



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Doctorado en Ingeniería

**DETECCIÓN, LOCALIZACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE DAÑOS EN ESTRUCTURAS
CIVILES METÁLICAS MIDIENDO VIBRACIONES**

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Doctor en Ingeniería

Presenta:

M.C. Alejandro Moreno Gómez

Dirigido por:

Dr. Juan Pablo Amézquita Sánchez

Codirigido por:

Dr. Omar Chávez Alegría

SINODALES

Dr. Juan Pablo Amézquita Sánchez
Presidente

Dr. Omar Chávez Alegría
Secretario

Dr. Aurelio Domínguez González
Vocal

Dr. Martín Valtierra Rodríguez
Suplente

Dr. Enrique Rico García
Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.
Septiembre 2019
México

RESUMEN

En los últimos años, la ocurrencia de amenazas naturales en todo el mundo ha puesto de manifiesto la necesidad de contar con esquemas de monitoreo estructural que permitan la evaluación continua de la integridad de las estructuras civiles para evitar posibles pérdidas económicas o humanas. En este sentido, esta tesis presenta una metodología basada en técnicas avanzadas de procesamiento de señales, tales como la descomposición empírica de modos, índices no lineales tales como la entropía de Shannon e inteligencia artificial para clasificar patrones, por ejemplo: redes neuronales artificiales, para detectar, localizar y cuantificar daños en estructuras civiles metálicas. La metodología es validada en una armadura de aluminio en estilo puente y una estructura de marcos rígidos de acero de 4 pisos. Los resultados demuestran que la metodología es capaz de detectar daños por corrosión y grietas en su estado inicial, así como su localización.

(Palabras clave: Estructuras Civiles, Monitoreo Estructural, Vibraciones, Procesamiento avanzado de señales, Descomposición empírica de modos, Entropía de Shannon, Redes neuronales artificiales, Corrosión, Grietas).

SUMMARY

In the last years, the occurrence of natural hazards around the world has evinced the necessity of having structural health monitoring schemes capable of monitoring and assessing continuously the integrity of civil structures in order to avoid potential economic or human loses. In this sense, this thesis presents a methodology based on advanced signal processing techniques, e.g., the empirical mode decomposition method, nonlinear indices such as the Shannon entropy index and artificial neural networks for detecting, locating and quantifying the severity of damages in metal civil structures. The proposed methodology is validated by using the vibrational response of a truss-type bridge and a steel frame structure. The results show that the methodology is capable of evaluating the structural condition in an accurate way.

Keywords: Civil Structures, Structural Health Monitoring, Vibrations, Empirical Mode Decomposition, Shannon Entropy, Artificial neural networks, Corrosion, Cracks.

DEDICATORIA

A mi madre q.e.p.d., que gracias a ella he llegado a este punto de mi vida profesional. A mi padre por su esfuerzo, trabajo y dedicación. A mis hermanos por formar una familia maravillosa y apoyarme siempre y en todo momento.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme cumplir esta meta en mi vida, proporcionándome la fortaleza necesaria para llevarla a cabo.

A mi director de tesis Dr. Juan Pablo Amézquita Sánchez y al Dr. Carlos Andrés Pérez Ramírez por su tiempo y apoyo.

A los miembros de mi sínodo por sus aportes a esta investigación.

A Sergio y Ozzy de la maestría de estructuras y a Francisco Pérez de la maestría de mecánica campus San Jun del Río por su colaboración para realizar las pruebas.

A los profesores de la DIP-FI-UAQ que tuve el placer de conocer, por sus enseñanzas y conocimientos transmitidos.

Al CONACYT por la beca No. 304844 otorgada para la realización de mis estudios de posgrado.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
SUMMARY	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
ÍNDICE GENERAL	VII
ÍNDICE DE TABLAS	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	2
1.2 Descripción del problema	5
1.3 Justificación	6
1.4 Hipótesis	7
1.5 Objetivos	7
1.5.1 Objetivo general	7
1.5.2 Objetivos particulares	7
1.6 Planteamiento general	7
2. REVISIÓN DE LITERATURA	9
2.1 Excitación de estructuras	9
2.1.1 Excitador electrodinámico	9
2.1.2 Túnel de viento	10
2.1.3 Prueba de impacto de talón	11
2.1.4 Martillo de impacto	12
2.1.5 Vibración ambiental	13
2.2 Vibraciones	13
2.3 Modelado de estructuras civiles	14
2.4 Técnicas de procesamiento de señales	17
2.4.1 Descomposición empírica de modos (EMD)	17
2.4.2 Descomposición empírica de modos conjunta (EEMD)	19
2.4.3 Descomposición empírica de modos conjunta completa (CEEMD)	20
2.4.4 Transformada wavelet Synchrosqueezed	20
2.4.5 Clasificación Múltiple de Señales	22
2.4.6 Medidas no lineales	28
2.4.6.1 Entropía de Shannon	23
2.4.6.2 Sesgo (Skewness)	24
2.4.6.3 Curtosis (Kurtosis)	25
2.5 Análisis de varianza (ANOVA) de una vía	25
2.6 Redes Neuronales Artificiales (RNA)	26
3. METODOLOGÍA	29
3.1 Estructuras utilizadas	30
3.2 Excitadores	32
3.3 Sensores	35
3.4 Sistema de adquisición de datos (SAD)	36
3.5 Validación el sistema de adquisición de señales	37
4. PRUEBAS Y RESULTADOS	39
4.1 Caso de estudio 1	39

4.1.1 Puesta de experimento	39
4.1.2 Elementos dañados	41
4.1.3 Resultados	42
4.2 Caso de estudio 2	47
4.2.1 Puesta de experimento	47
4.2.2 Elementos dañados	49
4.2.3 Resultatdos	51
4.3 Determinación de la bondad de ajuste del modelo desarrollado	58
5. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS	59
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61

Dirección General de Bibliotecas UAQ

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Elementos que conforman la armadura. _____	30
Tabla 3.2. Elementos empleados en la fabricación de la estructura de marcos rígidos. _____	31
Tabla 4.1. Frecuencias naturales de la armadura. _____	42
Tabla 4.2. Valores P estimados por ANOVA de una vía para los 3 métodos EMD e IMFs. _____	44
Tabla 4.3. Resultados del clasificador basados en los estimados intervalos empleando ANOVA de los diferentes niveles de daño para todos los cubos _____	47
Tabla 4.4. Frecuencias naturales de la estructura de marcos rígidos. _____	52
Tabla 4.5. Valores P estimados por ANOVA de una vía para la técnica EMD. _____	53
Tabla 4.6. Resultados del clasificador basados en los intervalos estimados empleando ANOVA de los diferentes niveles de daño para todos los entrepisos. _____	56
Tabla 4.7. Eficiencia de la metodología propuesta para localizar y cuantificar daños. _____	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Planteamiento general	7
Figura 2.1. Vibrador electrodinámico, (Moreno <i>et al.</i> , 2018).	10
Figura 2.2. Concepto para un túnel de viento con vórtice variable, (Monge-Gapper, 2014).	11
Figura 2.3. Martillo de impacto, (Martínez, 2018).	12
Figura 2.4. Elemento finito tipo SHELL, (Hutton, 2004).	15
Figura 2.5. Ejemplos de formas de elementos SOLID, (Hutton, 2004).	16
Figura 2.6. Elemento tipo barra, (Hutton, 2004).	16
Figura 2.7. Elemento tipo viga, (Hutton, 2004).	17
Figura 2.8. Neurona estándar, (Amézquita, 2012).	26
Figura 2.9. Red unicapa, (Amézquita, 2012).	27
Figura 2.10. Red multicapa, (Amézquita, 2012).	28
Figura 3.1. Diagrama general de la metodología propuesta.	29
Figura 3.2. Armadura en configuración puente.	30
Figura 3.3. Estructura de marcos rígidos de 4 niveles.	32
Figura 3.4. Sistema de excitación de la armadura, (a) excitador electrodinámico Labworks ET-126 y (b) amplificador Labworks PA-138.	33
Figura 3.5. Tarjeta National Instruments serie M modelo NI USB-6002.	33
Figura 3.6. Sistema de excitación propuesto inicialmente para la estructura de marcos rígidos, péndulo con masa de 4 kg.	34
Figura 3.7. Sistema de excitación elegido para la estructura de marcos rígidos, martillo de impacto KISTLER 9728A20000.	35
Figura 3.8. Acelerómetro de tres ejes marca KISTLER modelo 8395A.	36
Figura 3.9. SAD desarrollado, (a) vista frontal y (b) vista interior.	37
Figura 3.10. Tarjeta National Instruments serie M modelo NI-6211.	37
Figura 3.11. Sistema de adquisición de datos marca Kistler modelo LabAmp 5165A.	38
Figura 4.1. Puesta de experimento.	40
Figura 4.2. Señales de vibración medidas en los ejes X, Y, Z para (a) condición sana y (b) daño incipiente en el primer módulo.	40
Figura 4.3. Localización de elementos dañados en la armadura.	41
Figura 4.4. Daños generados por corrosión a las barras de aluminio; (a) vista superior y (b) vista frontal	41
Figura 4.5. Modelado de la armadura en el software SAP2000.	42
Figura 4.6. Primeras siete IMFs obtenidas para estado sano y daño incipiente (ubicados en el primer módulo) en el eje X, utilizando EMD, EEMD y CEEMD, respectivamente.	43
Figura 4.7. Distribución de los valores de la entropía de Shannon (SE) estimados para la condición sana (H) y daño incipiente para cada módulo (C) utilizando la IMF 1 para los ejes X, Y y Z, y para los métodos (a) EMD, (b) EEMD, y (c) CEEMD, respectivamente.	45
Figura 4.8. Distribución de los valores SE estimados utilizando la IMF1 del eje X para el estado sano (H) y para los cuatro niveles de corrosión, uniendo todos los valores SE estimados en todos los módulos (I: incipiente), (L: ligero), (M: moderado) y (S: severo).	46

Figura 4.9. Desarrollo de experimento. a) Estructura bajo estudio y localización de los sensores, b) sistema de excitación (martillo de impacto), c) colocación de acelerómetro sobre las columnas, d) sistema de adquisición de datos. _____	48
Figura 4.10. Localización de elementos dañados en la estructura de marcos rígidos. _____	49
Figura 4.11. Daños generados por cortes de sierra en las vigas de acero, (a) viga sin daño, (b) daño ligero, moderado y severo y (c) pérdida de área transversal en cada condición de daño. _____	50
Figura 4.12. Modelado de la estructura de marcos rígidos en el software SAP2000. _____	51
Figura 4.13. Las primeras cinco IMFs obtenidas en el cuarto entrepiso para el eje X, utilizando la técnica EMD, para (a) estado sano y (b) daño ligero, respectivamente. _____	52
Figura 4.14. Distribución de los valores SE estimados para la condición sana (H) y daño ligero para cada entrepiso (Li) utilizando la IMF1 para los ejes X, Y y Z, respectivamente. _____	54
Figura 4.15. Distribución de los valores SE estimados utilizando la IMF 1 en el eje Z para el estado sano (H) y para los tres niveles de agrietamiento, uniendo todos los valores SE estimados en todos los entrepisos; (L: ligero), (M: moderado) y (S: severo). _____	55
Figura 4.16. Proceso de evaluación de la condición estructural. _____	56

1. INTRODUCCIÓN

Las estructuras civiles representan un pilar en la economía y la vida moderna porque brindan protección a las personas y permiten la comunicación entre los diferentes países (Qarib y Adeli, 2015). Entre los diferentes tipos de estructuras civiles, las armaduras y los marcos rígidos son las más empleadas en el diseño de la infraestructura civil ya que ofrecen grandes beneficios tales como facilidad de ensamblaje y un peso liviano (Rafiei y Adeli, 2017). En este sentido, este tipo de diseños se han utilizado para construir puentes, torres, grúas, soportes de techo, construcción de esqueletos para edificios, entre otros (Osornio *et al.* 2012; Chang y Kim, 2016; Blachowski *et al.* 2017). Sin embargo, estas están expuestas a sufrir degradaciones o fallas durante su vida útil debido a las excitaciones producidas por factores humanos o naturales como terremotos, tornados, huracanes, viento, entre otros (Adeli y Jiang, 2009; Zhou *et al.*, 2013; Amezcuita *et al.*, 2017). Por lo tanto, una evaluación continua de su integridad estructural, mejor conocida como Structural Health Monitoring (SHM, por sus siglas en inglés), es de suma importancia ya que cualquier deterioro o falla puede ser atendido en una etapa temprana para evitar posibles pérdidas humanas y económicas.

Entre los principales daños que pueden sufrir las armaduras y los marcos rígidos de acero son las grietas por fatiga y la corrosión (Jang *et al.*, 2013). Por un lado, se denomina grieta a la ruptura de un elemento constructivo, dejándole inútil para su posible función estructural y esta(s) puede(n) aparecer en cualquier elemento estructural: pilares, vigas, muros, forjados, tabiques, etc. Las grietas son generadas principalmente por los movimientos del suelo cuyo desplazamiento afecta a los cimientos, reparto defectuoso de las cargas o sobrecargas no previstas, variaciones térmicas que dañen la cohesión de los materiales y envejecimiento prematuro ocasionado por la acción de agentes atmosféricos principalmente (Amini y Samani, 2014). Por otro lado, la corrosión es la pérdida o deterioro de las propiedades físicas y/o químicas de un metal, sobre todo el hierro/acero, al interactuar con su medio. Este fenómeno sucede de manera natural, transformándose el metal en un óxido (reacción anódica, donde ocurre la disolución del metal) que es un compuesto más estable, por el cual el metal vuelve a su estado anterior u original, que es el que tenía antes del proceso metalúrgico (Al-Sherrawi *et al.*, 2018). Si el metal es poroso puede llegar a su destrucción total. En otros casos si las estructuras metálicas son contenedoras de otras sustancias, pueden provocar fuga de las mismas por los sitios deteriorados por la corrosión. Son

factores de corrosión la atmósfera y el agua. Por eso es más frecuente que ocurra en lugares húmedos y salinos. La velocidad de la corrosión aumenta a mayor temperatura (Salgado *et al.*, 2014). Por estas razones, en este trabajo de tesis se evalúa la condición de estructuras metálicas como armaduras y marcos de acero con el fin de determinar si estas presentan algún tipo de daño por grietas y corrosión.

1.1 Antecedentes

Actualmente, es reconocido el hecho de que las construcciones más seguras y con mayor vida útil son aquellas que son constantemente vigiladas; en este sentido el monitoreo estructural juega un papel importante para cumplir este propósito, por lo que ha llamado la atención del mundo académico y de investigación (Jayawardhana *et al.*, 2017). El monitoreo estructural se define como un proceso capaz de recabar información acerca de la condición y comportamiento de una estructura a través del tiempo (Amézquita *et al.*, 2012). Este proceso consiste en la continua recopilación de los indicadores más representativos del estado de la estructura; los cuales dependen de varios factores: el tipo de estructura, los materiales de construcción, condiciones del medio ambiente, el propósito de la misma, entre otros. En este sentido, existen principalmente dos grandes métodos para el monitoreo de una estructura: (1) visuales y procedimientos experimentales locales y (2) dinámicos. Los métodos visuales y procedimientos experimentales locales tales como radiográficos, acústicos, térmicos, entre otros, requieren en ciertas ocasiones el cierre temporal de la estructura bajo inspección, así como un conocimiento a priori de la ubicación de la falla además de un fácil acceso al área dañada (Curadelli *et al.*, 2008). Por estas razones, una de las técnicas que ha sido más empleada debido a que no impone las limitaciones mencionadas con anterioridad, es el uso de estrategias basadas en la medición de la respuesta dinámica de la estructura o vibraciones. Este método consiste en implementar una estrategia de identificación de daños que conlleve el monitoreo de una estructura a lo largo del tiempo, empleando mediciones espaciadas de las vibraciones producidas por diferentes tipos de excitadores, típicamente un shaker (excitador electromagnético), un túnel de viento, martillos de impacto, entre otros, para posteriormente realizar el procesamiento de las señales adquiridas/monitoreadas para determinar el estado actual de la estructura, es decir, poder detectar, localizar y cuantificar los daños presentes en la misma.

La idea básica del empleo de las vibraciones para el diagnóstico de una estructura es que un daño modifica las características estructurales de ésta (por ejemplo, la masa, o rigidez, por mencionar algunas), mismas que se ven reflejadas en la medición de la respuesta mencionada (Amézquita y Adeli, 2014). Por lo tanto, es de vital importancia contar con una técnica de procesamiento avanzada capaz de revelar características en las señales medidas con el fin de asociarlas a la condición de la estructura.

En las últimas dos décadas, a nivel internacional se han propuesto diversas metodologías basadas en diversas técnicas de procesamiento para la evaluación de la condición de las estructuras civiles principalmente armaduras y marcos de acero. Por ejemplo, Salgado (2008) empleó la transformada wavelet continua y de paquetes para evaluar la condición de una viga con diferentes niveles de grietas sometida a excitaciones dinámicas. Los autores reportan que la eficacia de los métodos depende principalmente de varios factores tales como el número de sensores próximos a la zona dañada, el nivel de ruido de la respuesta dinámica adquirida y la ubicación del daño. Por otro lado, El Shafey *et al.* (2011) combinó la técnica de decremento aleatorio y la transformada rápida de Fourier para identificar y localizar daños en vigas sometidas a excitaciones forzadas. El daño inducido en la viga fue realizado a través de una disminución de la rigidez. Los resultados demuestran que los primeros dos modos o frecuencias naturales presentan un cambio con respecto al nivel de falla y su ubicación. Salgado *et al.* (2014) evaluaron la efectividad de diferentes técnicas de procesamiento tales como la transformada continua, discreta y de paquetes wavelet, así como el método de curvatura y cambios en la rigidez y flexibilidad para la detección de grietas en vigas. Los autores reportan que los métodos basados en la transformada wavelet son más eficientes que las otras técnicas propuestas para evaluar la condición de la viga. Por otro lado, Li y Hao (2016) investigaron la transformada continua wavelet para detectar fallas en uniones en una armadura estilo puente de acero a través de la medición del desplazamiento de sus elementos y excitaciones ambientales. Los resultados experimentales demuestran que el desplazamiento relativo detectado por el sensor y la transformada wavelet tiene un rendimiento sensible para identificar y evaluar los daños de las uniones del puente. Rafiei y Adeli (2017) fusionaron la transformada wavelet Synchrosqueezed, la transformada rápida de Fourier y una red neuronal dinámica para evaluar si un edificio de 38 pisos está sano o presenta un daño por agrietamiento. Con el fin de extraer la respuesta vibratoria del edificio esta es sujeta a vibraciones ambientales. Los autores reportan que

la metodología propuesta es capaz de diagnosticar el edificio con una eficiencia del 96%. Jayawardhana *et al.* (2017) emplearon la transformada wavelet discreta con una ondoleta madre llamada Daubechies para detectar y localizar grietas en losas de concreto reforzado. Las grietas fueron producidas a través de una carga incremental mientras se monitoreaban las localizaciones y longitudes de las grietas. Los autores reportan que la propuesta es eficiente para detectar y localizar la zona de daños, pero no su cuantificación. Recientemente, Li *et al.* (2018) colocaron 553 sensores para medir la respuesta vibratoria además de otras variables del Centro Financiero Ping-An, el cuarto edificio más alto del mundo con una altura total de 600 m. Esta instrumentación tiene como fin el proporcionar información para el diseño, construcción y diseño de rascacielos. Además, los autores mencionan que esta información permitirá generar un sistema de diagnóstico a través de técnicas de procesamiento avanzado para la evaluación de la integridad del edificio.

