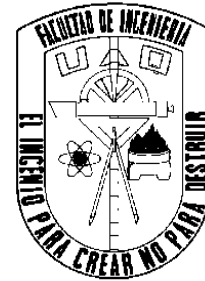




Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería



“Metodología para la detección de daños en estructuras del tipo truss empleando la teoría del caos.”

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de Maestría en Ciencias
Mecatrónica

Presenta

Ing. Francisco Javier Pérez Macías

Dirigido por:

Dr. Juan Pablo Amézquita Sánchez

Dr. Martin Valtierra Rodríguez

San Juan del Río, Querétaro, Mayo de 2018



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Metodología para la detección de daños en estructuras del tipo truss empleando la teoría del caos

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de Maestría en Ciencias
Mecatronica

Presenta

Ing Francisco Javier Pérez Macías

Dirigido por:

Dr Juan Pablo Amézquita Sánchez

Dr Martin Valtierra Rodriguez

Dr Juan Pablo Amézquita Sánchez
Presidente



Firma

Dr Martin Valtierra Rodriguez
Secretario



Firma

Dr Aurelio Dominguez González
Vocal



Firma

Dr Jesús Rooney Rivera Guillen
Suplente



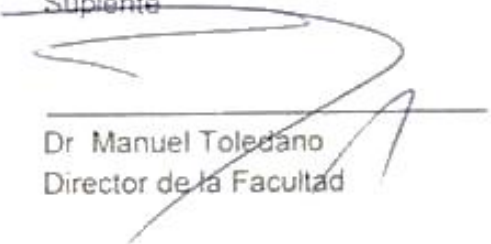
Firma

Dr J Jesús de Santiago Pérez
Suplente



Firma

Dr Manuel Toledano
Director de la Facultad



Dra. Ma Guadalupe Flavia Loarca Piña
Directora de Investigación y Posgrado



Firma

Querétaro, Mayo de 2018

RESUMEN

En la actualidad el monitoreo estructural es un tema relevante para la ingeniería y tiene un amplio campo de aplicación. Este monitoreo consiste en el procesamiento e interpretación de los datos adquiridos de una estructura con el fin de evaluar su condición. La detección temprana de daños en estructuras es un reto importante para el monitoreo estructural, ya que con esta detección se puede lograr una reducción tanto del tiempo como de los costos requeridos para la reparación. Uno de los daños más comunes que está presente en muchas estructuras civiles es la corrosión. Investigaciones relacionadas a la detección de daños en estructuras han demostrado que una condición de daño modifica la respuesta vibratoria de la misma. Es por esta razón que se presenta una metodología basada en la dimensión fractal, capaz de realizar un diagnóstico eficiente de la condición de una estructura de aluminio analizando su respuesta vibratoria. Esta metodología se puede usar para detectar y localizar daño por corrosión en un modelo a escala de una estructura tridimensional truss de 9 cubos. En general, la metodología presentada se puede dividir en tres pasos. En el primer paso, la transformada wavelet discreta (DWT) es utilizada para descomponer y eliminar el ruido contenido en la señal; a continuación, dos diferentes algoritmos de dimensión fractal (FD) son utilizados (Box Dimension y Katz) para detectar características en la señal que son utilizadas para la detección del daño. Por último, un análisis estadístico es realizado y una red neuronal es implementada como clasificador, pudiendo con esta lograr la detección y localización por zonas del daño en la estructura. Los resultados obtenidos muestran la efectividad y la utilidad de la metodología propuesta.

(Palabras claves: Monitoreo estructural, Estructura tridimensional truss, corrosión, Transformada Wavelet Discreta, Dimensión Fractal, Red Neuronal)

ABSTRACT

Structural health monitoring (SHM) is a relevant topic for engineering and has a wide field of application. This monitoring consists of the processing and interpretation of the data of a structure in order to evaluate its condition. The early detection of a structural damage is an important challenge for structural monitoring, since with this detection a reduction in both the time and the costs of the required repair can be achieved. One of the most common and damaging mechanism present in many engineering structures is the corrosion. Investigations related to the detection of damages in structures have shown that a damage condition modifies the vibratory response. For this reason, a methodology based on fractal dimension capable of performing an efficient diagnosis of the condition of an aluminum structure analyzing its vibratory response is presented. This methodology can be used to detect and locate corrosion damage in a scale model of a nine-bay three-dimensional truss structure. In general, the presented methodology can be divided into three steps. In the first step, the discrete wavelet transform (DWT) is used to decompose and eliminate the noise contained in the signal; then, two different fractal dimension algorithms (FD) (Box Dimension and Katz) are used to detect characteristics in the signal that are used for the detection of damage. Finally, a statistical analysis is carried out and a neural network is implemented as a classifier, being able to achieve the detection and location by areas of the damage in the structure. The results obtained show the effectiveness and usefulness of the proposed methodology.

(Key words: Structural health monitoring, three-dimensional truss structure, corrosion, Discrete Wavelet Transform, Fractal Dimension, Neural Network)

DEDICATORIA

A mis padres y hermanos, que siempre me apoyan.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia que siempre me han apoyado a seguir adelante y vencer los obstáculos que se presentan, por su cariño, comprensión y por siempre creer en mí.

A mi asesor, el Dr. Juan Pablo Amézquita Sánchez, por confiar en mí y darme la oportunidad de participar en este proyecto, por sus buenos consejos y comentarios que me ayudaron a terminar esta etapa de mi carrera.

A mis profesores el Martín Valtierra Rodríguez, Dr. Jesus Rooney Rivera Guillen, Dr. J. Jesús de Santiago Pérez y Dr. Aurelio Domínguez González, en general, a todos por su paciencia y consejos, pero sobre todo por su apoyo.

A mis amigos, Uriel, Zaid, Gustavo, Amparo, Omar, Darién, y a los que faltan de mencionar por su apoyo, amistad y comprensión durante todo este tiempo y los buenos momentos que pasamos juntos.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por haberme dado la oportunidad de desarrollar este proyecto de investigación apoyándome con el número de beca 743478, y por los recursos necesarios para la elaboración de este trabajo proporcionados por el proyecto CB-2015/254697. También agradecer a la Universidad Autónoma de Querétaro, siendo una de las instituciones con gran nivel educativo por su gran apoyo.

A todos, gracias.

ÍNDICE

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTOS	IV
ÍNDICE	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
1. CAPÍTULO 1: Introducción	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Antecedentes	2
1.3. Justificación.....	4
1.4. Descripción del problema.....	6
1.5. Hipótesis y objetivos.....	7
1.5.1. Hipótesis	7
1.5.2. Objetivo general.....	7
1.5.3. Objetivos particulares	7
1.6. Planteamiento general	8
2. CAPÍTULO 2: Fundamentación Teórica.....	9
2.1. Estado del arte.....	9
2.2. Armaduras.....	9
2.3. Modelo matemático de la estructura.	10
2.4. Vibraciones.	11
2.5. Monitoreo de la integridad estructural.	13
2.6. Métodos de detección de fallas en estructuras.	14
2.6.1. Métodos clásicos	14
2.6.2. Métodos dinámicos	16
2.6.2.1. Acelerómetros.....	16
2.6.2.2. Acelerómetros capacitivos	16
	V

2.7.	Transformada discreta Wavelet.	18
2.8.	Dimensión fractal.....	19
2.8.1.	Dimensión fractal de Katz	20
2.8.2.	Dimensión de caja	20
2.9.	Redes neuronales artificiales.	21
2.9.1.	Elementos de una neurona artificial	21
2.9.2.	Topología de una red neuronal	23
2.9.3.	Etapa para crear una red neuronal	24
2.9.4.	Diseño del conjunto de datos de entrenamiento y validación	25
3.	CAPÍTULO 3: Metodología.....	26
3.1.	Metodología.	26
3.2.	Ampliación de la estructura.	27
3.3.	Sistema de adquisición de datos.....	30
3.3.1.	Sensor.....	Error! Bookmark not defined.
3.3.2.	Tarjeta de adquisición	31
3.3.3.	Software de control para adquisición de señales.....	32
3.4.	Sistema de excitación	33
3.4.1.	Elemento excitador	34
3.4.2.	Amplificador	35
3.5.	Procesamiento de señales de vibración.....	36
4.	CAPÍTULO 4: Pruebas y Resultados	39
4.1.	Puesta de experimento.	39
4.2.	Caso de estudio.	42
4.3.	Resultados.	45
5.	CAPÍTULO 5	53
5.1.	Conclusiones.....	53
5.2.	Prospectivas.....	54
6.	BIBLIOGRAFÍAS.....	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Diagrama general del sistema.....	8
Figura 2.1 (a) Estructura de barras articuladas. (b) Montaje de elemento barra-..	10
Figura 2.2 Elemento barra denotado por sus desplazamientos modales.....	12
Figura 2.3 (a) Cilindro circular sujeto a torsión. (b) Notación para esfuerzos de torsión.	13
Figura 2.4 Estructura de acelerómetros tipo capacitivo.....	17
Figura 2.5 Algoritmo de Mallat.....	18
Figura 2.6 Neurona artificial..	21
Figura 3.1 Metodología propuesta.....	25
Figura 3.2 Elementos de la estructura.....	26
Figura 3.3 Nodo de la estructura.....	27
Figura 3.4 Estructura ampliada.	28
Figura 3.5 Base de metal para la estructura.....	28
Figura 3.6 Acelerómetro 8395A10 marca Kistler.....	29
Figura 3.7 Montaje del acelerómetro.....	30
Figura 3.8 Tarjeta de adquisición NI-USB 6211.	31
Figura 3.9 Interfaz gráfica de adquisición.....	32
Figura 3.10 Interfaz de control de excitación.....	33
Figura 3.11 Labworks ET-126B shaker electrodinámico.	33
Figura 3.12 Elemento excitador acoplado a la estructura	34
Figura 3.13 Amplificador Labworks PA-138.	35
Figura 3.14 Nodo del árbol de descomposición de interés.....	36
Figura 3.15 Diagrama a bloques del procesamiento.	37
Figura 3.16 Ejemplo de topología de red feedforward.....	37
Figura 4.1 Sistema de monitoreo estructural.....	38
Figura 4.2 Montaje de acelerómetro en la estructura.....	40
Figura 4.3 Sistema de excitación y sensado.	40
Figura 4.4 Sistema de sensado.....	41
Figura 4.5 Elemento de daño generado	42
Figura 4.6 Estudio de la estructura en estado sano.	42
Figura 4.7 Estudio de la estructura ante la presencia de daño por corrosión.....	43
Figura 4.8 Estudio de la estructura ante la presencia de daño en distintas ubicaciones.	43
Figura 4.9 Señales de vibración medidas.	44
Figura 4.10 Señales de vibración capturadas de la estructura sana y ante la presencia de daño por corrosión.	45
Figura 4.11 Aproximación nivel5 para la condición sano y con daño por corrosión	45
Figura 4.12 Funciones de densidad para valores Katz aproximación 5 Eje z	46
Figura 4.13 Funciones de densidad para valores Box Counting aproximación 5 eje z	47
Figura 4.14 Topología red feedforward implementada.....	48
Figura 4.15 Matriz de confusión de entrenamiento.	49
Figura 4.11 Matriz de confusión de validación	50

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Material necesario para la estructura.	27
Tabla 4.1 Valores de media calculados.....	48
Tabla 4.2 Valores de desviación estándar calculados.....	48

Capítulo 1: Introducción

1.1 Introducción

El monitoreo estructural (Structural Health Monitoring, “SHM”) se refiere al proceso de implementar una estrategia para la identificación de daños, este proceso implica la observación continua de una estructura para inferir su integridad estructural mediante el análisis de su respuesta medida (Jiang y Adeli, 2005; Ciang et al., 2008). El objetivo del SHM es construir una descripción cuantitativa del deterioro de la estructura. En este sentido, SHM permite garantizar la seguridad de la vida útil de dicha estructura. El daño estructural puede incluir corrosión, fatiga y deterioro provocado por el tiempo; sin embargo, el daño también puede ser causado por cargas de impacto, terremotos y fuertes vientos (Hao et al., 2014). Cuando una estructura presenta un daño, algunos parámetros estructurales como sus frecuencias naturales, formas modales, entre otros sufren un cambio. (Xu et al., 2014). El problema de la detección de daños, especialmente en una etapa temprana, se ha convertido en una preocupación para los investigadores e ingenieros en la actualidad, ya que una detección temprana de daño estructural puede conducir a la reducción de tiempo y costes necesarios para realizar la reparación, evitando la posible pérdida de dinero y en casos extremos vidas humanas. Estas razones ponen de manifiesto la necesidad de generar nuevas metodologías capaces de realizar el SHM de manera eficiente, siendo capaces de prevenir fallas catastróficas que desencadenen las consecuencias antes mencionadas.

1.2 Antecedentes

En la actualidad, el monitoreo estructural es un área de investigación importante y de rápido crecimiento, esto ha atraído el interés de los investigadores, así como de las agencias de gobierno relacionadas con el mantenimiento y seguridad de los diferentes tipos de estructuras civiles.

Algunos de los métodos utilizados para la detección de daños en los esquemas de monitoreo estructural consisten en procedimientos visuales o de experimentación localizada, tales como la laminografía de rayos X (Yang et al., 2016), emisión acústica (Li et al., 2011), imagen térmica (Clarke et al., 2009), ultrasónicos (Farhidzadeh et al., 2015), entre otros. Estos métodos han demostrado ser útiles; sin embargo, requieren tener un conocimiento a priori de la ubicación del daño, además, estos métodos también requieren en muchos casos un fácil acceso al área dañada y el cierre temporal de la estructura durante su inspección, creando con esto la necesidad de explorar alternativas menos invasivas. En los últimos años, los investigadores han empleado métodos basados en vibraciones para detectar e identificar el daño, ya que las características físicas de la estructura, es decir, la rigidez o la masa, cambian, modificando así su respuesta vibratoria (Labuz et al., 2015). Estos métodos han demostrado ser lo suficientemente sensibles para detectar daños que son invisibles para el ojo humano o daños que se encuentra en áreas que son imposibles de alcanzar mediante una inspección visual.

En este sentido, durante las dos últimas décadas, se han utilizado varias técnicas para el análisis de señales de vibración con el fin de evaluar el estado de las estructuras civiles. Por ejemplo, la transformada rápida de Fourier (Fast Fourier Transform, "FFT") es la técnica de procesamiento de señales más utilizada para esta tarea (Amezquita-Sanchez et al., 2012). Aunque ha demostrado ser buena para estimar frecuencias naturales y en algunos casos detectar daños en estructuras, su capacidad es limitada cuando se utiliza para analizar y extraer características de señales que muestran comportamiento no estacionario y no lineal, comportamiento encontrado en estructuras civiles. La transformada corta de Fourier (Short Time

Fourier Transform, “STFT”) puede superar algunas desventajas presentadas por la FFT al ser capaz de analizar una señal no estacionaria. Sin embargo, como se menciona en Amezquita-Sanchez et al., 2010, esta técnica requiere una gran ventana donde las señales transitorias no son claramente apreciadas, o pequeñas ventanas con baja resolución de frecuencia, lo que hace difícil observar las frecuencias del sistema correctamente. La transformación wavelet (Wavelet Transform, “WT”) es otra técnica de procesamiento de señal utilizada para realizar tareas de monitoreo estructural, ya que proporciona la representación tiempo-frecuencia de la señal, siendo adecuada para el análisis de señales no lineales y no estacionarias (Minu et al., 2010); sin embargo, esta técnica requiere una selección apropiada de la ondoleta madre para ser capaz de monitorear la condición de la estructura. El análisis aplicando EMD (Empirical Mode Decomposition, “EMD”) ha sido propuesto para superar las limitaciones antes mencionadas, y a pesar de que este análisis muestra una mejora, los métodos basados en EMD se ven afectados por el efecto de intermitencia entre la señal y el ruido, limitando la observación del comportamiento de la estructura en detalle (Lei et al., 2010).

En los últimos años, la dimensión fractal (Fractal Dimension, “FD”), un concepto de la teoría del caos (Hsu, 2013), ha demostrado su eficacia para el análisis de señales transitorias y no lineales (Amezquita-Sanchez et al., 2016). Esta técnica se ha utilizado principalmente en aplicaciones médicas (Ahmadlou y Adeli, 2010), sin embargo, se ha ido introduciendo gradualmente a la realización de tareas relacionadas al monitoreo estructural. La dimensión fractal proporciona una medida de auto-similitud e irregularidades incorporadas en una señal de tiempo, este valor denota cuántas veces un patrón se repite en una señal de serie de tiempo (Ahmadlou y Adeli, 2011). La FD se ha utilizado para detectar cambios en los parámetros modales para la vigilancia de la salud de vigas simples (Shi et al., 2010), sin embargo, los indicadores de daños basados en parámetros modales son conocidos por ser muy sensibles a las condiciones ambientales (Radzienski et al., 2011). Los resultados obtenidos por (Amezquita-Sanchez et al., 2015), donde se hace uso de la FD para detectar características utilizadas para la detección de

daños en un modelo a escala 1:20 de un edificio de concreto de 38 pisos, muestran que esta técnica puede ser utilizada para realizar el monitoreo estructural en estructuras grandes.

