructuras usando análisis modal en un modelo instrumentado. *Tesis de maestría UAQ*.

Chopra, A. K. (2014). Dinámica de estructuras. *Pearson Educación*.

de la Colina Martínez, J., & de Alba, H. R. (2000). La ingeniería estructural. *CIENCIA ergo-sum*, 7(2), 171-177.

Deperlioglu, O., & Kose, U. (2011). An educational tool for artificial neural networks. *Computers & Electrical Engineering*, 37(3), 392-402.

Gallardo Amaya, A. A. (2012). Estudio experimental para detectar fallas en estructuras del tipo truss por medio de análisis vibracional (*Doctoral dissertation, UAQ*).

García-Palencia, A. J., & Santini-Bell, E. (2013). A two-step model updating algorithm for parameter identification of linear elastic damped structures. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 28(7), 509-521.

Garcia-Perez, A., Amezquita-Sanchez, J. P., Dominguez-Gonzalez, A., Sedaghati, R., Osornio-Rios, R., & Romero-Troncoso, R. J. (2013). Fused empirical mode decomposition and wavelets for locating combined damage in a truss-type structure through vibration analysis. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 14(9), 615-630.

Gómez, A. C. (2017). aplicación de la difracción de rayos x para el análisis en la síntesis de ferritas. *INFOMIN*, 9(1), 2-12.

Gul, M., & Catbas, F. N. (2010). Damage assessment with ambient vibration data using a novel time series analysis methodology. *Journal of Structural Engineering*, 137(12), 1518-1526.

Hernandez-Vargas, M., Cabal-Yepez, E., & Garcia-Perez, A. (2014). Real-time SVD-based detection of multiple combined faults in induction motors. *Computers & Electrical Engineering*, 40(7), 2193-2203.

Higuchi, T. (1988). Approach to an irregular time series on the basis of the fractal theory. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 31(2), 277-283.

Huang, Y., Beck, J. L., Wu, S., & Li, H. (2014). Robust Bayesian compressive sensing for signals in structural health monitoring. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 29(3), 160-179.

Hutton, D. V., & Wu, J. (2004). *Fundamentals of finite element analysis* (Vol. 1). New York: McGraw-hill.

Katz, M. J. (1988). Fractals and the analysis of waveforms. *Computers in biology and medicine*, 18(3), 145-156.

Lopez-Ramirez, M., Ledesma-Carrillo, L., Cabal-Yepez, E., Rodriguez-Donate, C., Miranda-Vidales, H., & Garcia-Perez, A. (2016). EMD-based feature extraction for power quality disturbance classification using moments. *Energies*, 9(7), 565.

Lozano-Galant, J. A., Nogal, M., Castillo, E., & Turmo, J. (2013). Application of observability techniques to structural system identification. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 28(6), 434-450.

Lui, G. R., & Quek, S. S. 2003. *The Finite Element Method, A Practical Course*. Butterworth-Heinemaa, Burlington MA

Moreno-Gomez, A., Perez-Ramirez, C. A., Dominguez-Gonzalez, A., Valtierra-Rodriguez, M., Chavez-Alegria, O., & Amezcquita-Sanchez, J. P. (2018). Sensors used in structural health monitoring. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 25(4), 901-918.

Ni, Y. Q., Zhou, X. T., & Ko, J. M. (2006). Experimental investigation of seismic damage identification using PCA-compressed frequency response functions and neural networks. *Journal of sound and vibration*, 290(1-2), 242-263.

Osornio-Rios, R. A., Amezquita-Sanchez, J. P., Romero-Troncoso, R. J., & Garcia-Perez, A. (2012). MUSIC-ANN analysis for locating structural damages in a truss-type structure by means of vibrations. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 27(9), 687-698.

Pacheco-Ortega, D. O., Moreno-Gomez, A., Perez-Lara-y-Hernandez, M. A., & Amezquita-Sanchez, J. P. (2018). Fractal dimension-based methodology for detecting and quantifying the severity of fatigue cracks in a four-story structure. In 2018 XIV International Engineering Congress (CONIIN), pp. 1-7.

Paz M. (2009). Diseño, fabricación y análisis de vibraciones por medio de elemento finito de una estructura reconfigurable. *Tesis de Maestría UAQ*.

Perez Macias F. (2018). Metodología para la detección de daños en estructuras del tipo truss empleando la teoría del caos. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Querétaro.

Pérez Ramírez, C. A. (2014). Instrumentación y monitoreo de estructuras civiles para la obtención de parámetros modales basado en excitaciones ambientales (*Doctoral dissertation, UAQ*).

Perez-Ramirez, C. A., Amezquita-Sanchez, J. P., Adeli, H., Valtierra-Rodriguez, M., Romero-Troncoso, R. D. J., Dominguez-Gonzalez, A., & Osornio-Rios, R.

A. (2016). Time-frequency techniques for modal parameters identification of civil structures from acquired dynamic signals. *Journal of Vibroengineering*, 18(5), 3164-3185.

Su, W. C., Liu, C. Y., & Huang, C. S. (2014). Identification of instantaneous modal parameter of time-varying systems via a wavelet-based approach and its application. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 29(4), 279-298.

Umesha, P. K., Ravichandran, R., & Sivasubramanian, K. (2009). Crack detection and quantification in beams using wavelets. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 24(8), 593-607.