Es muy importante mencionar que los trabajos a nivel internacional se han enfocado a la detección de daños cuando estos ya presentan un nivel moderado a severo, además de no realizar una localización y cuantificación del daño en estructuras de mayor complejidad; por lo tanto, con base en ello, este trabajo de tesis se enfoca en la detección inicial o incipiente de los daños, así como su localización y cuantificación en una armadura en estilo puente de 162 elementos y en un edificio de cuatro pisos.

Por otro lado, a nivel local, dentro de la Universidad Autónoma de Querétaro existe una línea de investigación referente al análisis de vibraciones en estructuras civiles. Por ejemplo, el primer antecedente relacionado con el análisis de vibraciones en estructuras es el trabajo de licenciatura de Paz (2009), donde presenta la tesis titulada “Diseño, fabricación y análisis de vibraciones por elemento finito de una estructura tridimensional reconfigurable”, en la que se reporta el análisis dinámico de la estructura y el cálculo de las frecuencias naturales analítica y experimentalmente. Otro trabajo relacionado con el análisis de vibraciones en estructuras es el trabajo de maestría realizado por Chávez (2009), en el cual se muestra la comparación de las propiedades modales, frecuencias naturales, de una armadura de 5 cubos sana contra una que tiene daño en alguno de sus elementos. El modelo matemático de la estructura es obtenido por medio del Método del Elemento Finito considerando la Teoría del Amortiguamiento Proporcional para obtener la matriz equivalente de amortiguamiento. Por otra parte, Amézquita (2012) utilizó la

estructura desarrollada por Paz, a fin de proponer un sistema de monitoreo en tiempo real, utilizando la transformada llamada clasificación múltiple de señales (MUSIC) para detectar, localizar y cuantificar daños en la misma. Por su parte, Gallardo (2012) realizó la identificación de las frecuencias características para diversas fallas utilizando la transformada rápida de Fourier. Arceo (2012) realizó la detección de fallas en puentes utilizando algoritmos genéticos. Pérez (2014) propone el uso de la transformada wavelet para la estimación de los parámetros modales (frecuencia natural y factor de amortiguamiento) de la cafetería de facultad de ingeniería campus San Juan del Río. Recientemente, Martínez (2018) fusionó la técnica MUSIC con la transformada empírica wavelet para estimar los parámetros modales tales como frecuencias naturales y factores de amortiguamiento de una estructura escalada de acero de cuatro niveles sujeta a vibraciones forzadas.

Es muy importante mencionar que, principalmente, los trabajos se han enfocado en la estimación de los parámetros modales de las estructuras civiles y que en los pocos trabajos que se han orientado al monitoreo de estructuras civiles se observa que aún es necesario encontrar una metodología que proporcione de manera adecuada, fácil y eficiente la detección, localización y cuantificación de daños en una estructura donde daños incipientes puedan estar presentes.

1.2 Descripción del problema

La falta de acciones preventivas ante el deterioro y el daño estructural en las obras civiles trae diversas consecuencias negativas ya que la acumulación de daños puede provocar que una estructura sufra un debilitamiento, incluso en un caso dado, el colapso de la estructura, lo que puede desembocar en pérdidas económicas y de vidas humanas. Por esto, la razón principal para analizar y diagnosticar el estado de una estructura es determinar las medidas necesarias para corregir el estado de la misma, lo que permitirá continuar con la operación o programar su reparación o retiro dependiendo del nivel de daño (Talebinejad, 2011).

Conocer si una estructura presenta daños es indispensable, sin embargo, la detección temprana de fallas es más importante ya que permite que los costos de mantenimiento y reparación sean menores comparados con aquellos requeridos si se detectaran en una etapa en la que el

problema haya avanzado (Yan *et al.*, 2006). Para realizar una evaluación más completa de la integridad estructural, es deseable un sistema que realice las 3 acciones; es decir, detectar, localizar y cuantificar los daños y que además pueda ser ejecutado de manera rápida y precisa.

1.3 Justificación

Las pérdidas humanas y materiales se pueden prevenir y/o disminuir entre más rápido se detecte un daño en una estructura civil. En el sismo de 1985 en México se contabilizaron alrededor de 9,000 muertos por la catástrofe y cientos de edificios de salud y educación colapsaron. La reconstrucción fue pausada y las pérdidas se contabilizaron en 4,100 millones de dólares. Según datos de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL, 2014), el país requirió de un 2,39% de su Producto Interno Bruto (PIB) para recuperarse. En la infraestructura carretera, los requerimientos económicos para mantenimiento, reparación y sustitución de puentes representaron en 2015, alrededor de 1,396 millones de pesos (SCT, 2016). También, según un informe de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE por sus siglas en inglés, 2016), la economía de los Estados Unidos de América se estima perderá alrededor de 4 billones de dólares en su PIB entre 2016 y 2025, debido al deterioro de la infraestructura civil en el país. Esto se podría incrementar a 14 billones en 2040 si no se realiza ninguna inversión para mejorar la infraestructura dañada. Regresando a México, en el periodo enero–marzo de 2018, los recursos autorizados con cargo al Fideicomiso FONDEN para ejecutar las obras de reconstrucción de la infraestructura dañada por desastres naturales y otros, del año 2014 a la fecha ascendieron a 10,144.9 millones de pesos (Sistema Nacional de Protección Civil, 2018). Por estas razones, la principal justificación de este trabajo de tesis es el desarrollo de un sistema capaz de monitorear la integridad de una estructura con el fin de detectar oportunamente un daño en estructura civil con el fin de que las personas encargadas del mantenimiento de las estructuras en México les permita una reparación preventiva de las estructuras, lo que permite aminorar los gastos y permita evitar una catástrofe ya que se este sistema permitiría realizar una evaluación constante de las estructuras civiles.

1.4 Hipótesis

La detección, localización y cuantificación de daños en estructuras civiles metálicas resulta trascendente para determinar su integridad, esto se logra con un sistema que sea capaz de procesar mediante la combinación de diferentes algoritmos de procesamiento, la gran cantidad de datos generados por los acelerómetros instalados en diferentes puntos de la estructura.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Desarrollar un sistema que almacene y procese señales de vibración e implemente algoritmos complejos de inteligencia artificial para realizar la detección, localización y cuantificación de daños en estructuras civiles metálicas.

1.5.2 Objetivos particulares

1. Desarrollar el sistema de adquisición de señales de vibración.
2. Instrumentar las estructuras de prueba con el sistema de adquisición de señales.
3. Procesar las señales adquiridas para diagnosticar el estado de las estructuras.

1.6 Planteamiento general

La Figura 1.1 muestra el planteamiento general para este trabajo de tesis, el cual se basa en 4 etapas descritas a continuación:

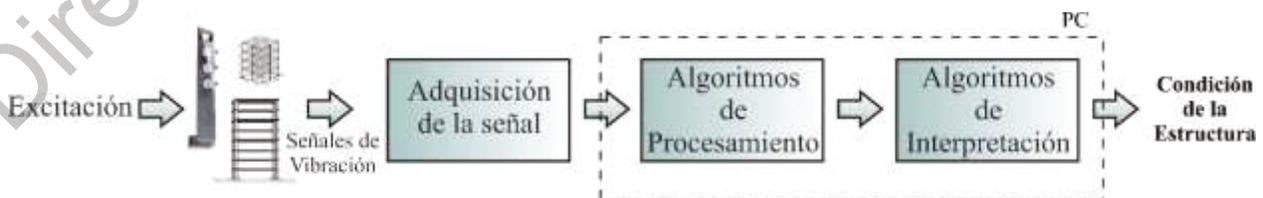


Figura 1.1. Planteamiento General.

Primeramente, las estructuras son sometidas a diversas excitaciones forzadas a través de diversos sistemas mecánicos con el fin de poder adquirir sus respuestas vibratorias a través de diversos sensores, en este caso acelerómetros. Entonces, las señales proporcionadas por los sensores son adquiridas y enviadas a una computadora personal a través de un sistema de adquisición. Una vez que las señales monitoreadas son enviadas a la computadora, estas son analizadas por diversas técnicas avanzadas de procesamiento de señales con el fin de estimar características que puedan ser asociadas al fenómeno analizado. Finalmente, las características más discriminantes son empleadas para entrenar un algoritmo de interpretación con el fin de diagnosticar la condición de la estructura de manera automática.

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

Este capítulo presenta un panorama general de los sistemas o procedimientos de excitación empleados en estructuras civiles, los fundamentos básicos para el modelado de estructuras, las principales técnicas de procesamiento de señales y lo referente a redes neuronales.

2.1 Excitación de estructuras

Con el fin de poder estimar la respuesta vibracional o dinámica de una estructura civil, la estructura debe ser excitada por algún medio, entre los más utilizados se encuentran los descritos a continuación:

2.1.1 Excitador electrodinámico

Los excitadores o vibradores electrodinámicos como el mostrado en la Figura 2.1, son equipos que generan vibraciones para el análisis de componentes, piezas o estructuras. Los vibradores electrodinámicos funcionan bajo el principio electromagnético de una bobina dentro de un campo magnético. A través de la bobina se hace pasar una corriente controlada lo cual hace que aparezca una fuerza la cual es proporcional a dicha corriente. Gracias a esa fuerza, se genera el movimiento vibratorio deseado. Entre su principal ventaja es que permite el generar vibraciones desde un rango bajo hasta un nivel alto de frecuencias, lo que permite generar fuerzas dinámicas importantes para el análisis modal en grandes estructuras y ver así la respuesta de dicha estructura a diferentes frecuencias (Taha, 2010). Estos equipos se utilizan principalmente para el análisis sísmico, dinámica estructural, mecánica estructural, búsqueda de frecuencias de resonancia, etc. Sin embargo, su desventaja radica en que son equipos costosos y que se requiere un fácil acceso a la estructura y en ciertos casos el cierre temporal durante la prueba dependiendo del tamaño del excitador, lo cual puede no ser posible para ciertas estructuras, como por ejemplo un edificio de apartamentos residenciales (García *et al.*, 2013).



Figura 2.1. Vibrador electrodinámico, (Moreno *et al.*, 2018).

2.1.2 Túnel de viento

En ingeniería, un túnel de viento o túnel aerodinámico, ver Figura 2.2, es una herramienta de investigación desarrollada para ayudar en el estudio de los efectos del movimiento del aire alrededor de objetos sólidos. Con esta herramienta se simulan las condiciones que experimentará el objeto de la investigación en una situación real. En un túnel de viento, el objeto o modelo permanece estacionario mientras se propulsa el paso de aire o gas alrededor de él. Se utiliza para estudiar los fenómenos que se manifiestan cuando el aire baña objetos como aviones, naves espaciales, misiles, automóviles, edificios o puentes. Un túnel de viento es una estructura cerrada donde se hace pasar aire a través de un conducto el cual contiene unas rejillas por las que se le hace pasar. Estas rejillas estabilizadoras tienen por cometido garantizar que el flujo de aire sea laminar; por otro lado, al trabajar con obstáculos u otros objetos se trabaja con flujo turbulento. El aire, una vez controlado su comportamiento (normalmente se trabaja en flujo laminar), se hace pasar a una zona llamada garganta o sección de prueba donde encontramos la estructura a analizar. El aire además está impulsado normalmente por un enorme ventilador accionado por un motor de mucha potencia. Es importante recalcar que, en la sección de prueba, el modelo es colocado en la zona de menor sección, ya que por efecto *venturi* el aire se verá acelerado y nos ahorrará trabajo del ventilador. Algunos datos que se pueden recopilar pueden ser empleando este tipo de excitación son: fuerzas aerodinámicas, arrastre, elevación, fuerza lateral, variación de fuerzas, distribución de

presión de superficie, entre otros. Una vez obtenida la información, se compara con los resultados teóricos y se validan en cada caso. La principal desventaja es que para estructuras escaladas de gran tamaño muchas veces no se cuenta con un espacio lo suficientemente amplio para colocarlas dentro del túnel y, por lo tanto, se tiene que reducir el tamaño de la estructura, lo cual no siempre resulta apropiado para el estudio en cuestión (Pozos et al., 2012).

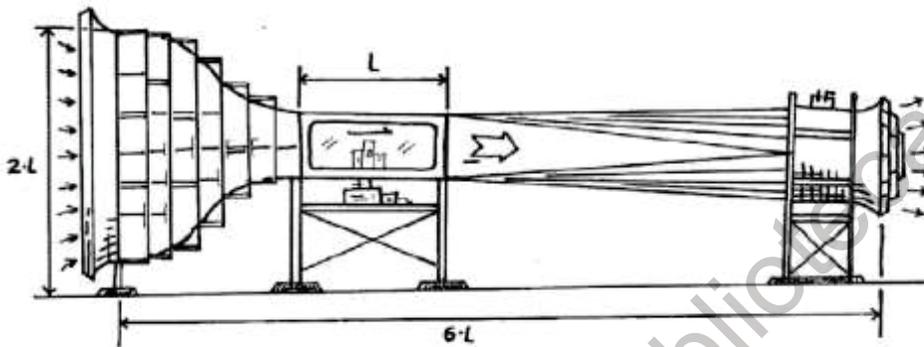


Figura 2.2. Concepto para un túnel de viento con vórtice variable, (Monge-Gapper, 2014).

2.1.3 Prueba de impacto de talón

La prueba de talón tiene como objetivo la obtención de las propiedades dinámicas de las estructuras, en particular, la aceleración máxima ante un impacto producido por la caída de los talones de una persona de aproximadamente 76 kg de peso, a la altura de 6.4 cm; con lo anterior se obtiene el nivel de amortiguamiento y la frecuencia a la que ocurre la disipación de tal impacto. Los puntos del procedimiento a seguir para el desarrollo de esta prueba son:

- El instrumento se coloca en cada estación de medición, dejando un lapso de minutos para que se estabilicen sus masas.
- Se ubica a la persona modelo, de 76 kg de peso aproximadamente, a un lado del instrumento manteniendo alzados ambos talones, a una altura aproximada de 6.4 cm, después de sincronizarse con el operador del equipo, deja caer libremente su peso corporal para registrar tal impacto de los talones.
- Dentro del paso b, se hace un disparo controlado coordinadamente con el instrumento.

Se repiten los pasos (a) al (c) para cada una de las estaciones de registro. Después de la medición *in-situ*, se procede a analizar cada uno de los registros, para la obtención de las aceleraciones, frecuencias y factores de amortiguamiento. Las desventajas que se tiene con este método es que se tiene que cerrar la estructura para poder realizar las pruebas además de que la repetitividad de los golpes presenta un margen de variación amplio entre prueba y prueba (Allen y Rainer, 1976).

2.1.4 Martillo de impacto

El martillo de impacto, ver Figura 2.3, se emplea para entregar un impulso de fuerza medible para excitar la estructura en estudio. El martillo de impacto permite medir la respuesta de los especímenes de prueba que van desde estructuras de paredes delgadas hasta los miembros de puentes de acero, ya que incorpora una célula de medición de cuarzo con función electrónica incorporada de baja impedancia. El modo de voltaje de la celda de operación garantiza una transmisión de señal estable, insensible a influencias ambientales. El martillo es ideal para probar estructuras pesadas, como grandes maquinarias rotativas, centros de máquinas de herramienta, marcos y miembros estructurales de bajas frecuencias. Las vibraciones inducidas por el impacto del martillo son medidas generalmente por un acelerómetro. Una de las desventajas de este método es que la fuerza con la que se impacta la estructura varía entre prueba y prueba si no se monta el martillo sobre un dispositivo mecánico que asegure la misma posición antes y después del impacto; además de que un golpe excesivamente fuerte puede dañar la estructura (Johnson *et al.*, 2004).



Figura 2.3. Martillo de impacto, (Martínez, 2018).

2.1.5 Vibración ambiental

Las pruebas con vibración ambiental consisten en aprovechar las excitaciones provocadas por el medio ambiente que rodea a una estructura tales como viento, micro terremotos, tráfico vehicular, entre otros fenómenos. Las vibraciones ambientales tienen las ventajas de ser de bajo costo y no interrumpir el funcionamiento normal de la estructura porque no se requiere equipo de excitación artificial ni un cerrado temporal de la estructura bajo prueba. Además, permite implementar acciones de evaluación en tiempo real. Sin embargo, la identificación de características mediante vibraciones ambientales es un desafío porque los datos medidos son no estacionarios y están inmersos en un nivel alto de ruido (Adeli y Jiang, 2006).

2.2 Vibraciones

Las vibraciones se definen como el movimiento oscilante que hace una partícula alrededor de un punto fijo (Nakamura, 1989). Los parámetros de las vibraciones para cualquier sistema son los siguientes:

1. Frecuencia, es el tiempo necesario para completar un ciclo vibratorio.
2. Desplazamiento, es la distancia total que describe el elemento vibrante, desde un extremo al otro de su movimiento.

3. Velocidad y Aceleración, son los valores relacionados con los anteriores.
4. Dirección, puede ser lineal o rotacional y producirse en 3 direcciones cada una.

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

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

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

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

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.

2.3 Modelado de estructuras civiles

La identificación y modelado de sistemas mecánicos tales como las estructuras civiles surgen de la necesidad de generar representaciones numéricas de los sistemas en cuestión con el fin de realizar experimentos de manera rápida, segura y eficiente (Kerschen *et al.*, 2006). En el campo de vibraciones, la necesidad de generar modelos numéricos que permitan reproducir de manera fidedigna el comportamiento de una estructura civil en estudio cobra una mayor relevancia.

Uno de los métodos más utilizados para modelar las estructuras es el Método del Elemento Finito (MEF), el cual se basa en dividir el cuerpo, estructura o dominio (medio continuo) sobre el que están definidas ciertas ecuaciones integrales que caracterizan el comportamiento físico del problema, en una serie de subdominios no intersectantes entre sí denominados elementos finitos. El conjunto de elementos finitos forma una partición del dominio también denominada

discretización. Dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos llamados nodos. Dos nodos son adyacentes si pertenecen al mismo elemento finito; además, un nodo sobre la frontera de un elemento finito puede pertenecer a varios elementos. El conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia se llama malla. Los cálculos se realizan sobre una malla o discretización creada a partir del dominio con programas especiales llamados generadores de mallas, en una etapa previa a los cálculos que se denomina pre-proceso. De acuerdo con estas relaciones de adyacencia o conectividad se relaciona el valor de un conjunto de variables incógnitas definidas en cada nodo y denominadas grados de libertad. El conjunto de relaciones entre el valor de una determinada variable entre los nodos se puede escribir en forma de sistema de ecuaciones lineales. La matriz de dicho sistema de ecuaciones se llama matriz de rigidez del sistema. El número de ecuaciones de dicho sistema es proporcional al número de nodos. Típicamente el método de los elementos finitos se programa computacionalmente para calcular el campo de desplazamientos y, posteriormente, a través de relaciones cinemáticas y constitutivas las deformaciones y tensiones respectivamente, cuando se trata de un problema de mecánica de sólidos deformables o más generalmente un problema de mecánica de medios continuos. MEF es muy usado debido a su generalidad y a la facilidad de introducir dominios de cálculo complejos (en dos o tres dimensiones). Además, el método es fácilmente adaptable a problemas de transmisión de calor, de mecánica de fluidos para calcular campos de velocidades y presiones (mecánica de fluidos computacional) o de campo electromagnético. Dada la imposibilidad práctica de encontrar la solución analítica de estos problemas, con frecuencia en la práctica ingenieril los métodos numéricos y, en particular, los elementos finitos, se convierten en la única alternativa práctica de cálculo. Una importante propiedad del método es la convergencia; si se consideran particiones de elementos finitos sucesivamente más finas, la solución numérica calculada converge rápidamente hacia la solución exacta del sistema de ecuaciones (Hutton, 2004).