En los años recientes, diferentes trabajos relacionados con el monitoreo de estructuras basados en vibración han sido desarrollados dentro de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ). El primer antecedente relacionado al análisis de vibraciones en estructuras es el trabajo de Paz (2009), donde reportó el análisis dinámico de una estructura tridimensional del tipo truss, estructura de la cual parte el trabajo desarrollado por Amézquita (2012), donde se realizó el análisis y diagnóstico de diversas fallas mediante algoritmos inteligentes y técnicas tiempo-frecuencia. Chávez (2010) realizó un estudio de daños en la estructura truss basado en la FFT y en el modelo de elemento finito de la estructura. Pérez (2014) desarrolló una metodología basada en técnicas tiempo-frecuencias para la estimación de las frecuencias naturales y factores de amortiguamiento del edificio de la cafetería ubicada en la facultad de ingeniería campus San Juan del Río. Todos estos trabajos elaborados en la UAQ se han enfocado a la estimación de los parámetros modales, así como a la detección de fallas. Por tanto, es de gran importancia seguir ahondando más sobre este tema de monitoreo estructural, para encontrar soluciones que sean más precisas y efectivas a las mencionadas anteriormente. Debido a esto, el presente trabajo de investigación se enfoca en la detección y localización de daños estructurales producidas por corrosión, contribuyendo en el estado del arte sobre este tema dentro de la universidad.

1.3 Justificación

La determinación de las propiedades dinámicas de estructuras mediante el estudio de vibraciones ha jugado un papel trascendente en la búsqueda de soluciones para la evaluación y posible reforzamiento de estructuras civiles. El análisis de señales de vibraciones para el monitoreo estructural es un área de

investigación que ha llamado la atención de numerosos investigadores en los últimos años debido a la importancia que tiene (Wang et al., 2014; Talebinejad et al., 2011). Esto se debe a que como se sabe, las estructuras civiles frecuentemente sufren daños durante su vida útil, principalmente a causas tales como: movimientos excesivos, corrosión, alta temperaturas, degradación, acumulación de grietas, entre otras (Amézquita et al., 2012). La acumulación de estos daños puede ocasionar daños irreparables en la estructura dando como resultado pérdidas económicas importantes. El uso de sistemas de monitoreo de daños en estructuras brinda información acerca del comportamiento y estado de las mismas, permitiendo con esto evaluar la condición de la estructura. Esto con la finalidad de detectar daños en su estado inicial, de forma que se realicen las medidas correspondientes buscando prevenir la falla o el colapso de la estructura, evitando pérdidas económicas y humanas, pudiendo alargar la vida útil de la estructura reduciendo el costo de inspecciones rutinarias poco eficientes. De aquí surge la necesidad de estudiar el comportamiento de estructuras y es donde radica la esencia de este trabajo.

El resolver el problema del monitoreo y análisis para la detección temprana de daños en las estructuras, beneficiaría a la industria de la región en diferentes factores como ahorro de primas a expertos analizadores, así como el poder descifrar el origen de la falla permitirá reducir costos por mantenimiento correctivo ya que se pueden hacer predicciones con el análisis de las vibraciones y ahorro en la compra de analizadores espectrales, etc. Por ello es necesario contar con un sistema independiente de la estructura el cual pueda ser reconfigurado para monitorear y analizar las características particulares de cada estructura.

La aportación más importante de esta investigación será el desarrollo de un sistema de monitoreo estructural, mediante el procesamiento digital de las señales de vibraciones introduciendo como herramienta principal de análisis el concepto de dimensión fractal, logrando la detección pronta de daños, así como su localización a partir de la interpretación de los datos obtenidos.

1.4 Descripción del Problema

El análisis y el diagnóstico del estado de una estructura permite determinar las medidas necesarias para corregir el estado de la estructura antes de que ocurra una falla, lo que permitirá su operación o programar su reparación o retiro, pudiendo con esto evitar daños irreparables que se traducen en pérdidas económicas. De manera que, al estudiar los datos, el interés principal es el poder encontrar características relevantes dentro de las señales monitoreadas que permitan la detección y localización de un daño estructural. Las señales adquiridas presentan principalmente propiedades no estacionarias además de estar embebidas en mucho ruido generando un reto el poder analizarla de forma correcta. Por ello, es necesario contar con técnicas de procesamiento de señales avanzadas tales como fractales que sea capaz de analizar las propiedades antes mencionadas para poder crear un sistema independiente de la estructura el cual pueda ser reconfigurado para monitorear y analizar las características particulares de cada estructura

El aportar una herramienta al problema del monitoreo y análisis para la detección temprana de daños en las estructuras beneficiaría a la industria de la región en diferentes factores como ahorro de primas a expertos analizadores, así como el poder descifrar el origen de la falla permitiría reducir costos por mantenimiento correctivo ya que se pueden hacer predicciones con el análisis de las vibraciones y ahorro en la compra de analizadores espectrales, etc.

1.5 Hipótesis y objetivos

1.5.1 Hipótesis

Mediante la utilización de la teoría del caos es posible generar una metodología que permita realizar la detección y localización de daños en estructuras civiles del tipo truss, mismas que son capaces de ser ejecutadas en plataformas de procesamiento en tiempo real como los FPGA.

1.5.2 Objetivo general

Proponer y desarrollar una nueva metodología basada en la teoría del caos investigando los fractales de Katz y Box Counting para la detección y localización del daño en estructuras civiles del tipo truss.

1.5.3 Objetivos particulares

1. Reconfigurar la estructura metálica tridimensional existente en la facultad de Ingeniería SJR, agregándole elementos que permitan obtener un comportamiento más real de la estructura.
2. Desarrollar las condiciones experimentales, creando elementos con características propias de daño (corrosión), que permitan analizar el comportamiento de la estructura bajo una condición de falla.
3. Instrumentar la estructura con sensores tales como acelerómetros para obtener su comportamiento vibratorio de la estructura ante el caso de estudio.
4. Desarrollar algoritmos y metodologías para la evaluación de la integridad de la estructura mediante técnicas avanzadas de procesamiento de señales, introduciendo como herramienta de análisis el concepto de dimensión fractal perteneciente a la teoría del caos, usando las bases de datos capturadas en los casos de estudio.
5. Realizar las pruebas necesarias sobre la estructura con el fin de validar la metodología propuesta buscando realizar el monitoreo estructural de manera eficiente.

1.6 Planteamiento general

El planteamiento general del proceso propuesto en este trabajo se muestra a continuación en la Figura 1.1.

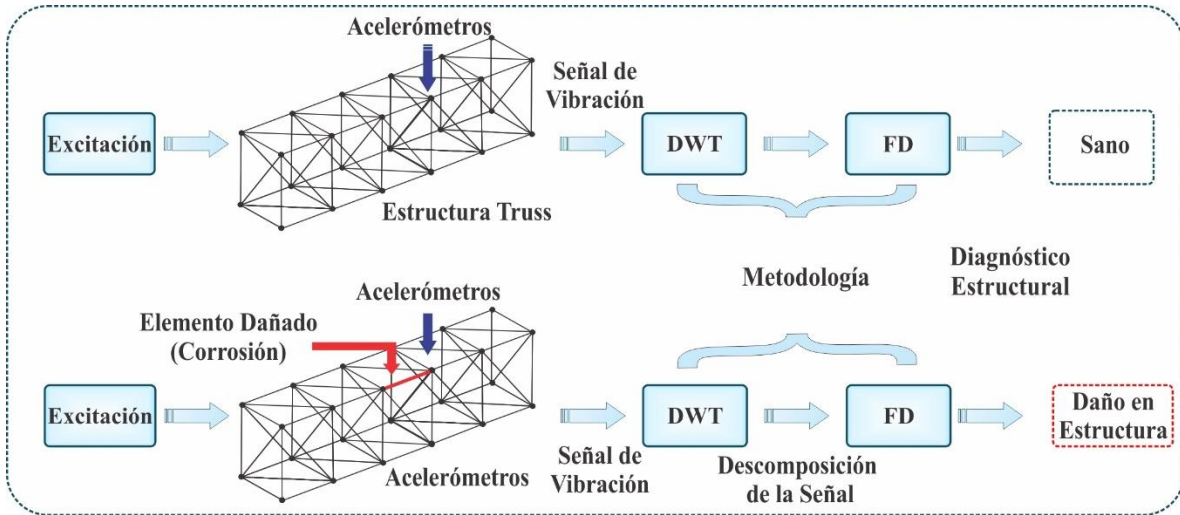


FIGURA 1. 1 DIAGRAMA GENERAL DEL SISTEMA.

Como primer paso se realiza la instrumentación de la estructura tipo truss, para ello se colocan 5 acelerómetros de forma distribuida en distintos puntos de la estructura. Como segundo paso, se realiza la adquisición de las señales de respuesta vibratoria de la estructura ante una excitación predefinida. Las señales obtenidas son almacenadas a través de una interfaz gráfica en un archivo de texto en el ordenador. Como siguiente paso, las señales de vibración obtenidas son pre-procesadas con el fin de eliminar el ruido presente en las mismas. La transformada Wavelet discreta es la herramienta utilizada para realizar esta labor, además, esta herramienta es utilizada para descomponer la señal en múltiples ventanas de frecuencias. El siguiente paso consiste en la aplicación de los algoritmos de dimensión fractal a los diferentes niveles de descomposición de la señal. Los valores de los fractales más discriminantes son empelados para el diagnóstico de la estructura con el fin de evaluar su condición y localizar la zona de daño dentro de la estructura truss.

Capítulo 2: Fundamentación Teórica

2.1. Estado del Arte

A continuación, se presentan diversos conceptos y temas tomados como base teórica para el desarrollo del proyecto.

2.2. Armaduras

Las armaduras o estructuras truss son las más empleadas en el diseño de la infraestructura civil ya que son fáciles de ensamblar, existe un ahorro de material en comparación a otros diseños de estructuras, su rápida instalación, su peso ligero y permiten un espacio accesible para su mantenimiento. Por lo tanto, las estructuras de barras articuladas juegan un papel importante en la economía teniendo aplicaciones en el diseño de puentes, torres, grúas, techos, esqueletos de edificios, entre otras.

En arquitectura e ingeniería estructural, una armadura (truss) es una estructura que comprende una o varias unidades triangulares construidas con elementos rectos cuyos extremos están conectados a las articulaciones llamadas nodos. Se considera que las fuerzas externas y reacciones a dichas fuerzas actúan solo en los nodos, resultando en compresión o tensión en los miembros de la estructura.

La estructura empleada en este trabajo de tesis consta de nueve cubos hechos de aluminio, la cual esta empotrada en una base metálica. Cada cubo mide 0.707 m de lado de manera que las barras diagonales son de 1 m de longitud. Los nodos tienen una masa de 0.2 Kg, miden 0.055m de lado y están conectados por medio de un tornillo con las barras. Los elementos que conforman la estructura se

diseñan a partir de estas dimensiones y a la topología mostrada en la Figura 2.1(a). La Figura 2.1(b) muestra el ensamble de la barra con el nodo.

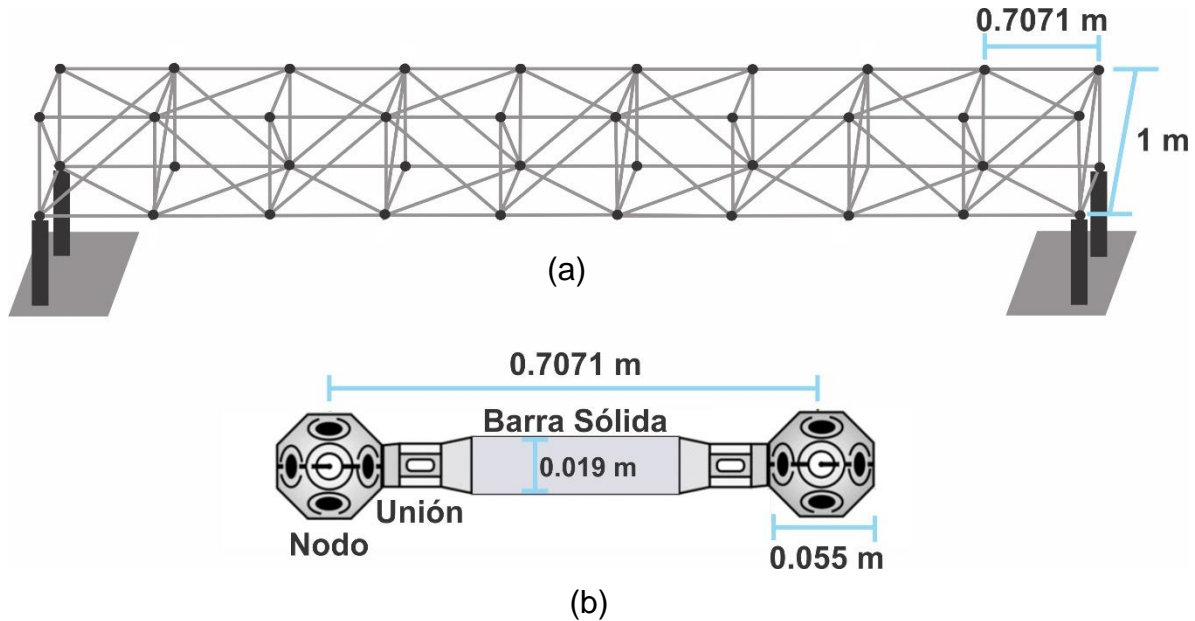


FIGURA 2. 1 (a) ESTRUCTURA DE BARRAS ARTICULADAS. (b) MONTAJE DEL ELEMENTO BARRA. (AMÉZQUITA, 2012)

2.3. Modelo matemático de la estructura

La ecuación diferencial que gobierna el movimiento de un sistema con grados de libertad se expresa como se muestra en la Ecuación (2.1) (Chávez, 2010).

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F\} \quad (2.1)$$

donde $[M]$, $[C]$ y $[K]$ son matrices de tamaño $n \times n$ que representan la masa, amortiguamiento y rigidez del sistema, respectivamente, $\{\ddot{x}\}$, $\{\dot{x}\}$, $\{x\}$ y $\{F\}$ son matrices columna de tamaño n que corresponden a la aceleración, velocidad, posición y la fuerza aplicada, respectivamente.

2.4. Vibraciones

Las vibraciones se definen como el movimiento oscilante que hace una partícula alrededor de un punto fijo. Los parámetros de las vibraciones para cualquier sistema son los siguientes (Chávez, 2010):

- Frecuencia: Es el tiempo necesario para completar un ciclo vibratorio.
- Desplazamiento: Es la distancia total que describe el elemento vibrante, desde un extremo al otro de su movimiento.
- Velocidad y Aceleración es el valor relacional de los anteriores.
- Dirección: Las vibraciones pueden producirse en 3 direcciones lineales y 3 rotacionales.

El principio básico para modelar el comportamiento de las vibraciones en una estructura está basado en las matrices de rigidez y masa de una barra tridimensional, donde el principio más básico que describe este sistema es el de una barra elástica con las siguientes suposiciones:

- La barra es geoméricamente recta.
- El material se comporta conforme a la ley de Hooke.
- Las fuerzas son aplicadas únicamente en los extremos de la barra.
- La barra soporta únicamente carga axial.

La energía de la deformación U_e para la barra elástica está definida por la Ecuación (2.2).

$$U_e = \frac{1}{2} E \left(\frac{u_2 - u_1}{L} \right)^2 AL \quad (2.2)$$

donde, E es el módulo de elasticidad del material de la barra, $(U_2 - U_1)$ es el cambio en longitud de la barra, L es la longitud de la barra y A es el área de sección transversal de la barra.

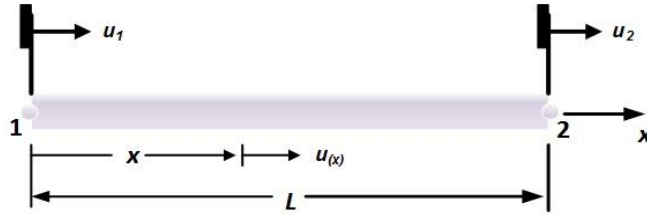


FIGURA 2. 2. ELEMENTO BARRA DENOTANDO SUS DESPLAZAMIENTOS NODALES.

