

2022 Metodología para la detección y
localización de daños estructurales en un
sistema de marcos rígidos de acero

José Jairo
Martínez Gómez



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería

"Metodología para la detección y localización
de daños estructurales en un sistema de
marcos rígidos de acero"

Tesis

Que como parte de los requisitos para
obtener el Grado de
Maestro en Ciencias (Estructuras)

Presenta

José Jairo Martínez Gómez

Dirigido por:

Dr. Alejandro Moreno Gómez

Querétaro, Qro.

Diciembre de 2022



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias (Estructuras)

“Metodología para la detección y localización de daños
estructurales en un sistema de marcos rígidos de acero”

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestro en Ciencias (Estructuras)

Presenta

José Jairo Martínez Gómez

Dirigido por:

Dr. Alejandro Moreno Gómez

Dr. Alejandro Moreno Gómez
Presidente

Dr. Juan Carlos Antonio Jáuregui Correa
Secretario

Dr. Aurelio Domínguez González
Vocal|

Dr. Carlos Andrés Pérez Ramírez
Suplente

Dr. Enrique Rico García
Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.
Fecha de aprobación por el Consejo Universitario (diciembre, 2022) México

Resumen

Los marcos rígidos de acero son ampliamente empleados en las sociedades, esto por las ventajas que se pueden tener con este tipo de sistemas constructivos, sin embargo, es importante mencionar que estos pueden presentar daños, como grietas, en sus elementos, lo cual puede generar efectos negativos a la sociedad y en lo económico. El conocimiento de las condiciones estructurales de una estructura es fundamental porque permite actuar y tomar decisiones de manera anticipada, dicha meta es posible de lograr al implementar sistemas y técnicas de monitoreo estructural. Las técnicas de monitoreo estructural basadas en vibraciones y enfocadas a la detección y localización de daños siguen siendo estudiadas en años recientes, ya que han demostrado presentar buenos resultados. En aplicaciones, el uso de arreglos complejos de sensores y técnicas de procesamiento complejas, requieren mayor capacidad de cómputo y de recursos en general, lo cual complica su aplicación. El presente trabajo tiene como objetivo el plantear una metodología enfocada en la detección y localización de daños estructurales en un marco rígido de acero, donde se emplean los exponentes de Lyapunov y redes neuronales para detectar y localizar un elemento viga agrietado. Los resultados obtenidos nos muestran que se tiene una eficiencia ponderada de un 88% en la localización y detección para los casos planteados.

Palabras clave: Monitoreo de la Salud Estructural, exponentes de Lyapunov, red neuronal, detección y localización de daños, sistema de marcos rígidos de acero.

Abstract

Structural steel frames are so employed in societies, a particular reason is related to advantages that steel frame presents as a constructive technique. Therefore, it is important to remark that damages could be present in any construction. For example, cracks, which can imply negative impact to people wellness and social economy. In this way, knowledge about structural condition of constructions is relevant, because it lets do faster decisions for solving critical issues. It could be possible when structural health monitoring is performance. Vibration-based structural health monitoring techniques for damage detection and location still are studied due to the performance they have. For real applications, complex sensor arrangements and robust processing techniques requires high computing power, time, and more resources, which is not the best working practice. The objective of the investigation is to present a methodology focused on damage location and detection for structural steel frames, where the Lyapunov exponents and artificial neuronal network is applied for cracked beams detection and location. Results show around 88% efficiency in detection and location of damages, according to the studied cases.

Keywords: Structural Health Monitoring, Lyapunov exponents, artificial neuronal network, damage detection and location, structural steel frames.

Dedicatoria

A mi abuela Galdina Ledezma, abuelo Sabas Ledezma, abuela Crecencia Martínez, todos que en paz descansen, por los años que estuvieron cerca de mí.

Al Dr. Guadalupe Moisés Arroyo Contreras, en paz descansa, por su arduo trabajo en la ingeniería civil, por ser un profesor apasionado con su labor y por ser motivación para culminar este posgrado.

Agradecimiento

A Dios por brindarme salud, tiempo, conocimiento y destreza para culminar esta meta. A mi familia por su compañía, apoyo y motivación brindada en todo momento y a lo largo de los años.

A mi director de tesis, el Dr. Alejandro Moreno, por su apoyo, tiempo y motivación brindados para la culminación de este trabajo. También, al Dr. Carlos Andrés Pérez Ramírez, por otorgarme de su tiempo, paciencia y enseñanza. Al Dr. Aurelio Domínguez González, por su cooperación y disposición para elaborar este trabajo.

A mis compañeros de la maestría, Fernando, Ilse, Ricardo, Clemente, Josué, Sebastián, Gibran, Manuel y Luis, por su amistad, ayuda y buenos momentos compartidos.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por otorgar la beca económica 1078693. A la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) por la beca de otorgada, respecto al pago de inscripción semestral.

A todo aquel que me brindo su ayuda, tiempo y amistad para terminar esta meta de mi vida profesional.

Índice general

Resumen.....	II
Abstract	III
Dedicatoria	IV
Agradecimiento.....	V
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	6
1.1.1. Investigaciones a nivel global	6
1.1.1.1. Exponentes Lyapunov	6
1.1.1.2. Marcos rígidos y similares	7
1.1.1.3. Otros trabajos no relacionados al dominio tiempo o frecuencia	9
1.1.2. Trabajos desarrollados en la UAQ.....	10
1.1.2.1. Modelación numérica.....	10
1.1.2.2. Diversas estructuras	10
1.1.2.3. Armadura	10
1.1.2.4. Marcos rígidos	12
1.2. Descripción del problema.....	12
1.3. Justificación.....	14
1.4. Hipótesis y Objetivos	17
1.4.1. Hipótesis.....	17
1.4.2. Objetivo General.....	17
1.4.3. Objetivos Particulares.....	17
2. Fundamento Teórico	18
2.1. Dinámica estructural	18
2.1.1. Sistemas de múltiples grados de libertad	18
2.1.2. Equilibrio dinámico	18
2.1.3. Matriz de amortiguamiento	20
2.1.4. Vibraciones.....	22
2.2. Dinámica no lineal	22
2.2.1. Teoría del caos.....	22
2.2.2. Exponentes de Lyapunov	23
2.3. Procesamiento de información y monitoreo estructural	25
2.3.1. Estructura <i>IASC-ASCE Benchmark</i>	25
2.3.2. Redes Neuronales.....	26
3. Metodología.....	30
3.1. Equipo y materiales.....	31
3.1.1. Estructura de estudio.....	31
3.1.2. Excitación estructural	33
3.1.3. Sistema de adquisición de señales	34
3.1.3.1. Sensores.....	34
3.1.3.2. Filtro antialiasing.....	35
3.1.3.3. Convertidor analógico-digital.....	36

3.2.	Daños y consideraciones realizar las pruebas experimentales	37
3.3.	Combinaciones de estudio en el procesamiento de la información	38
4.1.	Configuración experimental	42
4.2.	Mediciones experimentales	42
4.3.	Repetitividad de las pruebas experimentales	43
4.4.	Validación de una señal sintética.....	44
4.5.	Procesamiento de señales.....	44
5.	Resultados y discusión.....	45
5.1.	Frecuencias modales de la estructura	45
5.2.	Datos adquiridos de la experimentación	47
5.3.	Exponentes de Lyapunov calculados.....	48
5.4.	Localización de daños.....	51
5.5.	Caso de análisis en particular	52
5.6.	Trabajos previos.....	53
6.	Conclusiones	55
5.2	Prospectivas	56
7.	Anexos.....	57
7.1.	Frecuencias modales empleando transformada de Fourier	57
	Sin daño en los niveles:.....	57
	Daño en nivel 1	58
	Daño en nivel 3.....	59
7.2.	Exponentes de Lyapunov	61
	Sin daño en los niveles	61
	Daño en nivel 1	62
	Daño en nivel 2.....	63
	Daño en nivel 3.....	64
	Daño en nivel 4.....	65
8.	Bibliografía.....	66

Índice de tablas

Tabla 1-1 Pérdidas económicas por desastres (1998 - 2017)	14
Tabla 1-2 Muertes por desastres (1997 - 2017).....	15
Tabla 2-1 Parámetros físicos de la estructura ASCE Benchmark.....	25
Tabla 3-1 Propiedades de los elementos estructurales	32
Tabla 3-2 Pruebas experimentales	38
Tabla 3-3 Posicionamiento de sensores	39
Tabla 3-4 Fractalidad y el exponente de Lyapunov de una señal.....	44
Tabla 5-1 Frecuencias relacionadas a los primeros modos de vibración.....	46
Tabla 5-7 Efectividad en la localización de daños al emplear redes neuronales ...	51
Tabla 5-8 Porcentajes de clasificación de la red neuronal.....	52
Tabla 5-9 Trabajos similares en la literatura	54
Tabla 5-2 Exponentes de Lyapunov en estado sano	61
Tabla 5-3 Exponentes de Lyapunov, daño en el nivel 1	62
Tabla 5-4 Exponentes de Lyapunov, daño en el nivel 2	63
Tabla 5-5 Exponentes de Lyapunov, daño en el nivel 3	64
Tabla 5-6 Exponentes de Lyapunov, daño en el nivel 4	65

Índice de figuras

Figura 1.1 Proceso del monitoreo estructural	2
Figura 2.1 Marco de dos niveles	18
Figura 2.2 Atenuación de la amplitud de onda de sistemas sometido a vibración con diferente razón amortiguamiento.....	20
Figura 2.3 Fracciones modales según la frecuencia modal: a) masa y rigidez proporcional al amortiguamiento, b) amortiguamiento de Rayleigh.	21
Figura 2.4 Atractor de Lorenz	23
Figura 2.5 Evolución de la distancia entre dos orbitas generadas a partir de condiciones iniciales arbitrariamente cercanas.....	25
Figura 2.6 Modelo de la estructura ASCE Benchmark.....	26
Figura 2.7 Estructura de una neurona	28
Figura 2.8 Red neuronal multicapa, arquitectura de 3 capas.....	29
Figura 3.1 Diagrama de metodología.....	30
Figura 3.2 Metodología para localizar daños estructurales.....	31
Figura 3.3 Estructura de acero analizada: a) vista general antes de tener contravientos, b) estructura con contravientos.....	32
Figura 3.4 Martillo de impacto: a) apariencia, b) montaje, c) esquema del modo de uso	34
Figura 3.5 Acelerómetro capacitivo, tipo 8395A.....	35
Figura 3.6 Filtro antialiasing	36
Figura 3.7 Dispositivo de E/S Multifunción: USB-6211	36
Figura 3.8 Viga adicional a preparar con simulación de daño	37
Figura 3.9 Posicionamiento de sensores (parte 1).....	40
Figura 3.10 Posicionamiento de sensores (parte 2).....	41
Figura 3.11 Configuración del montaje experimental.....	42
Figura 5.1 Modelo del sistema de marcos rígidos de acero.....	45
Figura 5.2 Transformada de Fourier (envolvente), sin daño en algún nivel, sensor 1, eje z.	46
Figura 5.3 Transformada de Fourier (envolvente), 75% de daño en nivel 1, sensor 1, eje z.	46
Figura 5.4 Prueba del estado sano, sensor 4, eje z.....	47
Figura 5.5 Prueba de un estado con daño en nivel 2, sensor 4, eje z	48
Figura 5.6 Grafica de cajas de exponentes de Lyapunov (Sin daño).....	48
Figura 5.7 Grafica de cajas de exponentes de Lyapunov (daño en nivel 1)	49
Figura 5.8 Grafica de cajas de exponentes de Lyapunov (daño en nivel 2)	49
Figura 5.9 Grafica de cajas de exponentes de Lyapunov (daño en nivel 3)	50
Figura 5.10 Grafica de cajas de exponentes de Lyapunov (daño en nivel 4)	50
Figura 5.11 Grafica de la efectividad de las combinaciones	51
Figura 5.12 Arreglo de sensores para la combinación 1	52
Figura 5.13 Efectividad de combinación 1 al localizar daños.....	53

Figura 7.1 Envolvente de la transformada de Fourier, estructura sin daño, sensor 1, eje Z.....	57
Figura 7.2 Envolvente de la transformada de Fourier, estructura sin daño, sensor 2, eje Z.....	57
Figura 7.3 Envolvente de la transformada de Fourier, estructura sin daño, sensor 3, eje Z.....	57
Figura 7.4 Envolvente de la transformada de Fourier, estructura sin daño, sensor 4, eje Z.....	58
Figura 7.5 Envolvente de la transformada de Fourier, daño de 75% en nivel 1, sensor 1, eje Z.....	58
Figura 7.6 Envolvente de la transformada de Fourier, daño de 75% en nivel 1, sensor 2, eje Z.....	58
Figura 7.7 Envolvente de la transformada de Fourier, daño de 75% en nivel 1, sensor 3, eje Z.....	59
Figura 7.8 Envolvente de la transformada de Fourier, daño de 75% en nivel 1, sensor 4, eje Z.....	59
Figura 7.9 Envolvente de la transformada de Fourier, daño de 75% en nivel 3, sensor 1, eje Z.....	59
Figura 7.10 Envolvente de la transformada de Fourier, daño de 75% en nivel 3, sensor 2, eje Z.....	60
Figura 7.11 Envolvente de la transformada de Fourier, daño de 75% en nivel 3, sensor 3, eje Z.....	60
Figura 7.12 Envolvente de la transformada de Fourier, daño de 75% en nivel 3, sensor 4, eje Z.....	60

Abreviaturas y siglas

SHM: Structural Health Monitoring: Monitoreo de la integridad estructural

NDT: NonDestructive Testing: Pruebas no destructivas

EEMD: Ensemble Empirical Mode Decomposition: Descomposición empírica en bloques de modos

ARARX: Autoregressive-Autoregressive with Exogenous Input: Modelo autorregresivo de autoregresion con entradas exógenas.

MUSIC: Multiple Signal Classification: Clasificación múltiple de señales

WT: Wavelet Transform: Transformada de ondas o ondeletas

AISC: American Institute of Steel Construction: Instituto Americano de la Construcción en Acero

ANSI: American National Standards Institute: Instituto Nacional Americano de Normas

1. Introducción

A lo largo del tiempo, cualquier estructura es susceptible de presentar daños, puesto que éstas se exponen a diversos fenómenos y condiciones. Las propiedades mecánicas de los materiales se pueden alterar y degradar por eventos de naturaleza repetitiva, o bien por las condiciones ambientales en las que se opera, fenómenos naturales de magnitud importante y accidentes asociados a un factor humano (Hou & Xia, 2021; Mishra, 2021) .

Mantener estructuras en buenas condiciones de servicio es de suma importancia, dado que éstas son uno de los pilares fundamentales sobre las que se basa la vida cotidiana en la sociedad, ya que permiten desarrollar muchas de las actividades diarias de las personas (Josa & Aguado, 2019). En ese sentido, es necesario realizar actividades que permitan conocer de manera rápida y eficiente, el estado de la integridad estructural de la misma.

El monitoreo de la integridad estructural (*Structural Health Monitoring – SHM*) es un término empleado desde hace tiempo en la literatura, se trata de un área de estudio con múltiples industrias de aplicación, una de ellas es la ingeniería civil (Avci et al., 2021; Z. Li et al., 2016). En general, el monitoreo estructural tiene como objetivo la continua recopilación de datos acerca de la condición de una estructura para posteriormente evaluarla (ver Figura 1.1), lo anterior se logra mediante sensores que constantemente se encuentran midiendo (Saisi et al., 2017).

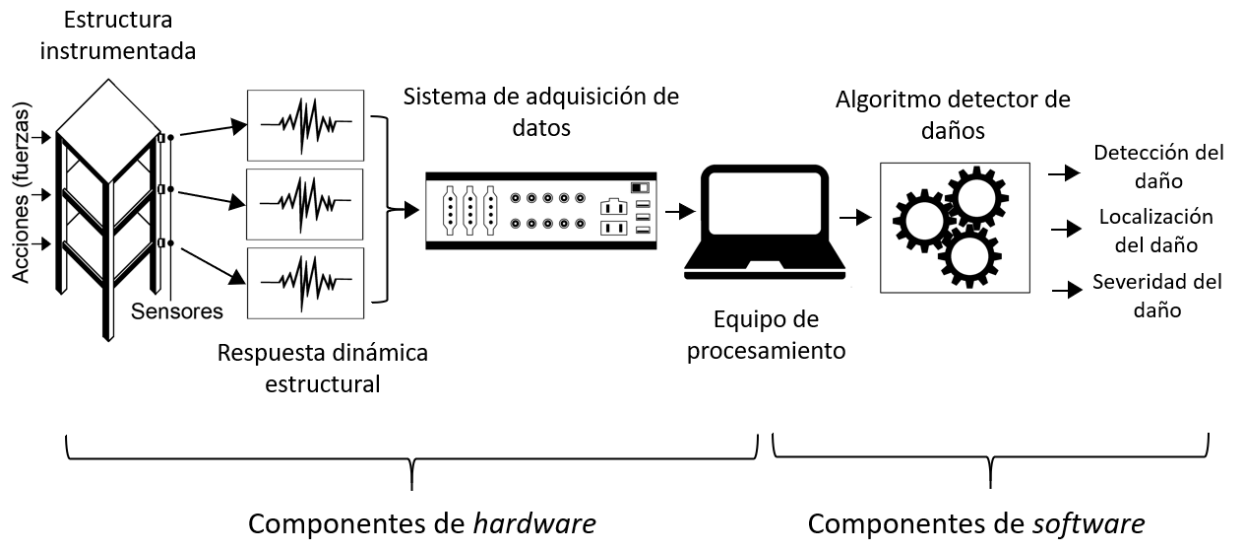


Figura 1.1 Proceso del monitoreo estructural

Los sensores usados para ejecutar el monitoreo estructural pueden usarse temporal o permanentemente en una estructura y éstos no deben interferir en la respuesta dinámica estructural, por lo cual deben cumplir con buenas características de peso, tamaño, fijación y otras (Giurgiutiu, 2020). Debe resaltarse que los esquemas de monitoreo basados en las mediciones de las vibraciones de la estructura son lo que obtienen los mejores resultados (Amezquita-Sanchez & Adeli, 2016).

Respecto al concepto de daño estructural, se puede definir como aquella variación que puede existir en la geometría o característica del material, la cual puede generar efectos no deseados en el comportamiento estructural. Las estructuras, con daños estructurales, presentan una reducción en su seguridad, confiabilidad, rendimiento y tiempo de vida (Avci et al., 2021; Kim & Stubbs, 2002).

Es posible tener hasta cuatro alcances o niveles de estudio diferentes al realizar monitoreo, el presente trabajo se enfocará en el segundo nivel. A continuación, se enlista cada uno de estos (Hou & Xia, 2021; Qiao & Cao, 2008):

1. Conocer la existencia de daños
2. Determinar la ubicación del daño
3. Cuantificar la magnitud del daño
4. Estimar la vida restante del sistema (más complejo)

Existen diversas formas de aplicar el monitoreo estructural, desde técnicas tradicionales o no destructivas, técnicas basadas en vibraciones y, hasta técnicas de visión artificial. A continuación, se indagará en cada una de ellas, haciendo énfasis que esta investigación empleará técnicas basadas en vibraciones.

Las pruebas no destructivas (*NonDestructive Testing – NDT*) son aquellos análisis de propiedades en donde la estructura, elemento o material analizado no es afectado con algún daño físico; algunas son: inspección acústica, ultrasonido, partículas magnéticas, radiografía termografía infrarroja, líquidos penetrantes, testeo laser, inspección visual, corrientes de Eddy, entre otras. Las pruebas no destructivas son de tipo inspección localizada o para daños locales, lo cual implica una serie de desventajas para uso práctico en las estructuras civiles, ya que se requiere conocer donde se localiza el supuesto daño y la zona a revisar debe ser de fácil acceso (Moreno-Gomez et al., 2018; Qiao & Cao, 2008; Suratkar et al., 2013).

Por lo general, existen algunas certificaciones solicitadas para el personal que lleva a cabo las pruebas no destructivas. A continuación, se mencionan dos:

- *Personal Qualification and Certification Nondestructive Testing* (ASNT SNT-TC-1A), o
- *Standard for the Qualification and Certification of Nondestructive Testing Personal* (ANSI/ASNT CP-189)

La inspección visual suele emplearse en estructuras civiles, pero aparte de consumir bastante tiempo, la técnica es propensa al error humano, muchas veces no son

visibles los elementos estructurales ni los daños y requiere personal capacitado (Avci et al., 2021; Hou & Xia, 2021).