Los principales tipos de elementos que se pueden emplear para crear modelos son los siguientes:

- Elementos cáscara (SHELL)

Los elementos Shell son utilizados para simular el comportamiento de sólidos de sección transversal fina, tales como placas delgadas (ver Figura 2.4). De manera más específica tienen

aplicación en todo tipo de estructuras laminares, cuyo espesor es menor que 0.1 veces su longitud menor. Estos elementos se utilizan para formular ecuaciones de alto orden (nodos intermedios), las cuales son apropiadas cuando el sólido experimenta flexión.

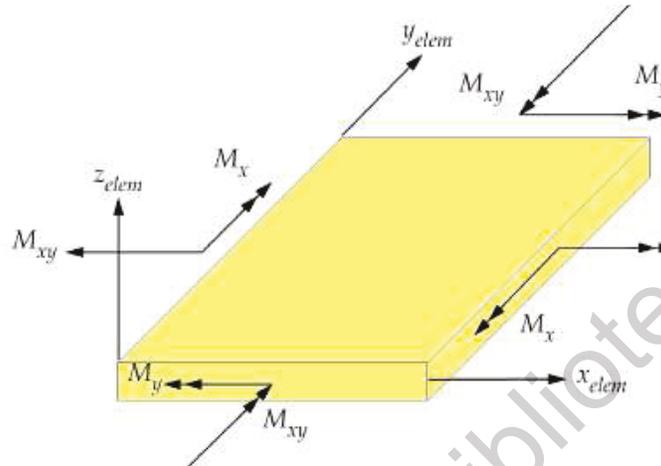


Figura 2.4. Elemento finito tipo SHELL, (Hutton, 2004).

- Elemento sólido (SOLID)

Estos elementos se utilizan para simular el comportamiento de sólidos sometidos a diferentes tipos de cargas. Su principal aplicación es el análisis de estructuras de paredes gruesas. Las formas de estos elementos varían desde tetraedros, cuñas, hexaedros, entre otras, como se muestra en la Figura 2.5.

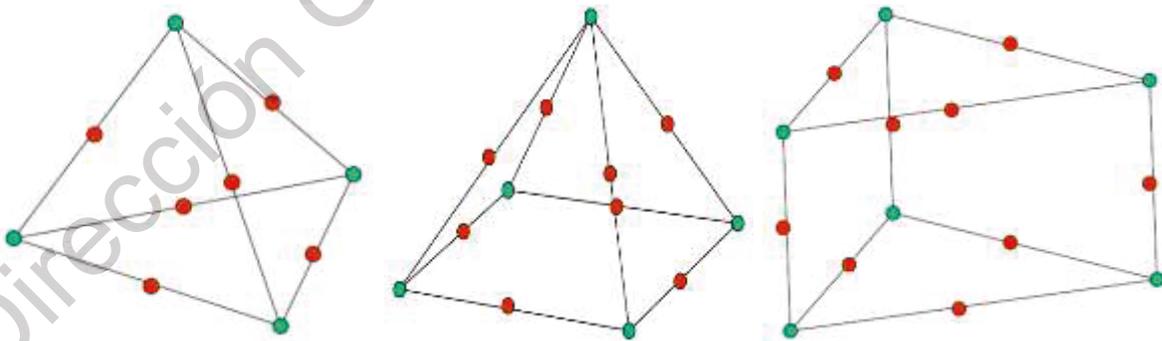


Figura 2.5. Ejemplos de formas de elementos SOLID, (Hutton, 2004).

- Elementos tipo barra

Los elementos barra son usados para introducir rigidez entre dos nodos como se muestra en la Figura 2.6. Estos elementos transmiten esfuerzos de tracción y compresión a lo largo de su eje.

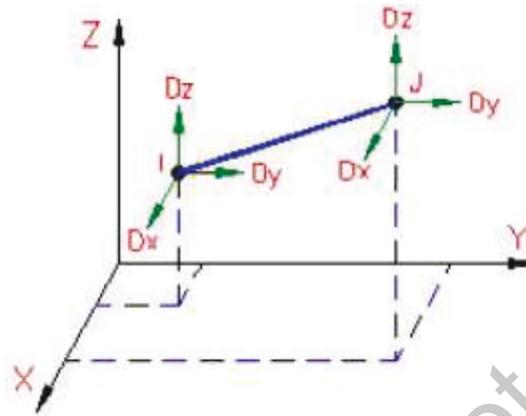


Figura 2.6. Elemento tipo barra, (Hutton, 2004).

- Elementos tipo viga (BEAM)

Los elementos viga se utilizan para proporcionar rigidez a tracción o compresión, flexión o torsión entre dos nodos; pueden tener una gran variedad de secciones como circular, rectangular, entre otras (ver Figura 2.7). Estos elementos son capaces de simular tanto comportamiento elástico lineal como plástico.

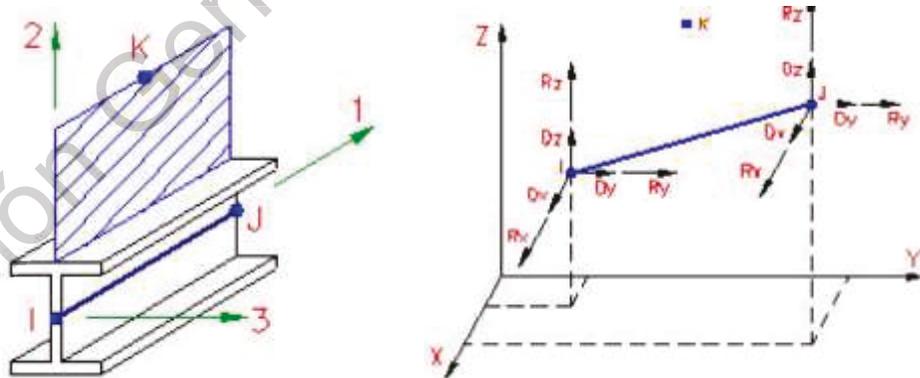


Figura 2.7. Elemento tipo viga, (Hutton, 2004).

Los elementos finitos tipo viga están directamente relacionados con el análisis matricial de estructuras. De manera adicional, el término método de desplazamientos o método de rigidez es utilizado dentro del campo de estudio conocido como la teoría estructural. Estos métodos de

análisis son históricamente los precursores del MEF. El énfasis está en la conexión entre el elemento finito tipo viga y la teoría elemental de vigas que se encuentra detallado en el libro de resistencia de materiales (Hutton, 2004).

2.4 Técnicas de procesamiento de señales

Esta sección se enfoca en mostrar la matemática de las principales técnicas de procesamiento utilizadas para el tratamiento de señales no estacionarias, tal es el caso de las monitoreadas en las 2 estructuras utilizadas en la presente tesis.

2.4.1 Descomposición empírica de modos (EMD)

La descomposición empírica de modos (*Empirical Mode Decomposition, EMD*) es un método adaptivo propuesto por Huang en 1998 para descomponer señales no lineales y no estacionarias de acuerdo con su información frecuencial contenida (Huang *et al.*, 1998; Hu *et al.*, 2010). El algoritmo descompone la señal de vibración en una serie de señales cuasi-estacionarias de banda limitada, llamadas Funciones de Modo Intrínseco (*Intrinsic Mode Function, IMF*). Cada señal IMF cumple con las siguientes condiciones (Huang *et al.*, 1998):

- a. El número de cruces por cero y el número de extremos debe ser igual o diferir en uno.
- b. El valor medio de la envolvente definido por el máximo local y el envolvente debe ser cero.

El proceso para obtener las IMF se llama proceso de cernido (*sifting process*), el cual consta de los siguientes pasos:

1. Identificar el máximo y el mínimo de la señal $x(t)$.
2. Generar la envolvente superior e inferior empleando una interpolación espline cúbica. La media de las dos envolventes se denomina $m_1(t)$. Reste $m_1(t)$ de la señal original $x(t)$ para obtener $h_1(t)$. Matemáticamente se expresa como:

$$h_1(t) = x(t) - m_1(t) \quad (2.2)$$

Determinar si la Ecuación (2.2) cumple con las condiciones a y b. Si no es así, repetir los pasos 1 y 2 hasta que $h_k(t)$ cumpla a y b. Cuando $h_k(t)$ cumple las condiciones, entonces la primer IMF se define como:

$$c_1(t) = h_k(t) = \text{IMF}_1 \quad (2.3)$$

3. Después de obtener la IMF1, restar $c_1(t)$ de la señal original $x(t)$ y calcular el residuo de acuerdo a:

$$r_1(t) = x(t) - c_1(t) \quad (2.4)$$

4. Considerar $r_1(t)$ como la nueva señal original y repetir el procedimiento desde el paso 1 hasta el 3 para obtener las IMFs restantes IMF ($c_2(t), c_3(t), \dots, c_n(t)$). El proceso se detiene cuando la señal de residuo final, $r_n(t)$ sea una función monótona.

5. Al final del procedimiento, la señal $x(t)$ se descompone en n modos intrínsecos, $c_i(t)$, y un residuo, $r_n(t)$. Por tanto, la señal original puede ser representada como:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t) \quad (2.5)$$

A pesar de ser una excelente técnica para la descomposición de señales de acuerdo con su contenido frecuencial, esta puede generar errores en su descomposición cuando las frecuencias presentan valores muy cercanos entre sí pues pueden mezclarse; es decir, asignar más de una frecuencia a la descomposición resultante. Con la finalidad de aminorar este fenómeno, diferentes mejoras como la EMD conjunta (EEMD) y la EMD completa (CEEMD) han sido propuestas, sin embargo, estas incrementan la carga computacional de acuerdo con el algoritmo seleccionado.

2.4.2 Descomposición empírica de modos conjunta (EEMD)

La técnica EEMD es un algoritmo para descomponer las señales de tiempo en sus componentes fundamentales, en el cual se agregan diferentes series de ruido blanco en la señal (Wu y Huang, 2009). Fue propuesto para proporcionar una solución a la mezcla de modos que se presentan en el método EMD. Los resultados muestran que sí hay una mejora en ese sentido, sin embargo, se requiere significativamente de recursos computacionales además de que se pueden

presentar frecuencias espurias e IMFs indeseables debidas al ruido blanco agregado. El método es descrito a continuación:

1. Generar nuevas señales utilizando la señal original $x_i(t)$ así como diferentes series de ruido blanco $n_i(t)$ como sigue:

$$x_i(t) = x(t) + n_i(t) \text{ para } i = 1, 2, \dots, m \quad (2.6)$$

donde m es el número de pruebas.

2. Descomponer la nueva señal generada, en (1) utilizando la técnica EMD descrita en la sección anterior.
3. Calcular una IMF indexada con j como sigue:

$$EEMD_{c_j}(t) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m c_{ij}(t) \quad (2.7)$$

donde la IMF indexada con j para la prueba i es representada por $c_{ij}(t)$. Es recomendable que el número de pruebas sea tan grande como sea posible para obtener un mejor resultado.

2.4.3 Descomposición empírica de modos conjunta completa (CEEMD)

La técnica CEEMD es una variación de la EEMD, propuesta para mejorar su eficiencia y lograr una mejor separación espectral de los modos (Torres *et al.*, 2011). La CEEMD presenta una mejor separación de las ondas frecuenciales que contiene la señal y proporciona una alta resolución en los dominios de tiempo y frecuencia, sin embargo, se requiere de una carga computacional mucho mayor que en los métodos EMD y EEMD.

En el método EEMD, cada prueba $x(t)$ se descompone de forma independiente; por lo tanto, se obtiene un residuo $r_i(t)$ para cada prueba. Por el contrario, el método CEEMD proporciona un primer residuo único de la siguiente manera:

$$r_i(t) = x(t) - IMF_1 \quad (2.8)$$

donde IMF_1 es una banda de frecuencia o una verdadera IMF calculada de forma similar que la técnica EEMD. Después, se llevan a más cabo más cálculos para obtener la IMF_2 . El siguiente residuo se calcula como $r_2(t) = r_1(t) - IMF_2$. Este procedimiento se repite hasta que se obtienen todas las IMFs.

2.4.4 Transformada wavelet Synchronsqueezed

La transformada wavelet Synchronsqueezed o Synchronsqueezing Wavelet Transform (SWT) es una transformada tiempo-frecuencia que se introdujo en el contexto del análisis de señales de audio (Daubechies *et al.*, 2011). Se caracteriza por realizar el trabajo de identificación de modos, tal y como lo hace la EMD. Sin embargo, a diferencia de ésta, el algoritmo de SWT es robusto al ruido y a errores inducidos por aproximaciones tales como las interpolaciones. Además, permite reconstruir una señal a partir de sus componentes fundamentales (Thakur *et al.*, 2013). El algoritmo realiza la descomposición de la señal en los siguientes pasos:

1. La transformada continua Wavelet, $W_f(a, b)$, se calcula a partir de la señal original, $f(t)$, como:

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (2.9)$$

donde a es la escala, b es el offset de tiempo y ψ es la wavelet madre. Se asume que la wavelet madre tiene un rápido decaimiento y que su transformada de Fourier (ψ) es cero en frecuencias negativas y se concentra alrededor de alguna frecuencia positiva (Daubechies *et al.*, 2011). Muchas wavelets tienen estas propiedades. La frecuencia instantánea $w_f(a, b)$ de la señal $f(t)$ es obtenida como la derivada de los coeficientes $W_f(a, b)$ en cualquier punto (a, b) , esto es:

$$\omega_f(a, b) = \begin{cases} \frac{-i\partial_b W_f(a, b)}{W_f(a, b)} & |W_f(a, b)| > 0 \\ \infty & |W_f(a, b)| = 0 \end{cases} \quad (2.10)$$

2. Los coeficientes calculados $W_f(a, b)$ se reasignan al dominio de tiempo-frecuencia. Para realizar este mapeo, cada punto (a, b) se convierte en otro punto $[w_f(a, b), b]$. Esta operación se llama sincronización. En aplicaciones prácticas, los coeficientes wavelets continuos se calculan solo a escalas discretas a_k y su transformada sincronizada $T_f(\omega_c, b)$ se calcula solo en los centros ω_c del rango de frecuencias $[\omega_c - \Delta\omega/2, \omega_c + \Delta\omega/2]$ como sigue:

$$T_f(\omega_c, b) = \Delta\omega^{-1} \sum_{a_k: w_f(a, b) \in [\omega_c - \Delta\omega/2, \omega_c + \Delta\omega/2]} W_f(a_k, b) a_k^{-3/2} (\Delta a)_k \quad (2.11)$$

donde $\Delta\omega = \omega_c - \omega_{c-1}$ y $\Delta a = a_k - a_{k-1}$. La sincronización permite la reasignación de la energía de los coeficientes wavelets a fin de mejorar la localización de la frecuencia. Después, cada componente individual de la señal original $f_i(t)$ se estima a partir de $T_f(\omega_c, b)$:

$$f_i(t) = \text{Re} \left[C_\psi^{-1} \sum_l T_f(\omega_c, t) \right] \quad (2.12)$$

donde Re regresa la parte real de la función, $C_\psi^{-1} = 0.5 \int_0^\infty \psi(\xi) \frac{d\xi}{\xi}$, y ψ representa la transformada de Fourier de la wavelet madre.

3. Finalmente, los componentes individuales calculados $f_i(t)$ son sumados para obtener la señal $f(t)$ sin ruido $n(t)$.

Esta técnica presenta mejores prestaciones que la EMD y sus variaciones para descomponer las señales en sus principales componentes frecuenciales; sin embargo, presenta una muy elevada carga computacional, además de requerir una selección adecuada de la madre wavelet con el fin de obtener resultados satisfactorios (Moreno *et al.*, 2018).

2.4.5 Clasificación Múltiple de Señales

El algoritmo Clasificación Múltiple de Señales (MUSIC, por sus siglas en inglés) es conocido por ser un método de alta resolución espectral capaz de detectar frecuencias en señales cuya relación señal-ruido (SNR, por sus siglas en inglés) es bajo. El método supone que la señal discreta, $x[n]$, puede ser representada como una suma de m sinusoidales complejas y ruido $e[n]$, es decir:

$$x[n] = \sum_{i=1}^m \bar{B}_i e^{j2\pi f_i n} + e[n] \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (2.13)$$

$$\bar{B}_i = |B_i| e^{j\phi_i} \quad (2.14)$$

donde N , B_i y f_i son el número de muestras, la amplitud de la sinusoidal compleja y su frecuencia, respectivamente, y $e[n]$ es el ruido blanco, con una media de cero y una variancia σ^2 . El algoritmo usa la descomposición en eigenvectores de $x[n]$ para obtener dos subespacios ortogonales. La matriz de autocorrelación R de la señal $x[n]$ es la suma de las matrices de autocorrelación de la señal pura R_s y ruidosa R_r :

$$R = R_s + R_r = \sum_{i=1}^P |B_i|^2 e(f_i) e^H(f_i) + \sigma_n^2 I \quad (2.15)$$

donde P es el número de frecuencias, el exponente H denota la transpuesta Hermitiana, I es la matriz identidad y $e^H(f_i)$ es la señal en forma de vector dada por:

$$e^H(f_i) = [1 \quad e^{-j2\pi f_i} \quad \dots \quad e^{-j2\pi f_i(N-1)}] \quad (16)$$

De la condición de ortogonalidad de ambos subespacios, el pseudoespectro Q del vector actual de espacio está dado por:

$$Q^{MUSIC}(f) = \frac{1}{|e(f)^H V_{m+1}|^2} \quad (2.17)$$

donde V_{m+1} es el eigenvector de la señal ruidosa. La expresión presenta picos ubicados exactamente en la frecuencia de la componente sinusoidal principal, donde el denominador es igual a 0. A pesar de las grandes prestaciones que presenta esta técnica, esta requiere un valor de frecuencias contenidas en la señal a priori, lo cual es un valor complejo de estimar ya que las señales de las estructuras civiles están embebidas en mucho ruido y presentan un comportamiento no estacionario que limita una correcta estimación de este valor (García *et al.*, 2013).

2.4.6 Medidas no lineales

Las técnicas de procesamiento anteriormente descritas se enfocan en pre procesar la señal bajo análisis, pero no se enfocan en estimar características que permitan ser asociadas al fenómeno estudiado, es por ello, que las medidas no lineales son empleadas para identificar ciertos patrones dentro de las señales pre-procesadas. A continuación, se describen tres de las medidas no lineales más empleadas para el análisis de señales no estacionarias.