Para poder determinar la matriz de rigidez de este sistema se aplica el teorema de Castigliano con respecto a cada desplazamiento, con lo cual se obtiene la Ecuación (2.3), en su forma matricial:

$$\frac{AE}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{Bmatrix} \quad (2.3)$$

Haciendo una analogía con la ecuación de deformación para un resorte $K \cdot X = F$, se deduce la matriz de rigidez k_e equivalente en el sistema coordenado local para las barras elásticas.

$$[k_e] = \frac{AE}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

La Ecuación (4) muestra que la matriz de rigidez para un elemento barra es una matriz 2 x 2. Esto corresponde a la facultad que el elemento tiene para exhibir dos desplazamientos nodales (o grados de libertad) y que los dos desplazamientos no son independientes (esto es, el cuerpo es continuo y elástico).

La simetría de la matriz es un indicativo de que el cuerpo es linealmente elástico y cada desplazamiento está relacionado con otro por el mismo fenómeno físico.

Ahora bien, para describir los efectos torsionales que se pudieran tener en los nodos de un sistema, en la Figura 2.3(a) se muestra un cilindro circular sujeto a efectos de torsión debido a los pares aplicados en los nodos. Para una mejor apreciación de los nodos y las rotaciones en base al eje x acorde a la regla de la mano derecha se muestran en la Figura 3b.

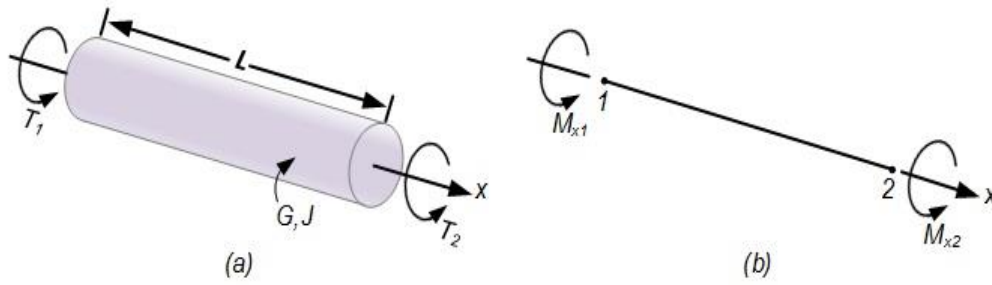


FIGURA 2. 3. (a) CILINDRO CIRCULAR SUJETO A TORSIÓN, (b) NOTACIÓN PARA ESFUERZOS DE TORSIÓN.

Ahora para obtener la matriz para esfuerzos torsionales se puede hacer una analogía con la Ecuación (2.3) queda la matriz de la Ecuación (2.5).

$$\frac{JG}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} M_1 \\ M_2 \end{Bmatrix} \quad (2.5)$$

donde G es el módulo de elasticidad al esfuerzo cortante del material del cilindro, θ_1 y θ_2 son los desplazamientos rotacionales de los extremos del cilindro, L es la longitud del cilindro y J es momento polar de inercia del cilindro.

La matriz de rigidez a torsión se describe mediante la Ecuación (2.6).

$$[K_{\text{torsion}}] = \frac{JG}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

2.5. Monitoreo de la integridad estructural

Monitoreo de la integridad estructural “Structural health monitoring” es un área de investigación importante y de rápido crecimiento que consiste en el proceso de implementar una estrategia de identificación de daños que envuelva la observación de una estructura a lo largo del tiempo empleado mediciones espaciadas y el análisis de estas para determinar el estado actual de la misma. El término daño puede ser definido como los cambios introducidos dentro del sistema que afectan negativamente su actual o futuro rendimiento y requiere una

comparación entre dos estados diferentes del sistema, uno de los cuales representa el estado inicial y el estado actual, el cual debe ser evaluado como sano o dañado.

Los datos a analizar se consiguen desde una red de sensores, los cuales, una vez procesados, permiten detectar las distintas anomalías (fallas) en la estructura. Esta información puede ser periódica o en tiempo real y continuo, y estar asociada a cambios diversos en la estructura como corrosión, fatiga, humedad, esfuerzos, desplazamientos, deformaciones, aceleraciones, agrietamiento, vibraciones, dislocaciones y otros que sean necesarios para la evaluación operacional de la estructura.

Dicha evaluación demanda contrastar la situación de la estructura dañada con un perfil saludable de la misma. Así pues, el análisis que debe hacerse a la estructura es a partir de la información capturada por sensores.

2.6. Métodos de detección de fallas en estructuras

Durante los últimos años se han propuesto diversos métodos clásicos y dinámicos para evaluar el daño estructural como se describe a continuación.

2.6.1. Métodos clásicos

Los métodos clásicos o también llamados técnicas no destructivas consisten en procedimientos visuales o experimentales, tales como (Talebinejad et al., 2011):

1. Inspección visual. Este tipo de métodos incluyen algunas variantes de niveles de especialización que van desde una evaluación óptica a simple vista hasta microscopio de barrido electrónico para obtener información detallada de las micro fracturas. La evaluación óptica, aunque es la más simple y barata tiene sus limitaciones en

materiales compuestos donde las fallas muchas veces ocurren en capas interiores. Para estructuras a gran escala este tipo de métodos resultan ineficientes y poco efectivos.

2. Emisión ultrasónica. Este método consiste de dos cabezales hidrodinámicos acoplados en tándem que al pasar por la superficie del elemento envían ondas acústicas transmitidas. El inconveniente de este método además del tamaño y el costo del equipo es la necesidad de tener acceso a ambos lados de la superficie o incluso el tener que desmontar los elementos de la estructura.
3. Rayos X. Este método basa su principio de funcionabilidad en la variación de absorción de rayos X a través de una superficie. Para acentuar los daños en materiales compuestos esta técnica puede ser mejorada si se combina con la técnica de líquidos penetrantes. Sin embargo, es de un alto costo y presenta la necesidad de tener acceso a ambos lados de la superficie con el fin de emitir y coleccionar los rayos X.
4. Corrientes de Eddy. El principio de funcionamiento se basa en los cambios de impedancia electromagnética debido a deformaciones en el material. El método es simple y no requiere gran equipamiento, sin embargo, no es una tecnología madura para materiales compuestos además de que requiere considerable potencia y sus resultados son de los más complicados de interpretar.

Sin embargo, los métodos mencionados requieren que la localización del daño sea conocida y que la estructura al ser inspeccionada tenga un fácil acceso. Estas limitaciones han conducido al desarrollo de nuevas técnicas globales de monitoreo que pueden aplicarse en sistemas estructurales mientras estos se hallen en servicio.

2.6.2. Métodos dinámicos

Los métodos dinámicos están basados en los cambios de vibración de la estructura ya que la medición de la vibración es suficientemente sensible para detectar daños, inclusive cuando los daños están localizados en áreas internas o escondidas de la estructura. La idea básica del monitoreo estructural basado en vibraciones es que las modificaciones en las características estructurales debido a una falla afectan a la respuesta vibratoria de la estructura (Talebinejad et al., 2011). Existen diferentes sensores para medir la respuesta vibratoria de una estructura civil tales como galgas, lvdts, acelerómetros, giroscopios, entre otros, siendo el acelerómetro el más empleado, ya que puede medir la vibración de la estructura de manera eficiente y en diferentes direcciones.

2.6.2.1. Acelerómetros

En general el acelerómetro es un dispositivo diseñado para determinar la razón de cambio de la posición, ubicación o desplazamiento con respecto al tiempo; de tal modo que se emplea para medir la aceleración de sistemas en reposo o en movimiento. Físicamente el acelerómetro se puede analizar por medio de un sistema masa-resorte-amortiguador. Existen diferentes tipos de acelerómetros entre los cuales se puede mencionar los acelerómetros de tipo capacitivo, piezoeléctrico, piezoresistivo, de efecto Hall, magnetoresistivo, de transferencia de calor, entre otros.

2.6.2.2. Acelerómetros capacitivos

Este tipo de dispositivos se encargan de variar la posición relativa de las placas de un micro condensador cuando este se encuentra sometido a aceleraciones. El cambio en la capacitancia en respuesta a una cantidad física tiene muchas aplicaciones en la física de los transductores.

Este tipo de acelerómetros se encuentran formados internamente por un conjunto de capacidades fijas (ancladas al circuito) y por otro lado existe un conjunto de placas centrales que se encuentran unidas a unos anillos elásticos que permiten el movimiento de estas placas, al aplicar una fuerza de aceleración sobre el sensor, las placas se mueven una a otra, esto ocasiona que la capacitancia entre ellas cambie. A partir de estos cambios en la capacitancia se determina la aceleración. La idea es que en reposo la placa central se encuentre justo en el medio de estas, por tanto, el valor de capacitancia no cambiará. Cuando se aplique una aceleración en la dirección de la placa central (ubicada entre ambas capacitancias), esta se moverá provocando que una de las capacitancias aumente y la otra disminuya.

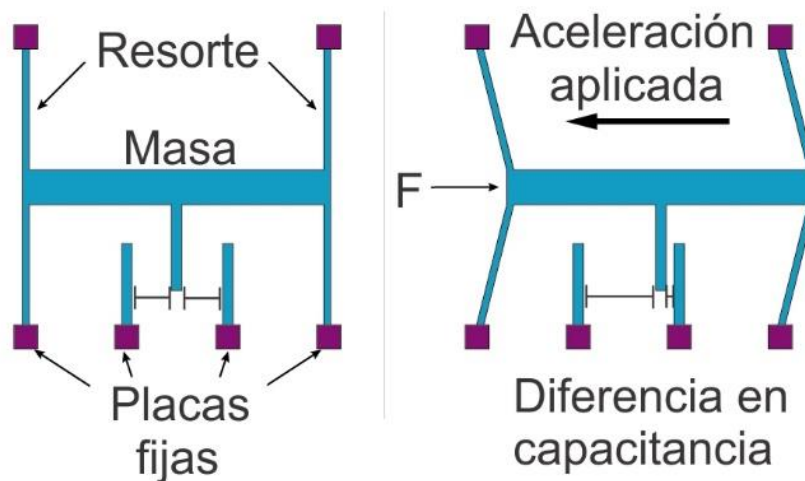


FIGURA 2. 4. ESTRUCTURA DE ACCELERÓMETRO TIPO CAPACITIVO.

La Figura 2.4 muestra el movimiento de la placa central cuando el acelerómetro está sometido a una aceleración. La elongación, y en consecuencia el cambio en la capacitancia es proporcional a la aceleración. La aceleración o desaceleración en el eje "sensor", ejerce una fuerza a la masa central. Al moverse libremente, la masa desplaza las minúsculas placas del condensador provocando un cambio de capacitancia.

2.7. Transformada discreta Wavelet

La transformada wavelet es caracterizada por poder analizar señales con propiedades estacionarias y no estacionarias (Amezquita-Sanchez et al., 2012). Cuando la función $x(t)$ es continua y las Wavelets son continuas con un factor de escala y traslación discretas, la transformada Wavelet resulta en una serie de coeficientes Wavelets, y se le llama descomposición en series Wavelet. Para obtener la transformada Wavelet discreta se requiere que el parámetro t , y el valor correspondiente al número de muestras n , donde el parámetro de escalamiento es $a=2^j$ y el de traslación es $b=k2^j$, con estos parámetros la ecuación de la forma discreta de la Wavelet es la siguiente ecuación:

$$DWt(j, k) = \sum_N x(n)h_j(n - 2^j k) \quad (2.7)$$

Ésta transformada se calcula utilizando un conjunto de filtros pasa-bajas y pasa-altas de tiempo discreto que son llamados aproximaciones y detalles respectivamente, este algoritmo se conoce como algoritmo de Mallat y su esquema general puede verse en la Figura 2.5.

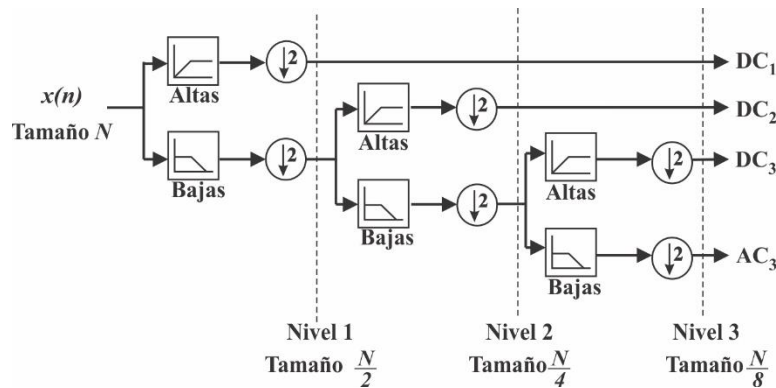


FIGURA 2. 5. ALGORITMO DE MALLAT.

Conforme el algoritmo de Mallat y como se puede observar en la Figura 2.5, la convolución de la señal $C_0(n)$ con el filtro pasa-bajas es conocida como aproximación del nivel L (C_L) y la convolución de la señal $C_0(n)$ con el filtro pasa-

altas es conocida como detalle del nivel L (d_L). El primer nivel de descomposición de la señal $C_o(n)$ es conocido como nivel 1 y se compone por el d_1 correspondiente a las componentes de alta frecuencia de la señal y el c_1 correspondiente a las componentes de baja frecuencia de la señal, el proceso de descomposición continúa tomando c_1 como $C_o(n)$ de la cual se obtiene el nivel 2 que se conforma por d_1 que corresponde a las componentes de las altas frecuencias de c_1 y c_2 que corresponde a las componentes de baja frecuencia de c_1 , este procedimiento se repite hasta que se obtenga el nivel L de descomposición deseado.

2.8. Dimensión fractal

La Dimensión Fractal (FD, “Fractal Dimension”) es un concepto perteneciente a la teoría del caos (Amezquita-Sanchez y Adeli, 2015). La teoría del caos puede definirse como el campo de estudio de la conducta de los sistemas dinámicos y no lineales. La Dimensión Fractal ha sido utilizada para el análisis de señales estacionarias; sin embargo, en los últimos años se ha demostrado su eficiencia para el análisis de señales transitorias y no lineales.

En la geometría Euclidiana, la dimensión de un espacio o un objeto se define como el número mínimo de coordenadas necesarias para especificar cualquier punto en él. Por ejemplo, una línea tiene una dimensión de uno y una superficie tiene una dimensión de dos, ya que se necesitan uno y dos coordenadas para especificar un punto en ellos, respectivamente; sin embargo, una línea con fracturas o desviaciones también tiene una dimensión de uno. El concepto de FD se utiliza en un intento de medir complejidad geométrica mediante la indicación de un no entero o de una dimensión fraccionada de la serie de tiempo considerada como un objeto geométrico.

En este contexto, el algoritmo de dimensión fractal proporciona una medida de auto-similitud y regularidad presente en una serie de tiempo, que se refiere a la

cantidad de veces que se repite un patrón en la señal de series de tiempo, los valores del algoritmo se encuentran entre valores de uno y dos, donde un valor de uno indica baja auto-similitud mientras un valor de dos indica alta auto-similitud en la señal analizada. Dentro de las herramientas más utilizadas para la obtención de la dimensión fractal se encuentran los algoritmos de dimensión fractal de Katz y de dimensión de caja.

2.8.1. Dimensión fractal de Katz (Katz, 1988)

La Dimensión fractal de Katz (KFD ,”Katz’s Fractal Dimension”) de la señal de una serie de tiempo es computada mediante las ecuaciones (2.8) a la (2.10) (Katz, 1988).

$$KFD = \frac{\ln\left(\frac{L}{a}\right)}{\ln\left(\frac{d}{a}\right)} \quad (2.8)$$

$$L = \sum_{i=2}^N |x_i - x_{i-1}| \quad (2.9)$$

$$a = \frac{L}{N - 1} \quad (2.10)$$

donde d es el valor máximo de distancia entre la primera muestra x_1 y la muestra actual x_i , L es la suma de las distancias de las muestras sucesivas de la serie de tiempo x , y a es la distancia promedio entre puntos sucesivos de x con N muestras.

2.8.2. Dimensión de caja (Wang, 2005)

La dimensión de caja (BD, ”Box Dimension”) de la señal de una serie de tiempo es definida por la Ecuación (11) (Wang, 2005).

$$BD \cong - \frac{\ln(\sum_{i=1}^{N-1} |x_i - x_{i-1}|) / \Delta t}{\ln(\Delta t)} \quad (2.11)$$

donde N es el número de muestras de la señal de la serie de tiempo x a analizar y Δt es el periodo de muestreo.

2.9. Redes neuronales artificiales

Las redes neuronales pretenden emular a una pequeñísima escala la forma de funcionamiento del sistema nervioso central, específicamente las neuronas que forman el cerebro humano, las cuales son elementos individuales de procesamiento, la información que viaja a través de las neuronas, es modificada por sinapsis, estas pueden ser inhibitoras y excitadoras, estas sinapsis dan el comportamiento de la red neuronal. Las redes neuronales artificiales son el resultado de la investigación del procesamiento en paralelo, en un inicio aplicadas al reconocimiento de patrones, en la actualidad son utilizadas en infinidad de aplicaciones dentro de las cuales se encuentra el monitoreo estructural.