El uso de la visión artificial, para realizar monitoreo estructural, es más reciente que las NDT. Estos tipos de sistemas constan de tres partes, un aparato que adquiere imágenes, una computadora y un programa de cómputo que procesa imágenes. El funcionamiento se basa en tener marcas en zonas específicas del sistema, una cámara fija toma capturas constantes de las zonas marcadas y con ayuda de un algoritmo es posible detectar movimiento de los patrones en alguna dirección en el plano (Ye et al., 2016). También es posible obtener desplazamientos en dos direcciones con una sola cámara digital y usando algún método de procesamiento de imágenes, como la correlación digital de imágenes, la cual conlleva solventar errores por distorsión de lentes (Pan et al., 2013), o por la intensidad de interpolación (Su et al., 2019), entre otros.

En última instancia, se tiene el monitoreo estructural basado en vibraciones. Ha sido más estudiado que la visión artificial ya que permite detectar cambios en la etapa más incipiente posible. Por esta razón será empleado en este trabajo. En primera instancia, las vibraciones estructurales son producto de las características del sistema, como la geometría, las condiciones de frontera y las propiedades estructurales (Toh & Park, 2020). Entonces, al medir y analizar señales de la respuesta vibratoria se pueden extraer características (lo cual cambia al aplicar otros métodos), conocer el estado de la estructura, detectar cambios dinámicos y evaluar daños estructurales (Li, 2016).

Los algoritmos de procesamiento de las señales de vibración pueden ser clasificados en tres diferentes dominios (Hou & Xia, 2021; Z. Li et al., 2016), los cuales se basan en parámetros de las vibraciones, este trabajo se centra en el primero de los que se enlistan a continuación:

1. Dominio del tiempo
2. Dominio de la frecuencia
3. Dominio tiempo-frecuencia

En este trabajo se busca localizar daños estructurales, en un sistema de marcos rígidos a escala, mediante el análisis de las aceleraciones desarrolladas por la estructura. Para lo antes establecido, se emplean los exponentes de Lyapunov en el análisis de la señal de vibración y se usan las redes neuronales para dar mayor capacidad en la localización de daños.

El presente trabajo se divide en 5 capítulos principales: introducción, revisión histórica de trabajos, hipótesis y objetivos, fundamento teórico, equipo y material, métodos y actividades desarrolladas, resultados y conclusiones.

1.1. Antecedentes

Dentro de los siguientes apartados, se hace una revisión exhaustiva de trabajos locales y globales, mencionando los usos y enfoques que han tenido los exponentes de Lyapunov, los trabajos enfocados a analizar daños en marcos rígidos y los avances que se tienen en el monitoreo general de daños en estructuras civiles.

1.1.1. Investigaciones a nivel global

1.1.1.1. Exponentes Lyapunov

Existen diversas técnicas usadas para analizar sistemas no lineales y que son aplicables a la detección de daños estructurales, dividiéndose en tres grandes grupos, métodos basados en funciones indicadoras no lineales, métodos sustentados en la teoría de sistemas dinámicos no lineales y los métodos basados en la identificación de sistemas no lineales. Zhou et al., (2010) comprueba que el comportamiento de un marco de acero puede presentar un comportamiento dinámicamente caótico, luego de analizar la respuesta vibratoria de un modelo *ASCE Benchmark* y un puente, con los exponentes de Lyapunov.

Recientemente, Kang (2018) propuso un método para caracterizar el movimiento dinámico no lineal producido en una viga sometida a impacto distribuido, donde ocurre una discontinuidad en la área de contacto. W. Zhang et al. (2018) propuso combinar un oscilador no lineal y los exponentes de Lyapunov para detectar daños menores en estructuras alargadas (tuberías, vías férreas etc.). El método fue sensible y con tolerancia para analizar señales altamente contaminadas con ruido. Jalili & Daneshmehr (2018) estudiaron las grietas en placas, el análisis realizado conto de juntar el espectro de los exponentes de Lyapunov de un modelo no lineal de una placa agrietada y una señal caótica de excitación. Zhang et al. (2021) obtuvo el máximo exponente Lyapunov de un modelo *Duffing* modificado para detectar daños por fatiga en componentes metálicos, el exponente Lyapunov fueron negativos para elementos con daño por fatiga.

Estos trabajos permiten observar que las estructuras civiles tienen un comportamiento no lineal, mismas que deben ser analizadas con algoritmos cuya naturaleza sea no lineal.

1.1.1.2. Marcos rígidos y similares

Relativo a daños en conexiones, Meneghetti et al. (2014) ha empleado el Método de Estrés Máximo (*Peak Stress Method*), combinado con modelos de elemento finito, para determinar el punto de iniciación de grietas por fatiga, en conexiones soldadas. Por otro lado, Yang et al. (2014) propuso un método analítico para la detección de daños por aflojamiento de pernos en conexiones en un marco con múltiples grados de libertad, el método consta de elemento finito de orden reducido y el error adaptativo de sumatorias cuadráticas con entradas desconocidas, se hizo la verificación experimental en un edificio a escala. Wang et al. (2015) propuso un modelo constitutivo para estimar daños, su acumulación y comportamiento, en vigas y columnas de marcos, ante eventos sísmicos, se comparó el modelo de elementos finitos 3D con pruebas experimentales.

Más tarde, Hasni et al., (2018) estudió una forma de detectar daños por pérdida de pernos y grietas en elementos de un marco de acero, empleando una red combinada de sensores piezoeléctricos de deformación y de acelerómetros, al final resultados experimentales se corroboraron con un modelo numérico. Avci et al. (2018) propusieron una red neuronal convolucional y de una dimensión, la cual requiere poco preprocesamiento y nula extracción manual de características de daño, la idea fue probada en la estructura *IASC-ASCE Benchmark* para detectar la falta de arriostamientos y pérdida de pernos. Entezami & Shariatmadar (2019) propusieron un algoritmo aplicable a señales estacionarias y no estacionarias, integrado por la Descomposición Empírica de Bloques de Modos (*Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD)*) y el Modelo de *Autoregressive-Autoregressive with Exogenous Input (ARARX)*; el método se validó en la estructura *IASC-ASCE Benchmark* para detectar pernos sueltos y falta de arriostres.

En este sentido, debe resaltarse que la siguiente sección menciona trabajos en estructuras experimentales, mismas que han sido instrumentadas. Lautour & Omenzetter (2010) proponen un método que permite conocer la clasificación de daños y la estimación de la rigidez remanente, para lo cual se empleó modelos de autorregresión para el ajuste de los análisis dinámicos tiempo historia, considerando los coeficientes de autorregresión características sensibles al daño fueron las entradas de una red neuronal. Chen & Zang (2011) investigaron sobre un patrón de reconocimiento de daños híbrido, el cual está basado en el agrupamiento difuso y el patrón de reconocimiento artificial inmune. Huang et al. (2016) examinó el problema de daños estructurales inferidos y la reducción de rigidez estructural desde las vibraciones estructurales, para lo cual fue aplicado el modelo Bayesiano jerárquico.

Por otra parte, Perez-Ramirez et al. (2016) empleó una nueva metodología, que se basa en la transformada de wavelet adaptada para lidiar con señales ruidosas, con el fin de obtener las frecuencias naturales y los coeficientes de amortiguamiento de estructuras sometidas a vibraciones naturales. Jiang et al. (2017) se centra en el desarrollo de un modelo de red neuronal difusa estocástica, donde se manejan dos tipos de imprecisión, la información difusa y las incertidumbres medidas. El trabajo puede extenderse a identificar propiedades físicas, modales y evaluar la condición estructural. Abdeljaber et al. (2017) profundiza en las redes neuronales convolucionales y propuso una mejorada, la cual permite estimar el daño de una estructural, empleando solamente dos paquetes de mediciones (sin importar el tamaño de la estructura) para el entrenamiento de la red.

Recientemente, Das & Saha (2020) propuso una técnica híbrida para detección de daños, combinando la descomposición variacional de modos y la descomposición frecuencial de dominio para analizar señales contaminadas con ruido ambiental.

1.1.1.3. Otros trabajos no relacionados al dominio tiempo o frecuencia

En los últimos años, el uso de algoritmos de procesamiento en el tiempo para la generación de metodologías basadas en el monitoreo estructural han sido propuestas. Un método modificado de la dimensión fractal fue desarrollado para el problema de los modos de vibrar de alto orden y así poder detectar de grietas en vigas (Bai et al., 2012). An & Ou (2012) usaron la dimensión fractal, como método con tolerancia a procesar señales ruidosas, para localización de daños en vigas. Por otro lado, la dimensión fractal fue usada para detectar y estimar daños en vigas de acero a escala (Li et al., 2011). Tiempo después se realizó un análisis numérico a un edificio de 10 niveles, en donde se empleó la dimensión fractal a las características de tiempo-frecuencia para detectar y localizar daños por sismo (Li et al., 2013). De igual forma, la dimensión fractal ha sido empleada para detectar daños de vigas, a partir de la función de frecuencias medidas (Lee & Eun, 2015). Por otra parte, se ha realizado la detección y clasificación de nivel corrosión en una estructura de aluminio mediante la transformada discreta wavelet y la dimensión fractal (Perez-Macias et al., 2017). También ha sido empleada la dimensión fractal para procesar señales ultrasónicas no lineales, detectando micro y macro grietas en bloques de concreto (Zamen & Dehghan-Niri, 2020). Recientemente, se empleó una técnica que integró el aprendizaje colectivo y análisis fractal para detectar daños siete escenarios de daños, siendo una técnica con potencial en estructuras instrumentadas con múltiples sensores (Xu & Liu, 2021)

Recientemente, la reconstrucción de atractores, usando el exponente de Lyapunov se ha vuelto un método novedoso para detectar daños al analizar vibraciones estructurales. Li et al. (2021) emplea un atractor reconstruido y el análisis de la fractalidad de la señal para detectar daños, empleando un análisis multiseccional mediante la transformada wavelet en el estado de fase.

1.1.2. Trabajos desarrollados en la UAQ

En la Universidad Autónoma de Querétaro se han desarrollado diversos trabajos relativos al monitoreo estructural. A continuación, se muestran los aportes de cada autor en modelaciones numéricas, monitoreo estructural en armaduras, n marcos rígidos y en otras estructuras.

1.1.2.1. Modelación numérica

Mediante simulación y modelos con elementos finitos, Vázquez Sánchez (2004) destacó el rendimiento de la Transformada de Ondeleta (*Wavelet Transform (WT)*) tiene para analizar grietas (variando posiciones) en estructuras simples, tales como viga cantiléver, viga doblemente apoyada y marco plano. Arceo Mariñelarena (2012) trabajó con algoritmos genéticos en su momento, los cuales se emplearon para optimizar la detección de daños por el Método de Búsqueda Global en modelos de elementos finitos, la reducción de sección transversal fue analizada como daño en una barra, un marco plano y un puente.

1.1.2.2. Diversas estructuras

Algunas otras investigaciones se han centrado en estudiar estructuras particulares. Pérez Ramírez (2014) desarrolló un método para la estimación de parámetros modales empleando la técnica llamada Transformada de Ondeleta de Synchrosqueezing (*Synchrosqueezing Wavelet Transform (SWT)*). Se estudiaron tres casos, un modelo de elementos finitos, un puente de concreto y la cafetería del campus San Juan del Rio de la UAQ.

1.1.2.3. Armadura

Se han realizado diferentes trabajos de investigación en una armadura de aluminio ensamblable y formada de varios cubos, la cual está localizada en el campus de

San Juan del Rio, Querétaro y fue construida hace algunos años. A continuación, se hace un recuento de trabajos:

- A. En un inicio, siendo una armadura con 5 cubos y empotrada en un extremo, Gallardo Amaya (2012) desarrolló una metodología basada en la Transformada Rápida De Fourier (*Fast Fourier Transform (FFT)*) para lograr estimar las frecuencias naturales y factor de amortiguamiento, con el fin de detectar daños (en unión, por falta de elementos y por reducción de rigidez) en diferentes zonas del sistema.
- B. Durante el mismo periodo, para la armadura ya descrita, Amézquita Sánchez (2012) se centró en localizar y cuantificar grietas y corrosión, analizando la amplitud de las frecuencias naturales mediante la combinación de la técnica de Clasificación Múltiple de Señales (*Multiple Signal Classification (MUSIC)*) con redes neuronales artificiales.
- C. Más tarde, Pérez Macías (2018) amplió la estructura, pasando de 5 a 9 cubos; también se cambiaron los apoyos, cambiando el empotramiento en un extremo a dos apoyos simples. De igual forma, desarrolló la localización de daños por corrosión en la armadura, lo cual fue posible mediante el uso de fractales de Katz y de Conteo de Cajas (Box Counting).
- D. Luego, Moreno Gómez (2019) localizó y cuantificó corrosión en la armadura, empleando la técnica de Descomposición Empírica de Modos (*Empirical Mode Decomposition (EMD)*) en conjunto con entropía de Shannon.
- E. Últimamente, Pascacio Abarca (2019) se enfocó en detectar daño por corrosión en la armadura, sin enfocarse en la ubicación del propio elemento dañado, se utilizó Dimensiones Fractales (*Fractal Dimension (FD)*) y Entropía de Shannon (*Shannon Entropy (SE)*) como técnicas de procesamiento.

1.1.2.4. Marcos rígidos

Una estructura formada por marcos rígidos de acero, localizada en el campus San Juan del Rio de la UAQ, ha servido para realizar experimentaciones e investigaciones en el pasado. A continuación, se presenta el historial:

- A. Martínez de Jesús (2018) obtuvo los factores de amortiguamiento y frecuencias naturales de la estructura, mediante un modelo en el programa de cómputo SAP2000 y experimentante, analizando vibraciones forzadas con la técnica de Clasificación Múltiple de Señales – Transformada Empírica de Ondeleta (*Multiple Signal Classification – Empirical Wavelet Transform (MUSIC-EWT)*) y apoyándose con la Transformada de Hilbert. Se compararon y discutieron resultados experimentales y teóricos.
- B. Recientemente, Pachecho Ortega (2018) realizó la detección de aflojamiento de conexiones, grietas y combinación de estos sobre la estructura; como técnicas de procesamiento de señales, se emplearon diversas Dimensiones Fractales (*Fractal Dimension (FD)*).
- C. Más tarde, Moreno Gómez (2019) localizó y cuantificó grietas en la estructura, empleando la técnica de Descomposición Empírica de Modos (*Empirical Mode Decomposition (EMD)*) en conjunto con entropía de Shannon.

1.2. Descripción del problema

El daño y deterioro estructural son los causantes de que una estructura presente una importante reducción en su vida útil, que inclusive puede terminar en un colapso, generándose así consecuencias sociales, económicas y de mortalidad (Avci et al., 2021). Para el caso de las estructuras formadas por marcos de acero, los principales daños que están llegando a presentar son la pérdida de pernos y agrietamiento en sus elementos (Hasni et al., 2018; Meneghetti et al., 2014). En muchas partes del mundo hay zonas de alta sismicidad donde se fomentan daños estructurales, México es un claro ejemplo, donde del 2010 a la fecha han sido registrado en promedio por año: 1400 sismos de 4-4.9 de magnitud, 35 sismos de

5-5.9 magnitud, 3 sismos de 6-6.9 magnitud y 1 sismo de 7-7.9 magnitud (Instituto de Geofísica de la UNAM, 2021).

Los daños estructurales se vuelven un problema por solventar para cualquier estructura, sin embargo, la falta de información, atención y conocimiento relativo al estado de una estructura es otro aspecto importante que considerar porque la falta de mantenimiento también puede generar efectos negativos de diversos tipos (Moreno Gómez, 2019).

Existen varias formas de conocer el estado estructural, tal es el caso de las pruebas no destructivas aplicadas a estructuras; algunas desventajas de este tipo de pruebas son: se requiere tener conocimiento de la posible ubicación del daño, se debe tener fácil acceso a ciertas zonas de la estructura, en ciertas técnicas el criterio humano es empleado y no siempre se puede tener interacción con elementos estructurales (Avci et al., 2021).

El monitoreo estructural basado en vibraciones es una alternativa para conocer la condición y estado de una estructura, donde se llegan a emplear técnicas de procesamiento de *machine learning*. Cuando se emplean técnicas avanzadas y arreglos complejos de monitoreo estructural, la capacidad de cómputo entra en juego y en ocasiones es requerido invertir mayores cantidades de tiempo en búsqueda de buenos resultados (Xu & Liu, 2021). En otros aspectos relevantes, la instrumentación de estructuras con sensores y equipo especializados puede implicar costos elevados de inversión, más aún en estructuras de gran magnitud donde en número de equipos empleados es alto (Rafiei & Adeli, 2017).

1.3. Justificación

Dado el gran uso del acero en estructuras en esta época moderna, siendo un material muy práctico por el comportamiento mecánico y estructural que brinda, es relevante prestar cuidado a este tipo de estructuras porque como cualquier material se degrada, los elementos que lo integran sufren daños y eventos externos pueden afectar a las estructuras.

Hay varios tipos de desastres que han afectado a las sociedades a nivel mundial, entre los cuales están las tormentas, terremotos, inundaciones, sequias, incendios forestales, temperaturas extremas y otros. En términos económicos (ver Tabla 1-1), las tormentas, inundaciones y terremotos han sido los desastres que mayor daño económico generan a las sociedades (Wallemacq et al., 2018).

Tabla 1-1 Pérdidas económicas por desastres (1998 - 2017)

Desastre	Pérdida económica (millones de USD)	Porcentaje
Tormentas	\$ 1,330,00	46 %
Terremotos	\$ 661,000	23 %
Inundaciones	\$ 656,000	23 %
Sequias	\$ 124,000	4 %
Incendios forestales	\$ 68,000	2 %
Temperaturas extremas	\$ 61,000	2 %
Derrumbes, actividad volcánica y movimiento de masas.	\$ 8,000	0.2%
Suma	\$ 2,908,000	100 %

Si bien los daños económicos pueden ser recuperados en un cierto periodo de tiempo, esto no pasa con las pérdidas de vidas humanas durante los siniestros. En la Tabla 1-2 se puede apreciar como los terremotos ocupan el primer lugar en el número de muertes.

Tabla 1-2 Muertes por desastres (1997 - 2017)

Desastre	Muertes	Porcentaje
Terremotos	747,234	56 %
Tormentas	232,680	17 %
Temperaturas extremas	166,346	13 %
Inundaciones	142,088	11 %
Sequias	21,563	2 %
Derrumbes	18,414	1 %
Incendios forestales, actividad volcánica, movimiento de masas	2,398	0.2 %
Suma	1,330,723	100 %

En la ingeniería estructural, el criterio ingenieril y las normativas vigentes son aplicables en proyectos y obras, sin embargo, siempre existe cierta incertidumbre en cualquier proceso, la cual se trata de reducir empleando diferentes técnicas como factores de carga, de resistencia e inspecciones de calidad en campo (Bulleit, 2008; Y. Jiang et al., 2015). El monitoreo estructural permite ampliar la información que se tiene de una estructura en sus condiciones de servicio, lo cual reduce la brecha entre lo planeado y lo ejecutado, permitiendo tener un ciclo de observación completo de una estructura (Q. Li et al., 2018) y posibilitando la detección de anomalías estructurales.

Detectar daños estructurales a tempranas edades es importante porque permite realizar mantenimiento oportuno, manteniendo en balance entre costos de mantenimiento rentables y el rendimiento estructural (Frangopol & Liu, 2007; Machorro-Lopez et al., 2021). Por otro lado, tomar decisiones informadas permite gestionar de mejor forma la operación de las estructuras, buscando mantener la seguridad y bienestar del personal, la productividad en actividades y reducir costos adicionales (Hughes et al., 2021; Kim & Stubbs, 2002).

Mantenerse en la búsqueda constante de sistemas de monitoreo estructural que sean económicamente costeables, eficientes y prácticos es fundamental por las ventajas que brinda. El mantener un número bajo de sensores permite reducir costos (Rafiei & Adeli, 2017) y el emplear técnicas de procesamiento que requieran

un menor potencial de cómputo permite reducir los tiempos de procesamiento (Xu & Liu, 2021).

Emplear técnicas que se basen en el procesamiento de vibraciones tiene características propias a ser aprovechadas, en comparación con otros métodos para conocer el estado estructural y la existencia de daños. De igual forma, muchos autores han trabajado usando técnicas que analizan las propiedades dinámicas estructurales para procesar señales, por lo cual abordar el procesamiento desde un enfoque caótico permite extender más el conocimiento en el área de estudio.

1.4. Hipótesis y Objetivos

A continuación, se hace el planteamiento de la hipótesis que da origen al trabajo, así como de los objetivos que se quieren lograr.

1.4.1. Hipótesis

En sistemas de marcos rígidos, la ubicación de un daño estructural se detecta analizando las diferencias de aceleraciones desarrolladas entre un estado sano y uno dañado, mediante exponentes de Lyapunov y un algoritmo de inteligencia artificial.

1.4.2. Objetivo General

Analizar las aceleraciones medidas de un sistema de marcos rígidos, mediante los exponentes de Lyapunov, para determinar la zona en donde se presenta un elemento con daño por daño estructural.