2.4.6.1 Entropía de Shannon

La entropía de Shannon (SE por sus siglas en inglés) es una medición no lineal en señales dinámicas, proporciona una medida de la información promedio contenida asociada con la aleatoriedad de los datos encontrados en una señal o evento (Shannon, 1948). Se ha utilizado en el procesamiento de imágenes, en la detección de fallas en cajas de cambios y motores, en el monitoreo estructural, en el análisis de señales de electroencefalogramas para diagnosticar el estado clínico de pacientes, entre otros (Moreno *et al.*, 2018). La SE puede variar de 0 al número de bits del convertidor analógico-digital (ADC) empleado para medir la señal de tiempo de entrada, por ejemplo, un ADC de 16 bits permite tener valores de 0 a 16, donde un valor bajo indica poca aleatoriedad en la señal; por otro lado, un valor alto indica que hay mucha aleatoriedad en la señal analizada. Por lo tanto, la SE puede ser una herramienta útil para mostrar cambios en las señales medidas asociadas con la condición de la estructura. La SE de una señal en tiempo es calculado como sigue:

$$SE = -\sum_{i=1}^N p(\alpha_i) \log_2[p(\alpha_i)] \quad (2.18)$$

donde α_i denota los valores de una señal aleatoria x con N posibles resultados que pueden ser tomados $x_0, x_1, x_2, \dots, x_{N-1}$, $p(\alpha_i)$ representa la probabilidad de α_i en la señal x , y \log_2 es el logaritmo binario.

2.4.6.2 Sesgo (Skewness)

El sesgo o coeficiente de asimetría (skewness) es la medida que indica la simetría de la distribución de una variable respecto a la media aritmética. Como eje de simetría se considera a una recta paralela al eje de ordenadas que pasa por la media de la distribución. Si una distribución es simétrica, existe el mismo número de valores a la derecha que a la izquierda de la media, por tanto, el mismo número de desviaciones con signo positivo que con signo negativo. El sesgo es el tercer momento estadístico normalizado, da idea de la simetría de la función de probabilidad, siendo 0 para una función normal gaussiana. Los coeficientes de asimetría indican si hay el mismo número de elementos a izquierda y derecha de la media (Lopez-Ramirez *et al.*, 2016).

El sesgo para una serie de datos se obtiene de la siguiente manera:

$$Sk = \frac{1}{(N)(S_x^3)} \sum (x[n] - \bar{x}[n])^3 \quad (2.19)$$

donde N es el número de datos de la serie, $x[n]$ es cada uno de los datos, $\bar{x}[n]$ es la media aritmética de la serie y S_x^3 la desviación típica elevada al cubo.

2.4.6.3 Curtosis (Kurtosis)

La curtosis (o apuntamiento) mide cuán escarpada o achatada está una curva o distribución. Este coeficiente indica la cantidad de datos que hay cercanos a la media, de manera que a mayor grado de curtosis, más escarpada (o apuntada) será la forma de la curva. La curtosis se mide promediando la cuarta potencia de la diferencia entre cada elemento del conjunto y la media aritmética dividido entre la desviación típica elevada también a la cuarta potencia. La curtosis para una serie de datos se obtiene como sigue (Lopez-Ramirez *et al.*, 2016):

$$Ku = \frac{1}{(N)(S_x^4)} \sum (x[n] - \bar{x}[n])^4 \quad (2.20)$$

donde N es el número de datos de la serie, $x[n]$ es cada uno de los datos, $\bar{x}[n]$ es la media aritmética de la serie y S_x^4 la desviación típica elevada a la cuarta potencia.

2.5 Análisis de varianza (ANOVA) de una vía

El análisis de varianza de una vía (ANOVA) es un método para analizar la variación entre muestras y la variación al interior de las mismas mediante la determinación de varianzas. Es llamado de una vía porque analiza un variable independiente o factor. Es un método estadístico útil para comparar dos medias poblacionales. Con base en ello, ANOVA estima un valor de probabilidad que permite evaluar si los conjuntos de datos presentan similitudes (valores similares) o son independientes. El valor de P varía entre 0 y 1, entre más cercano a 0 sea el valor significa que los grupos de datos analizados son independientes entre sí (Moreno *et al.*, 2018). Por lo tanto, este método es adecuado para identificar cual o cuales características estimadas a través de las mediciones no lineales son las más indicadas para evaluar la condición de una estructura civil.

2.6 Redes Neuronales Artificiales (RNA)

Las RNA imitan la estructura (conexiones físicas) del sistema nervioso, con la intención de construir sistemas de procesamiento de información paralelos, distribuidos y adaptivos que puedan presentar un comportamiento inteligente (Adeli y Jiang, 2009).

El elemento básico de una red neuronal artificial son las neuronas artificiales. Una neurona artificial es un dispositivo de cálculo simple que, a partir de un vector de entrada procedente del exterior o de otras neuronas, proporciona una respuesta única (ver Figura 2.8). Esta consta de:

1. Un conjunto de entradas $x_j(t)$ y pesos sinápticos w_{ij} .
2. Una regla de propagación $h_i(t) = \sigma(w_{ij}, x_j(t))$, donde $h_i(t) = \sum w_{ij}x_j$ es la más utilizada.

3. Una función de activación $y_i(t) = f_i(h_i(t))$, que representa simultáneamente la salida de la neurona y su estado de activación. Existen diferentes tipos de funciones de activación siendo la función sigmoide la más recomendada para la clasificación de patrones con características de valor positivo y es representada por la Ecuación (2.21)

$$A_i = \frac{1}{1 + \exp(-P_j)} \quad (2.21)$$

donde P_j representa un valor de ponderación para cada neurona.

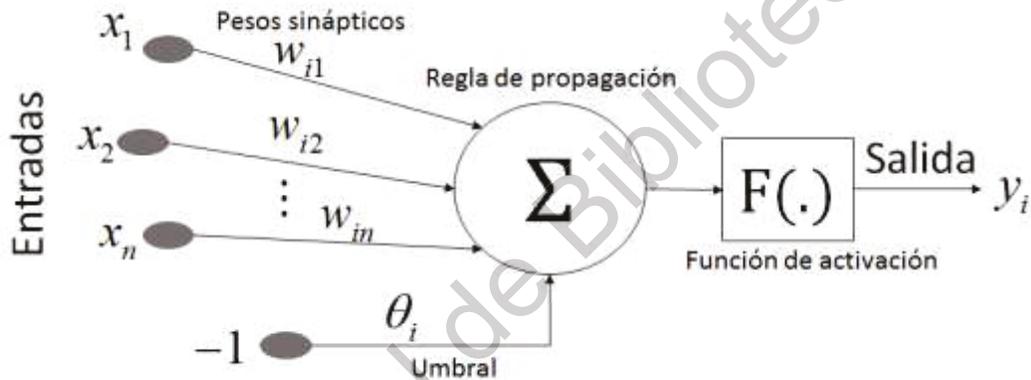


Figura 2.8. Neurona estándar, (Amézquita, 2012).

La salida de la neurona se define como:

$$y_i(t) = f_i \left(\sum_j w_{ij} x_j - \theta_i \right) \quad (2.22)$$

Como se observa en la Ecuación (2.22), la función de activación es un elemento crítico en la selección de la neurona, por lo que su apropiada elección es fundamental si se desea obtener un clasificador apropiado.

Cuando se trabaja con grandes cantidades de neuronas, es natural ordenar aquellas que tienen comportamientos similares en “capas”, como se muestra en la Figura 2.9. De ahí que se usen los subíndices para las neuronas. Cada capa es un vector de neuronas.

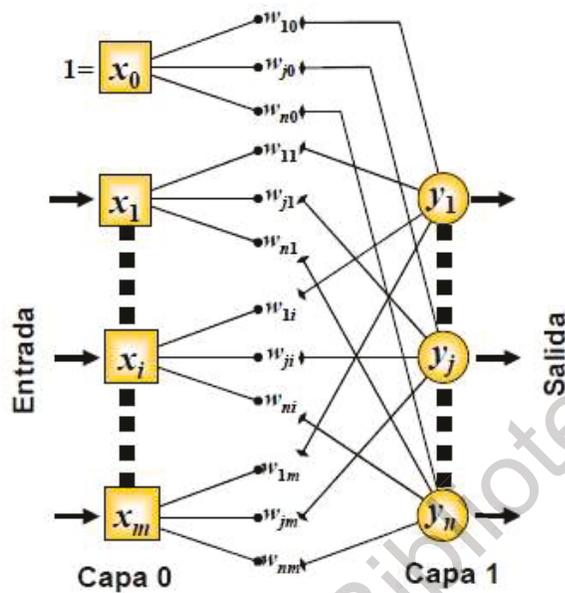


Figura 2.9. Red unicapa, (Amézquita, 2012).

Pero es evidente que se pueden seguir aumentando capas como se muestra en la Figura 2.10. El aprendizaje es la clave de una red neuronal y esencialmente es el proceso en el que se adaptan las sinapsis o pesos, para que la red asocie esos valores a una salida en específico. En este sentido el algoritmo de entrenamiento llamado Levenberg-Marquardt es el más remendado debido a que permite una gran asociación de las entradas con respecto a las salidas configuradas (Osornio *et al.*, 2012).

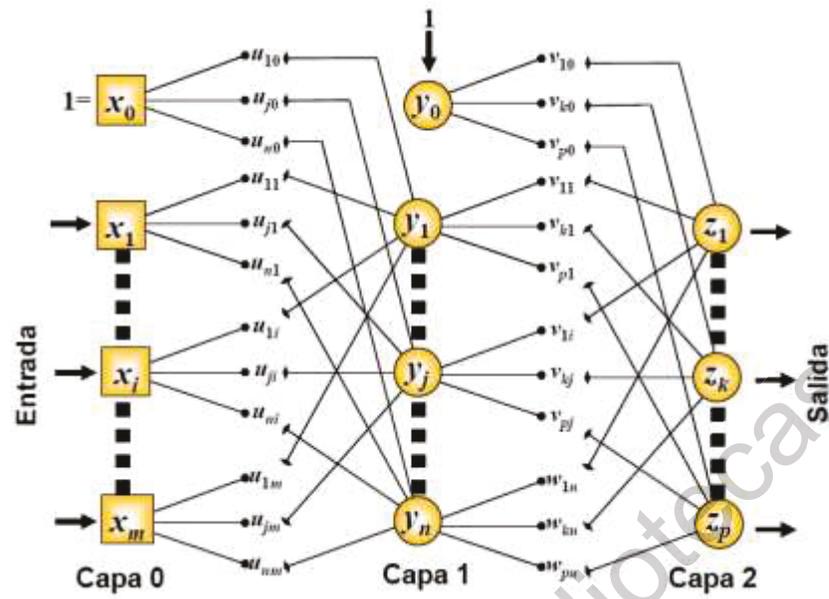


Figura 2.10. Red multicapa, (Amézquita, 2012).

3. METODOLOGÍA

En este capítulo se muestra lo concerniente a la metodología propuesta para cumplir con los objetivos propuestos en el presente trabajo de investigación. En la Figura 3.1 se observa un diagrama general de la metodología propuesta. La primera parte consiste en la excitación de las estructuras, la cual consta de un martillo de impacto para la estructura de marcos rígidos y un vibrador electrodinámico para la armadura. Los sensores para ambas estructuras consistieron en acelerómetros triaxiales de la marca KISTLER. Una vez obtenida las señales se pasan por una tarjeta de adquisición de datos para posteriormente ser enviadas a una computadora persona (PC) por medio de un puerto USB. Una vez transferidas las señales de vibración a la PC se procede a descomponerlas en sus componentes fundamentales por medio de las técnicas EMD, EEMD y CEEMD. Se eligieron estas técnicas porque presentan la gran ventaja de ser adaptivas, es decir, descomponen las señales de acuerdo con su información frecuencial, además de no requerir una configuración especial como la MUSIC y las transformadas wavelets. Una vez descompuesta las señales por medio de las técnicas EMD, se les aplican los indicadores no lineales Entropía de Shannon, Sesgo y Curtosis para encontrar características particulares en las descomposiciones.

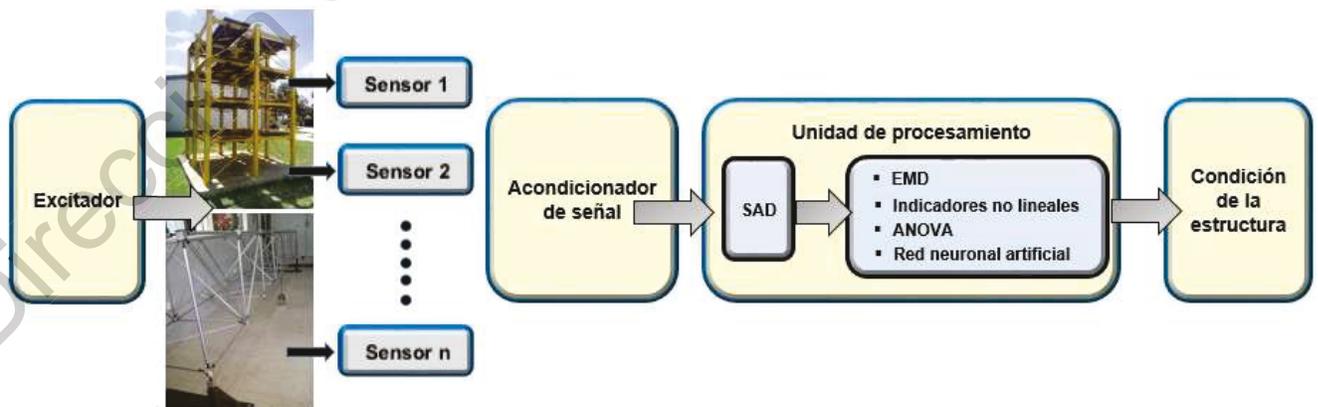


Figura 3.1. Diagrama general de la metodología propuesta.

Una vez obtenidos los valores de los indicadores se realiza el análisis ANOVA con el fin de identificar cual o cuales indicadores son los más capaces para evaluar la condición de la estructura. Finalmente, los indicadores más capaces para determinar las diferentes condiciones de daño son empleados para entrenar una red neuronal artificial con el fin de evaluar de manera automática el estado o condición de las estructuras

3.1. Estructuras analizadas

❖ Armadura en configuración puente

En la Figura 3.2 se muestra la armadura en configuración puente sobre la cual se desarrolló la investigación, se eligió esta estructura debido a que es simple y presenta muchas posibilidades de conexión, lo cual es favorable para propósitos de experimentación. Esta estructura se ancló al piso en sus extremos para simular la armadura de un puente. La armadura consta de 9 módulos construidos con barras de aluminio atornilladas a nodos con ayuda de espárragos y tuercas. Cada barra diagonal mide 1 m y cada arista de los cubos 0.7071 m de modo que la armadura mide 6.36 m de longitud total. En la Tabla 3.1 se muestran los elementos que conforman dicha estructura.



Figura 3.2 Armadura en configuración puente.

Tabla 3.1. Elementos que conforman la armadura.

Nombre de la pieza	Descripción	Número total de piezas
Nodo	Cubo de aluminio de 5.08 cm por lado	40
Barra corta	Barra cilíndrica de aluminio de 1.905 cm de diámetro	76
Barra larga	Barra cilíndrica de aluminio de 1.905 cm de diámetro	46
Espárrago	Varilla roscada de acero de 0.9525 cm de diámetro	244
Tuerca	Tuerca de 0.9525 cm con rosca estándar	488

❖ **Edificio de 4 niveles**

Con el fin de validar la metodología en otro tipo de estructura metálica, se monitoreó una estructura escalada de marcos rígidos de 4 niveles, la cual es mostrada en la Figura 3.3. Este edificio es fabricado en acero teniendo las siguientes dimensiones: 2.5 m de largo, 2.5 m de ancho y 3.6 m de alto. En cada entresuelo cuenta con placas de acero de 1200 kg sumando en total 4800 kg de las placas. En la Tabla 3.2 se muestran las propiedades de los elementos presentes en la estructura final, así como la cantidad de material empleado.

Tabla 3.2. Elementos empleados en la fabricación de la estructura de marcos rígidos.

PROPIEDAD	COLUMNA	VIGAS	DIAGONALES
Sección	TP 100 x 100 x 5	S3 x 5.7	TS 2 x 2 x ¼
Área(m²)	1.394 x 10 ⁻³	1.077 x 10 ⁻³	1.026 x 10 ⁻³
I_y (m⁴)	2.476 x 10 ⁻⁶	1.049 x 10 ⁻⁶	3.188 x 10 ⁻⁷
I_z (m⁴)	1.008 x 10 ⁻⁷	1.894 x 10 ⁻⁷	3.188 x 10 ⁻⁷
J (m⁴)	1.037 x 10 ⁻⁸	1.665 x 10 ⁻⁸	5.661 x 10 ⁻⁷
E (Pa)	2 x 10 ¹¹	2 x 10 ¹¹	2x10 ¹¹
G (Pa)	E/2.6	E/2.6	E/2.6
ρ (kg/cm³)	7800	7800	7800
Piezas	18	48	16

Ambas estructuras de prueba están localizadas en el campus San Juan del Río de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro.



Figura 3.3. Estructura de marcos rígidos de 4 niveles.

3.2. Excitadores

Con el fin de poder monitorear la respuesta vibracional de ambas estructuras, estas fueron sometidas a diferentes tipos de excitación. Por ejemplo, en la armadura de aluminio se empleó un excitador electrodinámico de la marca Labworks modelo ET-126 (ver Figura 3.4a), el cual permite generar señales desde 0 hasta 14 khz con una fuerza máxima de 11.5 kgf, además permite un desplazamiento máximo de 1.9 cm hacia arriba y hacia abajo desde su punto de origen. A su vez, el excitador electrodinámico es alimentado por un amplificador de la marca Labworks modelo PA-138 (ver Figura 3.4b). Este amplificador se caracteriza por contar con las siguientes propiedades: (a) protección por sobre corriente, (b) operación de voltaje en corriente directa con el acople directo de entradas y salidas, (c) niveles bajos de ruido y distorsión y (d) permite una amplificación de hasta 40 V y 16 A, lo que lo hace ideal para el control de excitador electrodinámico. Es muy importante mencionar que este tipo de excitador electrodinámico permite generar una fuerza baja

por lo tanto es recomendado que la señal de excitación sea de frecuencia y amplitud baja tal como ruido gaussiano, el cual es muy similar a las vibraciones ambientales (Rafiei y Adeli, 2017), con el fin de no dañar los componentes que conforman al excitador.

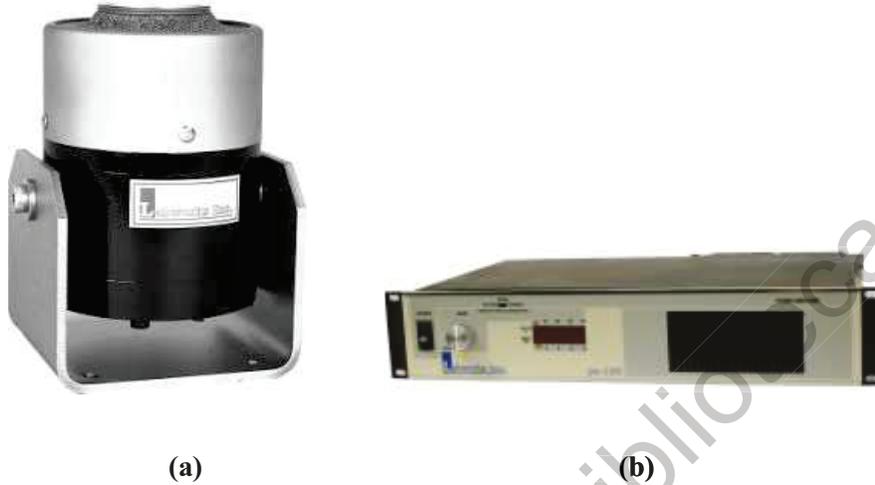


Figura 3.4. Sistema de excitación de la armadura, (a) excitador electrodinámico Labworks ET-126 y (b) amplificador Labworks PA-138.