2.9.1. Elementos de una neurona artificial

Las redes neuronales son modelos basados como se mencionó anteriormente en el cerebro humano, es por esto, que es necesaria una elección adecuada de los elementos que componen a dicho modelo beneficia la obtención de una mejor aproximación del modelo original. Los primeros en proponer un modelo de una neurona artificial fueron McCulloch y Pitts. La Figura 2.6 ilustra dicho modelo y la Ecuación (12) muestra la salida de la neurona.

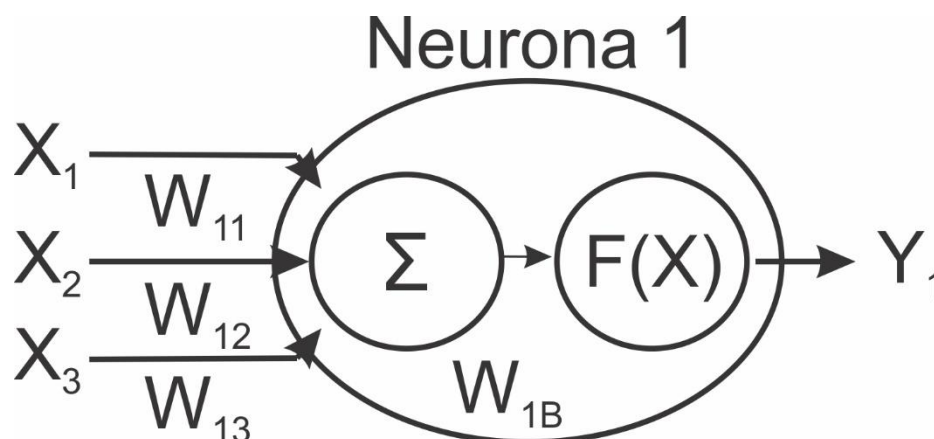


FIGURA 2. 6. NEURONA ARTIFICIAL.

$$Y_1 = F(X_1W_{11} + X_2W_{12} + X_3W_{13} + W_{1B}) \quad (12)$$

donde X_1 , X_2 y X_3 son las entradas, W_{11} , W_{12} , W_{13} y W_{1B} son los pesos o conexiones entre neuronas y $F(X)$ es una función de activación.

Una red neuronal esencialmente está constituida por 3 elementos: Unidades de proceso, conexión entre neuronas y tipos de función de activación. La unidad de proceso consiste en recibir las entradas provenientes del ambiente o en su caso de las células vecinas, calcular su valor de salida y posteriormente enviarla a neuronas vecinas o al ambiente. En los modelos de redes propuestos existen tres tipos de unidades de proceso, las cuales son: capa de entrada, capa oculta y la capa de salida. La primera recibe las señales del ambiente. La capa de salida es la que envía las señales al ambiente de indicando la realización alguna tarea. La capa o capas ocultas también llamadas intermedias son las que se encuentran en el interior de la red y si conexión es solo entre neuronas, es decir, no tiene contacto con el exterior.

La conexión que una a las neuronas dentro de una red neuronal tiene asociado un peso en el cual se encuentra almacenado el aprendizaje. Una neurona recibe el conjunto de señales provenientes de sus neuronas vecinas las cuales brindan información acerca del estado en que se encuentran. Cada una de estas conexiones tiene un peso el cual puede ser positivo o negativo, los pesos positivos corresponden a una excitación, mientras que los negativos corresponden a una inhibición; por lo tanto, un peso igual a cero significa que no hay conexión entre ellas. El procedimiento a seguir para combinar los valores de entrada con los pesos de la conexión según la regla de propagación es el siguiente: se considera que el efecto de cada señal es aditivo, de tal forma que la entrada total o neta que recibe la neurona es la suma del producto de cada señal individual por el peso que conecta ambas neuronas.

Así como es necesario una regla que combine las entradas con los pesos de cada conexión, en necesario también que exista una regla para evaluar la entrada global de la neurona con el fin de determinar el estado en el que se encuentra para determinar un nuevo estado de activación. Cualquier función definida en un intervalo

de posibles valores de entradas, un incremento monotonito, y que tengan un límite superior y un inferior, podrá realizar de forma satisfactorio la función de activación. Dentro de las señales de activación más utilizadas se encuentran las funciones de tipo escalón, funciones lineales y funciones sigmoidales.

2.9.2. Topología de una red neuronal

La topología de una red se refiere a la forma en la que están estructuradas. Esta arquitectura propia de la red consiste en la organización y disposición de las neuronas en forma de capas o agrupaciones que están alejadas de la entrada y la salida.

Cuando se realiza una clasificación de este tipo de redes se hace la subdivisión entre las capas o niveles de neuronas. De aquí surge la clasificación de las mismas en redes monocapa y multicapa.

En términos generales las redes monocapa, como su nombre lo indica, solo poseen una capa o nivel de neuronas agrupadas entre la entrada y la salida. En este tipo de redes las conexiones entre neuronas se establecen de forma lateral, esto significa que trabajan sin capa oculta, utilizando su única capa para lograr el aprendizaje. Las redes monocapa se utilizan normalmente en las tareas relacionadas con lo que se conoce como auto asociación.

Por su parte, las redes de tipo multicapa exceden más de dos niveles, la salida de este tipo de red está dado por el resultado secuencial de las capas anteriores, el resultado de una capa siguiente no puede ser dado sin antes haber calculado el resultado de la capa previa. Normalmente todas las neuronas en este tipo de red reciben señales de entrada de la capa anterior y envían señales de salida a la capa superior. A estas conexiones se les denomina conexiones hacia adelante o *feedforward*. Otra característica de las redes multicapa es que, además de enviar señales hacia adelante, tienen la capacidad de enviar señales de salida a las

entradas de las neuronas de la capa anterior, a estas conexiones se les conoce como conexiones hacia atrás o *feedback*.

2.9.3. Etapa para crear una red neuronal

A continuación, se enumeran los pasos requeridos para crear una red neuronal funcional:

- Crear un conjunto de datos de entrenamiento.
- Crear un conjunto de datos de validación.
- Crear la red.
- Entrenar la red (usar conjunto de entrenamiento).
- Validar la red para averiguar si aprendió y generalizó (utilizar el conjunto de datos de validación).

Una vez que la validación de la red se ha realizado de forma satisfactoria, puede ser utilizada aplicando nuevos datos, posiblemente diferentes al conjunto de datos de entrenamiento y de validación.

2.9.4. Diseño del conjunto de datos de entrenamiento y validación

El conjunto de datos de entrenamiento y de validación debe representar de forma apropiada el experimento, es por eso que se cuenta con las siguientes recomendaciones.

- El conjunto de entrenamiento debe contener los distintos tipos de lecciones que abarque la totalidad del problema real.
- El conjunto de entrenamiento no debe ser demasiado grande, esto produciría un sobre entrenamiento.
- Las redes de mayor tamaño requieren un conjunto de entrenamiento a su vez de mayor tamaño.

- El conjunto de entrenamiento puede obtenerse de una colección muy grande de datos o generando datos aleatorios.
- No se puede utilizar el conjunto de validación para el entrenamiento.

Un síntoma de un sobre entrenamiento es que la red trabaja muy bien con el conjunto de entrenamiento, sin embargo, produce malos resultados al ser tratada con el conjunto de validación.

En numerosas aplicaciones los datos de entrada utilizados en la red deben ser pre-procesados, es decir, que requieren cierta manipulación antes de ser introducidos en la capa de entrada, esto con la finalidad de aprovechar algunas de las particularidades del conjunto de datos. La magnitud u operación elegida para la red puede ser cualquiera ya que dependerá de la aplicación y de las características que el diseñador quiera resaltar en el conjunto de datos.

Capítulo 3: Metodología

3.1. Metodología

En la Figura 3.1 se muestra un diagrama general de la metodología propuesta, la cual está basada en la interpretación de los valores de dimensión fractal obtenidos de la respuesta vibratoria de la estructura para la detección y localización de daños en estructuras truss. El trabajo desarrollado en esta investigación se divide en 2 partes. La primera parte consta del manufacturado de los elementos necesarios para reconfigurar la estructura metálica, la habilitación del elemento excitador y la instrumentación de estructura. Se optó por la reconfiguración de la estructura con la finalidad de obtener un comportamiento más asemejado al de una estructura civil real de mayor tamaño. La segunda parte de la investigación es la parte fundamental del trabajo y consta de la adquisición y procesamiento de las señales de vibración medidas.

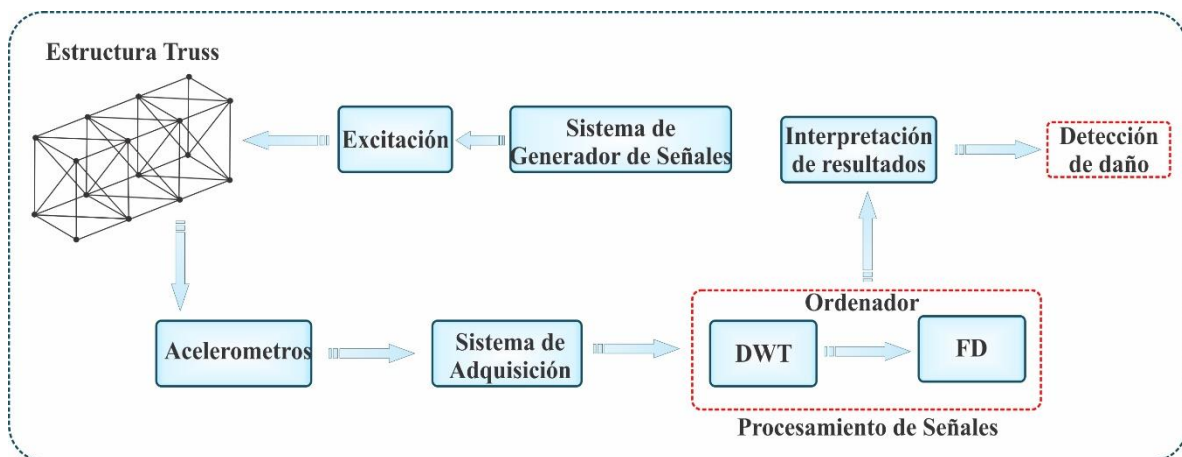


FIGURA 3. 1. METODOLOGÍA PROPUESTA.

La respuesta vibratoria es medida y almacenada en un ordenador a través de una interfaz gráfica, una vez almacenada, las señales son analizadas por la DWT en dos diferentes etapas. La primera etapa es de eliminación de ruido de las señales

capturadas. La segunda etapa de análisis con la DWT consta de la descomposición de las señales con el fin de extraer información a diferentes escalas de frecuencia. Una vez descompuestas las señales de vibración, se analizan mediante los dos diferentes algoritmos de dimensión fractal previamente descritos (KFD y BD). Para evaluar las características estimadas por los algoritmos FD, un análisis estadístico basado en la media y desviación estándar de los valores de FD es realizada con el fin de seleccionar los valores más discriminantes entre las diferentes condiciones de la estructura. Finalmente, un interpretador, red neural, de los valores de FD más discriminantes es empleado para evaluar la condición de la estructura de manera automática permitiendo detectar si la estructura analizada presenta un daño por corrosión y su ubicación.

3.2. Ampliación de la estructura

Con la finalidad de que el comportamiento de la estructura se asemejara a una estructura civil real, la estructura truss original de 5 cubos se expandió a 9 cubos en configuración de un puente. Para lograr esto se maquinan en un torno barras de aluminio. Estas son cortadas y careadas para que estas cumplieran con las medidas establecidas en la fundamentación teórica, teniendo 23in (0.58 m) de longitud las barras cortas y 34.5in (0.87m) las barras largas, tal y como se muestra en la Figura 3.2. Además de del maquinado un roscado de 3/8" in en ambos extremos de la barra.

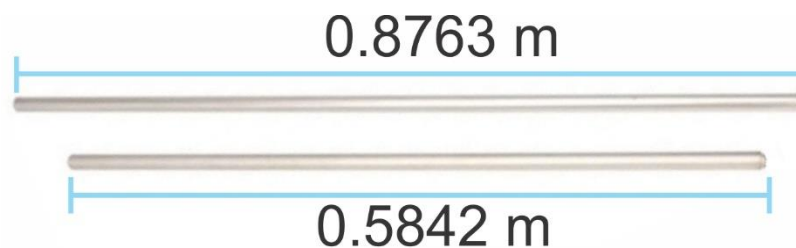


FIGURA 3. 2. ELEMENTOS DE LA ESTRUCTURA.

A la par de la elaboración de las barras, se maquinan los nodos de aluminio, piezas fundamentales de este tipo de estructura al ser a partir de los cuales estas estructuras toman su forma. Estos elementos son elaborados en una fresadora a partir de cubos de material aluminio, dando como resultado nodos de interconexión para la estructura como se muestra en la Figura 3.3.



FIGURA 3. 3. NODO DE LA ESTRUCTURA.

TABLA 3.1. MATERIAL NECESARIO PARA LA ESTRUCTURA.

Pieza	Material	Cantidad de material por pieza	Número de piezas requeridas
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

En la Tala 3.1 se muestra el tipo de material para la fabricación de cada pieza, además del número de ellas requerido. Las piezas espárrago y tuerca son de acero debido a que existen comercialmente.

Una vez que los elementos son maquinados se arma la estructura partiendo de los 5 cubos existentes hasta llegar a 9. La estructura se arma siguiendo el mismo patrón con el que cuenta. La estructura finalizada se muestra en la Figura 3.4.

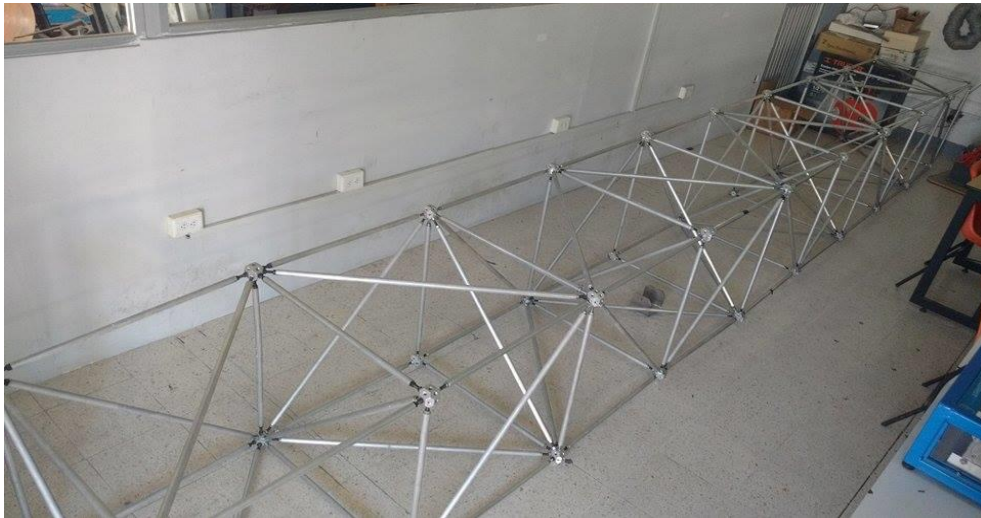


FIGURA 3. 4. ESTRUCTURA AMPLIADA.

Anteriormente la estructura se encontraba empotrada en una pared, sin embargo, para este trabajo se opta por fijar la estructura al suelo y debido a esto es necesario la elaboración de un par de bases que sirven de soporte, así como de elemento de sujeción de la estructura. Estas bases se elaboran de manera que queden robustas, esto con la finalidad de que soportara sin ningún inconveniente las pruebas. La Figura 3.5 muestra una de las bases a utilizar.



FIGURA 3. 5. BASE DE METAL PARA LA ESTRUCTURA.

3.3. Sistema de adquisicion de datos

3.3.1. Sensor

El acelerómetro que se utiliza para la medición de la respuesta vibratoria de la estructura se muestra en la Figura 3.6 Es un acelerómetro tri-axial de la marca KISTLER modelo 8395A10, el cual tiene un rango de medición de ± 10 g con una resolución de 400 mV/g y un ancho de banda de 0-1000 Hz.



FIGURA 3. 6. ACELERÓMETRO 8395A10 MARCA KISTLER.

Este acelerómetro es de alta sensibilidad, este tipo de acelerómetros están especializados en mediciones de vibraciones debido a los bajos niveles de ruido que presenta, lo que permite una medición precisa además de ser capaces de

trabajar en un amplio rango de temperaturas que van desde los $-54\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $125\text{ }^{\circ}\text{C}$. Cuenta con un montaje magnético que facilita el montaje de este y garantiza que la posición en la que se coloque se mantenga estable. La principal ventaja de este acelerómetro es que es un sensor analógico, su salida se entrega en un rango de $\pm 4\text{v}$, lo cual facilita su uso y evita la necesidad de un circuito de acondicionamiento para la lectura de la misma.