1.4.3. Objetivos Particulares

1. Instrumentar la estructura de prueba, utilizando acelerómetros para obtener la respuesta dinámica de estructura sana y con daño.
2. Obtener los exponentes de Lyapunov y realizar un análisis, que permita medir el grado de independencia entre señales, a fin de determinar cuáles de las señales medidas pueden utilizarse para determinar la condición de la estructura.
3. Evaluar múltiples alternativas del arreglo de sensores, a fin de conocer su comportamiento en lo relacionado a la detección y localización de daños.

2. Fundamento Teórico

En las siguientes páginas de este trabajo se presentan los fundamentos necesarios para solventar las diferentes necesidades para lograr con éxito los objetivos planteados para este trabajo de tesis.

2.1. Dinámica estructural

Se presentan las bases y conceptos importantes relativos a la dinámica estructural, los cuales son necesarios para mayor entendimiento del presente trabajo.

2.1.1. Sistemas de múltiples grados de libertad

Los grados de libertad de una estructura son aquellos desplazamientos independientes y que son requeridos para determinar las posiciones luego de que las masas perdieran el equilibrio inicial (Chopra. 2013). Para lo cual, un sistema de múltiples grados de libertad es aquel que presenta más de un grado de libertad. La Figura 2.1 muestra un sistema de dos grados de libertad (u_1 y u_2).

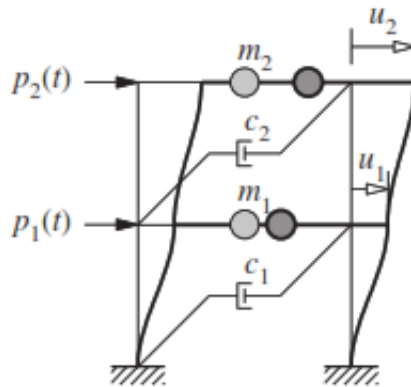


Figura 2.1 Marco de dos niveles

2.1.2. Equilibrio dinámico

La ecuación general de equilibrio que gobierna la respuesta dinámica estructural de un sistema elástico discreto, para un sistema de elementos finitos, a un tiempo t , la

ecuación **Error! Reference source not found.** está dada por un sistema de ecuaciones diferenciales lineales de segundo orden (Bathe, 2014).

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = R \quad (2.1)$$

Donde M , C , K son las matrices de masa, amortiguamiento y de rigidez del sistema, R es el vector de fuerzas externas aplicadas a la estructura, \ddot{U} es el vector de desplazamiento, \dot{U} es el vector de velocidad y U es el vector de aceleración.

La ecuación **Error! Reference source not found.**, que depende del tiempo, tiene como forma general la que se muestra en la ecuación (**Error! Reference source not found.**)

$$F_I(t) + F_D(t) + F_E(t) = R(t) \quad (2.2)$$

Donde $F_I(t)$ es la fuerza de inercia, $F_I(t) = M\ddot{U}$; $F_D(t)$ es la fuerza de amortiguamiento, $F_D(t) = C\dot{U}$; $F_E(t)$ es la fuerza elástica, $F_E(t) = KU$; y $R(t)$ son las fuerzas externas que se aplican.

Profundizando, se tiene que el amortiguamiento es el proceso en el cual la energía del sistema de vibración es tomada, disipada y atenuada (Bao, 2005), y la fuerza de amortiguamiento F_d está definida por:

$$F_d = -C\dot{x} \quad (2.3)$$

Donde \dot{x} es la velocidad y C es el coeficiente de amortiguamiento; el signo negativo representa que es una fuerza de dirección opuesta al movimiento del sistema. Sin embargo, el desempeño del sistema está dado por la razón de amortiguamiento ζ , este valor genera una atenuación de la vibración (ver Figura 2.2) y se define por:

$$\zeta = n/\omega_o \quad (2.4)$$

En donde ω_o es la frecuencia natural, con amortiguamiento nulo, $\omega_o = \sqrt{k/m}$, para lo cual, k es la rigidez y m la masa; n es un coeficiente de amortiguamiento, $n = c/2m$, para esto, c un factor de amortiguamiento y m es la masa.

Existe un fenómeno importante de mencionar, la resonancia, en el cual la amplitud de la vibración se ve incrementada notablemente. Este suceso ocurre cuando la frecuencia de resonancia (definida por: $\omega_r = \omega_0\sqrt{1 - 2\zeta^2}$), la frecuencia del sistema (dada por: $\omega_d = \omega_0\sqrt{1 - \zeta^2}$) y la frecuencia natural (ω_0) presentan valores cercanos entre sí, caso que pasa para amortiguamientos bajos.

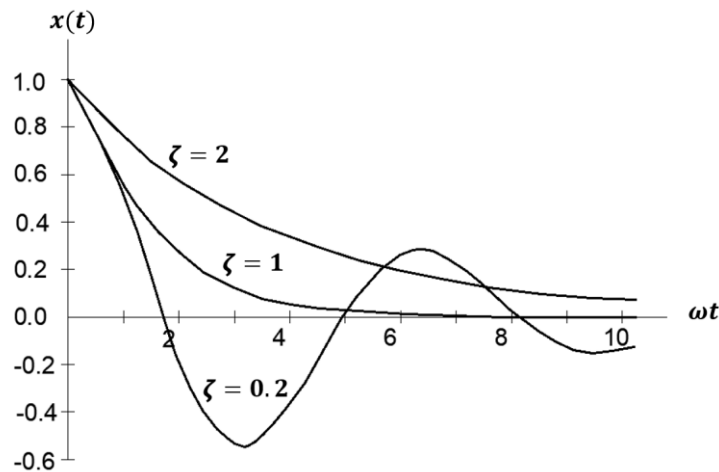


Figura 2.2 Atenuación de la amplitud de onda de sistemas sometido a vibración con diferente razón amortiguamiento

2.1.3. Matriz de amortiguamiento

La matriz de amortiguamiento es útil y aplicable cuando los sistemas son no lineales o cuando el amortiguamiento de una estructura es de tipo no clásico, en los demás casos suele emplearse un análisis modal clásico. En general, no es posible formular la matriz de amortiguamiento en base a las propiedades geométricas del sistema ni de sus elementos, tampoco en base al amortiguamiento de sus elementos porque este no está del todo definido.

Las fracciones de amortiguamiento permiten formular e integrar la matriz de amortiguamiento en un sistema, tales valores son generados en base a mediciones de estructuras parecidas y sometidas a movimientos importantes. No siempre existe un registro de respuesta dinámica de estructuras similares a la de estudio, por lo cual se recomiendan ciertos valores de forma general.

La hipótesis de amortiguamiento clásico, donde materiales y sistema constructivo sean constantes, se basa en mecanismos de amortiguamiento similares en toda la estructura. Bajo dicha hipótesis, hay varios métodos de generar la matriz de amortiguamiento, como el de Raleigh y el de Caughey (Chopra, 2014).

Amortiguamiento de Raleigh.

Se hace la consideración de una proporción entre la masa y el amortiguamiento, así como entre la rigidez y el amortiguamiento, existiendo una fracción de amortiguamiento para cierta frecuencia modal, como se aprecia la

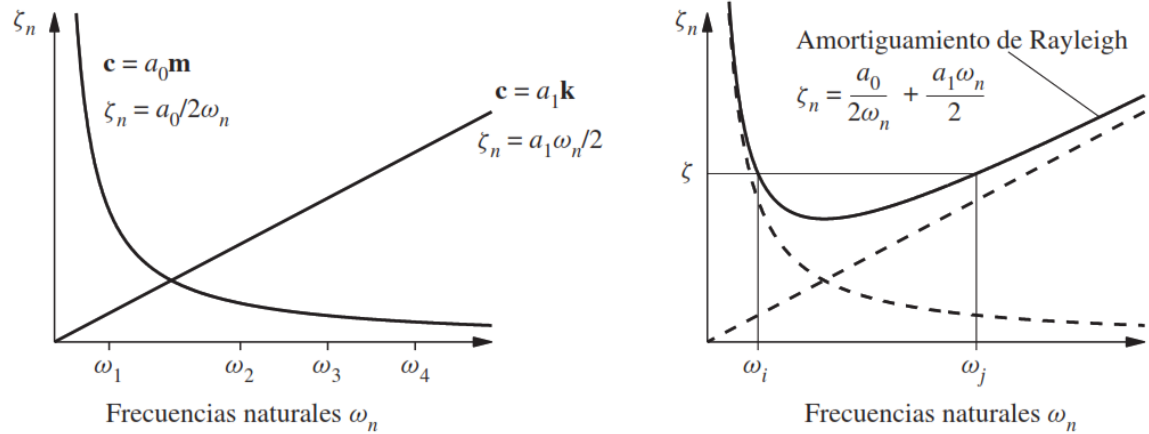


Figura 2.3 Fracciones modales según la frecuencia modal: a) masa y rigidez proporcional al amortiguamiento, b) amortiguamiento de Rayleigh.

Amortiguamiento de Caughey.

El amortiguamiento de Caughey permite obtener la forma general de la matriz de amortiguamiento, por lo que se puede determinar las fracciones de amortiguamiento de más de dos modos, a diferencia del método de Rayleigh. De forma matemática, la matriz de amortiguamiento está definida por:

$$c = m \sum_{l=0}^{J-1} a_l [m^{-1}k]^l \quad (2.5)$$

Donde J es el número de los primeros modos en un sistema de N grados de libertad, m la matriz de masas, k la matriz de rigidez, y a_l son constantes.

2.1.4. Vibraciones

Una vibración es un movimiento periódico de un objeto que se mueve alrededor de su punto de equilibrio; es decir un movimiento oscilante de una masa que está restringida a un punto de equilibrio, con una distancia limitada; la masa siempre vuelve a su punto de equilibrio independientemente de cómo oscile (Yang, 2014). Las principales características de cualquier cuerpo sujeto a vibración son (Moreno Gómez, 2019): (1) frecuencia (tiempo en completar un ciclo), (2) desplazamiento (distancia total existente a extremos de la vibración descrita por el elemento), (3) velocidad y aceleración, (4) dirección (ya sea lineal o rotacional).

2.2. Dinámica no lineal

2.2.1. Teoría del caos

La dinámica no lineal se ha aplicado a diversos campos de la ciencia, la industria y la tecnología. El término de caos, particularmente en este trabajo, hace referencia a un comportamiento complejo, ciertamente impredecible pero que matemáticamente está definido. En términos matemáticos, el caos es un fenómeno que presenta alta sensibilidad a las condiciones iniciales. Por lo general las trayectorias presentan un patrón irregular, no periódico y con un comportamiento totalmente diferente aun cuando las diferencias en las condiciones iniciales sean extremadamente pequeñas (Layek, 2015). Hasta cierto punto, es complejo conocer las condiciones iniciales de un sistema caótico, por lo cual hacer predicciones a largo plazo no es buena práctica (Borondo Rodríguez et al., 2005).

Matemáticamente, un sistema dinámico no lineal es la modelación de un fenómeno caótico. La no linealidad implica que los variables independientes no son proporcionales a los variables dependientes (García Meza, 1993), llegando a ser más complejo su estudio. Se dice que existe linealidad cuando hay un operador llamado L que cumple con la siguiente expresión formal:

$$L [a F(x) + b G(y)] = aL[F(x)] + bL[G(y)] \quad (2.6)$$

Por lo general, los sistemas de caos son de tipo disipativo, es decir que se pierde energía y el sistema con el paso del tiempo se estabiliza, dando paso a elementos como bifurcaciones, ciclos límite o atractores extraños. Se entiende que un atractor es la zona en donde el sistema llega a estabilizarse luego de cierto periodo de tiempo transcurrido, existen atractores lineales y los no lineales o extraños (Romanelli, 2006). Un ejemplo de un atractor extraño es el atractor de Lorenz, el cual tiene una representación gráfica como la que se muestra en la siguiente figura:

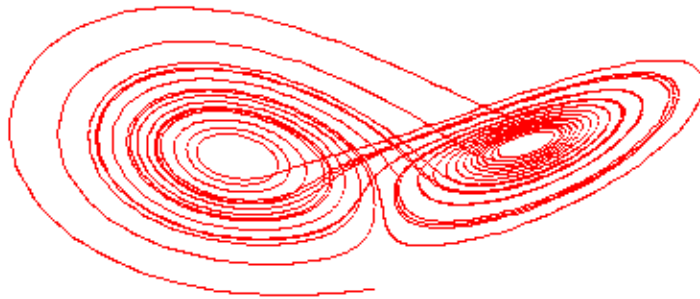


Figura 2.4 Atractor de Lorenz

2.2.2. Exponentes de Lyapunov

Alexander Mijáilovich Lyapunov (1857-1918), un físico y matemático ruso, quien estudio la estabilidad de sistemas dinámicos y propuso los exponentes de Lyapunov. Los exponentes de Lyapunov calculan el grado de caos en un sistema dinámico y forman parte de los modelos métricos, en donde se estudian las distancias entre puntos de un atractor (Ferrari Rojí, 2007).

La premisa fundamental en los exponentes de Lyapunov es que, en sistemas caóticos, la velocidad en que dos trayectorias tienden a separarse es exponencialmente rápida, existiendo así, una velocidad promedio positiva.

Matemáticamente, los exponentes de Lyapunov pueden expresarse (Layek, 2015) como se aprecia en la ecuación **Error! Reference source not found.**

$$\lambda = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \ln[|f^{N'}(x_0)|] \quad (2.7)$$

En donde:

N : variable dinámica (por ejemplo, el tiempo)

$f^{N'}$: solución en momento n

λ : Exponente de Lyapunov

x_0 : condición inicial

Usando la regla de la cadena, la expresión anterior se reduce a la ecuación siguiente:

$$\lambda(x_0) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \ln[|f'(x_i)|] \quad (2.8)$$

Es importante mencionar que en las ecuaciones se aprecia como el exponente de Lyapunov (λ) es dependiente de las condiciones iniciales (x_0).

Existe el caso donde el sistema presenta periodicidad estable o super estable, dado que x_0 es un elemento del k -enésimo ciclo y debe ser un punto de f^k , entonces el producto $|(f^k)'(x_0)| < 1$, lo que conlleva a que:

$$\lambda(x_0) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \ln[|f'(x_i)|] = \frac{1}{k} \sum_{i=0}^{k-1} \ln[|f'(x_i)|] = \frac{1}{k} \ln[|(f^k)'(x_0)|] < 0 \quad (2.9)$$

En base a la ecuación pasada, podemos apreciar cómo es que, para sistemas dinámicos no lineales, si el máximo exponente Lyapunov es negativo, el sistema es estable y si es positivo, el sistema es inestable y caótico. Un sistema caótico mantiene condiciones iniciales cercanas en sus diferentes orbitas (dinámicas) que este presenta (Atemático, 2006), pero dichas orbitas tienden a separarse exponencialmente, lo cual implica que predecir la evolución es imposible (Fernández Sanjúan, 2016). Lo anterior se aprecia en la figura de abajo.

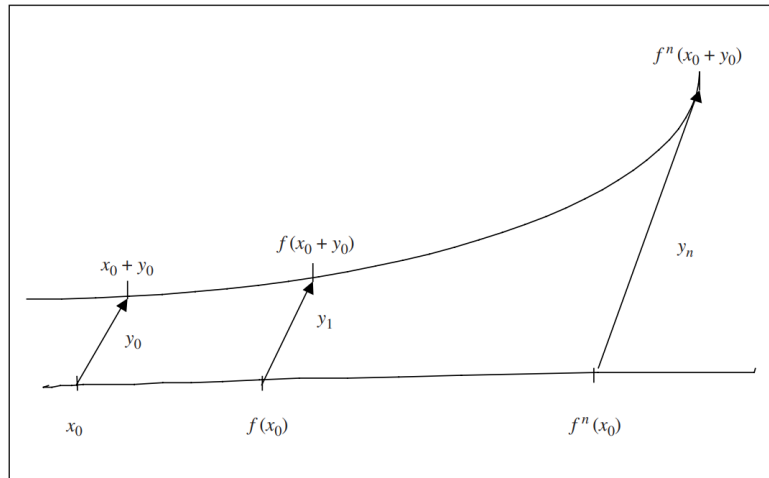


Figura 2.5 Evolución de la distancia entre dos orbitas generadas a partir de condiciones iniciales arbitrariamente cercanas

2.3. Procesamiento de información y monitoreo estructural

2.3.1. Estructura IASC-ASCE Benchmark

La estructura llamada *IASC-ASCE Benchmark* fue propuesta por el *IASC (International Association for Structural Control)* y el comité de dinámica del *ASCE (American Society of Civil Engineers)* el objetivo de estudiar métodos de monitoreo estructural. Por otro lado, fue construida por primera vez en el XV Congreso Internacional de Análisis Modal. La estructura propuesta cuenta con las características de la Tabla 2-1, de igual forma la Figura 2.6 muestra su composición (Zhou et al., 2013).

Tabla 2-1 Parámetros físicos de la estructura ASCE Benchmark

Propiedades	Columnas	Vigas	Contraviento
Sección	B100 x 9	S75 x 11	L25 x 25 x 3
Área (m ²)	1.113×10^{-3}	1.113×10^{-3}	0.141×10^{-3}
I _x (m ⁴)	1.79×10^{-6}	1.79×10^{-6}	0
I _y (m ⁴)	0.664×10^{-6}	0.664×10^{-6}	0
J (m ⁴)	8.01×10^{-9}	8.01×10^{-9}	0
E (Pa)	2×10^{11}	2×10^{11}	2×10^{11}
Γ (kg/m)	8.99	11.0	1.11

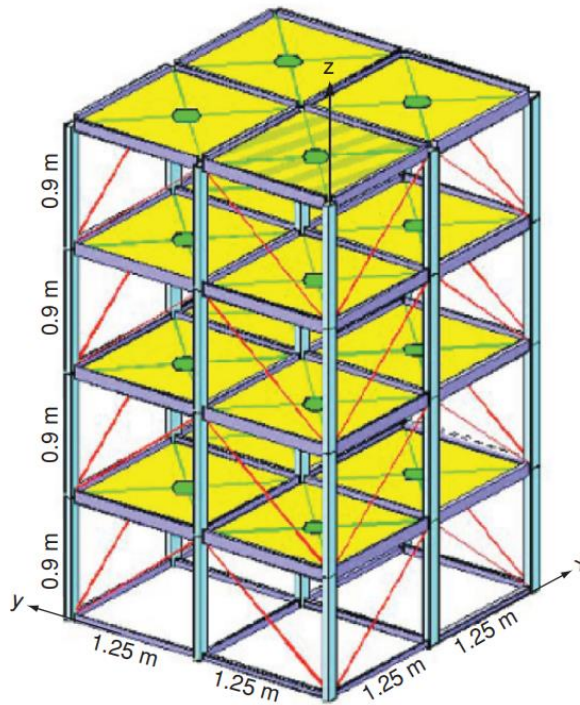


Figura 2.6 Modelo de la estructura ASCE Benchmark

2.3.2. Redes Neuronales

Actualmente, con el avance de los algoritmos de inteligencia artificial, es posible desarrollar clasificadores altamente efectivos. En conjunto con los algoritmos de aprendizaje de máquina (machine learning en inglés, ML) es posible desarrollar soluciones capaces de procesar señales con un alto grado de traslape, así como con la incertidumbre propia que tienen hace aproximaciones más meticulosas y superiores a las técnicas tradicionales (Avci et al., 2021).

Las redes neuronales artificiales (Artificial Neuronal Network – ANN) se basan en el comportamiento del cerebro y sistema nervioso, emulando la red neuronal biológica, pero usando menos características. Por lo general, las redes neuronales son útiles para lidiar con problemas complejos de patrones, como las de categorización (Walczak & Cerpa, 2003), que son objeto del presente trabajo.

Una red neuronal artificial es un modelo computacional que consiste en diversos elementos de procesamiento que reciben en entradas y entregan en salidas, todo en base a funciones predefinidas de activación. Al inicio, se requiere entrenar la red para aprender patrones ocultos y el peso de las conexiones. Las redes neuronales son herramientas poderosas para reconocimiento de patrones y predicción, una carencia es que necesitan cantidades grandes de información para su entrenamiento (Eshragh et al., 2015).