Con el fin de generar la señal de excitación que será reproducida por el excitador electrodinámico, se empleó una tarjeta National Instruments modelo NI USB-6002 (ver Figura 3.5), el cual cuenta con un convertidor digital analógico a 5KHz el cual permite acondicionar y enviar la señal de vibración generada hacia el amplificador, para mayores detalles consultar el trabajo de Pérez, (2018).



Figura 3.5. Tarjeta National Instruments serie M modelo NI USB-6002.

Por otro lado, la estructura de marcos rígidos se excitó con un sistema de excitación forzada (excitador de impacto), ya que el excitador electrodinámico no tenía la fuerza suficiente para poder excitar de forma correcta el edificio de 4 pisos. Primeramente, se probó con un péndulo formado por una masa de 4 kg unida a una cadena de acero sujetas a un marco hecho de tubular PTR pero se tuvo el inconveniente que no se presentaba la misma excitación entre cada uno de los golpes debido a que la cadena se giraba y/o torcía y afectaba la posición y fuerza del impacto como se muestra en la Figura 3.6.



Figura 3.6. Sistema de excitación propuesto inicialmente para la estructura de marcos rígidos, péndulo con masa de 4 kg.

Por lo tanto, se optó por utilizar un martillo de impacto de la marca KISTLER modelo 9728A20000, el cual se sujetó a una barra rígida que a su vez se integró a un sistema giratorio en el marco construido con PTR como se muestra en la Figura 3.7. Las principales características del martillo son: rango de fuerza de 0 a 20,000 N (0...5,000 lb-f), rango de frecuencia (-10 dB) de 1000 Hz, frecuencia de resonancia de 20 kHz, masa de 1500 g. Este nuevo sistema excitación permitió la repetitividad en la fuerza de impacto, lo que fue ideal para poder obtener la respuesta vibratoria de esta estructura.



Figura 3.7. Sistema de excitación elegido para la estructura de marcos rígidos, martillo de impacto KISTLER 9728A20000.

3.3. Sensores

Con el fin de poder medir la respuesta vibratoria de las estructuras metálicas bajo análisis, se emplean acelerómetros de tres ejes de la marca KISTLER modelo 8395a (ver Figura 3.8), los cuales permiten monitorear señales o vibraciones con un ancho de banda de 0 a 1000 Hz, con una resolución de 400mV/g y un rango de medición de ± 10 g, los cuales son alimentados 24 V_{DC}. Se eligieron estos sensores porque permiten medir frecuencias desde 0 Hz, lo cual es ideal para la presente investigación ya que las estructuras civiles tienen frecuencias de vibración bajas. Es muy importante mencionar que los sensores presentan una calibración por parte del fabricante KISTLER, lo que indica su correcto funcionamiento y correcta medición de datos.



Figura 3.8. Acelerómetro de tres ejes marca KISTLER modelo 8395A.

3.4. Sistema de adquisición de datos (SAD)

Con el fin de adquirir las señales de vibración de las estructuras, un sistema de adquisición de datos basado en la tarjeta National Instruments serie M modelo NI-USB 6211 fue diseñado (ver Figura 3.9). La tarjeta National Instruments serie M modelo NI-USB 6211 (ver Figura 3.10) presenta las siguientes características: (a) 16 entradas analógicas con un rango de entrada de $\pm 10V_{DC}$ (ideales para la salida proporcionadas por los sensores), (b) convertidor analógico-digital de 16 bits, (c) frecuencia máxima de muestreo de 250 KHz, (d) 2 salidas digital-analógico y (e) una comunicación USB con el fin de enviar la información adquirida a una PC. Gracias a estas características, se empleó esta tarjeta para el desarrollo de un sistema de adquisición para la adquisición de las señales de vibración, donde primeramente un filtro anti-alias es creado antes de pasar por la tarjeta de adquisición, el cual permite limitar el rango de frecuencia a monitorear que en este caso los sensores pueden monitorear hasta 1000Hz; por lo tanto, el filtro es desarrollado para una frecuencia de corte de 1200Hz, ya que si se pone a la misma frecuencia máxima del sensor puede generar problemas en esa región ya que reduciría su amplitud.

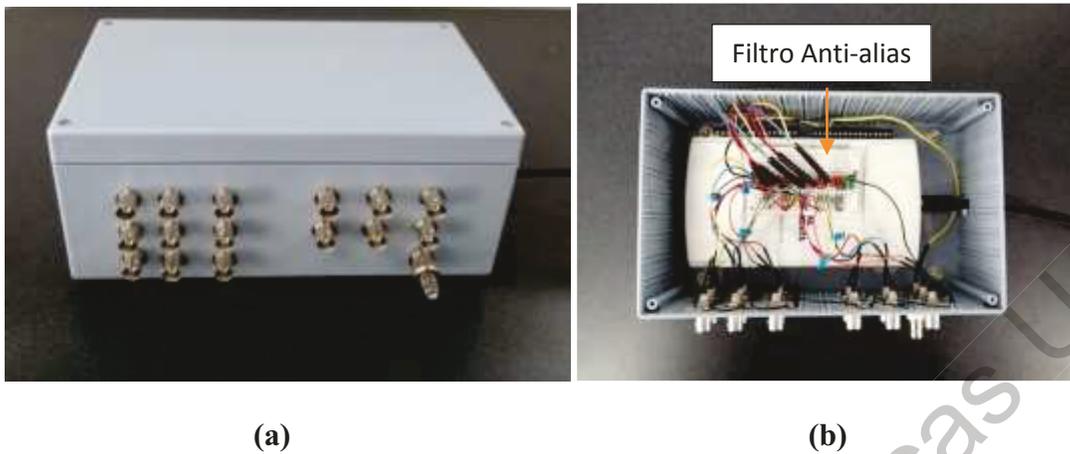


Figura 3.9. SAD desarrollado, (a) vista frontal y (b) vista interior.

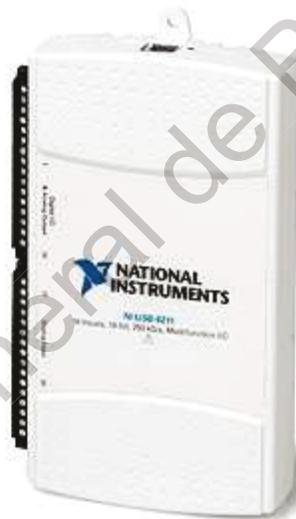


Figura 3.10. Tarjeta National Instruments serie M modelo NI-USB 6211.

3.5. Validación el sistema de adquisición de señales

El sistema de adquisición propuesto se validó contra un sistema comercial Kistler modelo LabAmp 5165a mostrado en la Figura 3.11 para corroborar que la respuesta de salida cumpla con la precisión deseada, teniéndose una diferencia entre ambos de 0.04mV/g , lo cual para el proyecto de investigación es altamente aceptable.



Figura 3.11. Sistema de adquisición de datos marca Kistler modelo LabAmp 5165A.

Es muy importante mencionar que el equipo comercial solamente permite el uso de 2 sensores al mismo tiempo y el diseño propuesto permite la conexión hasta de 5 sensores al mismo tiempo con una velocidad de muestro de hasta 5KHz por canal. Por lo tanto, con lo antes mencionado se cumple con el objetivo de desarrollar el sistema de adquisición de señales para su posterior procesamiento.

4. PRUEBAS Y RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos del procesamiento de las señales de vibración adquiridas en las 2 estructuras metálicas con el fin de evaluar su condición.

4.1. Caso de estudio 1

4.1.1. Puesta de experimento

La Figura 4.1 ilustra la puesta de experimento realizada con el fin de monitorear y evaluar la condición de la armadura en configuración puente, la cual se localiza en la Universidad Autónoma de Querétaro campus San Juan del Río. Con el fin de evaluar la dinámica o respuesta vibracional de la estructura, esta es sujeta a ruido gaussiano generado por el excitador electrodinámico modelo ET-126 alimentado por el amplificador lineal modelo PA-138. Es importante mencionar que la excitación impuesta a la estructura es de amplitud y frecuencia baja con el fin de asemejar una vibración ambiental, la cual permite tener un monitoreo constante de la dinámica de las estructuras civiles (Rafiei y Adeli, 2017). Para medir la respuesta de la estructura ante dicha excitación, se empleó un acelerómetro de tres ejes de la marca KISTLER modelo 8395a, el cual es colocado sobre el cuarto cubo de la estructura. Con el fin de adquirir las mediciones hechas por el sensor y enviarlas a la PC para su posterior análisis, un sistema de adquisición basado en la tarjeta National Instruments serie M modelo NI-USB 6211 es empleado, donde una frecuencia de muestreo de 200 Hz para obtener 4,000 muestras durante un tiempo de ventana de 20 segundos es fijada. Esta frecuencia de muestreo es empleada ya que la excitación presenta un ancho de banda de 0 a 100 Hz. El experimento se repite 20 veces para cada condición (estructura sana y con corrosión a diferentes niveles de daño, es decir, incipiente, ligero, moderado y severo) y para cada módulo, resultando en un total de 800 pruebas. La Figura 4.2 ilustra una señal de vibración medida en la armadura para una condición sana y para un daño incipiente (1 mm de reducción en el diámetro de la barra) ubicado en el primer módulo, respectivamente. De acuerdo con esta figura no pueden observar diferencias significativas entre las dos condiciones de la estructura, sana y dañada; por lo tanto, se requiere una metodología capaz de revelar estas diferencias entre una estructura sana y una con daño.

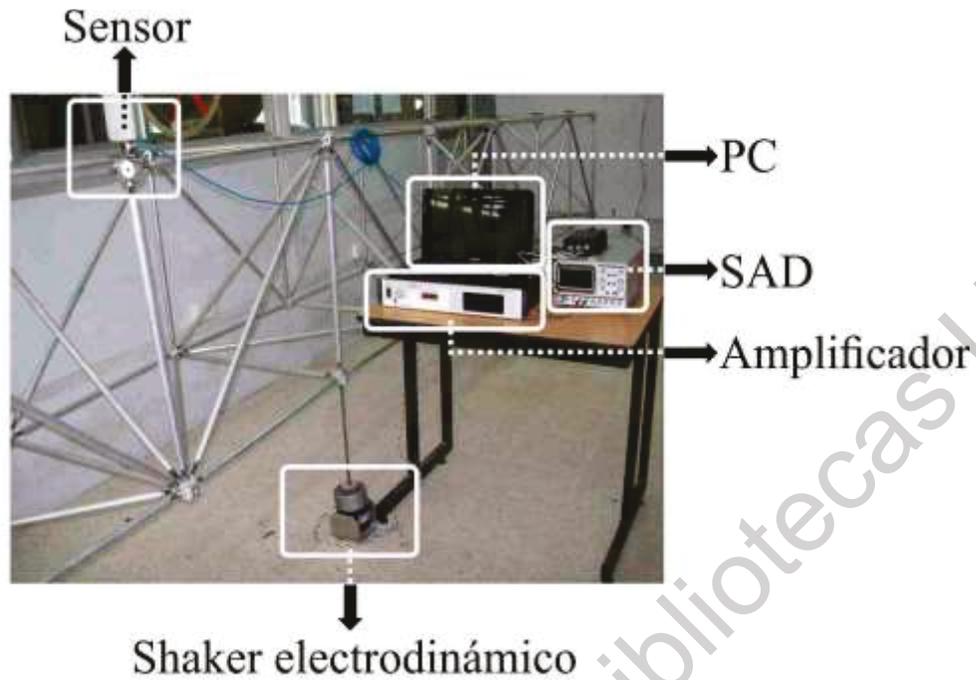


Figura 4.1. Puesta de experimento.

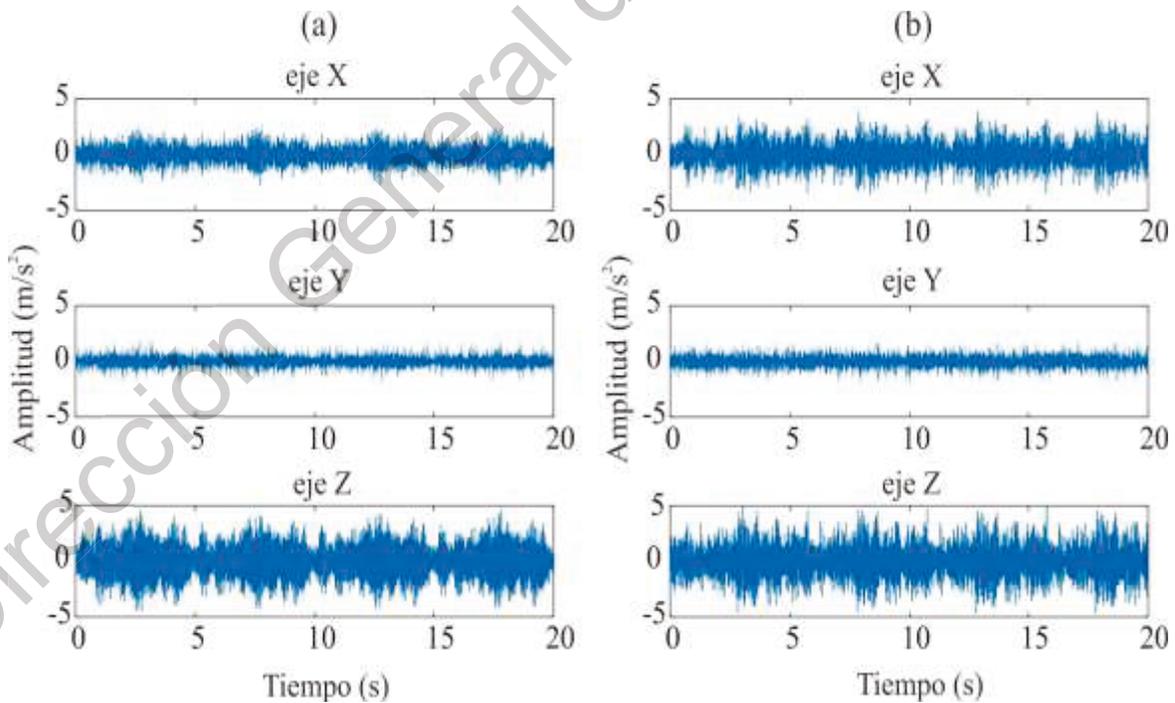


Figura 4.2. Señales de vibración medidas en los ejes X, Y, Z para (a) condición sana y (b) daño incipiente en el primer módulo.

Es muy importante mencionar que las 20 pruebas en estado sano de la estructura permiten tomarlas como base de comparación. Por otro lado, para realizar las pruebas para cada nivel de corrosión se selecciona una ubicación aleatoriamente dentro de cada módulo y una a la vez, como se muestra en la Figura 4.3. En línea punteada se muestra la ubicación donde se colocó los elementos con corrosión y el punto rojo indica la ubicación del sensor.

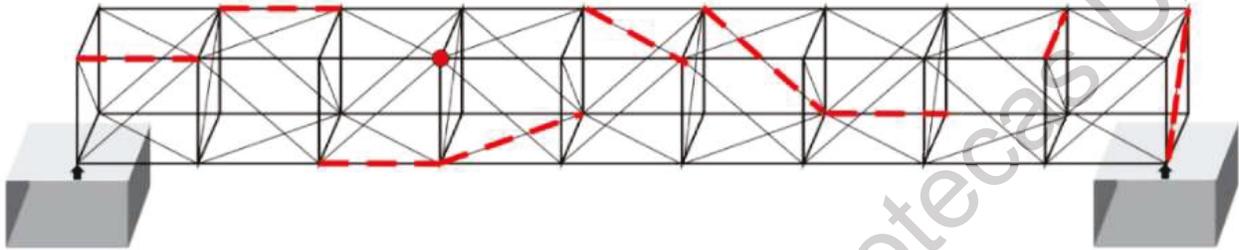


Figura 4.3. Localización de elementos dañados en la armadura.

4.1.2. Elementos dañados

Para el presente trabajo de investigación se indujeron las barras con corrosión dentro de la armadura tomando como base las experiencias reportadas por Amézquita (2012). El daño por corrosión en las barras se aceleró sumergiendo los extremos de las barras en ácido clorhídrico para simular los efectos que el medio ambiente causa sobre las estructuras. El diámetro exterior en las puntas de las barras se redujo en 1, 3, 5 y 8 mm debido al efecto de la corrosión. La barra no dañada (sana) presenta 19 mm de diámetro, y los diámetros correspondientes a daño incipiente, ligero, moderado y severo son 18 mm, 16 mm, 14 mm y 11 mm, respectivamente, los cuales se observan en la Figura 4.4.



(a)

(b)

Figura 4.4. Daños generados por corrosión a las barras de aluminio; (a) vista superior y (b) vista frontal.

4.1.3. Resultados

Primeramente, con el fin de evaluar que se está adquiriendo el comportamiento correcto de la estructura por medio de los sensores, la armadura es modelada por medio del software SAP2000 (ver Figura 4.5) para estimar sus frecuencias naturales de manera analítica con el fin de contrastar sus resultados con las mediciones experimentales hechas.

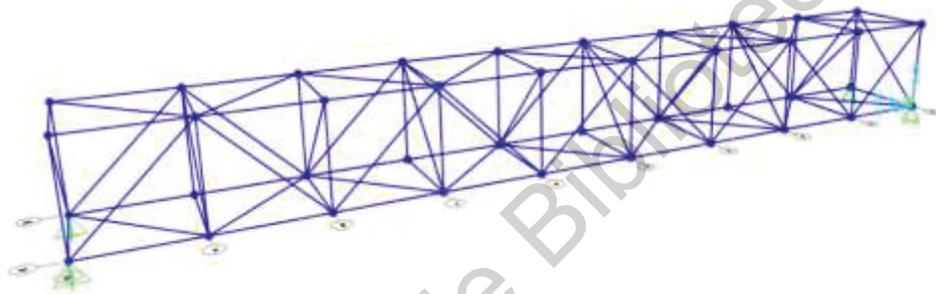


Figura 4.5. Modelado de la armadura en el software SAP2000.

En la Tabla 4.1 se muestran los valores de la armadura, se observa que son valores similares para las primeras 5 frecuencias excepto para la número 4 donde hay una diferencia mayor, esto debido principalmente que en los modelos de elemento finito se generan en base a varias consideraciones idealistas tales como el correcto empotramiento de la estructura. Sin embargo, esto permite mostrar que la señal adquirida contiene la información correcta de la dinámica de la armadura.

Tabla 4.1. Frecuencias naturales de la armadura.

# DE FRECUENCIA	SAP2000 Hz	EXPERIMENTAL Hz
1	16.48	15.67
2	20.08	20.50
3	29.76	27.17
4	40.61	44.00
5	44.58	45.50

Una vez comprobado que las señales obtenidas contienen la información correcta referente al comportamiento dinámico de la armadura, estas señales correspondientes a la condición sana y los diferentes niveles de corrosión son descompuestas en sus diferentes bandas de frecuencia (IMFs por sus siglas en inglés) por los tres métodos basados en EMD (EMD, EEMD y CEEMD). La Figura 4.6 muestra las primeras 7 IMFs obtenidas para la condición sana de la armadura y de daño incipiente en el eje X, utilizando los métodos EMD, EEMD y CEEMD, respectivamente.