La instrumentación de la estructura se realiza con este tipo de acelerómetros. Los acelerómetros cuentan con una base magnética con la cual se adhieren a la parte superior de los nodos de la estructura tal y como se observa en la Figura 3.7.

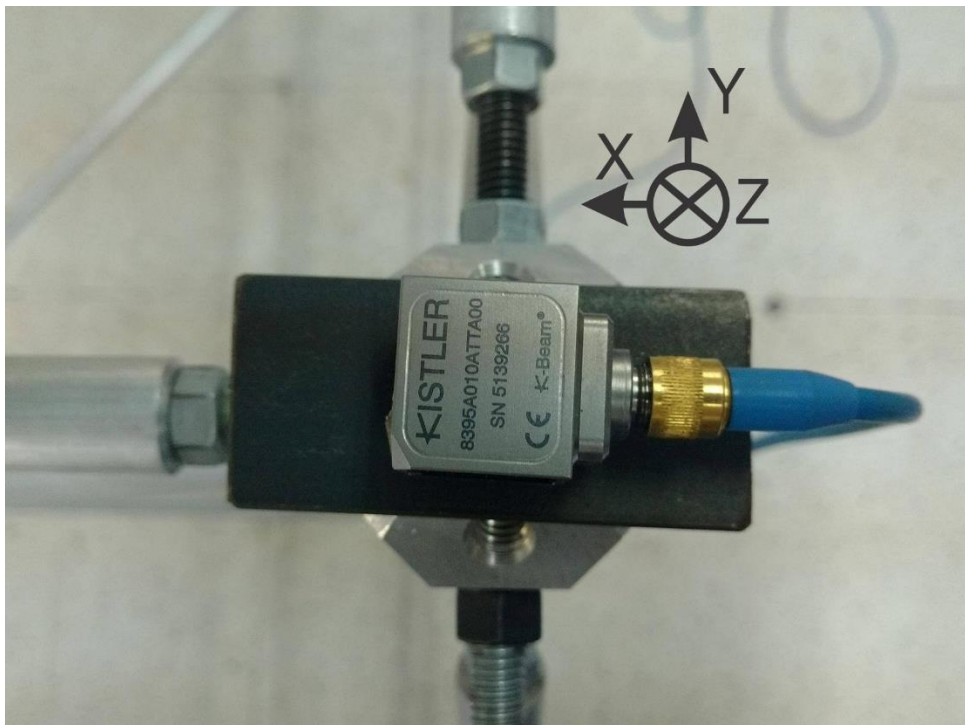


FIGURA 3. 7. MONTAJE DE ACELERÓMETRO.

3.3.2. Tarjeta de adquisición

La tarjeta de adquisición a utilizar es una tarjeta de adquisición de datos National Instruments modelo DAQ NI-USB6211. Esta tarjeta cuenta con un total de 16 canales para entradas analógicas, 2 para salidas analógicas, 4 canales de

entradas, así como 4 salidas digitales, cada una de ellas cuenta con una resolución de 16 bits y pueden trabajar a una frecuencia máxima de muestro de hasta 250 mil muestras por segundo. La tarjeta trabaja mediante el software LABVIEW y esta se puede observar en la Figura 3.8.



FIGURA 3. 8. TARJETA DE ADQUISICIÓN NI-USB 6211.

3.3.3. Software de control para adquisicion de señales

La adquisición de las señales de vibración medidas por los acelerómetros está controlada mediante una interfaz gráfica elaborada en el software LabVIEW. La interfaz desarrollada puede observarse en la Figura 3.9, en esta se pueden observar 3 gráficas en donde se las señales adquiridas en tiempo real son desplegadas, además se observan dos botones en la parte superior derecha con los cuales se inicia la adquisición de las señales y el almacenamiento de las mismas. En la parte inferior de la interfaz se encuentran los diferentes valores de configuración para la realización de la adquisición como lo son el periodo de muestreo, el número de muestra a almacenar, y tiempo de duración de la adquisición.

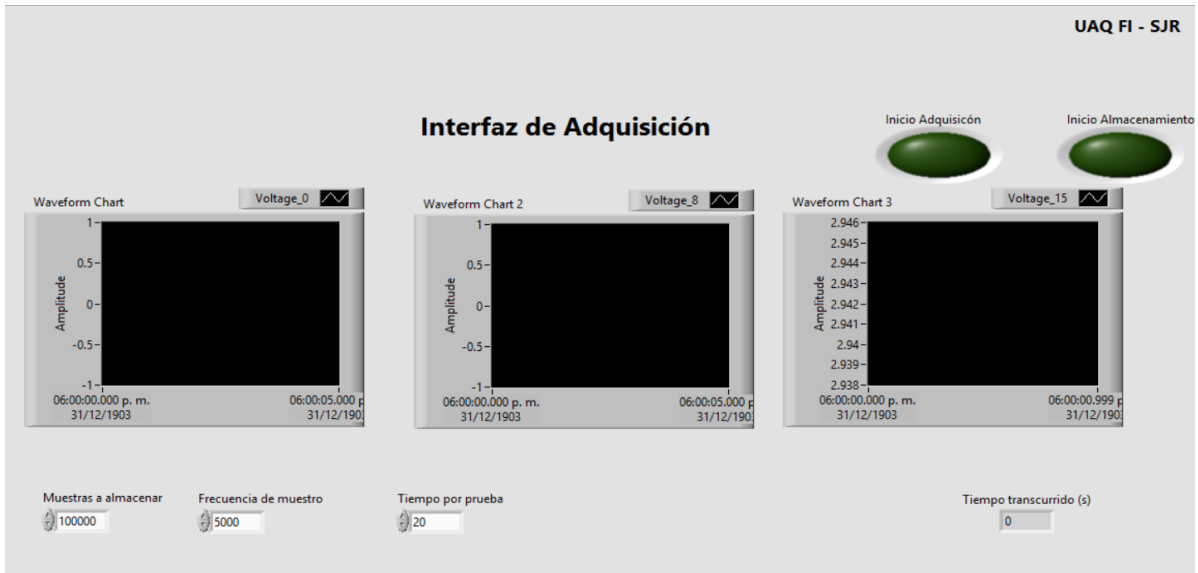


FIGURA 3.9. INTERFAZ GRÁFICA DE ADQUISICIÓN.

Una vez concluido el tiempo de adquisición, la interfaz genera un archivo de texto (.txt) automáticamente en donde se almacenan los datos de cada eje (x,y,z) de los 5 sensores. Se genera 1 archivo de texto por prueba y a partir de estos se realiza el procesamiento y análisis de las señales de vibración.

3.4. Sistema de excitación

La excitación inducida a la estructura está regida a partir de una interfaz gráfica elaborada en el software LabVIEW, en la cual se le indica el archivo de texto en el cual se encuentra la señal a reproducir, esta señal es mostrada en la gráfica central. El inicio de la excitación se rige a partir del botón que se encuentra en la parte inferior de la gráfica, y una vez es accionado, la señal es enviada a un amplificador lineal que a su vez alimenta al excitador shaker, dando como resultado la excitación de la estructura. La detención del sistema se realiza mediante la activación del botón con la etiqueta “STOP” que se encuentra en la parte inferior derecha. La interfaz de excitación del sistema se muestra en la Figura 3.10.

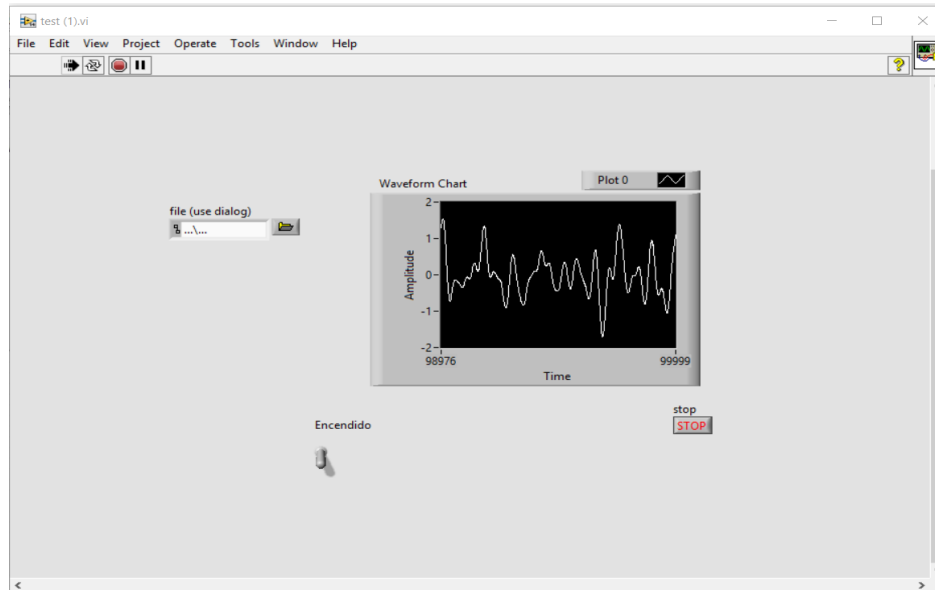


FIGURA 3.10. INTERFAZ DE CONTROL DE EXCITACIÓN.

3.4.1. Elemento excitador

El sistema de excitación o shaker empelado es de la marca Labworks modelo ET-126. Este shaker es un shaker portátil que es ideal para todo tipo de pruebas generales de vibración (ver Figura 3.11). Su pequeño tamaño (16.5 m x 12.192 cm x 10.795 cm) y peso (5 kg) lo hacen ideal para su uso en investigación y pruebas modales. Cuenta con un rango de frecuencia de fuerza completa extendida de hasta 14 kHz y 11.5 kgf de capacidad de fuerza.



FIGURA 3.11. LABWORKS ET-126B SHAKER ELECTRODINÁMICO.

Como parte de la instrumentación de la estructura, el elemento excitador es fijado al suelo y se realiza una conexión entre este y la estructura. El shaker es acoplado a la estructura mediante una barrilla roscada conectada a un nodo central de la estructura lo que permite la propagación del movimiento, esto con la finalidad de inducirle movimiento a la estructura a partir de la señal de excitación generada en la interfaz. La unión del elemento excitador y la estructura es mostrada en la Figura 3.12.



FIGURA 3.12. ELEMENTO EXCITADOR ACOPLADO A LA ESTRUCTURA.

3.4.2. Amplificador

El amplificador utilizado para alimentar el shaker es un amplificador de la marca Labworks modelo PA-138. Este amplificador es principalmente utilizado en pequeños sistemas de vibración y dentro de las características que posee se encuentran: (1) la salida presenta bajos niveles de ruido y distorsión, (2) cuenta con protección contra sobrecorriente y (3) el acople directo de entradas y salidas permite la operación en DC. Además, cuenta con dos modos de operación, como fuente de corriente (0-16A) o de voltaje (0-40V). El amplificador lineal a utilizar se muestra en la Figura 3.13.



FIGURA 3.13. AMPLIFICADOR LABWORKS PA-138.

3.5. Procesamiento de señales de vibración

La DWT y los algoritmos de FD permiten monitorear la condición estructural al ser este análisis capaz de extraer características de un daño presente en la respuesta vibratoria de la estructura. Como se sabe, el daño estructural produce cambios en la respuesta de vibración de la estructura. Por esta razón, el análisis de la respuesta vibratoria se considera una herramienta útil para realizar tareas de monitoreo estructural. El procesamiento propuesto es realizado en el software de programación MATLAB y se compone de la integración de los algoritmos de DWT y FD para la detección y localización de daño en estructuras truss.

Una vez se adquieren las señales correspondientes a la respuesta vibratoria de la estructura, las señales de vibración son analizadas mediante la DWT. Como se sabe, las señales de vibración generalmente contienen niveles de ruido indeseables, es por eso que una de las tareas para las que se utiliza la DWT es para eliminar componentes de ruido presentes en la señal a frecuencias altas. Si bien la DWT es utilizada para eliminar ruido en la señal, la principal aplicación que se le da es el extraer información de la señal al ser está descompuesta en diferentes escalas de frecuencia. Como se menciona anteriormente, la descomposición de la señal se realiza varias veces, llegando a un nivel 6 de descomposición. Se opta por este nivel de descomposición debido a que la frecuencia de la señal de excitación se planteó que sería 0-100Hz y por esto se deseaba contar con diferentes escalas de frecuencia en ese rango. Adicionalmente, una ondoleta madre conocida como

Daubechies orden 44 es empleada, ya que esta permite un análisis correcto de la señal sin introducir variaciones en la señal descompuesta.

Tanto la aproximación como el detalle de los niveles 5 y 6 son seleccionados como objeto de análisis debido a que estos reflejan la mayor parte de la señal de excitación. La Figura 3.14 muestra una representación del árbol de descomposición, así como los nodos de interés.

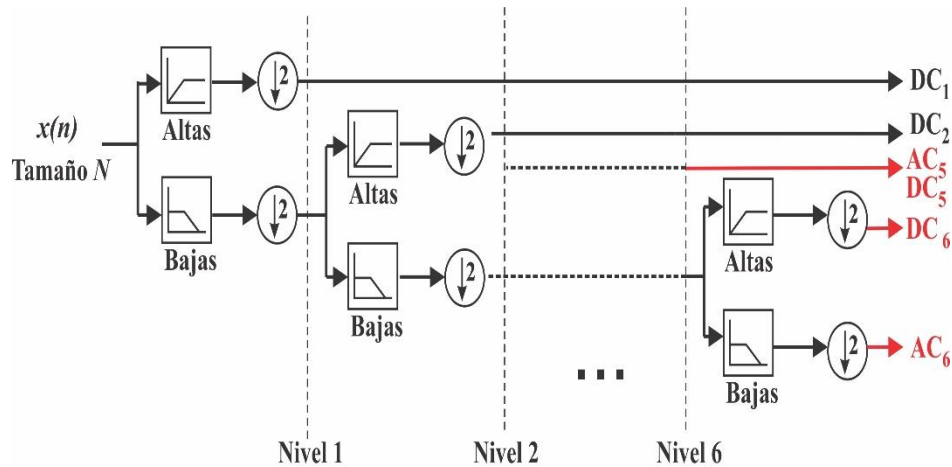


FIGURA 3.14. NODO DEL ÁRBOL DE DESCOMPOSICIÓN DE INTERÉS.

Una vez realizada la descomposición de la señal, los nodos seleccionados (aproximación y detalle del nivel 5 y 6) son analizados cada uno por medio de los dos algoritmos de dimensión fractal descritos anteriormente (KFD y BD). Este proceso se realiza para cada uno de los ejes de cada sensor y se realiza bajo las diferentes condiciones de daño de la estructura, este proceso se ve representado en la Figura 3.15.

Concluido este proceso, las características estimadas por los algoritmos FD de las condiciones saludables y de daño se someten a un análisis estadístico que puede detectar si la estructura analizada presenta un daño por corrosión.

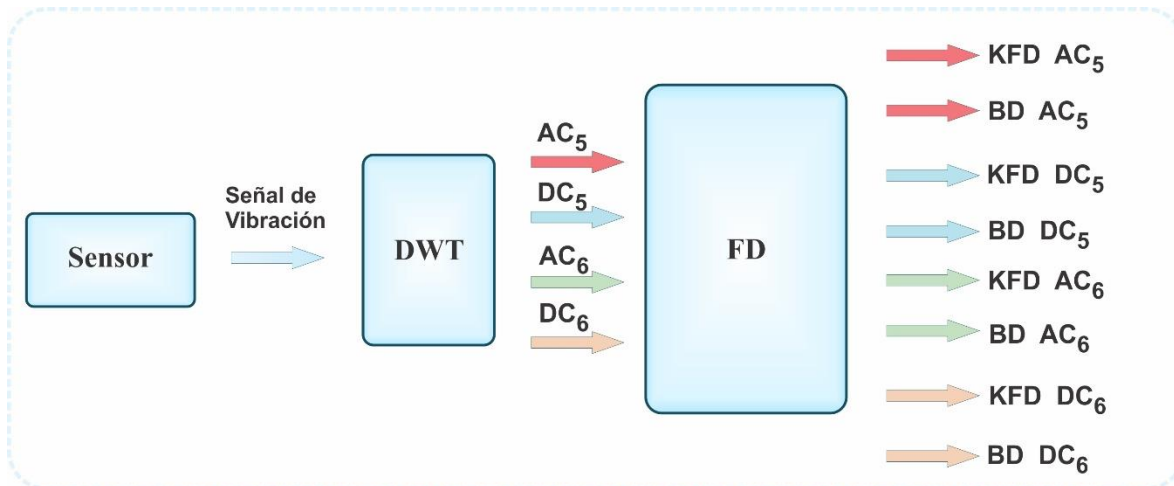


FIGURA 3. 15. DIAGRAMA A BLOQUES DEL PROCESAMIENTO.