Existen tres elementos esenciales para el funcionamiento las redes neuronales (Amézquita Sánchez, 2012):

1. Unidad de proceso: consta de recibir entrada (del ambiente o de otra neurona), calcular la salida y posteriormente enviarla (al ambiente o a otra neurona). Lo anterior da lugar a tres tipos de capas; capa de entrada, la cual solo recibe entradas del ambiente; capas ocultas, en donde no se tiene contacto con el ambiente, están al interior de la red neuronal y solo hay conexión entre neuronas; la capa de salida es aquella que envía señales al ambiente para realizar una función.
2. La conexión entre neuronas: esta presenta un peso asociado, dentro del cual se almacena el aprendizaje, una conexión neural existente puede ser positiva o negativa. La regla de propagación, para combinar valores de entrada y pesos de conexión, considera un efecto aditivo de la señal; es decir, cada entrada neta hacia la neurona es la suma del producto de cada señal individual con el peso de conexión.
3. Funciones de activación: son reglas predefinidas para evaluar la entrada global de la neurona y definir su estado posterior para una nueva activación. Existen funciones escalón (valores binarios), funciones lineales (toma valor 0 o 1, según un intervalo), y funciones sigmoideas (toma valores dentro de un rango)

Cada una de las neuronas artificiales que conforman la red, son dispositivos de cálculo simple (ver Figura 2.7); las cuales, utilizan conjunto de entradas (x_n) y pesos

de conexión (w_{in}), regla de propagación (h_i) y función de activación ($F(x)$)(Moreno Gómez, 2019).

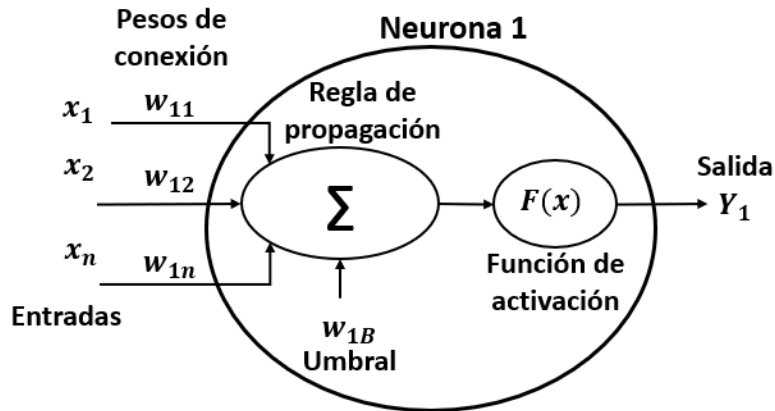


Figura 2.7 Estructura de una neurona

La regla de propagación de la neurona i , con n número de entradas, está definida por:

$$h_i = \sigma(x_n, w_{in}) = \sum_1^n x_n w_{in} + w_{iB} \quad (2.10)$$

La respuesta está dada por la función de activación:

$$y_i = F(h_i) = F\left(\sum_1^n x_n w_{in} + w_{iB}\right) \quad (2.11)$$

El algoritmo de entrenamiento tiene por objetivo el determinar los pesos w_{in} que mejor logren disminuir el error entre la clasificación que se calcula con la red y el valor teórico real que se tiene por referencia (Perez-Ramirez et al., 2020).

Las neuronas se conectan entre sí y se agrupan en capas, existen tres tipos de capas: capa de entrada, capa oculta y capa de salida (Tran-Ngoc et al., 2019).. Las redes pueden clasificarse en redes monocapa y redes multicapa; las redes multicapa presentan una o más capas ocultas en su arquitectura (ver Figura 2.8), esto las hace capaces de resolver problemas no lineales y complejos (Walczak & Cerpa, 2003).

El número de capas ocultas y la cantidad de neuronas por cada oculta es un valor que influye en la capacidad de la red neuronal, un gran número de capas ocultas implica mayor capacidad (costo) computacional, es importante escoger un número correcto de capas ocultas y nodos por capa oculta para lograr resultados óptimos (Tran-Ngoc et al., 2019).

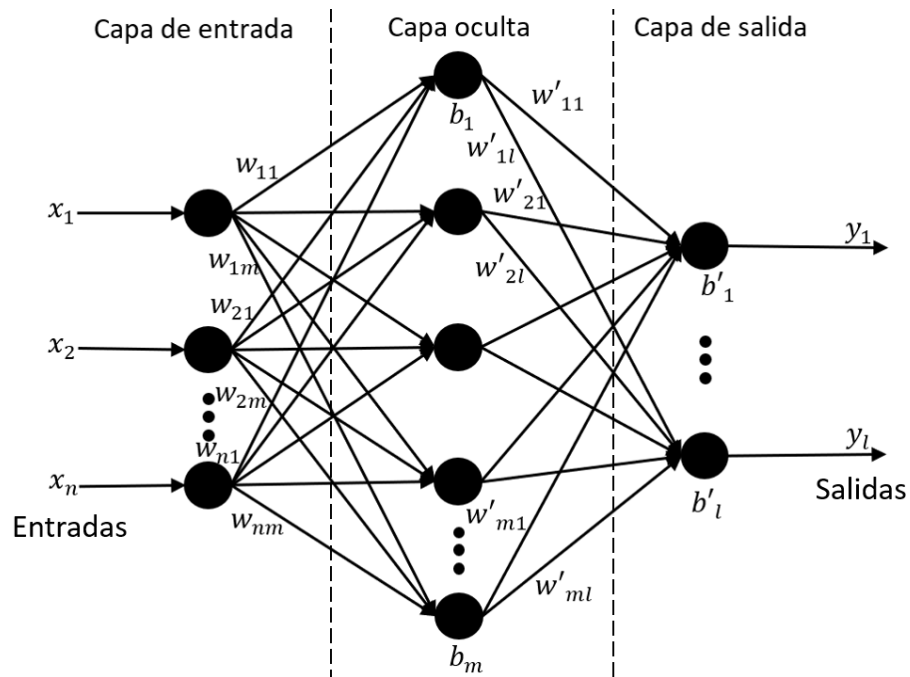


Figura 2.8 Red neuronal multicapa, arquitectura de 3 capas.

3. Metodología

La Figura 3.1, muestra las 4 etapas que dividen este trabajo, siendo la revisión del estado del arte un primer paso, seguido de la preparación de equipo y material, continuando con la etapa experimental y finalizando con el análisis de datos obtenidos; cabe resaltar que la búsqueda de información fue una actividad constante a lo largo del desarrollo del trabajo.

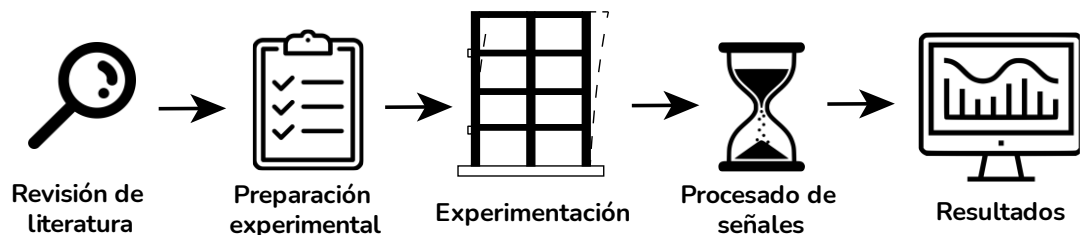


Figura 3.1 Diagrama de metodología.

Por otro lado, la Figura 3.2 muestra la metodología empleada para la parte técnica y más relevante del presente trabajo. Teniendo preparado el equipo y material, se procede a la parte experimental para recolectar datos de la respuesta vibratoria de la estructura en los ejes. Las aceleraciones registradas de la estructura en los ejes x y z son requeridas porque de cada prueba se obtiene el exponente de Lyapunov para cada eje. Como se aprecia, el primer paso consta en realizar la excitación de la estructura usando los medios apropiados, a fin de obtener la respuesta dinámica de la misma. Como segundo paso, se tiene que se calculan los Exponentes de Lyapunov de cada eje, a fin de ver cuál de ellos es el que aporta la mayor cantidad de información que permita realizar el diagnóstico, mismos que serán usados como valores de entrada para la red neuronal, misma que los interpretará a fin de determinar si existe el daño, así como la ubicación de éste.

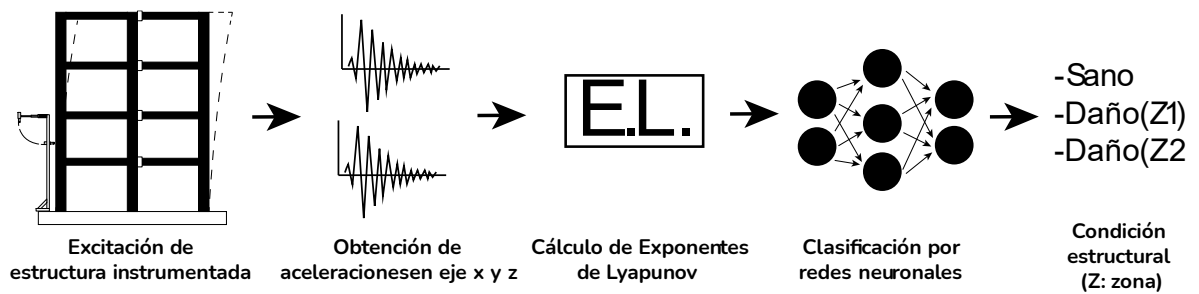


Figura 3.2 Metodología para localizar daños estructurales

3.1. Equipo y materiales

En los próximos párrafos, se muestran las características técnicas de la estructura, de los instrumentos de excitación estructural y de los componentes que conforman el sistema de adquisición de señales.

3.1.1. Estructura de estudio

En este apartado, se realizará una descripción de las características técnicas más relevantes de la estructura a emplearse. De igual forma, se darán detalles relevantes de la investigación.

La estructura se localiza al interior del campus San Juan del Rio de la Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro y fue construida en el año de 2018, por alumnos del doctorado y de la maestría en ciencias. En la Figura 3.3 puede apreciarse la estructura.

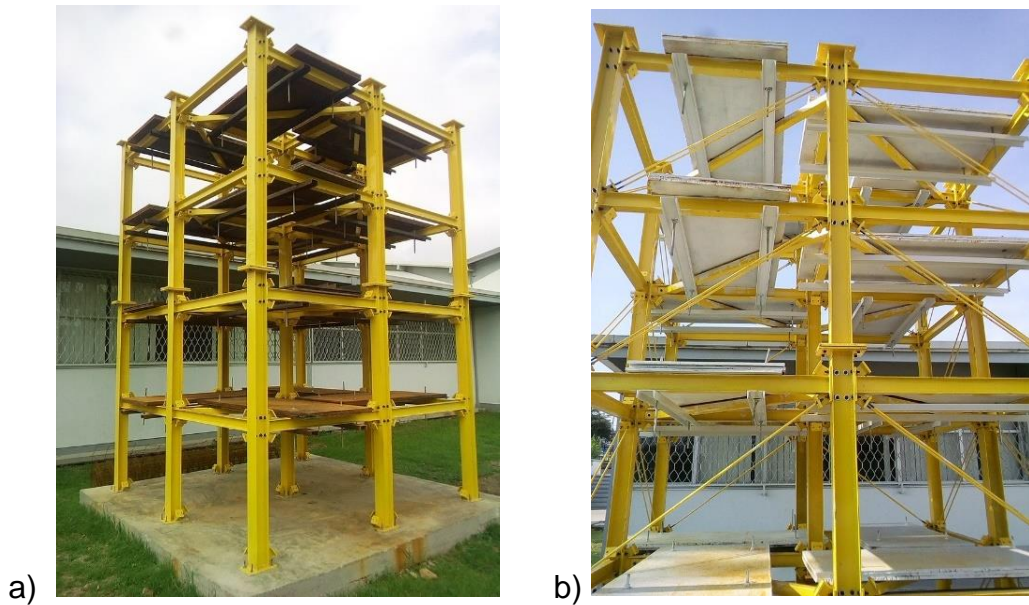


Figura 3.3 Estructura de acero analizada: a) vista general antes de tener contravientos, b) estructura con contravientos.

Respecto a la geometría, la estructura cuenta con dos crujeías en cada dirección y cuatro niveles en altura. En sus dimensiones totales, presenta 3.6 m de altura, 2.5 m de largo y 2.5 m de ancho.

La estructura es un sistema de marcos rígidos de acero A36, formado de vigas de 1.25 m de largo y columnas de 90 cm de altura; en cada nivel se tiene un equivalente de 1200 kg en placas de acero, sumando un total de 4800 kg de carga muerta. A continuación, la Tabla 3-1 muestra las propiedades estructurales de la configuración del sistema.

Tabla 3-1 Propiedades de los elementos estructurales

Propiedad	Columnas	Trabes perimetro	Trabe diagonal	Contravientos
Sección	TP 100 x 100 x 5	S 3 x 5.7	TS 2 x 2 x 1/4	R (3/8)"
Área (m ²)	1.394 x 10 ⁻³	1.077 x 10 ⁻³	1.026 x 10 ⁻³	7.097 x 10 ⁻⁵
I _y (m ⁴)	2.476 x 10 ⁻⁶	1.049 x 10 ⁻⁶	3.188 x 10 ⁻⁷	4.042 x 10 ⁻⁶
I _z (m ⁴)	1.008 x 10 ⁻⁷	1.894 x 10 ⁻⁷	3.188 x 10 ⁻⁷	4.042 x 10 ⁻⁶
J (m ⁴)	1.037 x 10 ⁻⁸	1.665 x 10 ⁻⁸	5.661 x 10 ⁻⁷	8.084 x 10 ⁻⁶
E (Pa)	2.000 x 10 ¹¹	2.000 x 10 ¹¹	2.000 x 10 ¹¹	2.000 x 10 ¹¹
G (Pa)	E/2.6	E/2.6	E/2.6	E/2.6
ρ (kg/cm ³)	7800	7800	7800	7800
Piezas	18	48	16	64

3.1.2. Excitación estructural

Los análisis de vibraciones requieren de la medición de la respuesta dinámica de la estructura. Dichas respuestas se producen mediante la excitación forzada de la estructura o por vibración ambiental. En este sentido, el uso de martillo de impacto es un método ampliamente usado para excitar estructuras, dado que es barato, rápido y relativamente simple para hacer pruebas; este es muy usado para hacer mediciones en los entresijos de las estructuras. El impacto del martillo debe ser en la misma zona y con la misma fuerza, preferentemente. Las mediciones de los impactos suelen hacerse con acelerómetros, una persona opera el martillo mientras que otra el sistema de adquisición de señales (Reynolds & Pavic, 2000)

Para su uso se debe considerar que, la fuerza de impacto puede ser variable entre pruebas si la posición (previa y posterior) de impacto no es la misma (ver Figura 3.4); también, impactos demasiado fuertes pueden generar daño al elemento (Moreno Gómez, 2019).

El martillo de impulsos empleado fue de la marca KISTLER, modelo 9728A20000, el cual cuenta con un rango de frecuencia (-10 dB) de 1000 Hz, un rango de fuerza de 0 a 5000 lbf (2000 N), y que es válido para análisis modales. Algunas de sus propiedades físicas del martillo son:

- a) Diámetro: 51 mm
- b) Longitud: 155 mm
- c) Peso: 1500 g
- d) Longitud del mango: 355 mm
- e) Conector: BNC neg.

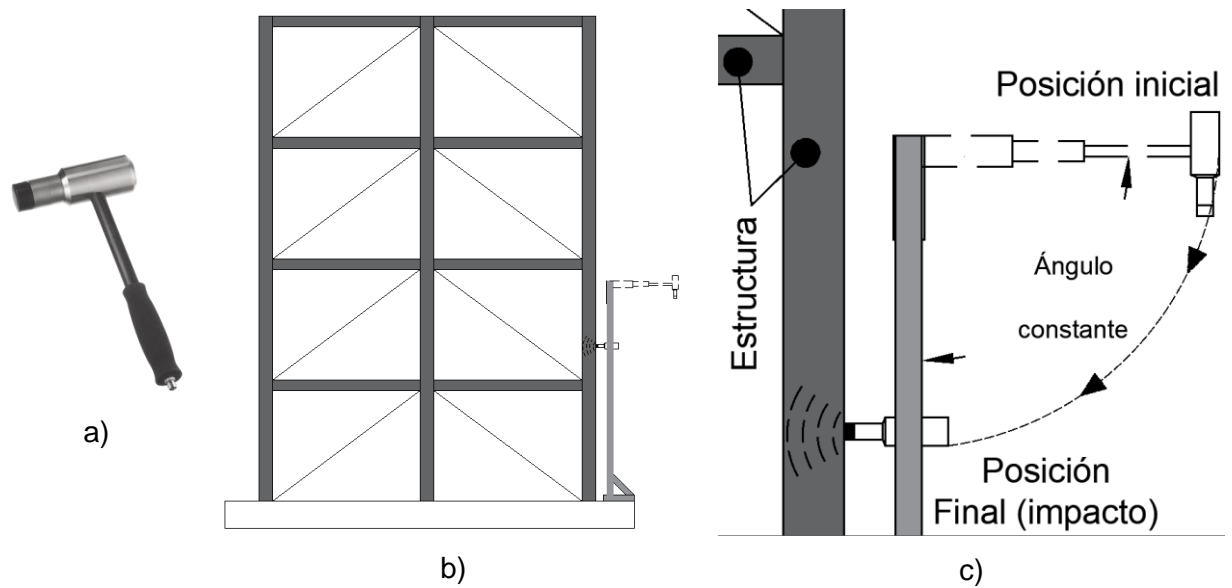


Figura 3.4 Martillo de impacto: a) apariencia, b) montaje, c) esquema del modo de uso

3.1.3. Sistema de adquisición de señales

El Sistema de Adquisición de Datos (*Data Acquisition System – DAS*) está conformado por tres elementos, los cuales son: (1) sensores, (2) filtro *antialiasing*, y (3) dispositivo acondicionador de la señal (convertidor). A continuación, cada uno de los componentes son descritos con detalle.

3.1.3.1. Sensores

El sensor empleado en la medición la respuesta dinámica de la estructura fue el acelerómetro capacitivo triaxial MEMS CC K-Beam, tipo 8395A (ver Figura 3.5), de la marca KISTLER. Este sensor utiliza un microsistema electromecánico (*Micro-Electro-Mechanical System, MEMS*), presenta excelente estabilidad térmica y es un cubo pequeño de 30 g de masa.

Las características importantes del sensor son:

1. Alta sensibilidad
2. Bajo nivel de ruido, con medición simultanea de aceleraciones
3. Medición precisa y optimizado para eventos de baja frecuencia, teniendo un amplio ancho de banda de 0 a 1000 Hz.

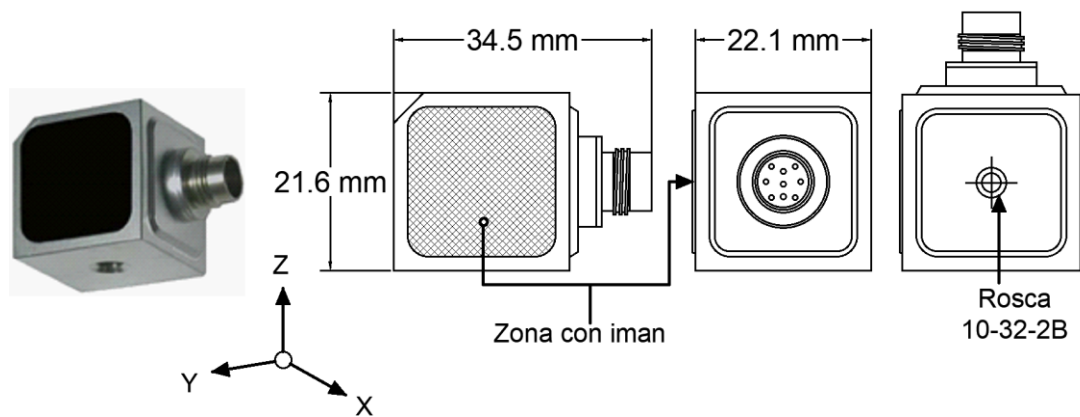


Figura 3.5 Acelerómetro capacitivo, tipo 8395A

3.1.3.2. Filtro antialiasing

Para la experimentación, el filtro antialiasing es un dispositivo que recibe la señal analógica de los acelerómetros, la limpia y trasmite al acondicionador (convertidor) de la señal. Un filtro antialiasing es un filtro pasa baja, donde el objetivo es pasar solamente aquellas frecuencias que cumplan el criterio de Nyquist (ecuación **Error! Reference source not found.**), el cual establece que la frecuencia de la señal de muestreo f_s debe ser mayor que el doble de la frecuencia de la señal a analizar f_a . Dicho criterio evita la pérdida y distorsión de datos cuando se va a transformar la señal analógica a señal digital, ya que al momento que se intenta reconstruir la señal inicial, los componentes de frecuencia de muestreo interfieren. Por otro lado, el filtro pasa baja también elimina el ruido e interferencia de frecuencias altas, por lo que este elemento es fundamental para cualquier sistema de adquisición de datos cuando se requiere obtener información precisa (Oshana, 2006). El filtro empleado es como el que se puede apreciar en la Figura 3.6, un arreglo formado de resistencias y capacitores.

$$f_s > 2f_a \quad (3.1)$$

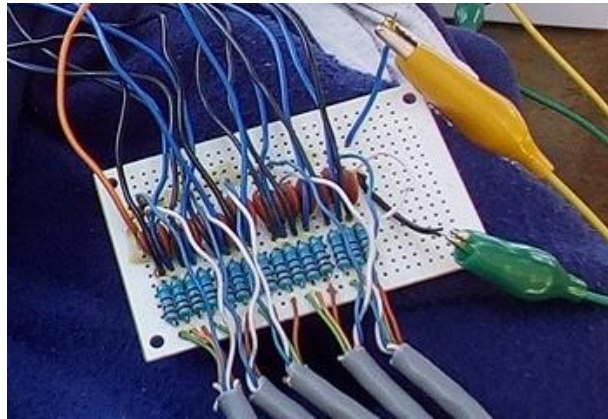


Figura 3.6 Filtro antialiasing

3.1.3.3. **Convertidor analógico-digital.**

Para realizar la conversión analógica-digital y la comunicación con el equipo de cómputo, se emplea la tarjeta de la compañía National Instruments, modelo USB-6211 (ver Figura 3.7). Es un módulo de adquisición de datos multifuncional que ofrece entradas y salidas analógicas y digitales, 2 contadores de 32 bits, además de un ADC con resolución de 16 bits, con una frecuencia máxima de muestreo de 250 KHz. Este tipo de dispositivo muy empleado para aplicaciones de prueba, control y diseño, ya que permite aplicación académica, OEM (*Original Equipment Manufacturer*) embebidas, registro de datos portátil, adquisición de datos del vehículo y monitoreo de campo.