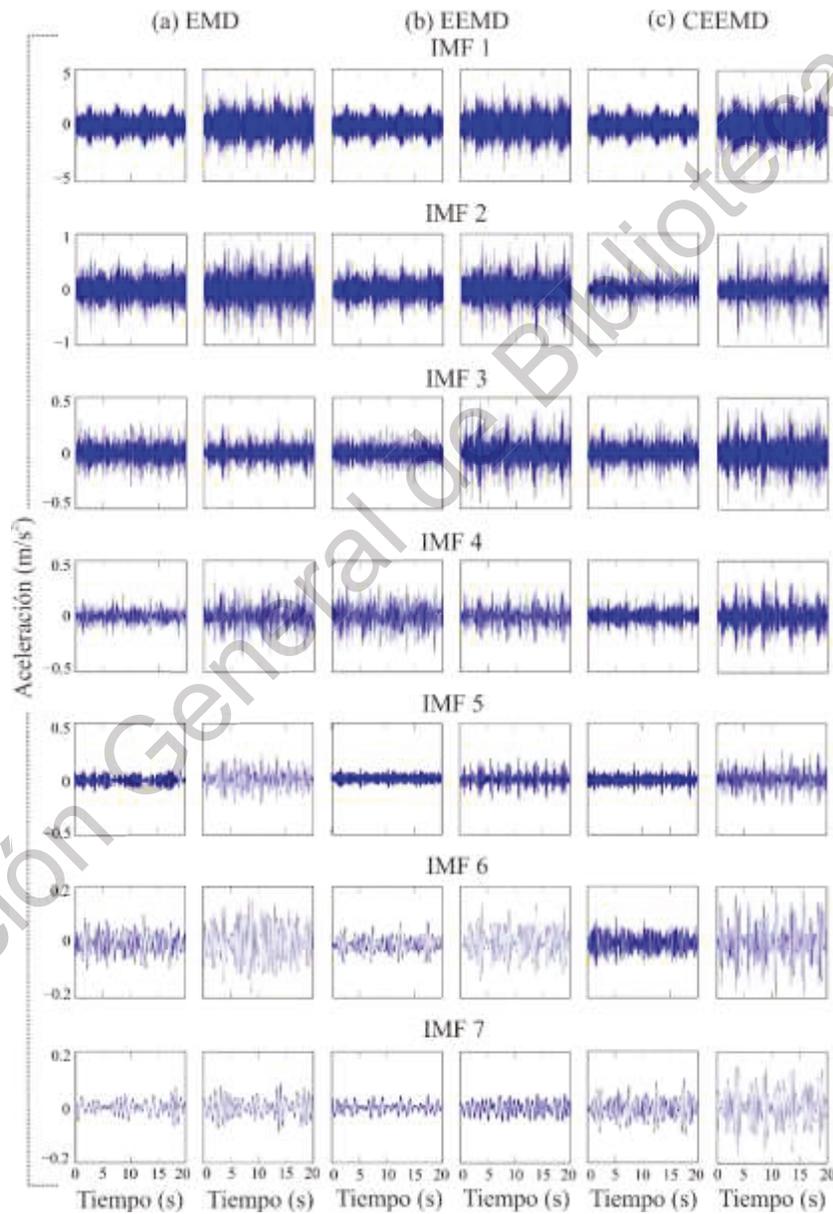


Figura 4.6. Primeras siete IMFs obtenidas para estado sano y daño incipiente (ubicados en el primer módulo) en el eje X, utilizando EMD, EEMD y CEEMD, respectivamente.

De acuerdo con la Figura 4.6, es evidente que no hay diferencias visuales significativas entre las IMFs obtenidas con los tres métodos EMD y la condición sana y con daño; por lo tanto, la importancia de estimar características o patrones dentro de estas descomposiciones para poderlas asociar al fenómeno estudiado. En este sentido, todas las descomposiciones estimadas por los tres algoritmos basados en la técnica EMD y los tres ejes son analizadas por medio de las diferentes medidas no lineales, la entropía de Shannon, la curtosis y el sesgo, con el fin de estimar diferentes características o patrones para poder determinar la condición de la armadura, especialmente cuando la armadura presenta una falla en su estado inicial o incipiente. Una vez calculadas las características para las diferentes IMFs de los 3 métodos de descomposición, estas son analizadas por medio del método estadístico ANOVA con el fin de identificar cual o cuales, que IMFs y que técnica basada en la EMD son las más discriminativas para ser relacionadas con la evaluación de la condición de la armadura. Basado en el análisis de ANOVA, se identificó que la entropía de Shannon en conjunto con la IMF₁ de los tres métodos de descomposición son los más adecuados para la evaluación de la armadura.

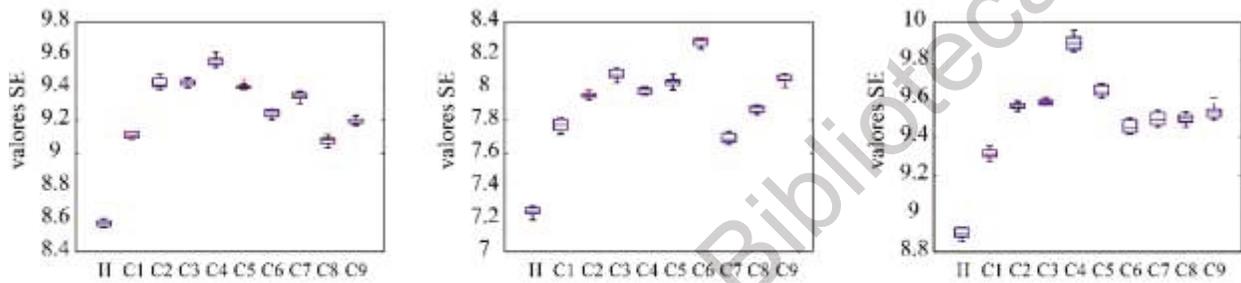
La Tabla 4.2 resume los valores de p calculados para la entropía de Shannon con los tres métodos de EMD y para las primeras 7 IMFs de cada eje del sensor. Es importante mencionar que los valores de entropía de Shannon obtenidos para la IMF₁ para los tres métodos tienen el valor de p más bajo, lo que indica que son los más adecuados para realizar la tarea de evaluar la condición de la estructura. Además, también se debe tener en cuenta que los tres métodos de EMD tienen valores p muy cercanos.

Tabla 4.2. Valores P estimados por ANOVA de una vía para los 3 métodos EMD e IMFs.

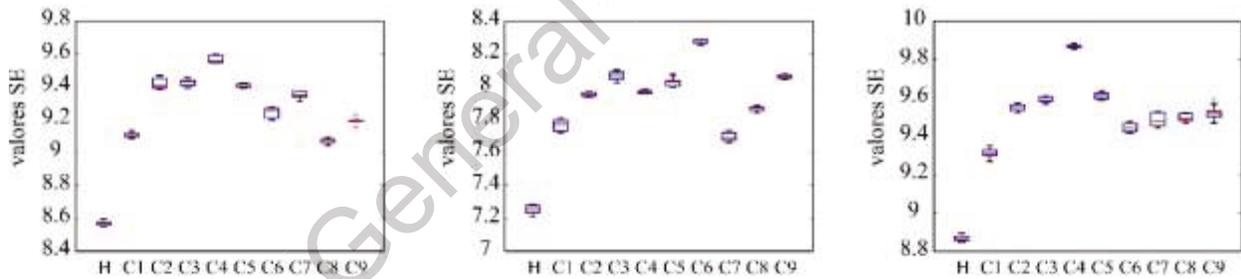
	Eje X			Eje Y			Eje Z		
	EMD	EEMD	CEEMD	EMD	EEMD	CEEMD	EMD	EEMD	CEEMD
IMF1	8.63×10^{-98}	1.32×10^{-97}	6.29×10^{-98}	2.65×10^{-91}	2.17×10^{-91}	4.38×10^{-91}	1.47×10^{-91}	1.43×10^{-97}	3.55×10^{-98}
IMF2	1.13×10^{-13}	2.86×10^{-09}	2.46×10^{-05}	5.68×10^{-04}	0.00427	0.03355	2.64×10^{-06}	7.36×10^{-07}	6.25×10^{-07}
IMF3	4.45×10^{-61}	1.95×10^{-69}	3.46×10^{-65}	3.47×10^{-23}	1.13×10^{-40}	1.52×10^{-51}	9.78×10^{-57}	4.10×10^{-72}	1.51×10^{-11}
IMF4	1.31×10^{-65}	7.14×10^{-74}	2.52×10^{-63}	1.60×10^{-49}	1.26×10^{-63}	3.46×10^{-62}	4.55×10^{-55}	2.85×10^{-54}	2.33×10^{-81}
IMF5	2.13×10^{-83}	2.54×10^{-85}	7.99×10^{-37}	1.17×10^{-50}	1.32×10^{-58}	8.75×10^{-50}	1.45×10^{-44}	2.16×10^{-55}	8.96×10^{-51}
IMF6	3.48×10^{-73}	5.46×10^{-88}	2.73×10^{-92}	3.22×10^{-40}	7.19×10^{-49}	5.38×10^{-38}	3.31×10^{-31}	1.25×10^{-43}	1.35×10^{-47}
IMF7	6.18×10^{-56}	9.47×10^{-45}	3.84×10^{-57}	3.34×10^{-43}	4.24×10^{-45}	9.73×10^{-48}	2.40×10^{-16}	2.73×10^{-27}	1.86×10^{-47}

La Figura 4.7 muestra gráficamente los valores la entropía de Shannon para la condición sana (H) y daño incipiente encontrado en cada módulo denotado por (Ci i =1,...9) utilizando la IMF₁ para los ejes X, Y y Z y por los métodos EMD, EEMD y CEEMD, respectivamente. Es posible observar que los tres métodos basados en EMD estiman resultados similares, ya que todas las gráficas de caja siguen el mismo patrón, lo que justifica que el método EMD en conjunto con la entropía de Shannon sea el más adecuado para la evaluación de la armadura.

(a) EMD



(b) EEMD



(c) CEEMD

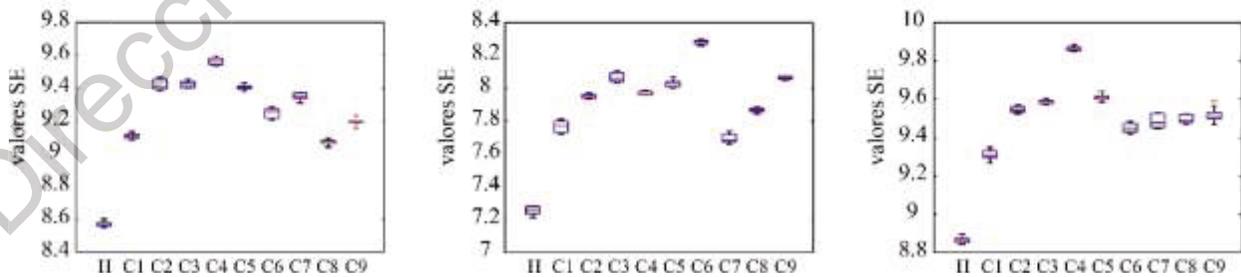


Figura 4.7. Distribución de los valores de la entropía de Shannon (SE) estimados para la condición sana (H) y daño incipiente para cada módulo (C) utilizando la IMF 1 para los ejes X, Y y Z, y para los métodos (a) EMD, (b) EEMD, y (c) CEEMD, respectivamente.

Tomando como base los resultados de ANOVA y las Figura 4.7, el método EMD fusionado con la entropía de Shannon (SE) es capaz de identificar daños incipientes; los otros dos métodos de EMD (EEMD y CEEMD) se pueden descartar porque requieren mayor carga computacional. De esta manera, la carga computacional en la metodología propuesta se mantiene al mínimo. Por lo tanto, la IMF 1 en el eje X, obtenido mediante el método EMD y SE, se selecciona como la más discriminante.

Una vez seleccionado el método más útil para evaluar la condición de la estructura, esta se emplea para verificar su eficiencia bajo los otros 3 niveles de daño propuestos que son; ligero, moderado y severo, que se representan mediante una reducción del diámetro en los extremos de la barra de 3, 5 y 8 mm, respectivamente. La Figura 4.8 ilustra la distribución de los valores SE estimados utilizando la IMF₁ del eje X para la condición sana (H) y para todos los niveles de daño de corrosión propuestos en esta investigación; 1 mm (I: incipiente), 3 mm (L: ligero), 5 mm (M: moderado) y 8 mm (S: severo). Al observar esta figura, los valores SE obtenidos para la condición sana y los diferentes niveles de corrosión están completamente separados, lo que nos permite detectar los daños independientemente de su ubicación.

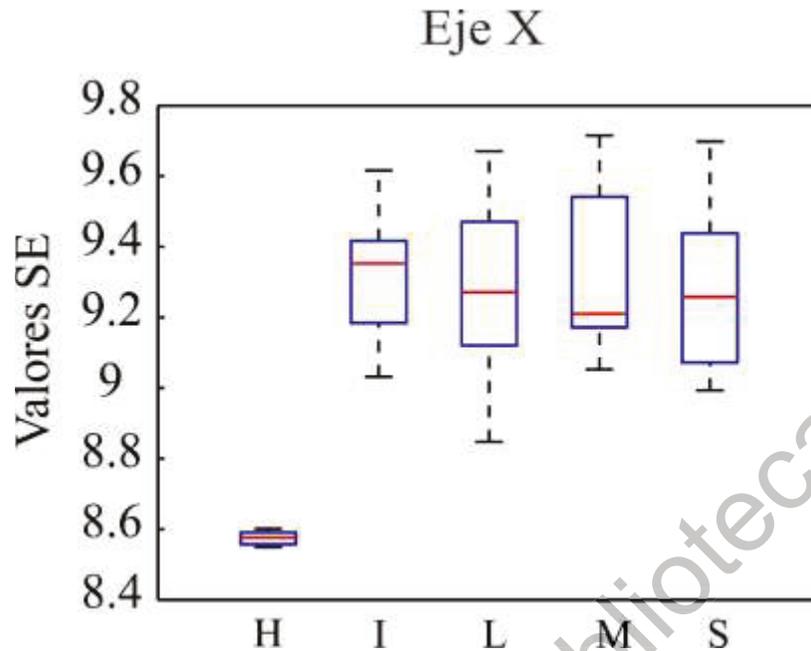


Figura 4.8. Distribución de los valores SE estimados utilizando la IMF₁ del eje X para el estado sano (H) y para los cuatro niveles de corrosión, uniendo todos los valores SE estimados en todos los módulos (I: incipiente), (L: ligero), (M: moderado) y (S: severo).

Finalmente, una vez que se han estimado todos los valores SE para las 5 condiciones (sana y 4 niveles de daño), y con base al ANOVA de una vía, se propone un clasificador tipo árbol de decisiones (CTC) basado en si o sino (if-else), donde 2 intervalos son empelados para la evaluación de la estructura, intervalo 1 (condición sana): $8.4 \leq SE < 8.69$ e intervalo 2 (condición de daño): $8.69 \leq SE \leq 9.8$. La Tabla 4.3 presenta los resultados de clasificación en forma una matriz de confusión, mostrando que la metodología propuesta es eficiente y confiable para evaluar la condición de la armadura, ya que un 100% de eficiencia es obtenido.

Table 4.3. Resultados del clasificador basados en los estimados intervalos empleando ANOVA de los diferentes niveles de daño para todos los cubos.

Condición de la estructura		Sana (%)	Corrosión (%)	Efectividad (%)
Sana		100	0	100
Corrosión	Incipiente (Reducción 1 mm)	0	100	100
	Ligero (Reducción 3 mm)			
	Moderado (Reducción 5 mm)			

	Severo (Reducción 8 mm)	
Efectividad Total		100%

4.2. Caso de estudio 2

4.2.1. Puesta de experimento

La Figura 4.9 ilustra la puesta de experimento realizada para evaluar la metodología propuesta y la condición de un edificio de 4 pisos localizado en la Universidad Autónoma de Querétaro campus San Juan del Río. Con el fin de evaluar la dinámica o respuesta vibracional de la estructura, esta es sujeta a una excitación forzada inducida por un martillo de impacto de la marca KISTLER modelo 9728A20000. Para medir la respuesta de la estructura ante dicha excitación, se empleó cuatro acelerómetros de tres ejes de la marca KISTLER modelo 8395a, los cuales son colocados uno en cada entrepiso de la estructura (denotados por los círculos rojos en la figura), esto con el fin de poder localizar una zona de falla. Con el fin de adquirir las mediciones hechas por los sensores y enviarlas a la PC para su posterior análisis, un sistema de adquisición basado en la tarjeta National Instruments serie M modelo NI-USB 6211 es empleado, donde una frecuencia de muestreo de 5,000 Hz para obtener 90,000 muestras durante un tiempo de ventana de 18 segundos es fijada. El experimento se repite 20 veces para cada condición (estructura sana y elementos con diferentes niveles de severidad producida por grietas, es decir, ligero, moderado y severo) y para cada entrepiso, resultando en un total de 260 pruebas.

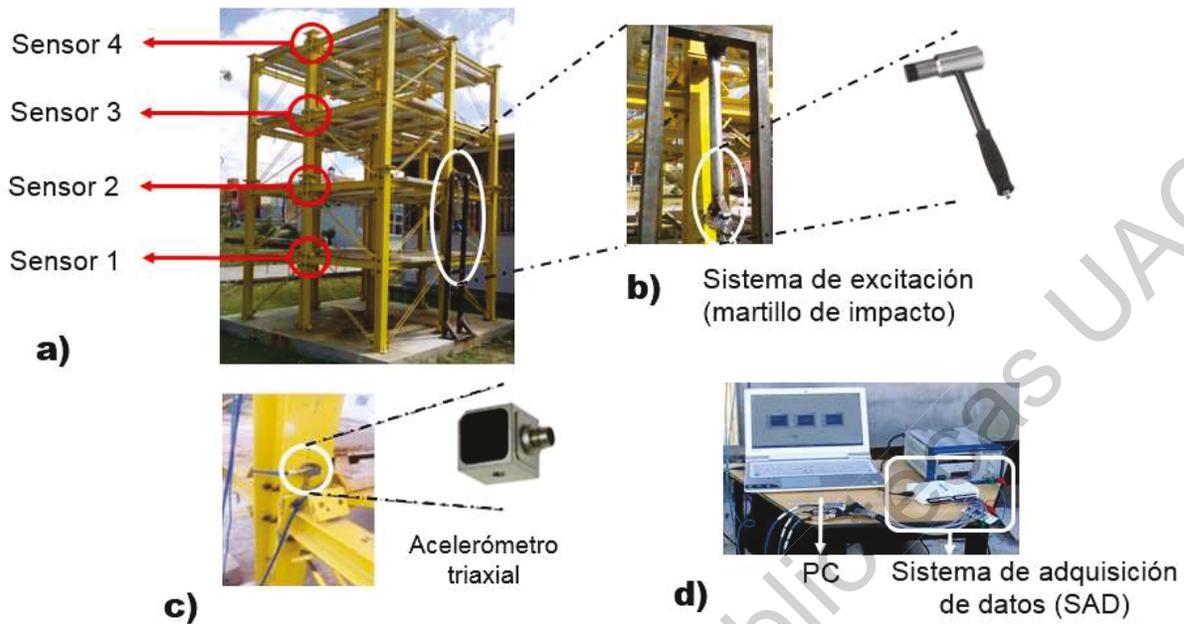


Figura 4.9. Desarrollo de experimento. a) Estructura bajo estudio y localización de los sensores, b) sistema de excitación (martillo de impacto), c) colocación de acelerómetro sobre las columnas, d) sistema de adquisición de datos.