Posteriormente y una vez que el análisis estadístico demuestra si el procesamiento propuesto es viable la detección del daño, se propone la implementación de una red neuronal artificial para la clasificación de la condición estructural buscando con esto lograr la localización por área del daño en la estructura.

Se propone utilizar una red neuronal sencilla, en este caso se opta por una red de tipo Feedforward en donde las entradas sean las señales provenientes de los sensores y como salidas las diferentes ubicaciones del daño. La red propuesta consta de 10 entradas y salidas, así como 10 neuronas en la capa oculta. La Figura 3.16 ilustra la topología típica de una red neuronal del tipo Feedforward.

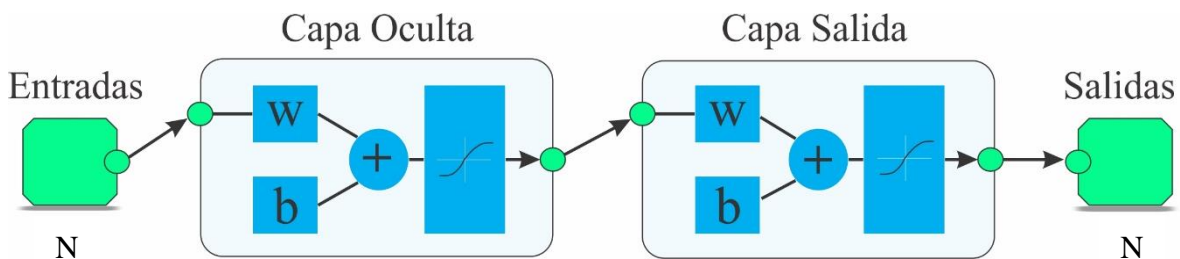


FIGURA 3. 16. EJEMPLO DE TOPOLOGÍA DE RED FEEDFORWARD.

Capítulo 4: Pruebas y Resultados

4.1. Puesta de experimento

La puesta del experimento se muestra en la Figura 4.1, donde se enmarcan los elementos principales. La estructura es elemento primordial de la experimentación, es una estructura reconfigurable de aluminio de tipo truss de 9 cubos fija en ambos extremos al suelo representando un puente. Sobre esta se pueden observar la localización de los acelerómetros empleados para monitorear su comportamiento. Los acelerómetros empleados son de la marca KISTLER modelo 8395A10, cuentan con un ancho de banda de 0 hasta 1000 Hz y una capacidad de medida de $\pm 10g$. Así mismo se puede observar en la parte inferior de la estructura el elemento excitador que se encuentra acoplado a la misma. Para la excitación de la estructura, un shaker electrodinámico de Labworks modelo ET127 alimentado por un amplificador lineal de Labworks modelo PA-141 son empleados como fuente de excitación. Simultáneamente, el amplificador es alimentado con una señal proveniente de un ordenador, generada por la interfaz de excitación elaborada en el software LabVIEW. Dicha señal de excitación fue generada en el software MATLAB y almacenada en un archivo de texto. La señal de excitación se compone de una señal de ruido Gaussiano con frecuencias entre 0 y 100 Hz, debido a que este asemeja una excitación ambiental natural. Las señales obtenidas son adquiridas mediante una tarjeta de adquisición de National Instruments modelo DAQ NI-USB6211 que cuenta con 16 canales y una resolución de 16 bits. El almacenamiento de las señales adquiridas se realiza en el ordenador mediante una interfaz gráfica elaborada en el software LabVIEW. La frecuencia de muestreo fijada es de 5 kHz y la duración de la prueba consistió en 20 segundos, lo que da un total de 100,000 muestras por cada eje por prueba. Se realizaron 10 pruebas con la condición sana de la estructura, posteriormente se procedió a realizar 10 pruebas con el elemento dañado ubicándolo en el cubo 1, seguidas por 10 pruebas ubicando

el daño en el cubo 2, y así sucesivamente hasta concluir con 10 pruebas en el cubo 9. El elemento que se sustituía en cada cubo correspondía al elemento que se encuentra en la parte superior del frente de la estructura, entre los nodos en los que fueron colocados los sensores.

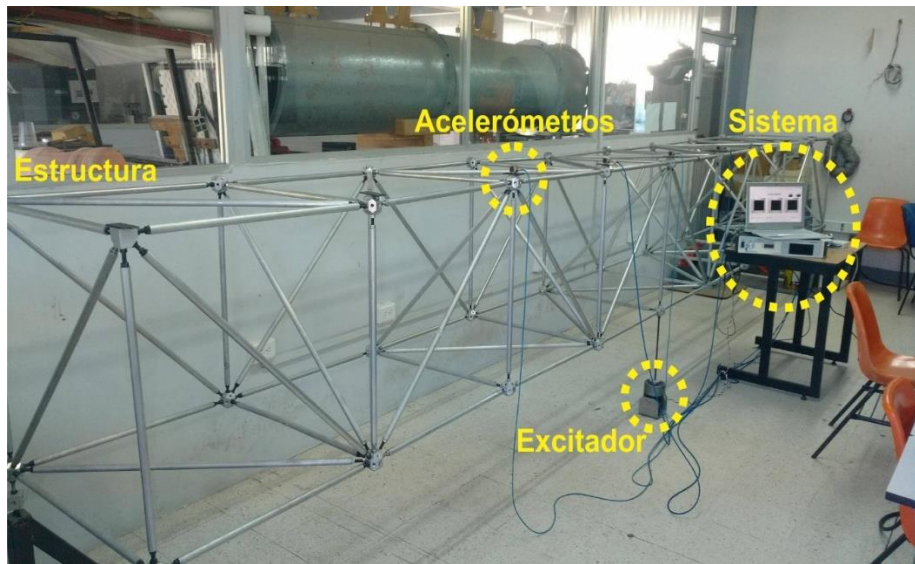


FIGURA 4. 1. SISTEMA DE MONITOREO ESTRUCTURAL.

Los acelerómetros son montados sobre cada nodo tal y como se muestra en la Figura 4.2. Debido a que solo se contaban con 5 sensores y la estructura cuenta con 10 nodos, se optó por realizar 2 mediciones por prueba, la primera colocando los 5 sensores en los nodos 1 a 5 y posteriormente otra medición con los 5 sensores ubicados en los nodos 6 a 10.

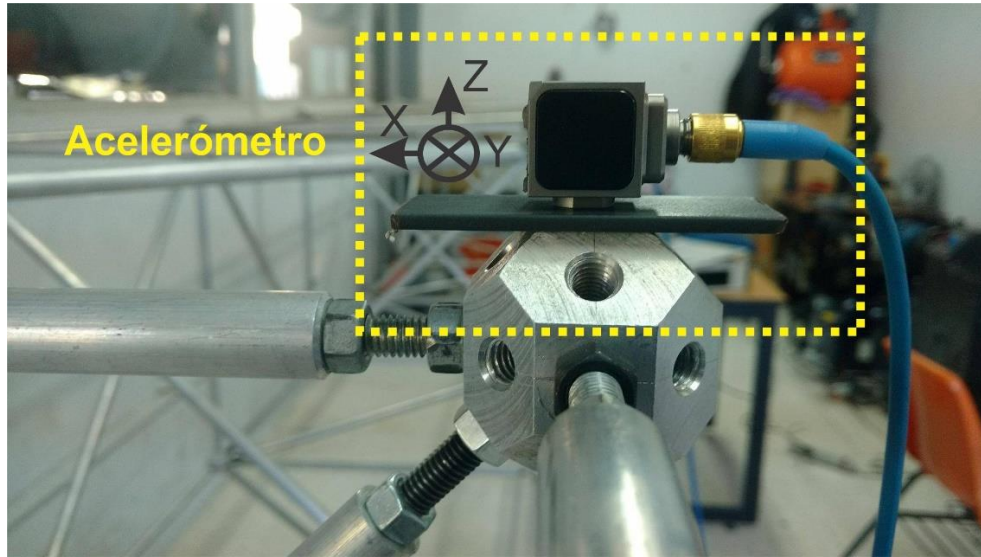


FIGURA 4. 2. MONTAJE DE ACELERÓMETRO EN LA ESTRUCTURA.

Las Figura 4.3 y Figura 4.4 muestra el sistema de adquisición y excitación, en la primera se puede observar la interfaz de adquisición ejecutándose en el ordenador, además se muestra el amplificador lineal que se encuentra conectado al shaker electrodinámico. Por su parte la Figura 4.4 muestra la tarjeta de National Instruments utilizada, así como la fuente de voltaje necesaria para la alimentación de los sensores.

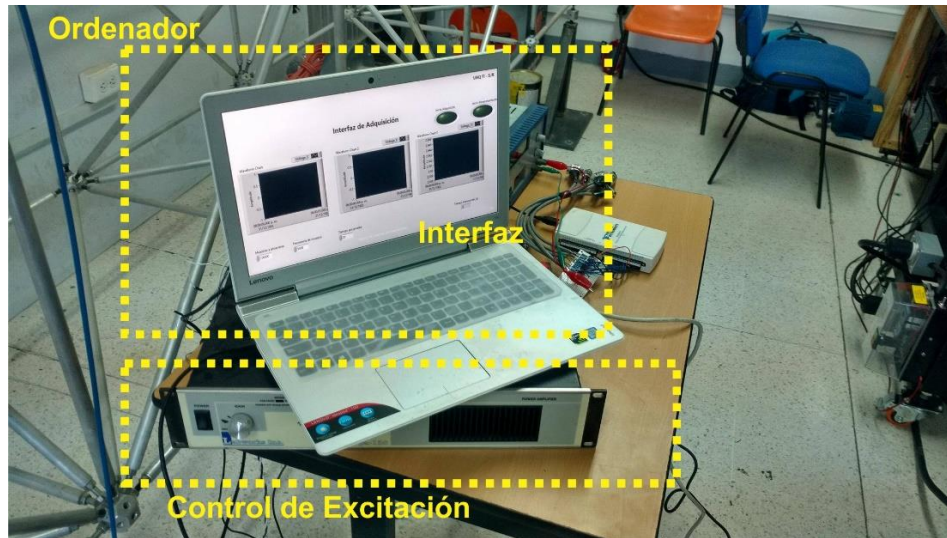


FIGURA 4. 3. SISTEMA DE EXCITACIÓN Y SENSADO.

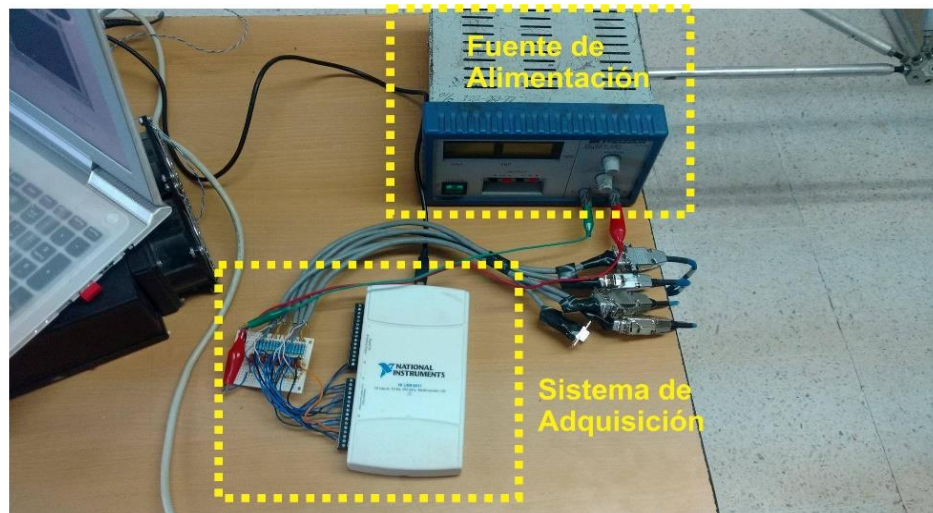


FIGURA 4. 4. SISTEMA DE SENSADO.

4.2. Caso de estudio

Como se mencionó en la metodología, el caso de estudio a analizar es cuando la estructura presenta un daño producto de la corrosión.

La corrosión es uno de los mecanismos más dañinos en muchas de las estructuras civiles, ya que una reducción del material con la que está construida la estructura es producida. Debido a que la corrosión se produce normalmente durante un periodo largo de tiempo, el proceso de corrosión en la barra fue acelerado. El proceso de corrosión se realiza al sumergir ambos extremos de la barra en ácido clorhídrico, el resultado de este proceso es muy similar a la corrosión uniforme que ocurre típicamente en estructuras civiles. La Figura 4.5 muestra la comparación entre una barra sana y una que presenta daño por corrosión. Un elemento sano cuenta con un diámetro de 19 mm mientras que el elemento dañado cuenta con 11 mm de diámetro en los extremos, siendo este un caso de corrosión grave.

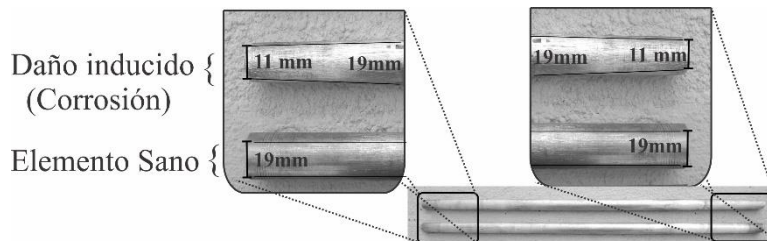


FIGURA 4. 5. ELEMENTO DE DAÑO GENERADO.

En este trabajo, los efectos de un elemento con corrosión son estudiados en la estructura al ser remplazado un elemento sano por el que presentaba el daño emulado a lo largo de los diferentes cubos de la estructura. Inicialmente se realizaron las muestras en la estructura en estado sano tal y como se ilustra en la Figura 4.6.

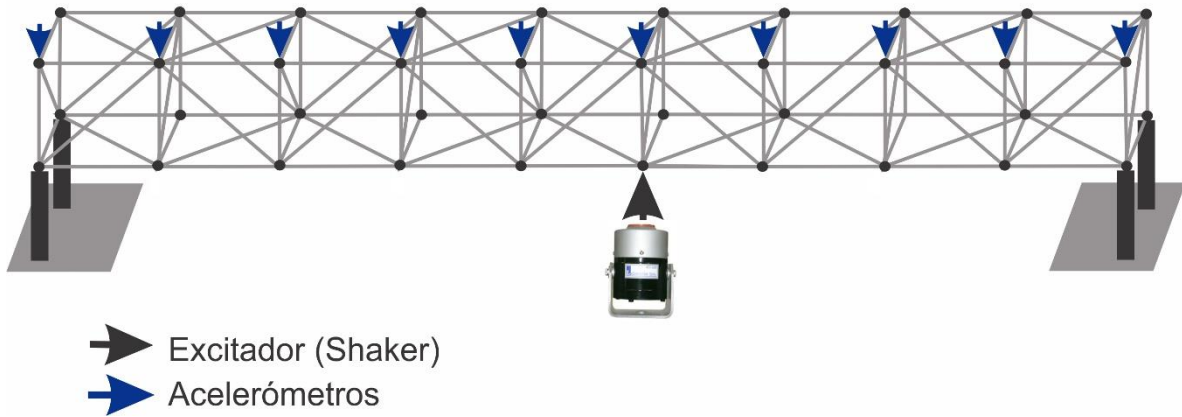


FIGURA 4. 6. ESTUDIO DE LA ESTRUCTURA EN ESTADO SANO.

Una vez tomadas las muestras de la estructura cuando esta se encuentra sana, se procede a tomar las mediciones correspondientes de la misma cuando esta presenta un daño, para esto como se mencionó se reemplaza un elemento sano por el elemento dañado. Esto se ilustra en la Figura 4.7.