Figura 3.7 Dispositivo de E/S Multifunción: USB-6211

3.2. Daños y consideraciones realizar las pruebas experimentales

En un inicio, se implementaron las condiciones experimentales para el estado dañado de la estructura. Aparte de los elementos requeridos para armar la estructura, se generó un elemento extra con la condición de daño por reducción de sección transversal (en un 75%), simulando una grieta (ver la Figura 3.8).

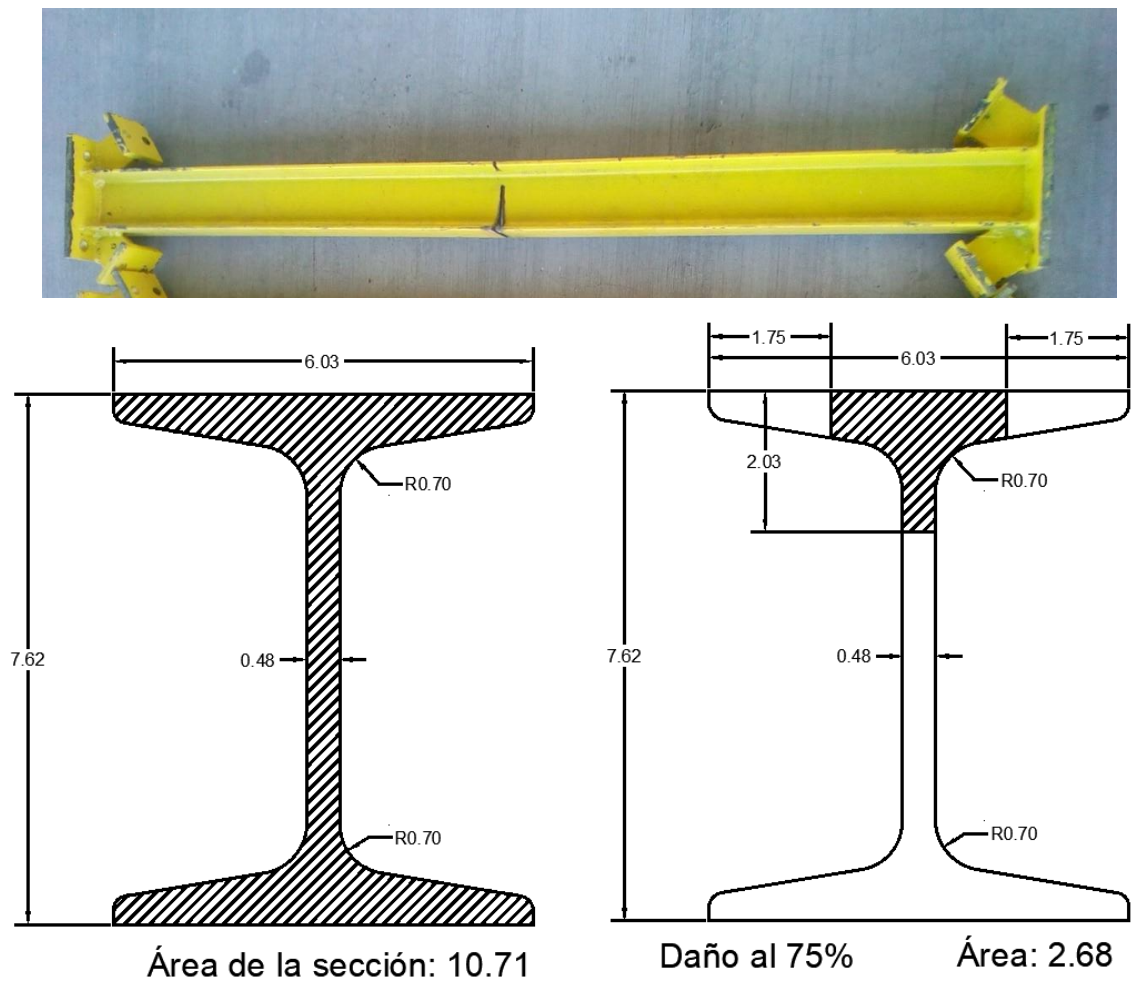


Figura 3.8 Viga adicional a preparar con simulación de daño

Una vez conseguidas las vigas con daños, se empezó a realizar la experimentación en la estructura. Sí bien, el objetivo inicial fue realizar pruebas zonificando, evitar usar un sensor por nivel y realizar diferentes combinaciones al posicionar los sensores. Sin embargo, por limitaciones de tiempo, recursos y para mantener un

numero de pruebas bajo, pero de calidad, se hicieron las pruebas posicionando un sensor en cada nivel, a continuación, se hace la explicación con más detalle.

En primera estancia, se experimentó la estructura con vigas y columnas en estado sano, realizando n pruebas de impacto y medición (n serán 25 repeticiones). Luego, una viga sana del primer nivel fue intercambiada por la viga con grieta al 75%, se ejecutaron otras n pruebas de impacto, esta viga dañada fue cambiando al segundo, tercer y cuarto nivel, de igual forma en cada cambio de nivel se realizaron n pruebas de impacto y medición. En la Tabla 3-2, se puede apreciar lo antes mencionado de manera sintetizada.

Tabla 3-2 Pruebas experimentales

Vigas		Numero de pruebas de impacto y medición				Total
		Nivel				
Tipo	Característica	Primer	Segundo	Tercer	Cuarto	
a	Sanas (sin reducción de área)	25				25
b	Reducción de área transversal	25	25	25	25	100
Total						125

3.3. Combinaciones de estudio en el procesamiento de la información

Se ha mencionado que se realizaron pruebas experimentales posicionando un sensor por cada nivel y variando la viga dañada para realizar un menor número pruebas de calidad, aprovechando así el tiempo y recursos. La información medida en campo se procesó empleando diferentes combinaciones de estudio, porque se desea continuar con el objetivo de estudiar los daños zonificando la estructura, usando menos de un sensor por nivel y variando las posiciones de los sensores. A continuación, se explica mejor cuantas y como fueron estas combinaciones de estudio.

Las diferentes combinaciones en el acomodo de los sensores para detectar daños en diferentes zonas de la estructura, la Tabla 3-3 muestra de forma resumida el nivel donde se posicionaron los sensores y la zona de la estructura que estos miden.

Tabla 3-3 Posicionamiento de sensores

Combinación (No.)	Posición de Sensores	Zona	
	Nivel (No.)	Zona (No.)	Niveles que la integran (No.)
1	1	1	1 y 2
	3	2	3 y 4
2	2	1	1 y 2
	4	2	3 y 4
3	1	2	3 y 4
	3	1	1 y 2
4	2	2	3 y 4
	4	1	1 y 2
5	2	1	1 y 2
	3	2	3 y 4
6	1	1	1 y 2
	4	2	3 y 4
7	2	2	3 y 4
	3	1	1 y 2
8	1	2	3 y 4
	4	1	1 y 2



Para un mejor entendimiento, la  Reducción de sección transversal  Acelerómetro

Figura 3.9 y

Figura 3.10 muestran de forma esquemática los diversos arreglos que fueron empleados para analizar la respuesta dinámica de la estructura.

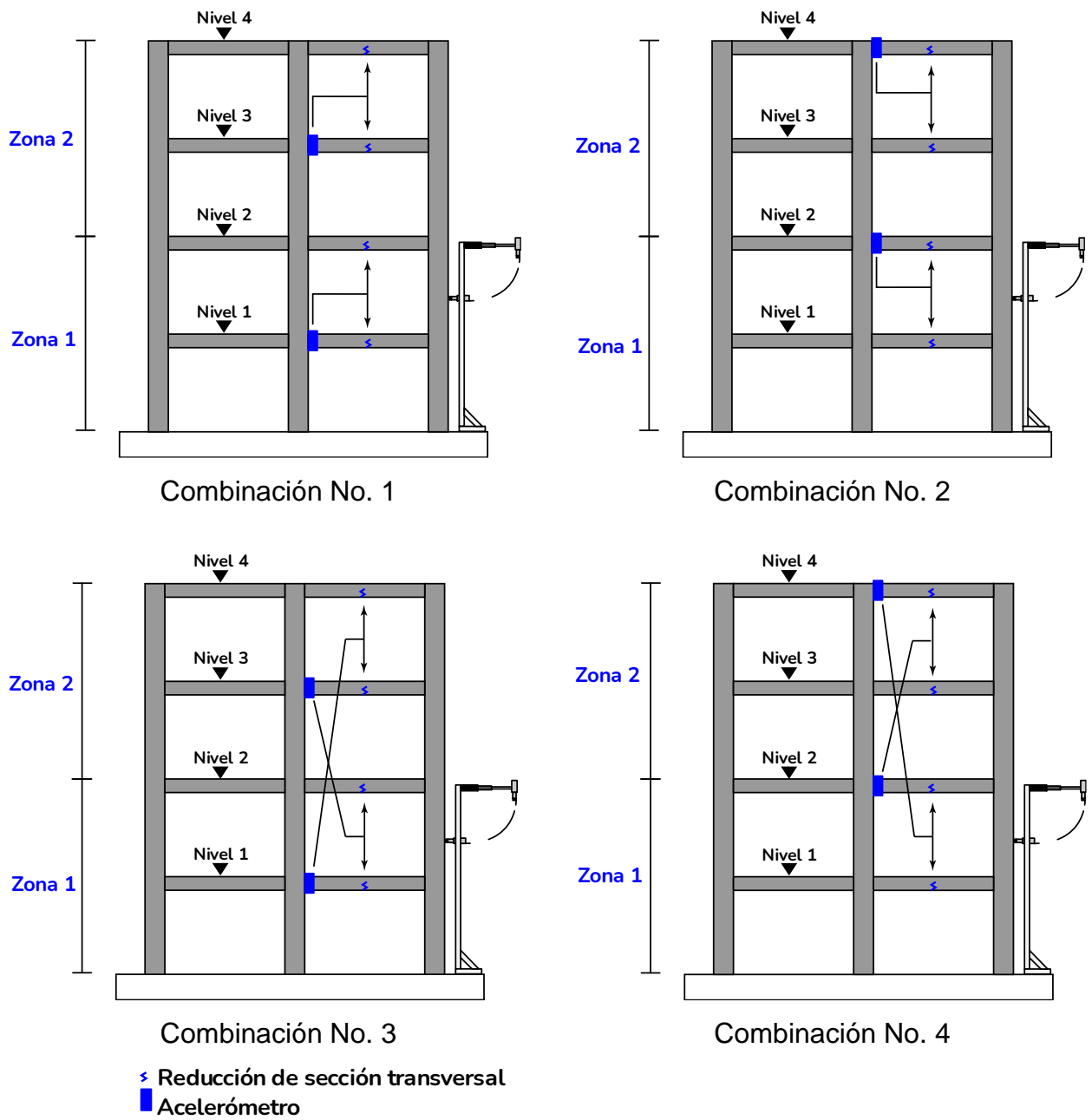
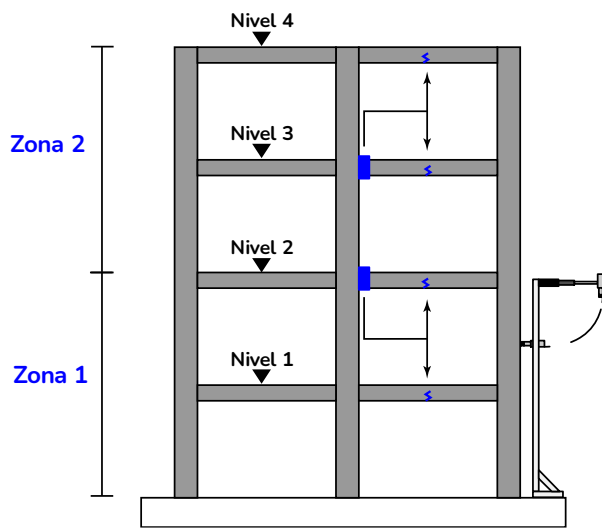
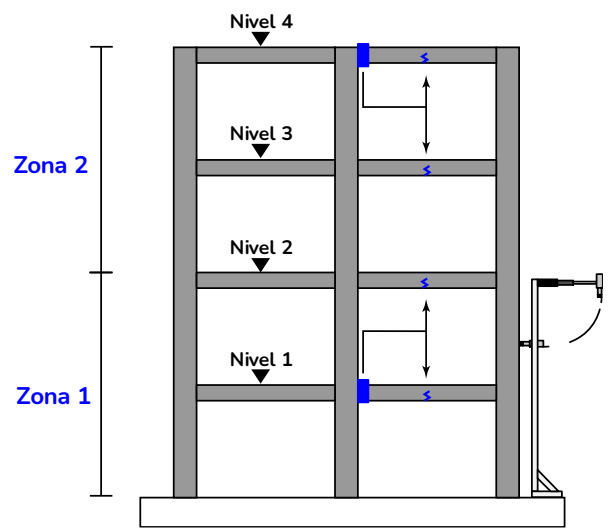


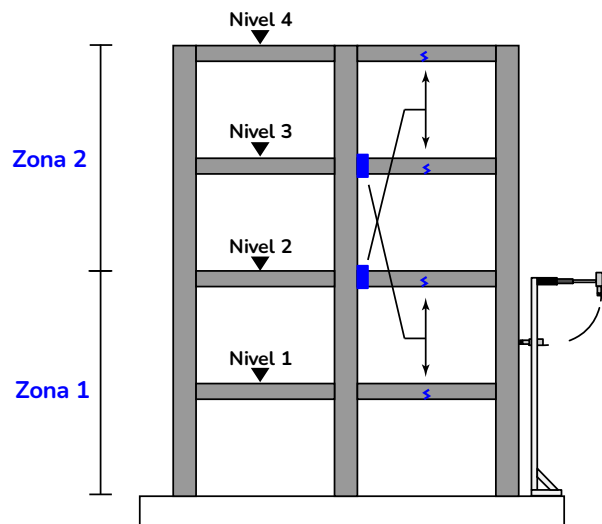
Figura 3.9 Posicionamiento de sensores (parte 1)



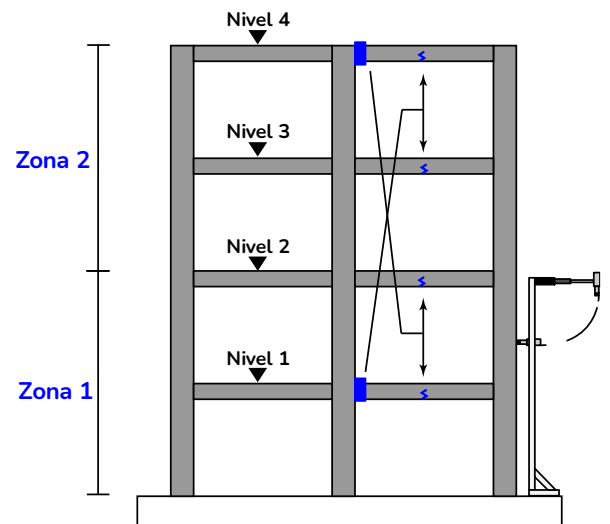
Combinación No. 5



Combinación No. 6



Combinación No. 7



Combinación No. 8

< Reducción de sección transversal 4.
 ■ Acelerómetro

Figura 3.10 Posicionamiento de sensores (parte 2)

4.1. Configuración experimental

En la Figura 3.11, se aprecia el montaje experimental desarrollado para realizar las pruebas experimentales. Todo inicia con la excitación de la estructura, la cual genera vibraciones que son registradas por el sistema de adquisición de señales, en la parte final la computadora guarda la información capturada.

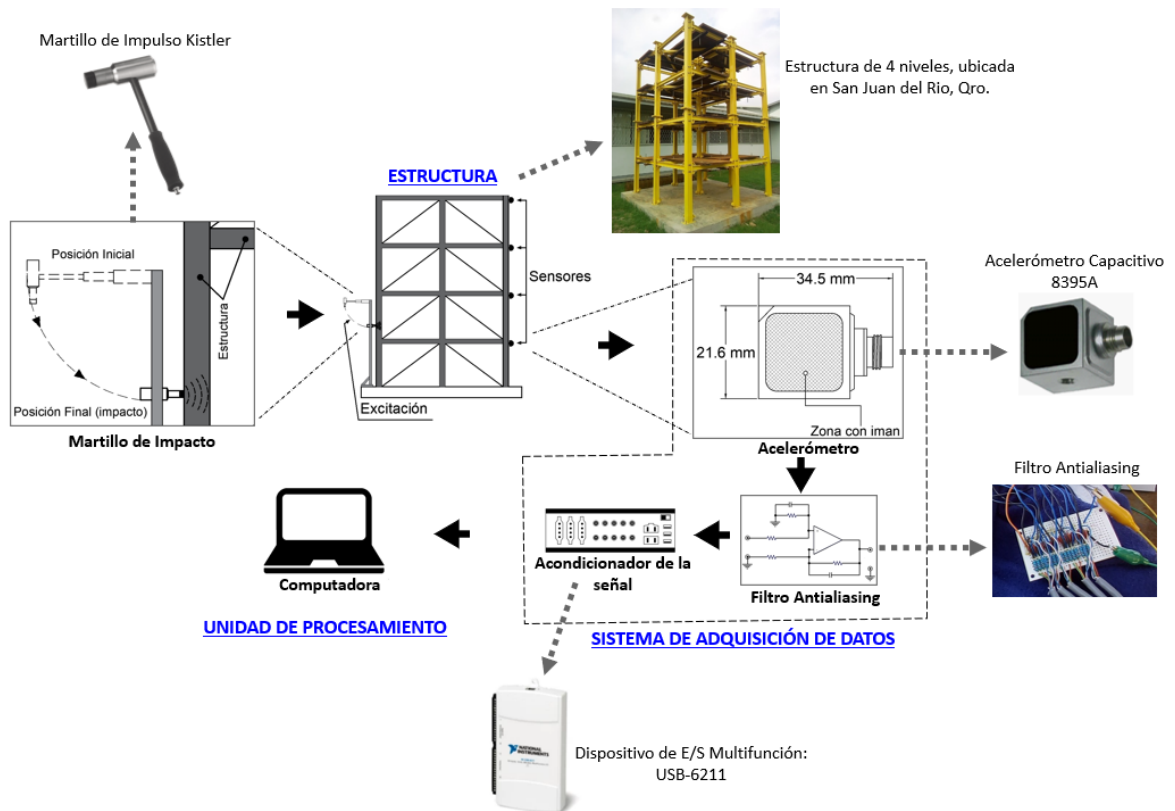


Figura 3.11 Configuración del montaje experimental

4.2. Mediciones experimentales

Cada prueba de impacto y medición conlleva los siguientes puntos:

- I. La estructura fue excitada mediante un impacto del martillo, provocando así vibraciones en la estructura.
- II. Cada acelerómetro triaxial, posicionado en cada nivel (4 en total), se encargó de la detección y medición de las vibraciones que la estructura desarrolla.

- III. Conectado entre los acelerómetros y el acondicionador de la señal, el filtro antialiasing controló que la frecuencia de muestreo sea al menos el doble de la frecuencia de vibración de la estructura, evitando la pérdida de información.
- IV. Posteriormente, el acondicionador de señal fue empleado para recibir, transformar y enviar la señal por protocolo USB a una computadora. Cada prueba y medición tuvo una duración de alrededor de 20 segundos, dado que la frecuencia de muestreo del acondicionador de la señal es de 5 kHz, se obtuvieron alrededor de 100,000 mediciones, es decir cada 0.0002 segundos se midió y registró un valor de la vibración estructural.
- V. La computadora mantiene una configuración que hace posible visualizar las vibraciones medidas y para posteriormente poder ser guardadas en archivos de texto.