Las 20 pruebas en estado sano de la estructura permiten tomarlas como base de comparación. Por otro lado, para realizar las pruebas para cada nivel de agrietamiento se seleccionó una ubicación dentro de cada entrepiso (viga resalta de color rojo) y una a la vez, como se muestra en la Figura 4.10. En línea punteada se muestra la ubicación donde se colocó los elementos con corrosión y el punto rojo indica la ubicación del sensor.

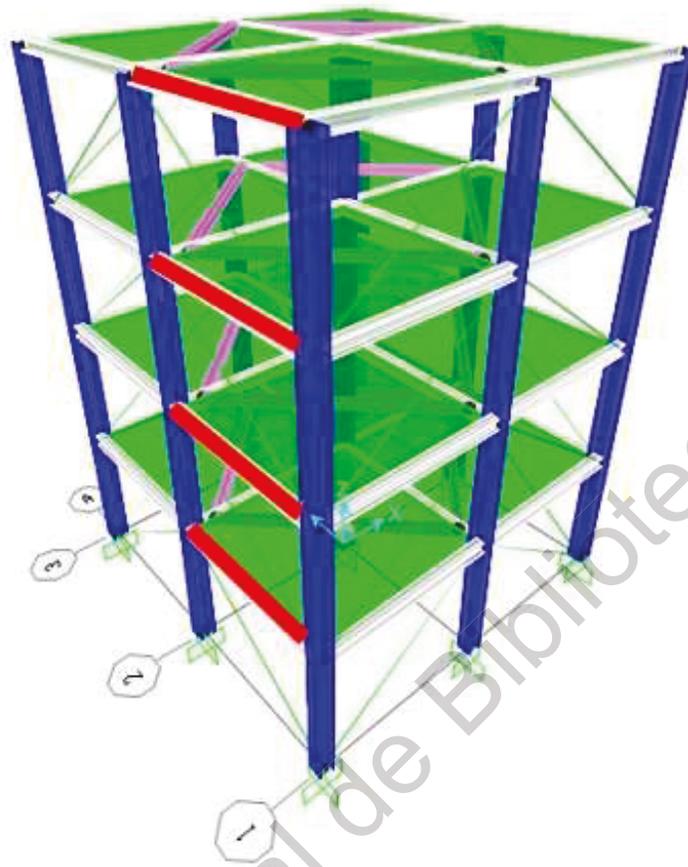


Figura 4.10. Localización de elementos dañados en la estructura de marcos rígidos.

4.2.2. Elementos dañados

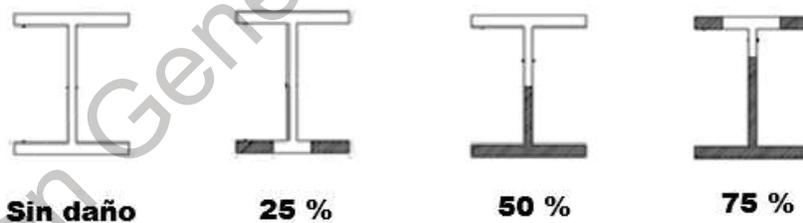
En las vigas de acero, las grietas se simularon mediante diferentes escenarios de daños a través de cortes de sierra, perpendiculares al eje longitudinal de las vigas, similar a lo reportado por Salgado *et al.* (2014). La Figura 4.11(a) ilustra una viga sin daño, así mismo la Figura 4.11(b) muestra los elementos con grietas que representan daño ligero, moderado y severo (denotado por los círculos rojos en la figura), ya que la sección transversal de la viga se reduce en 25%, 50% y 75%, respectivamente, como se aprecia en la Figura 4.11(c), lo que produce una disminución en la rigidez axial en ese mismo porcentaje. La posición de los sensores se determinó de tal manera que se obtuvieron mediciones a todo lo largo de las estructuras y se tuvo una equidistancia entre cada sensor tomando como base lo reportado por Amézquita y Adeli (2014).



(a)



(b)



(c)

Figura 4.11. Daños generados por cortes de sierra en las vigas de acero, (a) viga sin daño, (b) daño ligero, moderado y severo y (c) pérdida de área transversal en cada condición de daño.

4.2.3. Resultados

Similar al caso previo, primeramente, es evaluado a través del comportamiento de la estructura por medio de los sensores y un modelo del edificio de 4 pisos hecho en el software

SAP2000 (ver Figura 4.12) con el fin de estimar sus frecuencias naturales de manera analítica con el fin de contrastar sus resultados con las mediciones experimentales hechas. Y con base en ello, corroborar que los sensores están adquiriendo la dinámica de la estructura correctamente.

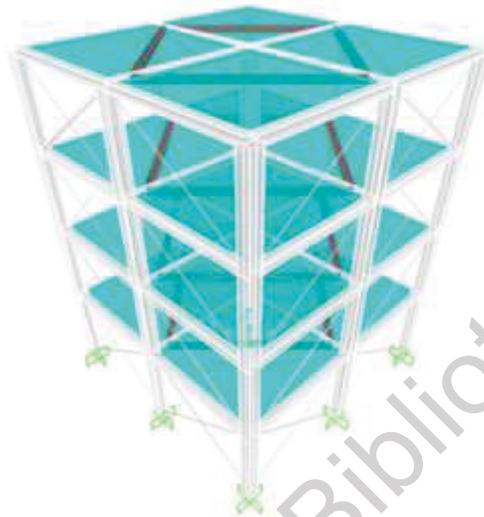


Figura 4.12. Modelado de la estructura de marcos rígidos en el software SAP2000.

La Tabla 4.4 muestra los valores de las frecuencias naturales obtenidas tanto de manera analítica como experimental de la estructura de marcos rígidos, donde se puede observar que son valores similares para las primeras 5 frecuencias excepto para la número 3 donde hay una mayor diferencia, esto debido principalmente que en los modelos de elemento finito se generan en base a varias consideraciones idealistas tales como el medidas de los elementos, el correcto empotramiento de la estructura, entre otras. Sin embargo, esto permite mostrar que la señal adquirida contiene la información correcta de la dinámica del edificio.

Tabla 4.4. Frecuencias naturales de la estructura de marcos rígidos.

# DE FRECUENCIA	SAP2000 Hz	EXPERIMENTAL Hz
1	8.90	8.74
2	9.56	9.41
3	12.52	17.84
4	26.02	26.41
5	28.94	29.11

Una vez comprobado que las señales obtenidas contienen la información correcta referente al comportamiento dinámico del edificio, estas señales correspondientes a la condición sana y los diferentes niveles de agrietamiento son descompuestas en sus diferentes bandas de frecuencia solamente por la EMD debido a los grandes resultados mostrados en el caso 1 y además con el fin de corroborar que esta técnica es capaz de analizar otro tipo de estructuras y otro tipo de excitación. La Figura 4.13 muestra un ejemplo de las primeras 5 IMFs obtenidas para la condición sana de la armadura y de daño ligero en el eje X para el sensor localizado en el cuarto entrepiso, respectivamente. Es muy importante mencionar que en la primera etapa de la metodología se emplea ese sensor por la lejanía con respecto a la falla, además permite identificar cual IMF y que eje permite evaluar de forma correcta la condición de la estructura.

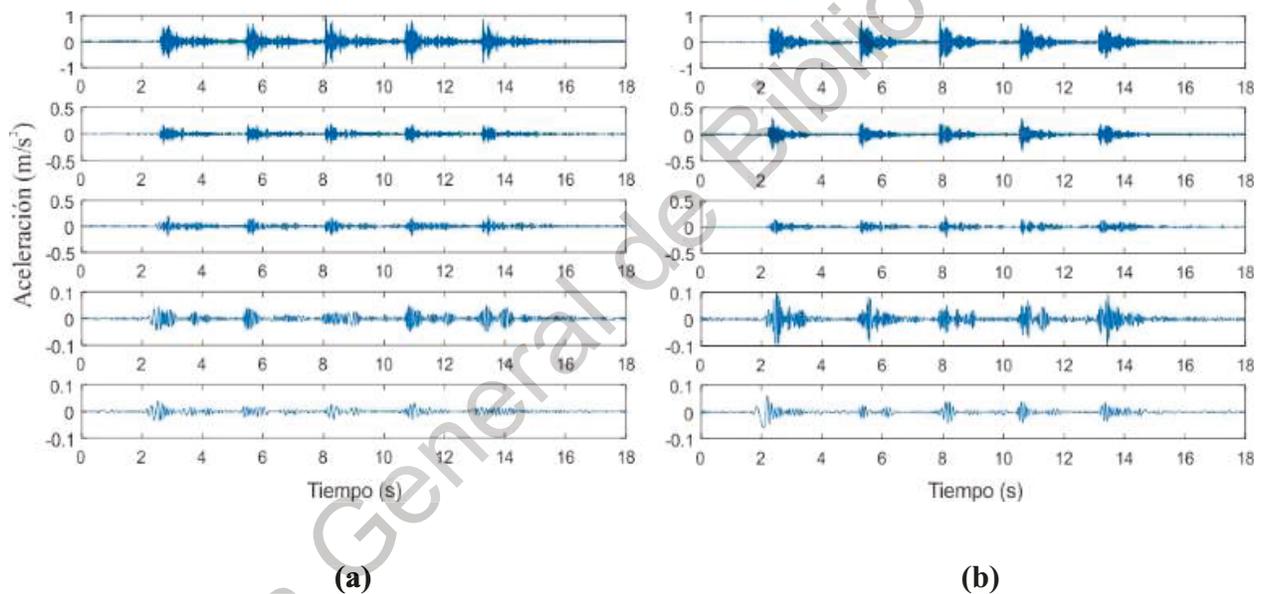


Figura 4.13. Las primeras cinco IMFs obtenidas en el cuarto entrepiso para el eje X, utilizando la técnica EMD, para (a) estado sano y (b) daño ligero, respectivamente.

De acuerdo con esta figura, es evidente que no hay diferencias visuales significativas en las IMFs obtenidas con la técnica EMD; por lo tanto, la importancia de aplicar un método o medida no lineal capaz de identificar características o patrones dentro de estas señales. Por esta razón y de acuerdo con los resultados obtenidos en el caso anterior presentado se emplea la entropía de Shannon para estimar estos patrones.

Una vez analizadas todas las señales a través de la entropía de Shannon estos valores son evaluados por el método estadístico de ANOVA con el fin de determinar cuál banda de frecuencia en conjunto la entropía de Shannon es la más adecuada para evaluar la condición del edificio. Después de un análisis exhaustivo por medio de ANOVA, se determinó que al igual que en el caso anterior presentado, la IMF₁ en conjunto con la entropía de Shannon presentan los valores de probabilidad más bajos, lo que indica que esta banda de frecuencia en conjunto con la entropía de Shannon es la más adecuada para evaluar la condición de la estructura. La Tabla 4.5 resume los valores de p calculados por la técnica EMD para las primeras 5 IMFs de cada eje comparando los valores de una condición sana y una condición de daño de nivel ligero. Vale la pena mencionar que los valores SE obtenidos para la IMF₁ tienen el valor más bajo en los 3 ejes, además, en el eje Z se presenta el valor más pequeño de todos, lo cual indica que la IMF₁ del eje Z arroja el valor más discriminante.

Tabla 4.5. Valores P estimados por ANOVA de una vía para la técnica EMD.

	EJE X	EJE Y	EJE Z
IMF1	5.60×10^{-28}	6.81×10^{-27}	1.24×10^{-43}
IMF2	9.06×10^{-16}	6.92×10^{-21}	2.87×10^{-27}
IMF3	3.64×10^{-17}	3.89×10^{-17}	2.88×10^{-06}
IMF4	0.0017	1.57×10^{-17}	5.61×10^{-08}
IMF5	0.0331	7.47×10^{-13}	0.0002

La Figura 4.14 muestra gráficamente los valores SE para la condición sana (H) y daño ligero encontrados en cada entrepiso (L_i , $i = 1, \dots, 4$) con la IMF₁ para los ejes X, Y y Z. Es posible observar que en los ejes X y Z se obtienen los mejores resultados ya que no se presentan traslapes en las gráficas, lo que justifica que la técnica EMD en conjunto con la entropía de Shannon sea capaces de identificar patrones en este tipo de señales con el fin de poderlas asociar al fenómeno estudiado.

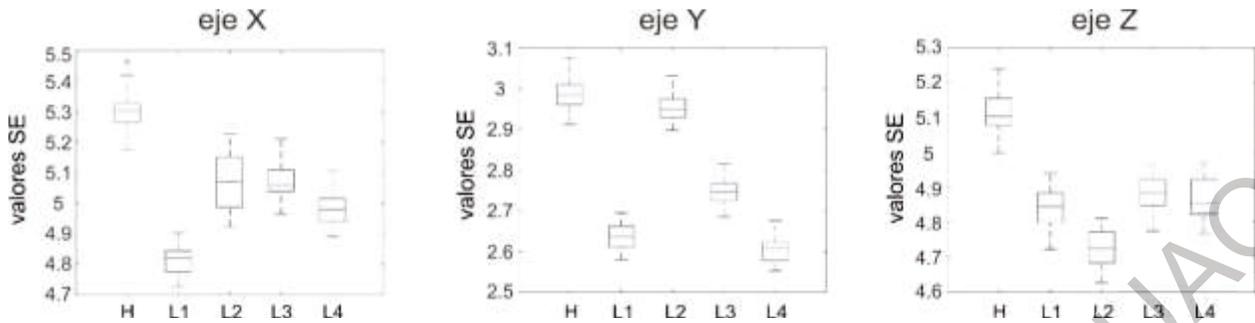


Figura 4.14. Distribución de los valores SE estimados para la condición sana (H) y daño ligero para cada entrepiso (Li) utilizando la IMF_1 para los ejes X, Y y Z, respectivamente.

Tomando como base los resultados de ANOVA y la Figura 4.14, el método EMD fusionado con SE es capaz de identificar daños ligeros en la estructura. De esta manera, la carga computacional en la metodología propuesta se mantiene al mínimo. Por lo tanto, la IMF_1 con en el eje Z, obtenida mediante el método EMD, se selecciona como la más discriminante.

Una vez seleccionado la banda de frecuencia en conjunto la entropía de Shannon más capaz para evaluar la condición de la estructura, se utiliza para verificar su eficiencia bajo los otros 2 niveles de daño propuestos, moderado y severo, que se representan mediante una reducción de la sección transversal de la viga de 50 y 75%, respectivamente. La Figura 4.15 ilustra la distribución de los valores SE estimados utilizando la IMF_1 con en el eje Z para la condición sana (H) y para todos los niveles de daño de agrietamiento propuestos en esta investigación; 25% (L: ligero), 50% (M: moderado) y 75% (S: severo). Al observar esta figura, los valores SE obtenidos para la condición sana y los diferentes niveles de agrietamiento están completamente separados, lo que nos permite detectar los daños independientemente de su ubicación.

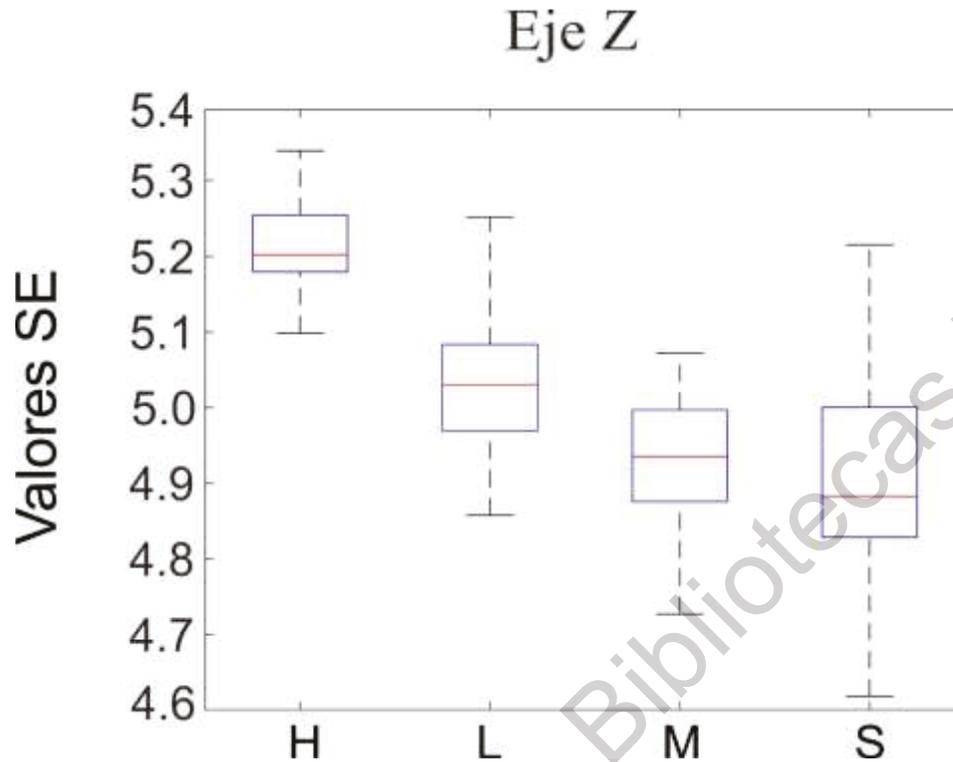


Figura 4.15. Distribución de los valores SE estimados utilizando la IMF 1 en el eje Z para el estado sano (H) y para los tres niveles de agrietamiento, uniendo todos los valores SE estimados en todos los entepisos; (L: ligero), (M: moderado) y (S: severo).

Finalmente, una vez que se han estimado todos los valores SE para las 4 condiciones (sana y 3 niveles de daño), y con base al ANOVA de una vía, se propone un clasificador tipo árbol de decisiones (CTC) basado en si o sino (if-else), donde se establecen 2 intervalos para la evaluación de la estructura, intervalo 1 (condición sana): $5.17 \leq SE \leq 5.27$ e intervalo 2 (condición de daño): $4.83 \leq SE \leq 5.09$. La Tabla 4.6 presenta los resultados de clasificación en forma una matriz de confusión, mostrando que la metodología propuesta es eficiente y confiable para evaluar la condición de la condición del edificio, ya que se obtiene una eficiencia total del 90%. Es muy importante mencionar que se obtuvo un 85% de eficiencia para distinguir una estructura con daño y esto es debido principalmente a que el daño ligero traslapa ciertos valores con la condición sana ya que esta condición genera un cambio muy ligero en las señales de vibración adquiridas, representando un reto su identificación.

Table 4.6. Resultados del clasificador basados en los intervalos estimados empleando ANOVA de los diferentes niveles de daño para todos los entrespisos.

Condición de la estructura		Sana (%)	Grieta (%)	Efectividad (%)
Sana		100	0	100
Grieta	Ligero	15	85	85
	Moderado			
	Severo			
Efectividad Total				90%

A pesar de los buenos resultados obtenidos para distinguir entre una estructura sana y con daño, la localización y la cuantificación de la severidad del daño es una parte importante del monitoreo estructural. En este sentido, los valores de los tres ejes X, Y y Z de la IMF₁ del sensor 4 presentan variaciones de acuerdo con la localización y el nivel de daño, sin embargo, no son suficientes para poder determinar la zona y el nivel de daño, es por ello, que los valores de los otros tres sensores correspondientes a la IMF₁ también son empelados, ya que también presentan variaciones de acuerdo con localización y nivel de daño. Por lo tanto, al tener una gran cantidad de indicadores correspondientes a los 3 ejes y los cuatro sensores de la IMF₁, una red neuronal artificial es la ideal para evaluar la condición de la estructura de manera automática, ya que esta puede trabajar con una gran cantidad de información de entrada con el fin de asociarla a una salida deseada (ver Figura 4.16).