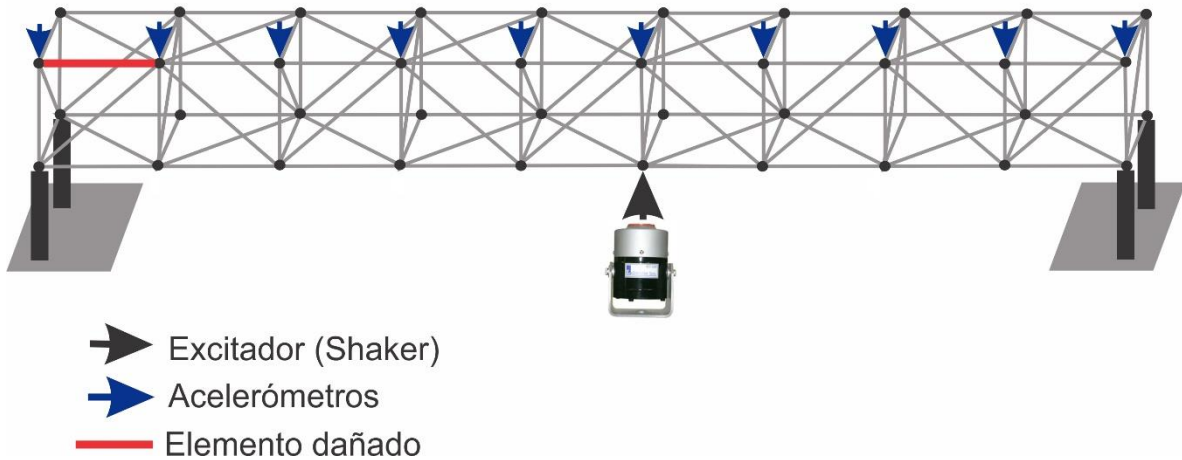


FIGURA 4. 7. ESTUDIO DE LA ESTRUCTURA ANTE LA PRESENCIA DE DAÑO POR CORROSIÓN.

El elemento reemplazado corresponde al elemento frontal superior de cada cubo. Se opta por reemplazar este elemento debido a la ubicación de los sensores

que se encuentran montados sobre los nodos frontales superiores de la estructura. Para cada cubo de la estructura se repite el proceso en el que es sustituido un elemento sano por uno dañado, esto se ilustra en la Figura 4.8. De esta manera se obtienen las muestras para el caso de estudio de la estructura ante la presencia de un daño por corrosión en distintas ubicaciones.

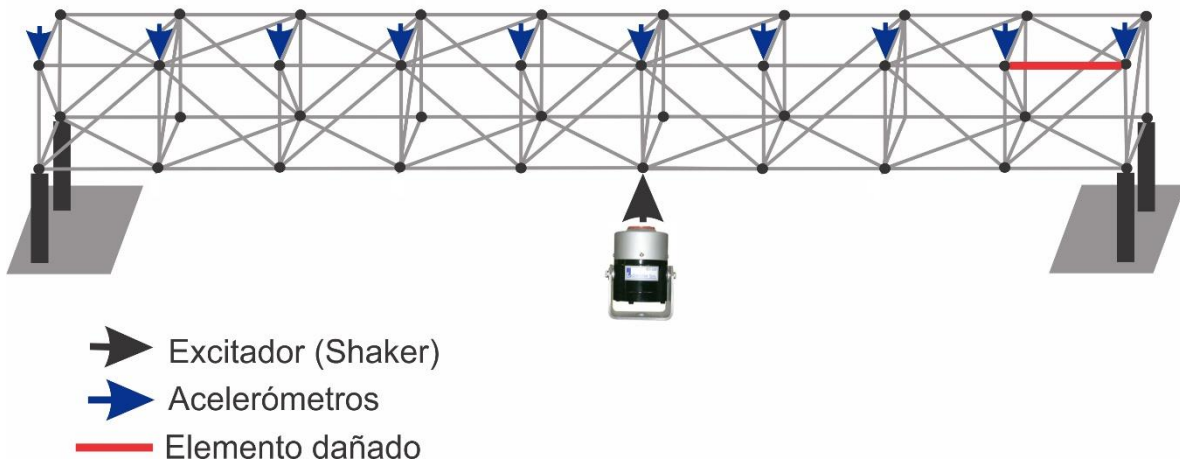


FIGURA 4. 8. ESTUDIO DE LA ESTRUCTURA ANTE LA PRESENCIA DE DAÑO EN DISTINTAS UBICACIONES.

4.3. Resultados

Como primer resultado se tiene la comprobación del correcto funcionamiento del sistema de sensado. Pudiendo almacenar simultáneamente 100,000 muestras por cada uno de los 15 canales, correspondientes a los ejes x, y y z de cada uno de los 5 sensores. En la Figura 4.9 se muestra las señales adquiridas de los tres ejes de un acelerómetro.

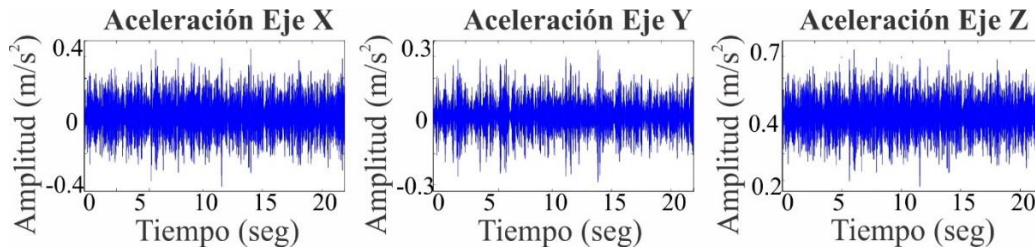


FIGURA 4. 9. SEÑALES DE VIBRACIÓN MEDIDAS.

Como observa en la Figura 4.9, las señales de vibración almacenadas corresponden en número de muestras a las adquiridas durante la prueba, siendo 100,000 muestras por prueba a una frecuencia de muestro de 5 kHz equivalentes a 20 segundos de duración. Una vez realizada la comprobación del correcto funcionamiento del sistema de sensado, se procede a las 20 mediciones de la respuesta vibratoria de la estructura por cada condición de la estructura. A continuación, en la Figura 4.10 se muestran las señales adquiridas de la respuesta vibratoria de la escultura en estado sano y ante la presencia de daño. En la parte superior se muestran de forma representativa las señales por eje correspondientes a un sensor ante la condición sana de la estructura, mientras que en la parte inferior se muestran las correspondientes a los tres ejes del sensor ante una condición de daño.

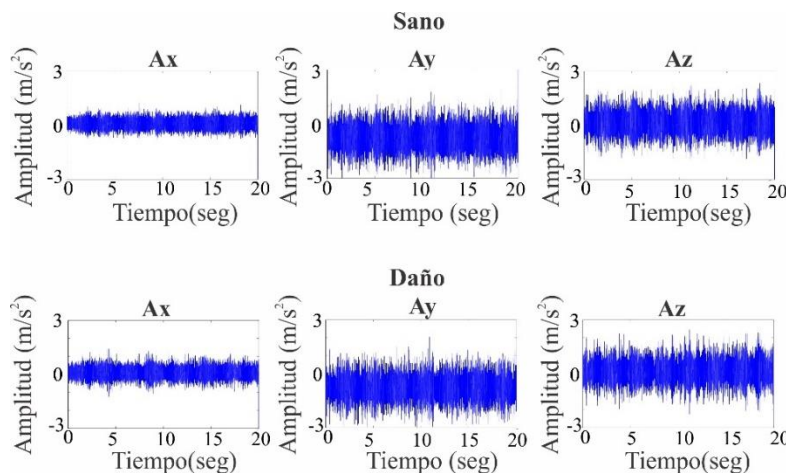


FIGURA 4. 10 . SEÑALES DE VIBRACIÓN CAPTURADAS DE LA ESTRUCTURA SANA Y ANTE LA PRESENCIA DE DAÑO POR CORROSIÓN.

Como se observa en la Figura 4.10, es imposible determinar a simple vista si la estructura presenta un daño o no. Es por eso que se recurre como primer parte de procesamiento a la descomposición mediante la DWT. La Figura 4.11 muestra la señal de la aproximación del nivel 5 para cada eje en ambas condiciones.

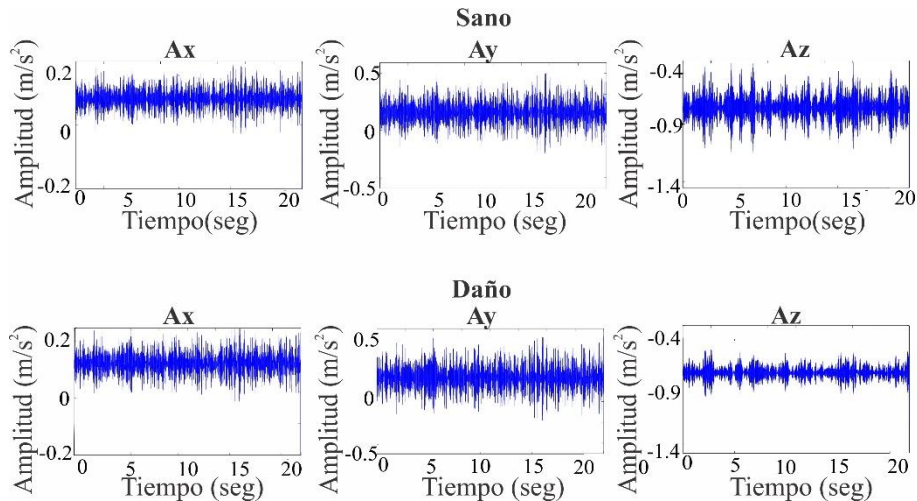


FIGURA 4. 11. APROXIMACIÓN NIVEL 5 PARA LA CONDICIÓN SANOS Y CON DAÑO POR CORROSIÓN.

Si bien para este caso existen ciertos cambios que se pueden visualizar en la gráfica de dichas señales, sigue siendo imposible diagnosticar si la escultura presenta un daño y mucho menos a partir de estas señales determinar la localización del mismo. Es por eso la necesidad de complementar dicho procesamiento, la aplicación de los algoritmos de dimensión fractal a estas señales supone la obtención de buenos resultados para la tarea. Ambos algoritmos (Katz y Box Counting) fueron aplicados a las señales de aproximación y detalle para los niveles 5 y 6 de la descomposición. Una vez obtenidos los valores de, ambos algoritmos para cada aproximación y detalle de ambos niveles de cada eje perteneciente a cada uno de los sensores, se procedió a realizar un análisis estadístico realizando la aplicación de una función de densidad mediante una distribución Gaussiana. Se optó por este tipo de análisis estadístico debido a que en la literatura revisada se recomienda este tipo de señales. Los valores de media y desviación estándar fueron calculados para cada prueba y después de un extenso

análisis se observó que la aproximación de nivel 5 en el eje z mostraba mejores resultados para el propósito de detección y la localización del daño. A continuación, se muestran las funciones de densidad para cada sensor en el nodo y eje mencionado. La Figura 4.12 muestra las funciones pertenecientes a los valores obtenidos a partir del algoritmo de Katz. Por su parte la Figura 4.13 muestra las funciones correspondientes a los valores obtenidos del algoritmo de Box Counting.

En la Figura 4.12 se observa que las campanas Gaussianas se encuentra traslapadas en las funciones de todos los sensores, esto nos indica que desafortunadamente estos valores no son útiles para la detección del daño en la estructura debido a que es imposible discernir entre una estructura con daño y una sin daño, sin embargo, a diferencia de lo ocurrido con los valores del algoritmo de Katz, los valores obtenidos del algoritmo de Box Counting presentan resultados satisfactorios al contar con diversas funciones sin traslape entre la condición de daño y la condición sana de la estructura, esto se observa en la Figura 4.13, de color rojo se encuentra representada la condición sana de la estructura mientras que los demás colores representan las distintas localización del daño a lo largo de la estructura.

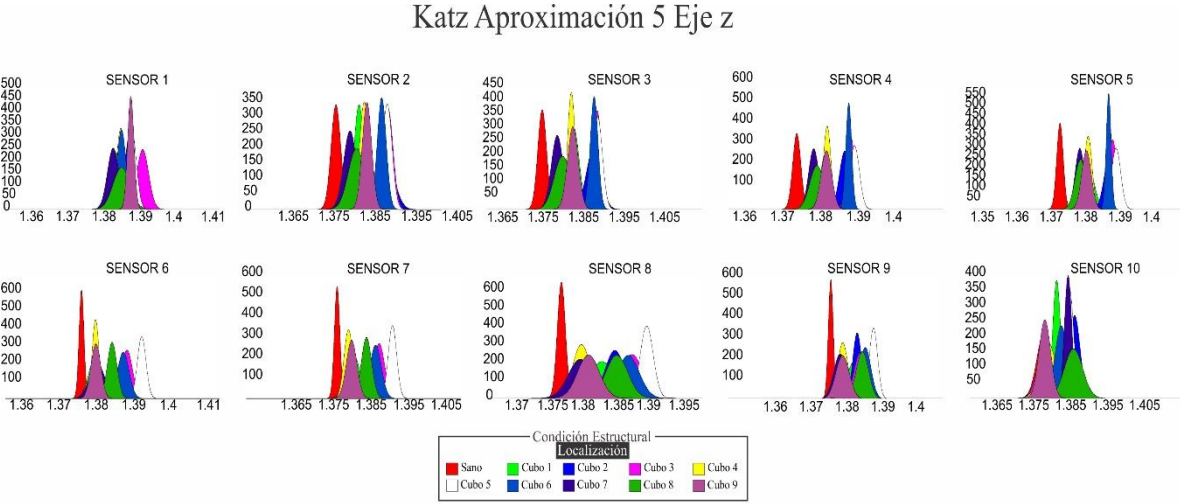


FIGURA 4. 12. FUNCIONES DE DENSIDAD PARA VALORES KATZ APROXIMACIÓN 5 EJE Z.

Box Counting Aproximación 5 Eje z

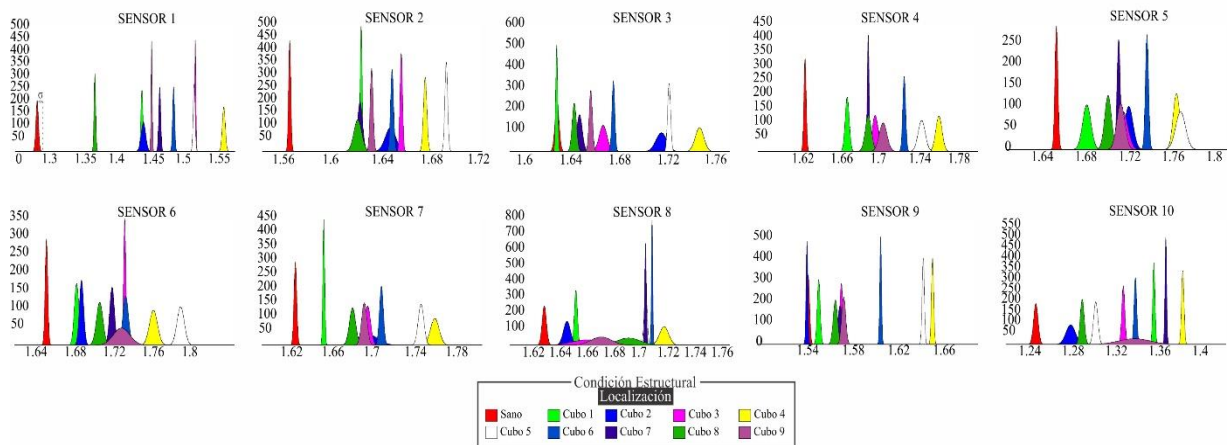


FIGURA 4. 13. FUNCIONES DE DENSIDAD PARA VALORES BOX COUNTING APROXIMACIÓN 5 EJE Z.