Una fuente de poder móvil brindó la energía requerida para que los instrumentos funcionen correctamente durante las pruebas experimentales.

4.3. Repetividad de las pruebas experimentales

Es importante que la experimentación se mantenga bajo condiciones controladas, con el fin de mantener la repetividad y la baja desviación entre los datos. Para los trabajos de pruebas de impacto se realizaron las siguientes acciones de control:

- Realizar las pruebas durante el mismo horario, trabajándose en horas tempranas del día, evitando así las altas temperaturas y sus efectos en el acero estructural.
- En cada una de las repeticiones de impacto se aseguró que la zona de impacto fuera la misma.
- Los intervalos entre impactos fueron constantes en lo posible, realizando 5 impactos a cada 2.5 s aproximadamente.

4.4. Validación de una señal sintética

A fin de validar una de las ideas básicas sobre las que se basa este trabajo, se utiliza la Función de Weierstrass. Esta función se caracteriza por tener un comportamiento no lineal, misma que está definida con la siguiente ecuación (Kantz, 1994):

$$W_H(t) = \sum_{i=0}^M \gamma^{-iH} \cos(2\pi\gamma^i t) \quad (3.2)$$

Donde H es el exponente de Hurst y γ es una constante cuyo valor va de 0 a 5. M es la cantidad de términos que se desean sumar. Para este trabajo se emplea una $\gamma = 5$ y $M = 26$ términos. Debe resaltarse que estos parámetros son propios de un sistema no lineal, y se usan según la recomendación de Kantz (1994) como medio de validación del algoritmo programado. En la Tabla 3-4 se observan las diferencias entre el exponente de Lyapunov y el grado de fractalidad de la señal. Como se aprecia, el exponente varía en cuanto se cambia el valor del fractal, lo que implica que se pueden cuantificar los cambios geométricos que se producen en la señal.

Tabla 3-4 Fractalidad y el exponente de Lyapunov de una señal

Valor del Fractal	1.8	1.5	1.3	1.1
Exponente de Lyapunov	232.98	211.53	190.02	105.06

4.5. Procesamiento de señales

En general, gran parte del trabajo de procesamiento se lleva a cabo en el programa de cómputo MATLAB. En un inicio, se realiza el procesamiento de las señales, aplicando los exponentes de Lyapunov. En la parte final, se emplea una red neuronal multicapa para detectar las zonas en donde se localizan los daños, según sea el caso, en el capítulo de resultados se puede entender más sobre los obtenido en el procesamiento de datos.

5. Resultados y discusión

En esta parte del trabajo se presentan, de forma gráfica o textual, los datos obtenidos de las pruebas experimentales, valores del procesamiento de la señal, características del clasificador empleado y la efectividad que se tiene para la localización del daño según el caso analizado. Por otro lado, se tiene como objetivo discutir los resultados obtenidos, realizar observaciones de relevancia y llevar a cabo lo necesario para posteriormente realizar conclusiones acordes a lo obtenido.

5.1. Frecuencias modales de la estructura

Se realizó el modelo de la estructura empleada en la experimentación (ver Figura 5.1), empleando el programa de análisis estructural llamado SAP200, el cual permite realizar análisis modales y de más tipos.

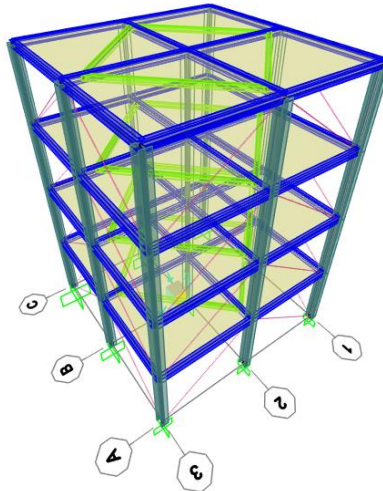


Figura 5.1 Modelo del sistema de marcos rígidos de acero

Una vez dada la geometría, condiciones de frontera, cargas, masas y propiedades de las secciones se realizó el análisis modal de la estructura y se recabaron las frecuencias resultantes de los primeros modos de vibración (ver Tabla 5-1).

Tabla 5-1 Frecuencias relacionadas a los primeros modos de vibración

Modo (No.)	Periodo (s)	Frecuencia (Hz)
1	0.12	8.3
2	0.11	9.0
3	0.09	11.7
4	0.04	24.4
5	0.04	27.5
6	0.03	34.6

Las frecuencias de vibraciones de los primeros modos fueron también obtenidas mediante la transformada de Fourier, la cual se aplicó a las aceleraciones registradas durante las múltiples pruebas de impacto hecha (ver Figura 5.2 y Figura 5.3, en anexos se encuentran las gráficas de los demás condiciones, niveles y sensores).

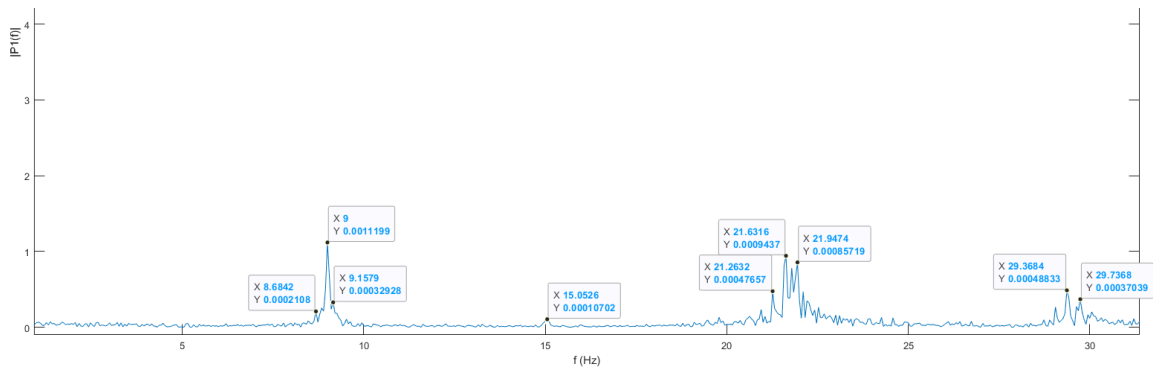


Figura 5.2 Transformada de Fourier (envolvente), sin daño en algún nivel, sensor 1, eje z.

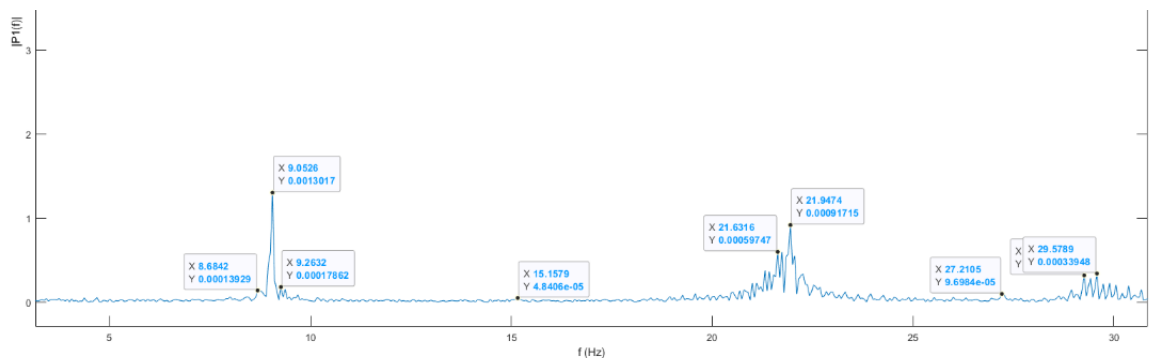


Figura 5.3 Transformada de Fourier (envolvente), 75% de daño en nivel 1, sensor 1, eje z.

Dentro de algunos aspectos relevantes, las frecuencias modales calculadas en SAP200 de los primeros 3 modos son muy cercanas a las frecuencias obtenidas con la transformada de Fourier para los estados sano y con daño, mientras que en los demás modos existe ligera variación. En general, las frecuencias modales obtenidas con la transformada de Fourier son muy similares tanto en la estructura sana como en la estructura con daño.

Del modelo de SAP200, se aprecia que las frecuencias de vibración son relativamente bajas, esto por la rigidez que la estructura presenta. Por otro lado, un dato a destacar es que la frecuencia del modo 4 resulta ser más del doble de la frecuencia del modo 3.

5.2. Datos adquiridos de la experimentación

De las 25 pruebas realizadas para cada configuración de daño, hay datos importantes por mencionar, cada prueba presentó una duración de aproximadamente 20 segundos, la frecuencia de muestro es de 5 kHz, cada 0.0002 segundos se registró un valor de la aceleración, sumando cerca de 100,000 valores por prueba. Los datos registrados de las aceleraciones no presentan una distribución normal, en las siguientes figuras se pueden apreciar casos particulares de los datos medidos, tanto para el caso sano y uno con daño.

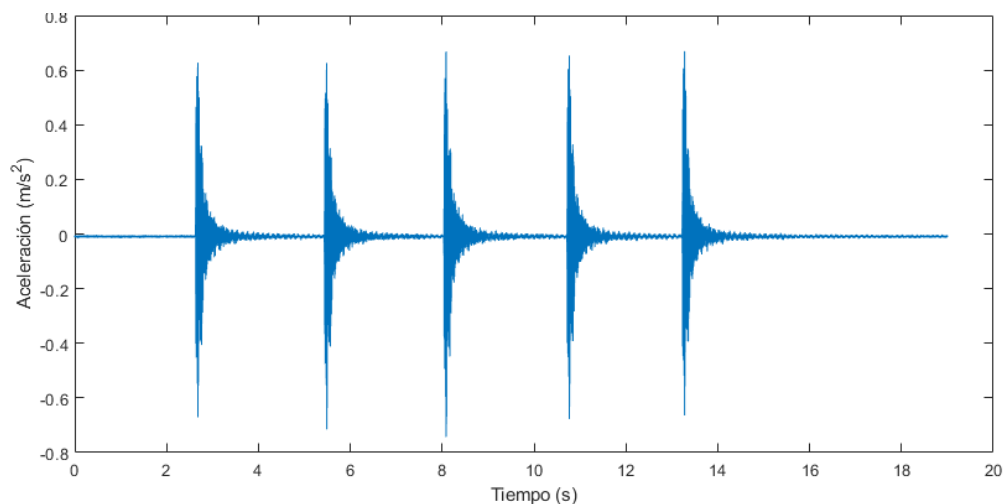


Figura 5.4 Prueba del estado sano, sensor 4, eje z

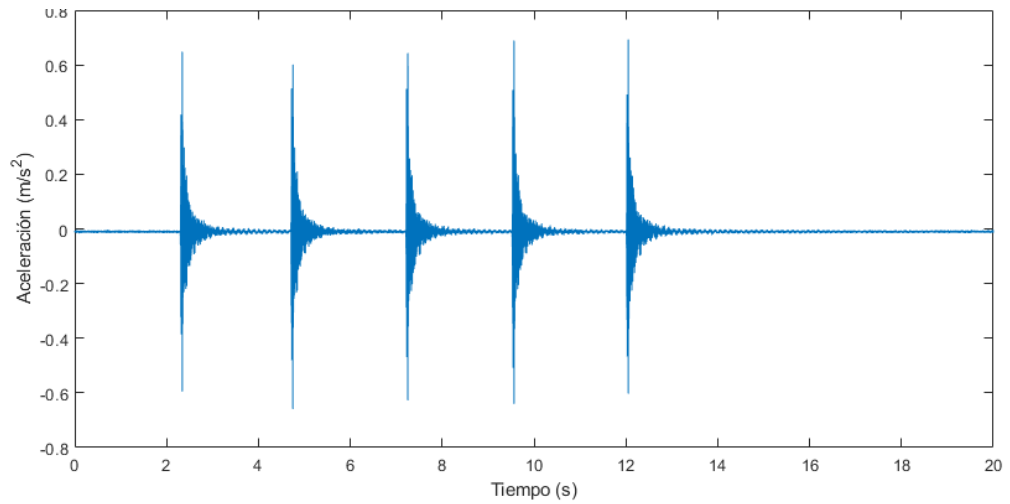


Figura 5.5 Prueba de un estado con daño en nivel 2, sensor 4, eje z

5.3. Exponentes de Lyapunov calculados

En primera estancia, se realizó la programación para el procesamiento de las aceleraciones registradas por el Sistema de Adquisición de Datos en el programa de cómputo MATLAB. El objetivo del procesamiento fue obtener los exponentes de Lyapunov para cada prueba realizada y dado que se requiere localizar el daño, se obtuvieron valores para los diferentes niveles, diferentes ejes y diferentes condiciones de estado, los valores resultantes no presentan una distribución normal. A continuación, se muestra una síntesis de los exponentes de Lyapunov obtenidos para los diversos casos:

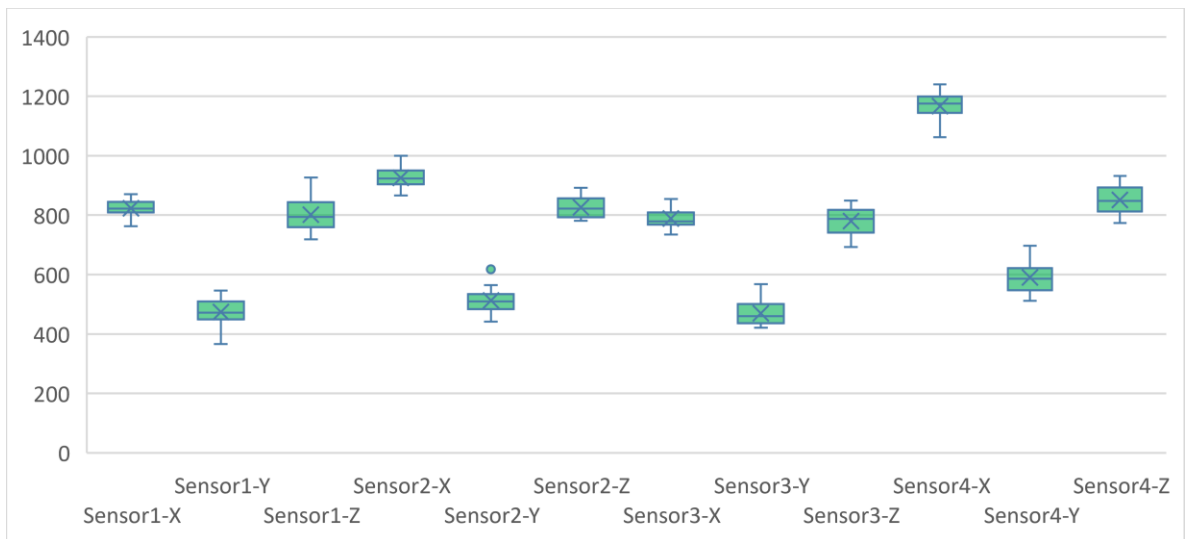


Figura 5.6 Grafica de cajas de exponentes de Lyapunov (Sin daño)

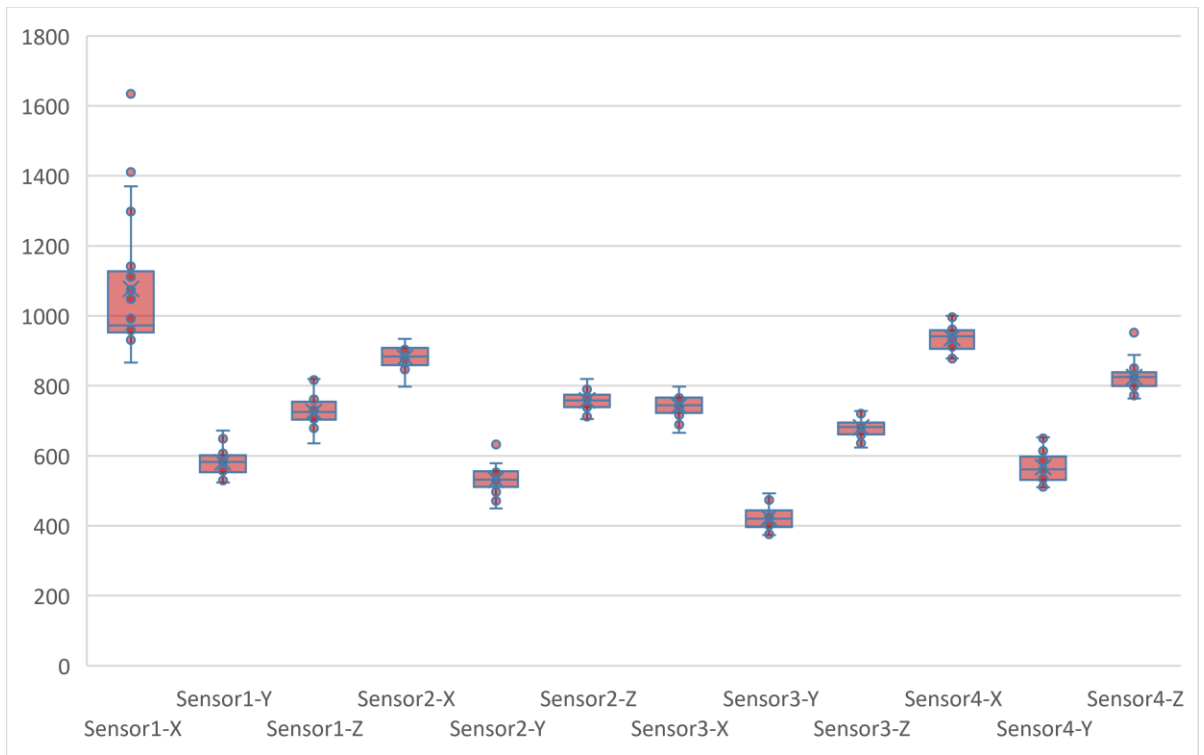


Figura 5.7 Grafica de cajas de exponentes de Lyapunov (daño en nivel 1)

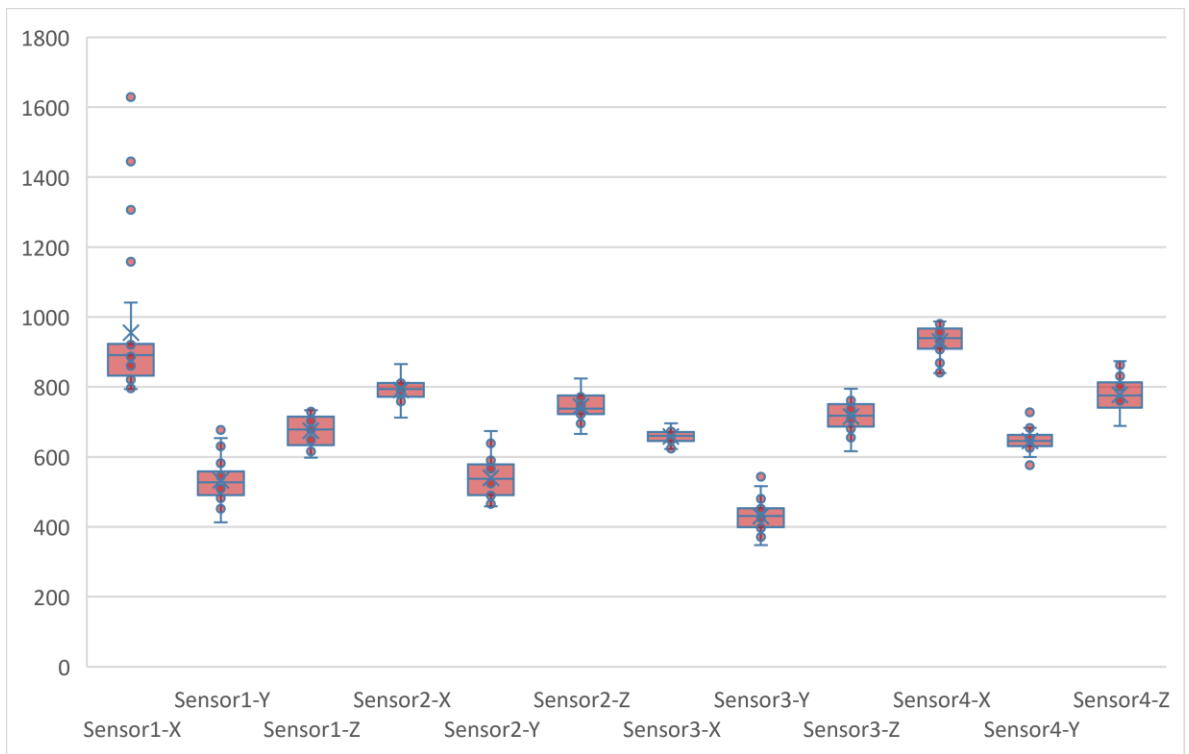


Figura 5.8 Grafica de cajas de exponentes de Lyapunov (daño en nivel 2)