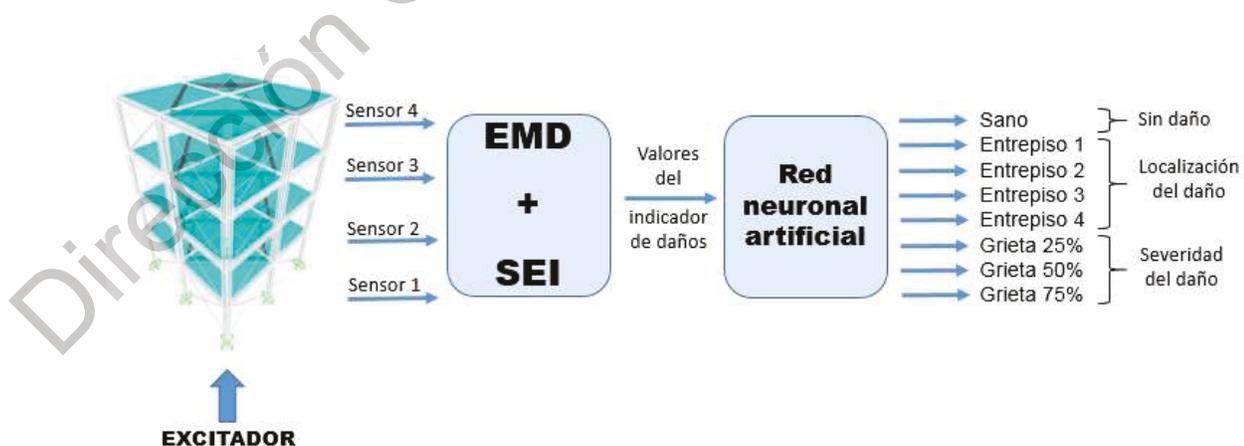


Figura 4.16. Proceso de evaluación de la condición estructural.

La red neuronal artificial empleada consiste en 12 nodos de entrada, los cuales reciben los valores de los intervalos calculados de la IMF_1 y entropía de Shannon de las señales de vibración para cada uno de los 4 sensores y para los 3 ejes, 2 capas ocultas con 24 y 12 nodos, respectivamente, y 8 nodos de salida son relacionados con la condición de la estructura (ver Figura 4.14). Para el entrenamiento de la red neuronal propuesta se empleó el software MATLAB mediante un algoritmo de entrenamiento llamado Levenberg-Marquardt, ya que este ha presentado buenos resultados para asociar las entradas con sus respectivas salidas (Adeli y Jiang, 2009; Lopez-Ramirez *et al.*, 2016), además de que las neuronas en las capas ocultas y en la capa de salida utilizan una función de activación Logsig ya que los valores son positivos y esta función se adapta mejor para el análisis de este tipo de valores. Es muy importante mencionar que para el diseño de la capa oculta se refirió a la literatura, donde la teoría indica que el número de neuronas en la capa oculta debe ser de mínimo el doble del número de neuronas en la capa de entrada. (Lopez-Ramirez *et al.*, 2016). Para el estudio en cuestión, serían 24, no obstante, efectuando un análisis experimental exhaustivo, en el que se incrementaba poco a poco el número de ellas, se encontró que una capa oculta más con 12 neuronas permitió los mejores resultados.

La red neuronal fue entrenada con un conjunto de datos correspondiente para cada condición de daño (400 valores para cada condición), los cuales fueron generados de forma sintética de acuerdo con los límites obtenidos de la distribución de datos de la entropía de Shannon obtenida por ANOVA y las primeras 10 pruebas de la estructura. Por lo tanto, el resto de las pruebas, 10 para cada condición, son empleadas para validar la eficiencia de la red neuronal para poder detectar, localizar y cuantificar la severidad del daño. La Tabla 4.7 muestra los resultados de la red neuronal para evaluar la condición del edificio de forma automática, donde se puede observar que la metodología propuesta es capaz de poder detectar, localizar y cuantificar la severidad del daño con una eficiencia del 98%, ya que presentó un solo error para identificar la ubicación del daño moderado, pero sí identificó que la estructura presentaba un daño, por lo tanto, se puede mencionar que la metodología es capaz de evaluar la condición eficientemente.

Tabla 4.7. Eficiencia de la metodología propuesta para localizar y cuantificar daños.

CONDICIÓN DE LA ESTRUCTURA	LOCALIZACIÓN DEL DAÑO			
	Entrepiso 1	Entrepiso 2	Entrepiso 3	Entrepiso 4
Sana	100%			
Daño ligero	100%	100%	100%	100%
Daño moderado	100%	100%	90%	100%
Daño severo	100%	100%	100%	100%

4.3. Determinación de la bondad de ajuste del modelo desarrollado

Una vez desarrollado y probado el modelo en las estructuras, se procedió a comparar la metodología propuesta para la detección, localización y cuantificación del daño en estructuras contra las metodologías encontradas en la literatura revisada con el fin de determinar la bondad de ajuste del modelado desarrollado. Es muy importante mencionar que, de acuerdo a la revisión literaria hecha, las metodologías propuestas solamente realizan una o dos etapas del monitoreo estructural; por ejemplo, detección, detección y localización, detección y cuantificación, pero no las tres al mismo tiempo.

Es importante mencionar que el método propuesto puede convertirse en una herramienta útil para evaluar el estado de las estructuras civiles porque; (a) se puede considerar de baja carga computacional, lo que permite su implementación en hardware como los arreglos de compuertas programables en campo (FPGA por sus siglas en inglés), procesadores de señal digital (DSP), etc., (b) requiere sólo un sensor para determinar si hay daños en la estructura, y (c) detecta la presencia de daños incipientes en la estructura independientemente de su ubicación, superando el trabajo reciente propuesto por An *et al.* (2017) y Blachowski *et al.* (2017), donde sus propuestas sólo son capaces de identificar daños a partir de un nivel moderado; además, requieren más de un sensor.

5. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

En este trabajo de tesis se propone una nueva metodología para monitorear la condición de estructuras civiles metálicas. La propuesta consiste en la integración de diversas técnicas avanzadas de procesamiento basadas en el método EMD y diversas medidas no lineales como la entropía de Shannon, curtosis y sesgo, con el fin de estimar características o patrones en la respuesta vibratoria que permitan determinar la condición de las estructuras evaluadas. Para determinar el método y la medida no lineal más capaces de estimar la condición de la estructura, se realiza un análisis estadístico llamado ANOVA, resultando que la primera banda de frecuencia o IMF_1 de la EMD en conjunto con la entropía de Shannon es la más capaz para evaluar la condición de ambas estructuras analizadas. En este sentido, para el primer caso de estudio que fue la armadura, la metodología propuesta es eficaz y confiable para detectar daños hasta de nivel inicial o incipiente, ya que se obtuvo una efectividad del 100%, sin importar la ubicación del daño con un solo sensor.

Con respecto del caso de estudio 2, se observa que la metodología es capaz de determinar si la estructura está dañada o no, la localización y cuantificación de la severidad del daño a través de una red de sensores (4 acelerómetros), obtiene una eficiencia global del 98%. Es muy importante mencionar que la localización y cuantificación de la severidad del daño se logra debido a que la estructura es monitoreada por varios sensores, lo cuales fueron distribuidos a una misma distancia a lo largo de la estructura, lo que permitió dividir la estructura en 4 diferentes zonas o subestructuras y con base en ello tener diferentes valores que variaban con respecto a la zona dañada, además, con la ayuda de una red neuronal se logró evaluar correctamente la condición de la estructura de marcos rígidos. Por lo tanto, los resultados presentados permiten afirmar que la metodología propuesta puede considerarse como una alternativa sólida en SHM, donde los recursos computacionales y el número de sensores son limitados.

Con base en lo anterior, el sistema desarrollado fue capaz de adquirir y almacenar las señales de vibración provenientes de los acelerómetros, en una computadora personal para su posterior procesamiento. Una vez obtenidas las señales de vibración, se implementó la metodología propuesta para diagnosticar el estado de las estructuras y se observó que en lo referente a la detección de daños, aún en una etapa incipiente, se cumple con este objetivo en las 2 estructuras.

En cuanto a la localización y cuantificación de daños, la metodología propuesta alcanza ambos objetivos, por lo que se cumple con las 3 acciones propuestas en el objetivo general para realizar el diagnóstico de la condición estructural. Con esto, se acepta la hipótesis de que midiendo las vibraciones en las estructuras civiles metálicas utilizadas en este proyecto, se detectan, localizan y cuantifican los daños mediante el sistema de adquisición de datos y procesamiento propuesto.

Una prospectiva de investigación, gracias al uso moderado de los recursos computacionales, es la implementación de los algoritmos propuestos en un sistema hardware tal como un FPGA o un DSP que permita la evaluación de una estructura en tiempo real. En la literatura existen diversos trabajos relacionados con la implementación en hardware, FPGA, de la técnica EMD y la entropía de Shannon (Cabal *et al.*, 2012; Camarena *et al.* 2014), lo que permite asumir que para un trabajo futuro estas técnicas son factibles para ser implementadas en hardware. Por otra parte, la revisión de otras medidas no lineales así como de nuevas técnicas de procesamiento avanzado para la evaluación de tipo distintas de estructuras civiles puede ser llevada a cabo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adeli, H., and Jiang, X. 2006. Dynamic Fuzzy Wavelet Neural Network Model for Structural System Identification. *Journal of Structural Engineering*, 132 (1): 102-111.
- Adeli, H., and Jiang, X. 2009. *Intelligent Infrastructure: Neural Networks, Wavelets, and Chaos Theory for Intelligent Transportation Systems and Smart Structures*. CRC Press.
- Al-Sherrawi, M. H., Lyashenko, V., Edaan, E. M., and Sotnik, S. 2018. Corrosion as a source of destruction in construction, *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 9(5), 306-314.
- Allen, D., and Rainer, J. 1976. Vibration criteria for long-span floors. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 3(2): 165-173.
- Amézquita, J. 2012. Monitoreo de vibraciones en tiempo real para la detección de daños en estructuras. Tesis doctoral UAQ.
- Amezquita, J., Osornio, R., Romero, R., and Dominguez, A. 2012. Hardware-software system for simulating and analyzing earthquakes applied to civil structures. *Natural Hazards and Earth System Science*, 12(1): 61–73.
- Amézquita, J., and Adeli, H. 2014. Signal Processing Techniques for Vibration-Based Health Monitoring of Smart Structures. *Archives of Computational Methods in Engineering*. DOI 10.1007/s11831-014-9135-7.
- Amezquita, J., Valtierra, M., and Adeli, H. 2017. Current efforts for prediction and assessment of natural disasters: Earthquakes, tsunamis, volcanic eruptions, hurricanes, tornados, and floods. *Scientia Iranica*, 24(6):2645-2664.
- Amini, F., and Samani, M. Z. 2014. A Wavelet-Based Adaptive Pole Assignment Method for Structural Control. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 29: 464–477.
- An, Y., Błachowski, B., Zhong, Y., Hołobut, P., and Ou, J. 2017. Rank-revealing QR decomposition applied to damage localization in truss structures. *Structural Control Health Monitoring*, 24(2), e1849.
- Arceo, D. 2012. Diseño de Algoritmos Genéticos (AG) para la detección de daños en estructuras. Tesis de maestría UAQ.

- ASCE. 2016. Failure to Act: Closing the Infrastructure Investment Gap for America's Economic Future, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia.
- Blachowski, B., An, Y., Spencer Jr., B., and Ou, J. 2017. Axial strain accelerations approach for damage localization in statically determinate truss structures. *Computed Aided Civil and Infrastrucure Engineering*, 32, 304–318.
- Cabal-Yepey, E., Valtierra-Rodriguez, M., Romero-Troncoso, R.J., Garcia-Perez, A., Osornio-Rios, R.A., Miranda-Vidales, H., and Alvarez-Salas, R. 2012. FPGA-based entropy neural processor for online detection of multiple combined faults on induction motors. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 30:123–130.
- Camarena-Martinez, D., Valtierra-Rodriguez, M., Garcia-Perez, A., Osornio-Rios, R.A., and Romero-Troncoso, R.J. 2014. Empirical mode decomposition and neural networks on FPGA for fault diagnosis in induction motors. *The Scientific World Journal*, 2014, 908140.
- CEPAL. 2014. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. La estimación de los efectos de los desastres en América Latina. *Serie Medio Ambiente y Desarrollo*, 57. Publicación de las Naciones Unidas.
- Chang, K., and Kim, C. 2016. Modal-parameter identification and vibration-based damage detection of a damaged steel truss bridge. *Engineering Structures*. 122:156-173.
- Chavez, R. 2009. Estudio de daños en estructuras usando análisis modal en un modelo instrumentado. Tesis de maestría UAQ.
- Curadelli, R., Riera, J., Ambrosini, D, and Amani, M. 2008. Damage detection by means of structural damping identification. *Engineering Structures*, 30:3497-3504.
- Daubechies, I., Lu, J., and Wu, H.-T. 2011. Synchrosqueezed wavelet transforms: An empirical mode decomposition-like tool. *Applied and Computational Harmonic Analysis* 30(2): 243-261.
- El Shafey, A., Marzouk, H., Gu, X., and Haddara, M. 2011. Non-destructive techniques for early damage detection for bridges using dynamic response. *Concrete Research Letters*. 2(1):190-200.
- Gallardo, A. 2012. Estudio experimental para detectar fallas en estructuras del tipo Truss por medio del análisis vibracional. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Querétaro.
- Garcia, A., Amezcuita, J., Dominguez, A., Sedaghati, R., Osornio, R., and Romero, R. 2013. Fused empirical mode decomposition and wavelets for locating combined damage in a truss-type

- structure through vibration analysis. *Journal of Zhejiang University. Science A*, 14(9):615-630.
- Design of Tall and Special Buildings. 27(6): doi.org/10.1002/tal.1456.
- Huang, N., Shen, Z., and Long, S. 1998. The empirical mode decomposition and the Hubert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society of London* 454: 903-995.
- Hu, W., Cunha, A., Caetano, E., Magalhaes, F. and Moutinho, C. 2010. LabVIEW toolkits for output-only modal identification and long-term dynamic structural monitoring. *Structure and Infrastructure Engineering*, 6(5): 557–574.
- Hutton, V. 2004. *Fundamental of finite element analysis*. McGraw-Hill.
- Jang, S., Li, J., and Spence Jr., B. 2013. Corrosion Estimation of a Historic Truss Bridge Using Model Updating. *Journal of Bridge Engineering*. 18(7): doi:10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000403.
- Jayawardhana, M., Zhu, X., Liyanapathirana, R., and Gunawardana, U. 2017. Compressive sensing for efficient health monitoring and effective damage detection of structures. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 84:414-430.
- Johnson, E., Lam, H., Katafygiotis, L., and Beck, J. 2004. Phase I IASC-ASCE Structural Health Monitoring Benchmark Problem Using Simulated Data. *J. Eng. Mech.* 130: 3–15.
- Kerschen G., Wordenb K., Vakakisc F., A., and Golinval, J. 2006. Past, present and future of nonlinear system identification in structural dynamics. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 20: 505-592.
- Li, J. and Hao, H. 2016. Health monitoring of joint conditions in steel truss bridges with relative displacement sensors. *Measurement*. 88:360–371.
- Li, Q., He, Y., Zhou, K., Han, X., He, Y., and Shu, Z. 2018. Structural health monitoring for a 600 m high skyscraper. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. 27(12), e1490.
- Lopez-Ramirez, M., Ledesma-Carrillo, L., Cabal-Yopez, E., Rodriguez-Donate, C., Miranda-Vidales, H., and Garcia-Perez, A. 2016. EMD-based feature extraction for power quality disturbance classification using moments. *Energies*, 9(7), 565.
- Martínez, S. 2018. Metodología para la estimación de parámetros dinámicos de una estructura de acero escalada de cuatro niveles empleando la transformada MUSIC-EWT. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Querétaro.

- Monge-Gapper, J. 2014. Concepto para un túnel de viento con vórtice variable. *Métodos y Materiales*. 4(1):33-40.
- Moreno, A., Amezcuita, J., Valtierra, M., Perez, C., Dominguez, A., and Chavez, O. 2018. EMD-Shannon Entropy-Based Methodology to Detect Incipient Damages in a Truss Structure. *Applied Sciences* 8(11), 2068. doi: 10.3390/app8112068.
- Nakamura, Y. 1989. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremors on the ground surface. *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute*. 30(1):25-33.
- Osornio, R., Amezcuita, J., Romero, R., and Garcia, A. 2012. MUSIC - ANN Analysis for Locating Structural Damages in a Truss - Type Structure by Means of Vibrations. *Computer - Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 27(9):687-698.
- Paz, M. 2009. Diseño, fabricación y análisis de vibraciones por 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 basado en excitaciones ambientales. Tesis de maestría UAQ.
- Pérez, F. 2018. Metodología para la detección de daños en estructuras del tipo truss empleando la teoría del caos. Tesis de Maestría UAQ.
- Pozos, A., Sánchez, R., and Gómez, R. 2012. Análisis de un puente atirantado ante cargas de viento y su comparación con resultados experimentales. XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural. Acapulco, Guerrero, México.
- Qarib, H., and Adeli, H. 2015. A new adaptive algorithm for automated feature extraction in exponentially damped signals for health monitoring of smart structures. *Smart Materials and Structures*, 24(12), 125040.
- Rafiei, M. H., and Adeli, H. 2017. A novel machine learning-based algorithm to detect damage in high-rise building structures. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 26(18), e1400.
- Salgado, R. 2008. Damage detection methods in bridges through vibration monitoring: evaluation and application. Tesis Doctoral. Universidad de Minho-ISISE. Guimaraes, Portugal. 320 pp.

- Salgado, R., Cruz, P., Ayala, G., and Zamora, S. 2014. Performance of damage detection methods used in bridge structures through dynamic tests in steel beams. *American Journal of Civil Engineering*. 2(2): 18-26.
- SCT. 2016. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. México.
- Shannon, C. 1948. A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*. 27:379–423.
- Sistema Nacional de Protección Civil. Secretaría de Gobernación. México. 2018.
- Taha, M. M. R. 2010. A neural-wavelet technique for damage identification in the ASCE benchmark structure using phase II experimental data. *Advances in Civil Engineering*, 2010:1-13 doi:10.1155/2010/675927.
- Talebinejad, I., C. Fischer, and F. Ansari. 2011. Numerical Evaluation of Vibration-Based Methods for Damage Assessment of Cable-Stayed Bridges. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 26(3):239–251.
- Thakur, G., Brevdo, E., Fuckar, N., and Wu, H.-T. 2013. The Synchrosqueezing algorithm for time-varying spectral analysis: Robustness properties and new paleoclimate applications. *Signal Processing* 93(5): 1079-1094.
- Umesha, P., Ravichandran, R. and Sivasubramanian, K. 2009. Crack detection and quantification in beams using wavelets. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 24(8):593-607.
- Wu, Z., and Huang, N. 2009. Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method. *Advances in Adaptive Data Analysis*. 2009(1):1–41.
- Yan, Y., Cheng, L., Wu, Z., and Yam, L. 2006. Development in vibration based structural damage detection technique. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 21. p.2198–2211.
- Zhou, L., Yan, G., and Ou, J. 2013. Response surface method based on radial basis functions for modeling large-scale structures in model updating. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2013(28):210–226.