Los valores de media y desviación estándar para cada condición empleando el algoritmo de Box dimensión son resumidos en la Tabla 4.1 y Tabla 4.2, respectivamente:

Tabla 4.1. Valores de media calculados

Ubicación	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 5	Sensor 6	Sensor 7	Sensor 8	Sensor 9	Sensor 10
SANO	1.2948039	1.56567714	1.63665943	1.63190015	1.66037098	1.65695035	1.63176114	1.63332939	1.54822944	1.24945532
CUBO1	1.45174436	1.62361478	1.63637308	1.6750518	1.68825529	1.68787722	1.65926359	1.65678892	1.55744957	1.35857751
CUBO2	1.45396636	1.64737794	1.72238489	1.70442371	1.72673858	1.69286402	1.70119345	1.65018427	1.54714623	1.28167918
CUBO3	1.53177413	1.65613043	1.67450675	1.70372102	1.72138809	1.73716673	1.70162124	1.66560195	1.57741414	1.33032521
CUBO4	1.57443444	1.67551086	1.75369864	1.7689339	1.77046451	1.76664085	1.76655232	1.72222592	1.65764713	1.38530271
CUBO5	1.52999759	1.69258889	1.72868976	1.75130896	1.77421349	1.79447419	1.75322091	1.70856108	1.64944276	1.30481861
CUBO6	1.49923362	1.64866596	1.68291746	1.7334072	1.74341582	1.73813253	1.71495596	1.7133137	1.61195403	1.34149236
CUBO7	1.47844479	1.62270195	1.65512324	1.69654999	1.71745937	1.72419316	1.687027	1.7084465	1.57634376	1.36959474
CUBO8	1.38123862	1.62085867	1.65079974	1.69666231	1.70776343	1.711538	1.687027	1.69600659	1.57211196	1.29232691
CUBO9	1.46633373	1.63207172	1.66435303	1.71182872	1.71941569	1.73394693	1.69836086	1.67569272	1.57946013	1.34064204

Tabla 4.2. Valores de desviación estándar calculados

Ubicación	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 5	Sensor 6	Sensor 7	Sensor 8	Sensor 9	Sensor 10
SANO	0.00580302	0.00271567	0.00511757	0.00362097	0.0041081	0.00407054	0.00402749	0.00480095	0.00368358	0.0062411
CUBO1	0.0048267	0.00240231	0.00235024	0.00621392	0.01137531	0.00699719	0.00267361	0.00345282	0.00391071	0.00313224
CUBO2	0.01021626	0.01270226	0.01335152	0.01320572	0.01178122	0.00665699	0.03000703	0.00790049	0.00246352	0.01298975
CUBO3	0.00265903	0.00306748	0.00954466	0.00933985	0.01338598	0.0034208	0.0085445	0.03485617	0.00416715	0.00435661
CUBO4	0.00671679	0.00408407	0.01051008	0.00955347	0.00908348	0.0123426	0.01249944	0.01020637	0.00293425	0.00346955
CUBO5	0.0044121	0.0033862	0.00367628	0.01090044	0.01344812	0.01122879	0.0081873	0.0033664	0.00295509	0.006012
CUBO6	0.00459601	0.00368844	0.00353495	0.00450539	0.00442023	0.00878088	0.00568838	0.00151573	0.00235835	0.00382378
CUBO7	0.00461845	0.00606628	0.00678098	0.00290868	0.00461321	0.00741678	0.00902948	0.00185967	0.00653032	0.00238078
CUBO8	0.00381973	0.00946724	0.00519678	0.00948358	0.00941751	0.01002975	0.00902948	0.02633764	0.00571409	0.00567687
CUBO9	0.00269063	0.00362637	0.00411057	0.01183833	0.01106153	0.0250891	0.0078827	0.02309696	0.00533954	0.04412401

Una vez que se determinó que la aproximación del nivel 5 del eje z con el algoritmo de Box dimensión tiene resultados favorables o los menos traslapes entre las Gaussianas, se procedió a realizar la implementación de la red neuronal, para esto se optó como se comentó antes por una estructura Feedforward debido a la simplicidad de la misma. Se fijó como 10 el número final de neuronas en la capa oculta. Además, se determinó que tendría 10 entradas correspondiendo a los sensores colocados en los 10 nodos de la estructura, así como 10 salidas, esto con la finalidad de abarcar las 10 condiciones presentes, la condición sana de la estructura y las 9 restantes al ubicar la barra dañada en cada uno de los 9 cubos de la misma. En la Figura 4.14 es mostrada la red neuronal implementada.

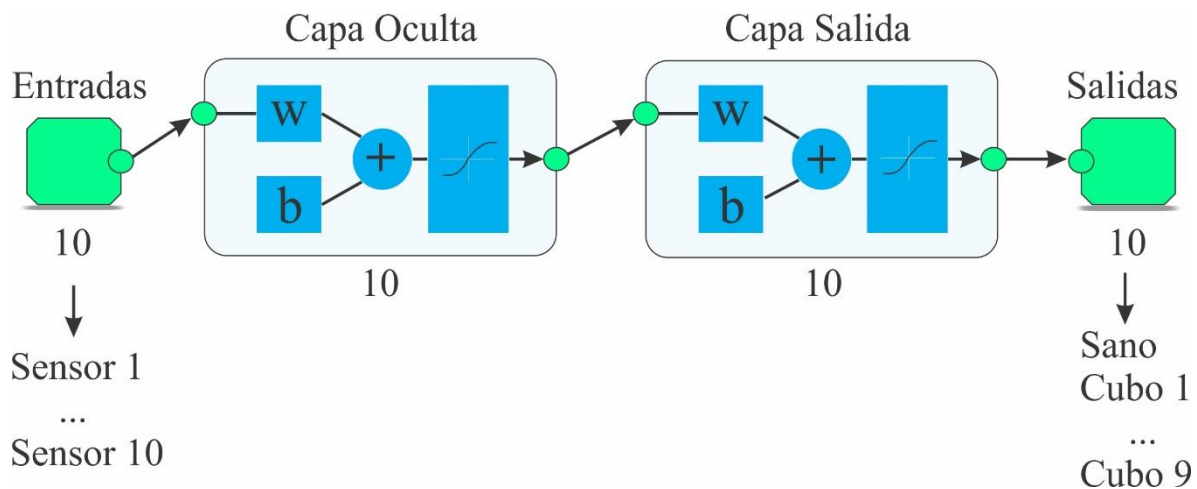


FIGURA 4. 14. TOPOLOGÍA RED FEEDFORWARD IMPLEMENTADA.

El entrenamiento de la red se realizó introduciendo un conjunto de 100 valores aleatorios por cada sensor para cada condición, estos valores aleatorios se generaron a partir de la media y desviación calculada para cada uno de ellos anteriormente. Esto buscando obtener un entrenamiento con valores que tengan una distribución similar a los datos reales obtenidos del análisis. La Figura 4.15 muestra la matriz de confusión obtenida del entrenamiento.



FIGURA 4. 15. MATRIZ DE CONFUSIÓN DE ENTRENAMIENTO.

Como se puede observar el entrenamiento entrego buenos resultados al tener una efectividad del 100% en la clasificación de los resultados. Una vez que se realizó el entrenamiento de la red de forma exitosa, se procedió a validar la red con los datos reales.

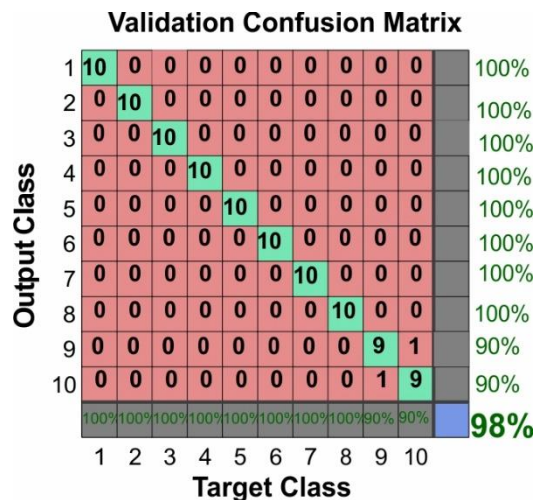


FIGURA 4. 16. MATRIZ DE CONFUSIÓN DE VALIDACIÓN.

La Figura 4.16 muestra la matriz de confusión con los resultados obtenidos de dicha validación. Como se observa en la matriz de confusión de la validación, la red cuenta con un 100% de eficiencia para identificar si la estructura está sana o

presenta un daño, pero un 98% de efectividad al tratar de localizar la zona de daño ya que confunde la ubicación en dos pruebas. Por lo tanto, la metodología se puede considerar una metodología capaz de evaluar la condición de la estructura ante un daño por corrosión de manera eficiente.

Capítulo 5: Conclusiones y Prospectivas

5.1. Conclusiones

A lo largo de este trabajo de tesis se presenta una metodología para la detección y localización de daños estructurales (corrosión) por medio del procesamiento de la respuesta vibratoria empleando como principal herramienta de análisis el uso en conjunto de dos algoritmos de dimensión fractal y la transformada wavelet. La experimentación demuestra el buen comportamiento de la metodología propuesta al momento de evaluar la condición de la estructura, pudiendo discernir entre una estructura sana y una que presenta daño por corrosión, además de ser capaz de localizar en que zona se encuentra dicho daño. El uso en conjunto de la transformada wavelet como preprocesamiento de la respuesta vibratoria permite una mejor identificación de las características utilizadas para las tareas de evaluación de la condición de la estructura. La integración de los sistemas de excitación y de adquisición resultó en un sistema completo con un amplio campo de aplicación debido a su re-configurabilidad al estar implementado en el software LabVIEW. Pudiendo a través de estos realizar la adquisición en tiempo real de forma eficiente y confiable.

Debido a los resultados obtenidos, la metodología propuesta puede ser considerada una herramienta simple, efectiva y automática que permite el monitoreo de la estructura de forma práctica, siendo fácil de implementar y sin la necesidad del uso de un equipo sofisticado. Se pretende con la metodología propuesta en este trabajo ayudar a evaluar la condición de este tipo de estructuras con la finalidad de poder diagnosticar cuando estas presentan un daño por corrosión, pudiendo a partir de este diagnóstico, realizar el mantenimiento correspondiente, evitando con esto daños irreparables y las pérdidas económicas que estos conllevan.

Un punto importante que se debe mencionar es que se cree que la metodología propuesta en este trabajo se puede aplicar al estudio de diferentes tipos de estructuras y a diferentes clases de daños, es decir que no se limita a estructuras de tipo truss ni a daño por corrosión. Debido a que como se mencionó, un daño en una estructura produce un cambio en la respuesta vibratoria, se cree que esta metodología puede llegar a tener resultados satisfactorios para la tarea evaluar la condición de diferentes tipos de estructuras o ante diferentes clases de daños.

5.2. Prospectivas

Como prospectiva se tiene la aplicación de la metodología propuesta buscando lograr además de la detección y localización de daño por corrosión, la cuantificación del mismo, con el fin de medir la severidad del daño presente en la estructura.

Además, para trabajos futuros se contempla la posibilidad de aplicar la metodología expuesta en este trabajo para la detección de diferentes tipos de daños, buscando la detección de fallas provocadas por algunos factores como lo son grietas y aflojamientos de uniones, así como sus combinaciones.

Bibliografías

- Acharya, U. R., Yanti, R., Zheng, J. W., Krishnan, M. M. R., TAN, J. H., Martis, R. J., & Lim, C. M. 2013. Automated diagnosis of epilepsy using CWT, HOS and texture parameters. *International journal of neural systems*. 23(03), 1350009.
- Adewuyi, A. P., & Wu, Z. 2011. Vibration-Based Damage Localization in Flexural Structures Using Normalized Modal Macrostrain Techniques from Limited Measurements. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 26(3), 154-172.
- Ahmadlou, M., & Adeli, H. 2010. Wavelet-synchronization methodology: a new approach for EEG-based diagnosis of ADHD. *Clinical EEG and Neuroscience*. 41(1), 1-10.
- Amézquita Sánchez, Juan Pablo. Monitoreo de vibraciones en tiempo real para detectar daños en estructuras. 2012. *Tesis Doctoral UAQ*.
- 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., Cabal-Yepez, E., Romero-Troncoso, R. J., Osornio-Rios, R. A., & Garcia-Perez, A. 2010. Determination of system frequencies in mechanical systems during shutdown transient. *Journal of Scientific & Industrial Research*. 69(6), 415-421.
- Amezquita-Sanchez, J. P., Osornio-Rios, R. A., Romero-Troncoso, R. J., & Dominguez-Gonzalez, A. 2012. Hardware-software system for simulating and analyzing earthquakes applied to civil structures. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 12(1), 61.
- Amezquita-Sanchez, J. P., Valtierra, M., Camarena, D., Granados, D., Romero, R & Dominguez, A. 2016. Fractal dimension-based approach for detection of

- multiple combined faults on induction motors. *J. Vibration and Control*. 22(17), 3638-3648.
- Cao, M., & Qiao, P. 2009. On the wavelet–fractal nonlinear damage diagnosis of mechanical systems. *Smart Materials and Structures*. 18(8), 085022.
- Chávez, R. 2010. Estudio de Daños en Estructuras usando Análisis Modal en un Modelo Instrumentado. *Tesis Maestría UAQ*.
- Ciang, C., Lee, J. & Bang, H. 2008. Structural health monitoring for a wind turbine system: a review of damage detection methods. *Measurement Science and Technology*. 19(12), 122001.
- Clarke, T., Cawley, P., Wilcox, D. & Croxford, J. 2009. Evaluation of the damage detection capability of a sparse-array guided-wave SHM system applied to a complex structure under varying thermal conditions, *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*. 56(12), 1-9.
- Farhidzadeh, A., Salamone, S. 2015. Reference-free corrosion damage diagnosis in steel strands using guided ultrasonic waves, *Ultrasonics*. 57, 198-208.
- Farrar, C. R., & Worden, K. 2007. An introduction to structural health monitoring. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 365(1851), 303-315.
- Gallardo-Amaya A., Amezcua-Sanchez J.P. et al. 2012. Vibration- based structural health monitoring to detect damages in truss-type structures. 8vo Congreso CONIIN.
- González-Perez, C., & Valdes-Gonzalez, J. 2011. Identification of structural damage in a vehicular bridge using artificial neural networks. *Structural Health Monitoring*. 10(1), 33-48.
- Hao, W, Aiqun, L. & Tianyou, T. 2014. Establishment and application of the wind and structural health monitoring System for the Runyang Yangtze River Bridge. *Shock and Vibration*. 2014, 1-8.

- He, Z., You, X., Zhou, L., Cheung, Y., & Du, J. 2010. Writer identification using fractal dimension of wavelet subbands in gabor domain. *Integrated Computer-Aided Engineering*. 17(2), 157-165.
- Hsu, W. Y. 2013. Single-trial motor imagery classification using asymmetry ratio, phase relation, wavelet-based fractal, and their selected combination. *International journal of neural systems*. 23(02), 1350007.
- Jiang, X., & Adeli, H. 2005. Dynamic wavelet neural network for nonlinear identification of highrise buildings. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 20(5), 316-330.
- Katz, M. J. 1988. Fractals and the analysis of waveforms. *Computers in biology and medicine*. 18(3), 145-156.
- Labuz, E., Chang, M. & Pakzad, N. 2010. Local damage detecton in beam-column connections using a dense sensor netwok. En congreso de Estrcuturas, pp. 3143-3154.
- Lei, Y. Lin, J. He, Z. & Zuo, J. 2013. A review on empirical mode decomposition in fault diagnosis of rotating machinery. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 35(1-2), 108-126.
- Li, H., Huang, Y., Chen, W.L. Ma, M.L. Tao, D.W. & Ou, J.P. 2011. Estimation and warning of fatigue damage of FRP stay cables based on acoustic emissions techniques and fractal theory. *Computer Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 35(1-2), 108-126.
- Minu, K., Lineesh, C. & John, C. 2010. Wavelet neural networks for nonlinear time series analysis. *Applied Mathematical Sciences*. 4(50), 2485-2495.
- Nishikawa, T., Yoshida, J., Sugiyama, T., & Fujino, Y. 2012. Concrete crack detection by multiple sequential image filtering. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 27(1), 29-47.

- Park, H. Lee H.M. Adeli, H. & Lee, I. 2007. A new approach for health monitoring of structures: terrestrial laser scanning. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 22(1), 19-30.
- Paz M. 2009. Diseño, fabricación y análisis de vibraciones por medio de elemento finito de una estructura tridimensional reconfigurable. *Tesis de Licenciatura UAQ*.
- Pérez C. 2014. Instrumentación y monitoreo de estructuras civiles para la obtención de parámetros modales basados en excitaciones ambientales. *Tesis de Maestría UAQ*.
- Proakis, J.G., y D. K. Manolakis. 2006. Digital Signal Processing, *Principles and Applications, Fourth Edition, Prentice-Hall, New Jersey, USA*.
- Radzienski, M., Krawczuk, M. & Palacz. 2011. Improvement of damage detection methods based on experimental modal parameters. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 25(6), 2169-2190.
- Shi J, Xu X, Wang J and Li G 2010 Beam damage detection using computer vision technology. *Nondestructive Test and Evaluation*. 25(3), 189-204.
- Tang, J.P., D.J.Chio,C.W.Chen et al. 2011. A case study of damage detection in benchmark buildings using a Hilbert-Huang transform-based method. *Journal of Vibration and Control*. 17(4), 623-636.
- Vossoughi, F., Ostertag, C. P., Monteiro, P. J., & Albert, R. D. 2007. Damage characterization of concrete panels due to impact loading by motionless X-ray laminography. *Journal of Materials Science*. 42(9), 3280-3285.
- Wang, B.Y. 2005 Detection of structural damage using fractal dimension technique. *Journal of Vibration and Shock*. 24, 87-88.
- Wang, R., Huang, Y., Li, Q., & Zhen, X. 2009. Model test and numerical analysis of a special joint for a truss bridge. *Journal of Constructional Steel Research*. 65(6), 1261-1268.

- Xu, G., Zhu, W. & Emory, B. 2014. Experimental and numerical investigation of structural damage detection using changes in natural frequencies. *Journal Vibration and Acoustics*. 129(6), 686-700.
- Yan, R., He & Zhang, H. 2016. Progress and trends in nondestructive testing and evaluation for wind turbine composite blade. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 60, 1225-1250.
- Yan, B. & Miyamoto A. 2006 . A comparative study of modal parameter identification based on Wavelet and Hilbert-Huang transforms. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 21(1), 9-23.
- Zang, C., Friswell, M. I., & Imregun, M. 2004. Structural damage detection using independent component analysis. *Structural Health Monitoring*. 3(1), 69-83.