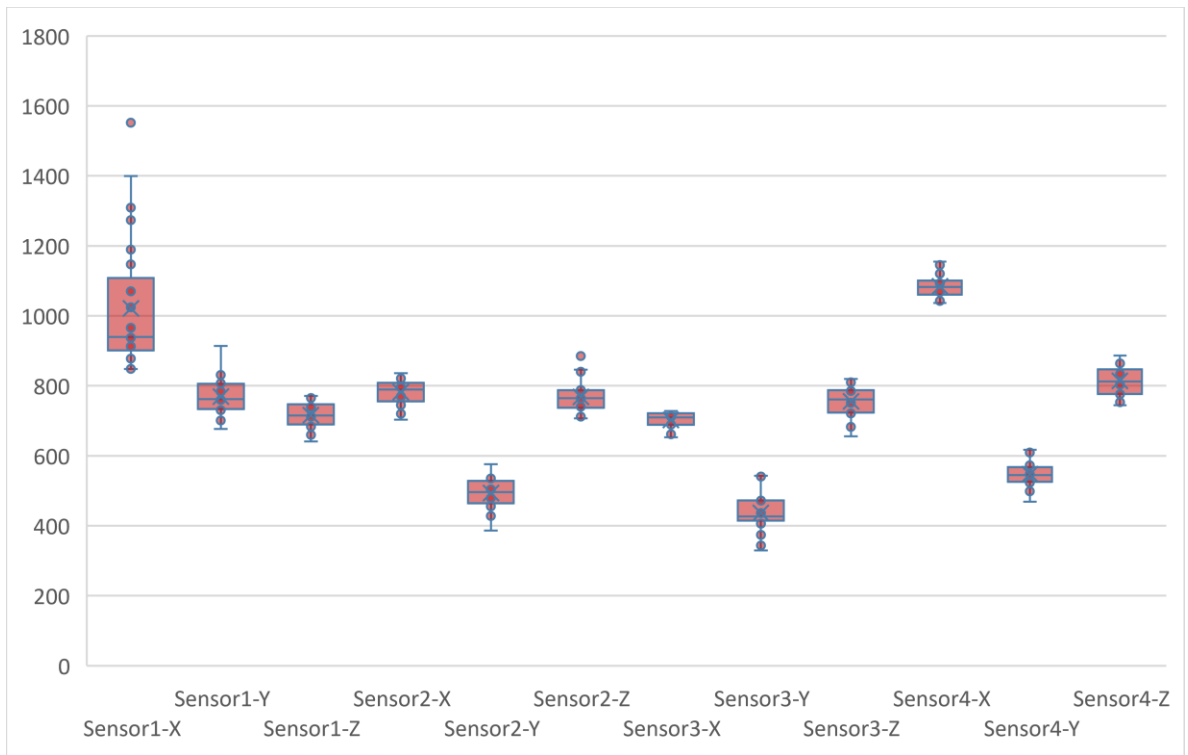


Figura 5.9 Grafica de cajas de exponentes de Lyapunov (daño en nivel 3)

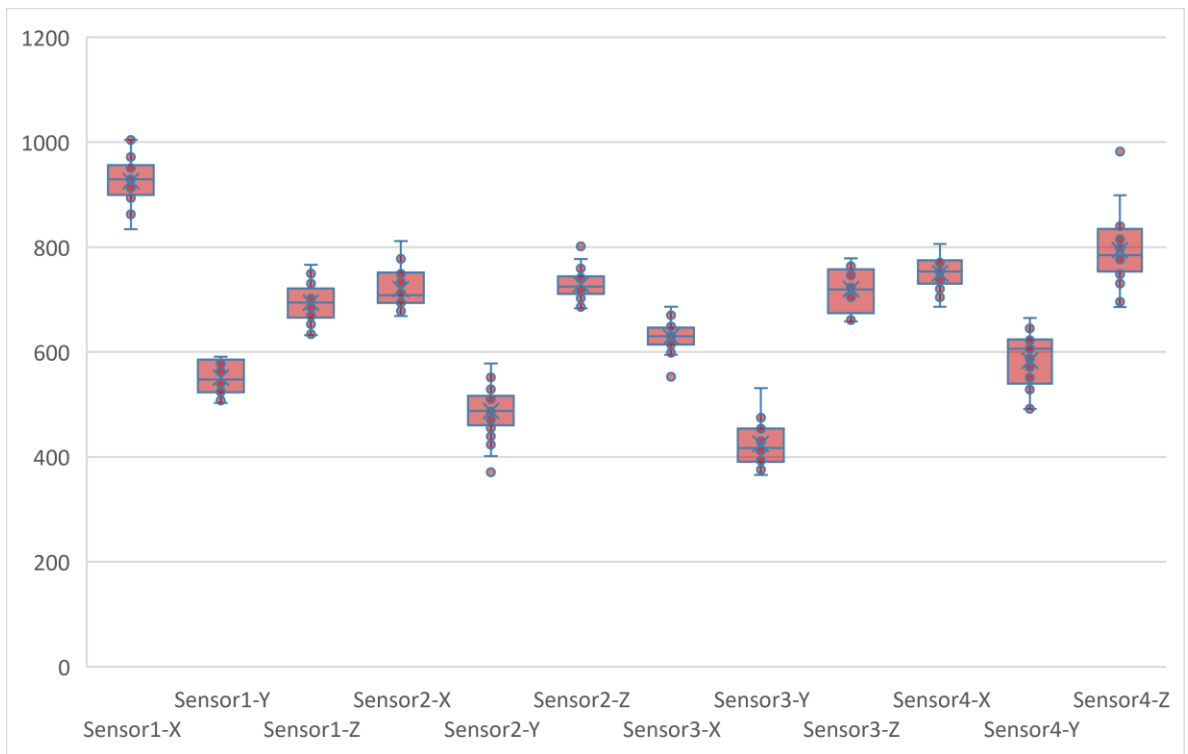


Figura 5.10 Grafica de cajas de exponentes de Lyapunov (daño en nivel 4)

5.4. Localización de daños

En este apartado se presenta un resumen de los resultados obtenidos luego de utilizar redes neuronales para la detección del daño en los diferentes niveles de la estructura de análisis.

La siguiente tabla y grafica hacen un recuento de los porcentajes de efectividad, en términos breves, se cuantifico las veces se clasifico correctamente la estructura como sana, con daño en zona (subestructura) 1 o 2. Como se puede apreciar en la tabla, la combinación 1 y 3 presentan mejores resultados que las demás.

Tabla 5-2 Efectividad en la localización de daños al emplear redes neuronales

Combinación (No.)	Efectividad (%)			
	Sin daño alguno (SANO)	Daño en zona 1 (EST-1)	Daño en zona 2 (EST-2)	General
1	100	98	100	98
2	60	70	90	76
3	100	100	100	100
4	70	100	90	90
5	50	90	100	86
6	90	85	80	84
7	90	85	80	78
8	100	80	100	92

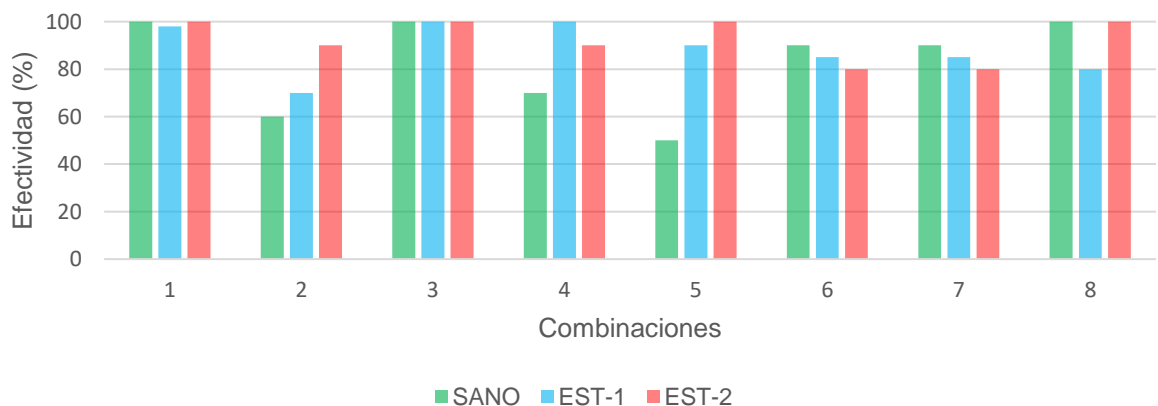


Figura 5.11 Grafica de la efectividad de las combinaciones

5.5. Caso de análisis en particular

A continuación, se hace una recapitulación de la combinación 1, la cual entra dentro de las combinaciones con mejor aproximación en la localización de daños en la estructura.

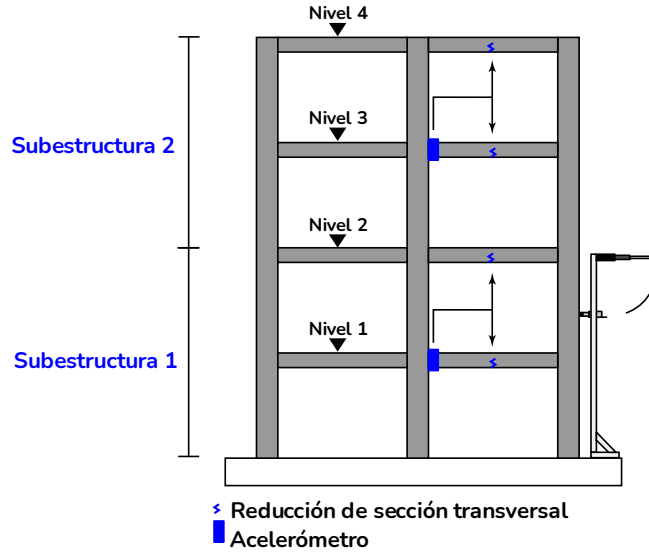


Figura 5.12 Arreglo de sensores para la combinación 1

La siguiente Tabla 5-3 es la obtenida de la combinación 1, lo cual nos permite observar el comportamiento específico de dicha combinación. Por ejemplo, el recuadro de la primer fila y segunda columna, la red clasificó un 2% de las pruebas como condición sana, cuando en realidad el daño tenía que ser clasificado como condición con daño en subestructura 2.

Tabla 5-3 Porcentajes de clasificación de la red neuronal.

Condición según la red neuronal	1	20%	2%	0%	98% Total
	2	0%	38%	0%	
	3	0%	0%	40%	
		100%	95%	100%	
		1	2	3	
		Condición real de la estructura			

Donde:

1: Condición sana

2: Condición con daño en subestructura 1

3: Condición con daño en subestructura 2

Como se puede apreciar, posicionar los sensores en el nivel 1 logro resultados satisfactorios, al obtener la matriz de confusión del caso de estudio se tuvo sólo un mínimo de error al localizar el daño en la subestructura 1, pero el general se tuvo una efectividad cercana al 100%.

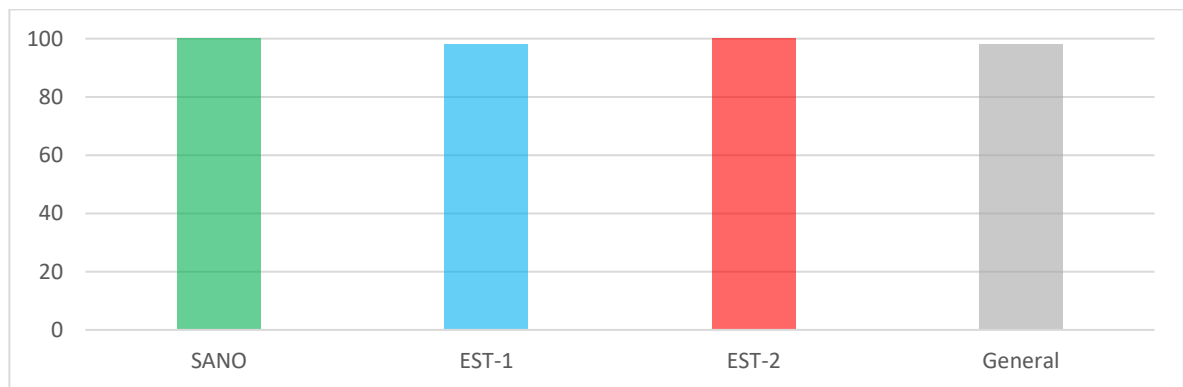


Figura 5.13 Efectividad de combinación 1 al localizar daños

5.6. Trabajos previos

En la Tabla 5-4 se puede apreciar algunos de los trabajos similares al trabajo de esta investigación, siendo ayuda para posibles comparativas. Los métodos mencionados en la tabla no son propiamente empleando los exponentes de Lyapunov para la detección de daños, son trabajos que han sido desarrollados para detección y localización de daños en estructuras tipo marcos rígidos de acero.

Tabla 5-4 Trabajos similares en la literatura

Trabajo	Metodología empleada	Relevante	Precisión
Chen & Zang (2011)	Combina el agrupamiento difuso y el reconocimiento artificial-inmune de patrones para reconocer la pérdida de arriostres y pernos	La mejor efectividad fue al emplear la distancia diagonal en el método. El método no tiene el mejor rendimiento, pero presenta un rendimiento más estable comparado con los métodos de FC-SVM and FC- Bayesiano simple. Se emplearon 15 sensores.	84 %
Huang et al., (2016)	Modelo Bayesiano jerárquico empleado en la detección de pérdida de pernos y arriostres.	Se logro inferir daños por pérdida de rigidez al analizar las vibraciones, presentando mejoras a un primer método planteado, eliminando aproximaciones erróneas y mejorando el análisis modal. Se emplearon 15 sensores.	96%
Jiang et al., (2017)	Un modelo dinámico de red neuronal difusa estocástica con el fin de analizar la falta de arriostres y pernos.	El modelo desarrollado fue aplicado a un modelo autorregresivo, un marco plano de dos niveles y a la estructura experimental Benchmark (el shaker usado puede generar efectos torsionales). La metodología puede ser útil en identificar propiedades físicas, modales y condiciones locales de daño.	78-97%
Abdeljaber et al. (2018)	Red neuronal convolucional mejorada para detectar falta de pernos y arriostres.	Alrededor del 20% de datos fueron usados para el entrenamiento, el factor indicador de daño presenta buen rendimiento si se promedian los casos. 15 acelerómetros fueron empleados.	83%
Das & Saha (2020)	Método híbrido de la descomposición variacional de modos y la descomposición frecuencial de dominio, se analizaron daños por falta de arriostres y pernos.	El método fue capaz de procesar señales hasta con 100% de ruido en modelo analítico, mientras que experimentalmente se trabajó solo con un 10% de ruido. 16 sensores fueron empleados.	98%
Presente	Exponentes de Lyapunov y redes neuronales para localizar y detectar daños por pérdida de sección transversal en vigas.	Se detecto y localizó daños bajo el concepto de subestructuras (zonificación), manteniendo un numero bajo de sensores. 2 sensores empleados para procesamiento.	88 %

6. Conclusiones

En la presente investigación se realizó la detección y ubicación de daños estructurales en un sistema de marcos rígidos empleando exponentes de Lyapunov y redes neuronales. En general, se logró detectar los daños por reducción de la sección transversal, logrando una efectividad ponderada de 88% en el panorama general de los casos analizados.

La red neuronal detectó y localizó daños mejor para la combinación de estudio no. 1 y no. 3 (ambas con acelerómetros en el primer y tercer nivel). La localización de daños fue más efectiva cuando los sensores se posicionaron más cerca de la zona de impacto, pero que a su vez estuvieron los más cercanos a la base rígida de la estructura, donde los desplazamientos por lo general son de menor magnitud.

El sistema de marcos rígidos que se experimentó y analizó presenta un comportamiento no lineal, ya que como se observa los valores del exponente de Lyapunov son mayores a cero. En última instancia, se acepta la hipótesis de investigación planteada al comienzo de este trabajo.

5.2 Prospectivas

En trabajo de investigación a futuro, se pueden abordar los trabajos desde un enfoque relacionado a la cuantificación de los daños en los elementos, donde se puedan estudiar diferentes niveles de daño. Por otro lado, se puede estudiar la optimización del uso de sensores en la estructura, con el fin de establecer la mínima cantidad de sensores que es requerido emplear con el fin de no perder información. El estudio de la estructura con diferentes tipos de daño como, pérdida de pernos, de arriostres, y daños en columnas puede ser otra opción de trabajo

7. Anexos

7.1. Frecuencias modales empleando transformada de Fourier

A continuación, se muestran las transformadas de Fourier para la estructura en estado sano y para la presencia de daño en niveles 1 y 3, se presentan las envolventes porque se realizaron 25 pruebas para cada caso.

Sin daño en los niveles:

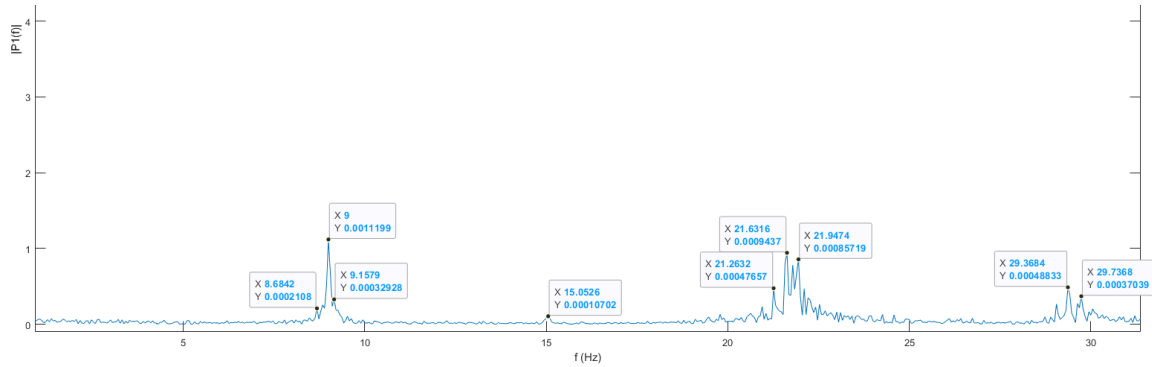


Figura 7.1 Envolvente de la transformada de Fourier, estructura sin daño, sensor 1, eje Z

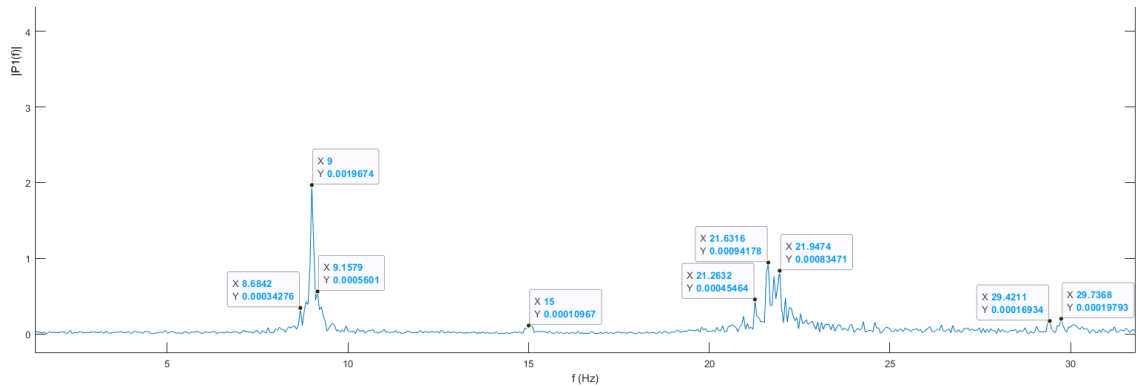


Figura 7.2 Envolvente de la transformada de Fourier, estructura sin daño, sensor 2, eje Z

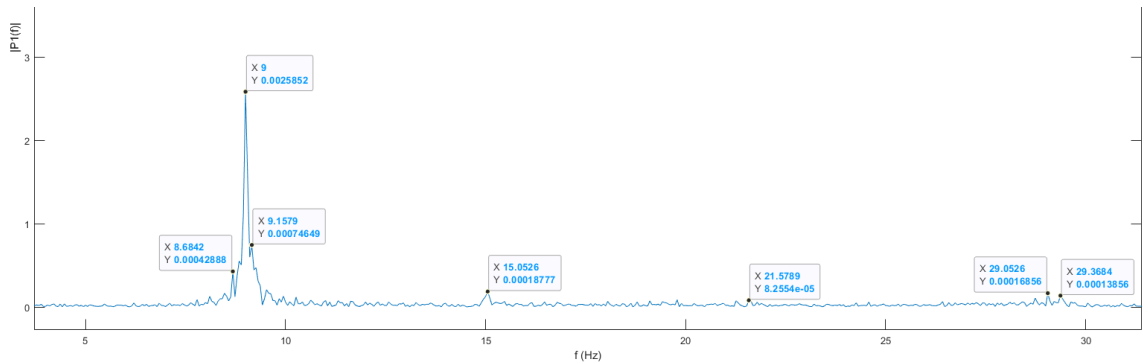


Figura 7.3 Envolvente de la transformada de Fourier, estructura sin daño, sensor 3, eje Z

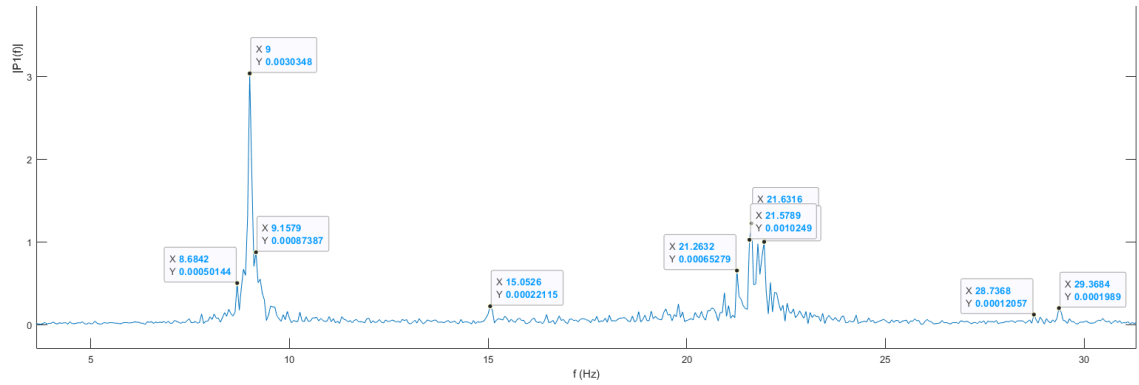


Figura 7.4 Envoltura de la transformada de Fourier, estructura sin daño, sensor 4, eje Z

Daño en nivel 1

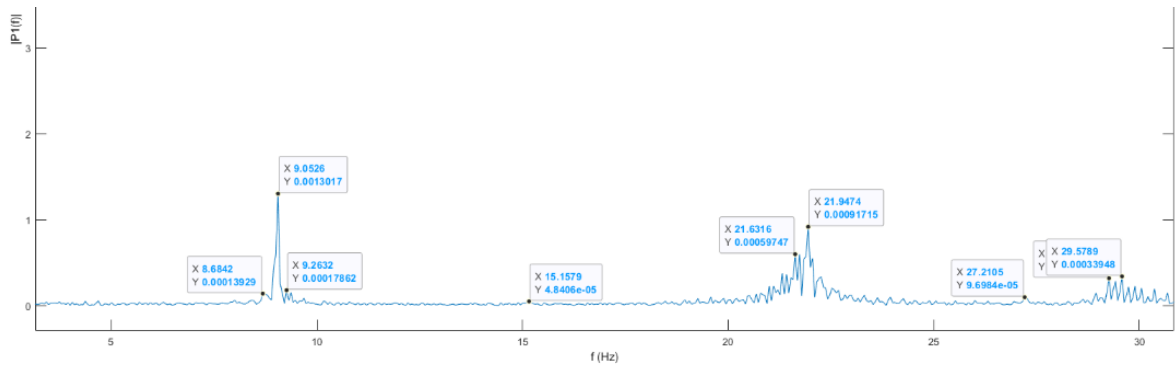


Figura 7.5 Envoltura de la transformada de Fourier, daño de 75% en nivel 1, sensor 1, eje Z

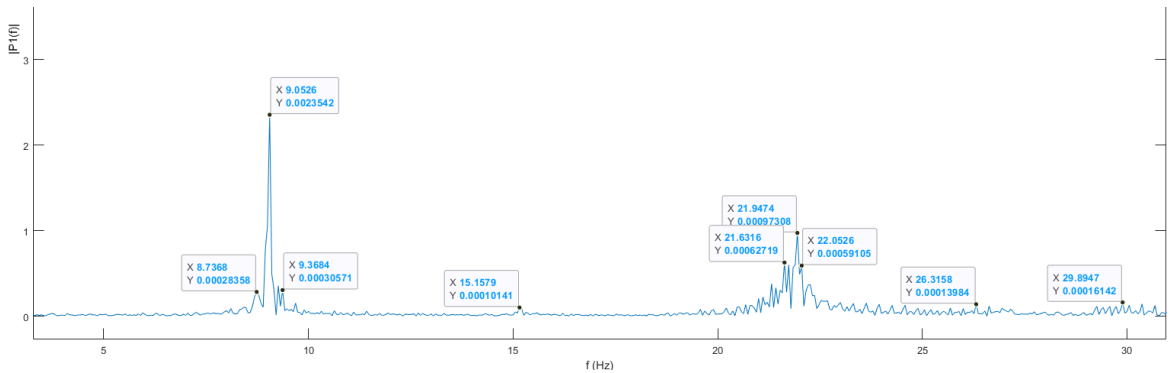


Figura 7.6 Envoltura de la transformada de Fourier, daño de 75% en nivel 1, sensor 2, eje Z

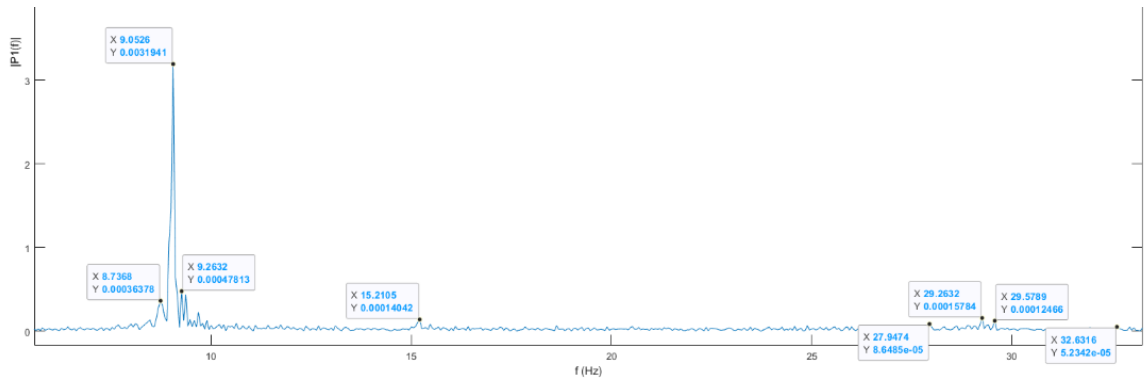


Figura 7.7 Envoltura de la transformada de Fourier, daño de 75% en nivel 1, sensor 3, eje Z

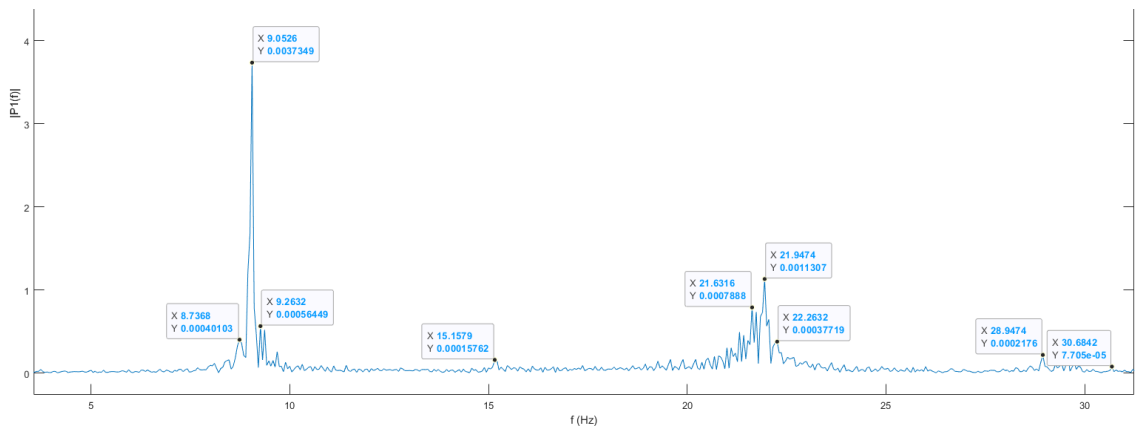


Figura 7.8 Envoltura de la transformada de Fourier, daño de 75% en nivel 1, sensor 4, eje Z

Daño en nivel 3

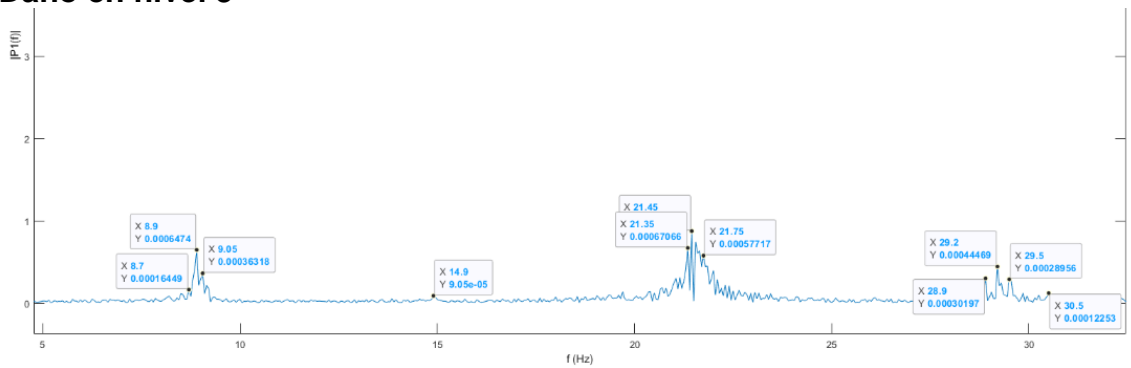


Figura 7.9 Envoltura de la transformada de Fourier, daño de 75% en nivel 3, sensor 1, eje Z

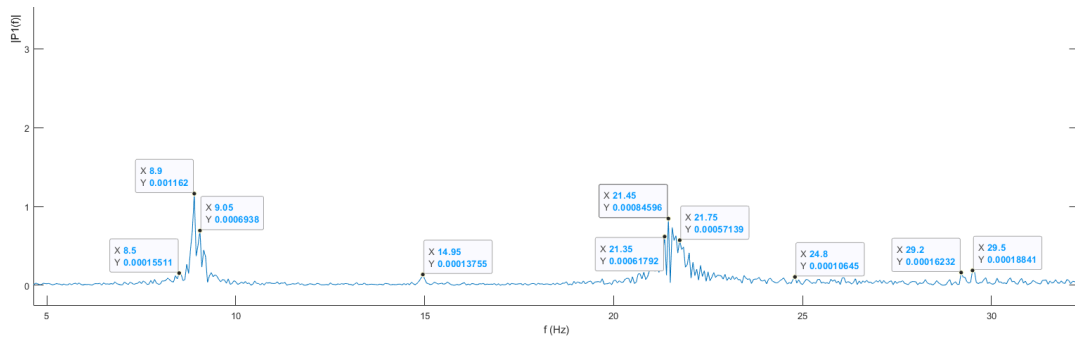


Figura 7.10 Envolvente de la transformada de Fourier, daño de 75% en nivel 3, sensor 2, eje Z

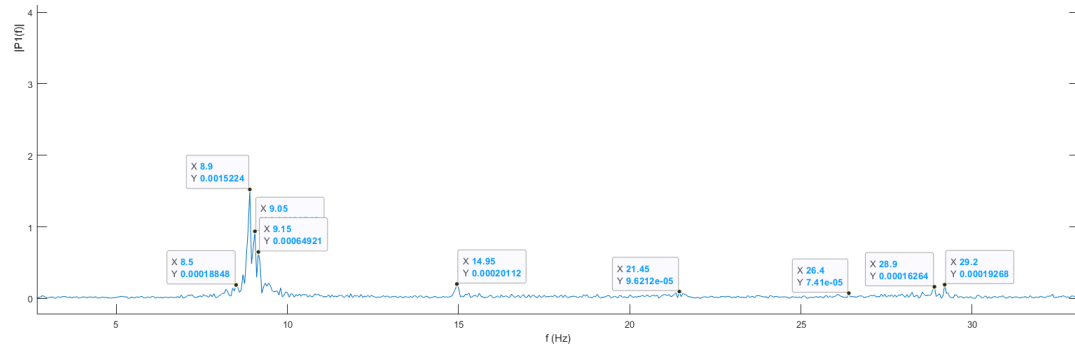


Figura 7.11 Envolvente de la transformada de Fourier, daño de 75% en nivel 3, sensor 3, eje Z

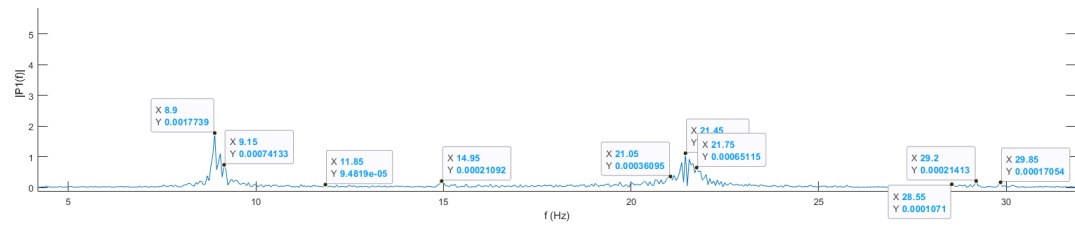


Figura 7.12 Envolvente de la transformada de Fourier, daño de 75% en nivel 3, sensor 4, eje Z

7.2. Exponentes de Lyapunov

Sin daño en los niveles

Tabla 7-1 Exponentes de Lyapunov en estado sano

Sensor en nivel 1			Sensor en nivel 2			Sensor en nivel 3			Sensor en nivel 4		
x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
818	515	832	937	564	805	779	567	849	1132	631	841
847	452	806	1000	525	863	797	440	824	1157	672	905
799	537	813	891	503	882	770	439	825	1174	571	892
818	484	847	889	463	797	765	435	842	1186	540	896
821	547	887	966	535	822	854	421	787	1221	593	890
824	449	849	866	491	781	794	480	765	1120	586	808
788	449	744	911	509	816	823	444	797	1216	646	928
809	474	782	926	528	803	788	460	800	1179	602	774
810	536	736	884	488	789	754	434	693	1146	623	839
844	424	786	953	544	787	832	430	754	1205	588	821
833	468	806	961	442	844	757	472	815	1086	620	795
853	435	781	900	476	841	809	465	694	1176	542	788
829	537	765	923	461	830	849	512	814	1240	604	847
793	500	842	919	505	854	778	455	764	1196	523	828
847	457	790	947	509	858	811	518	743	1203	549	849
816	522	844	927	560	845	808	467	738	1165	512	886
763	382	803	908	534	784	781	508	799	1142	545	877
836	504	794	918	478	784	776	460	740	1191	697	788
785	486	751	881	523	806	772	466	731	1156	539	815
846	472	927	925	534	893	735	519	822	1195	575	854
822	448	754	954	538	878	776	431	773	1160	575	897
870	472	741	943	514	809	772	558	808	1203	616	828
836	464	768	964	618	886	807	428	729	1184	570	932
853	472	719	912	494	781	751	439	763	1062	581	810
818	367	878	918	480	826	766	494	837	1089	656	893

Daño en nivel 1

Tabla 7-2 Exponentes de Lyapunov, daño en el nivel 1

Sensor en nivel 1			Sensor en nivel 2			Sensor en nivel 3			Sensor en nivel 4		
x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
1634	650	816	918	511	747	774	427	692	878	594	825
1414	672	748	894	633	743	717	446	701	948	609	811
1411	606	711	904	511	781	706	428	661	878	546	772
1299	558	726	859	527	705	745	420	676	899	587	813
1370	561	643	921	579	712	763	393	624	951	653	815
1142	557	635	883	560	767	765	402	720	938	614	858
1111	591	718	863	559	748	720	410	683	895	526	835
1113	542	701	861	514	772	783	426	680	912	526	781
1074	596	761	894	538	764	691	426	679	882	549	801
994	588	732	916	537	769	779	476	728	961	561	828
1048	585	644	857	548	732	798	478	673	966	511	792
940	523	697	846	550	790	768	443	682	928	528	838
936	568	679	838	471	765	665	474	659	886	509	823
973	602	708	881	548	719	766	404	654	935	528	798
952	649	768	913	565	807	743	396	725	944	556	840
970	530	706	798	531	758	726	374	675	940	601	798
969	582	715	884	516	763	740	376	698	995	650	830
952	601	731	922	473	739	756	444	651	941	566	851
931	536	714	853	449	800	724	492	661	963	560	831
958	571	766	866	552	778	748	397	684	947	581	888
866	538	819	860	564	757	742	387	635	956	576	763
973	548	745	885	502	740	758	419	683	919	576	850
937	592	744	934	527	750	689	394	691	956	545	830
962	619	731	887	497	723	767	433	688	1000	606	805
992	568	780	875	518	819	741	401	720	999	534	952

Daño en nivel 2

Tabla 7-3 Exponentes de Lyapunov, daño en el nivel 2

Sensor en nivel 1			Sensor en nivel 2			Sensor en nivel 3			Sensor en nivel 4		
x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
1629	677	648	814	479	712	679	417	655	840	653	746
1445	654	724	865	566	788	624	401	751	863	626	816
1307	630	624	811	538	751	654	544	795	868	662	774
1158	519	616	833	590	780	672	348	697	841	599	708
922	530	695	818	609	824	654	374	700	961	728	831
901	527	623	769	538	767	675	439	761	984	647	846
1041	557	722	803	587	724	660	446	767	987	634	776
835	523	598	764	639	752	672	481	617	947	631	689
843	583	693	788	458	666	652	442	729	941	639	779
808	559	622	712	572	718	696	516	666	929	671	739
804	546	666	778	485	722	622	408	694	973	628	743
796	553	703	759	541	723	660	455	737	931	683	730
794	582	650	776	566	723	642	467	729	944	627	764
922	412	656	812	674	712	656	425	708	943	646	764
921	482	707	805	492	747	680	451	718	975	633	760
821	454	638	774	491	731	668	382	663	930	632	705
924	511	670	802	525	791	652	435	752	976	576	862
865	489	734	770	580	779	665	389	738	939	632	850
874	510	681	747	465	788	670	397	753	956	682	810
896	544	629	777	490	695	635	461	724	911	647	874
887	547	729	795	526	725	648	371	680	882	663	721
891	519	721	819	485	772	667	451	665	931	648	783
861	452	722	794	534	731	635	407	714	924	631	801
892	472	710	794	577	738	666	416	775	981	653	779
831	493	678	794	502	754	643	431	693	907	667	782

Daño en nivel 3

Tabla 7-4 Exponentes de Lyapunov, daño en el nivel 3

Sensor en nivel 1			Sensor en nivel 2			Sensor en nivel 3			Sensor en nivel 4		
x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
1400	807	761	821	549	718	714	446	752	1070	523	834
1552	783	723	754	496	748	728	383	756	1052	527	766
1310	816	696	757	496	808	682	427	788	1076	617	770
1147	914	702	780	575	772	726	373	771	1061	562	851
1273	763	641	809	504	764	722	480	699	1102	556	834
1189	798	743	807	555	788	726	482	814	1059	523	877
1070	812	700	745	463	742	719	423	721	1036	586	803
939	741	765	790	474	776	653	427	761	1052	540	788
945	759	739	784	506	786	712	425	730	1043	573	753
1024	732	668	804	505	773	691	426	683	1058	545	744
968	677	712	790	464	731	667	407	774	1063	536	780
939	734	680	810	428	885	722	541	767	1094	530	886
886	723	744	818	547	760	703	436	810	1120	562	810
940	765	705	826	455	724	713	449	656	1075	468	776
965	739	699	769	386	707	721	471	731	1084	508	774
913	701	731	796	464	846	690	425	811	1110	589	848
927	734	676	775	435	741	717	455	819	1096	529	820
889	762	754	799	484	712	726	425	788	1145	498	805
931	730	723	720	522	772	709	329	744	1088	547	864
888	723	659	729	479	751	689	405	725	1093	516	812
914	796	715	703	545	733	704	476	796	1083	609	823
848	745	683	734	535	745	702	449	691	1068	544	843
848	805	751	785	505	798	662	543	787	1121	558	776
938	831	771	836	461	840	689	474	785	1154	579	846
878	835	756	804	495	778	666	344	722	1100	550	865

Daño en nivel 4

Tabla 7-5 Exponentes de Lyapunov, daño en el nivel 4

Nivel 1			Nivel 2			Nivel 3			Nivel 4		
x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
894	519	694	678	510	683	620	436	770	730	625	759
916	578	673	691	488	729	614	474	709	686	623	686
875	587	661	706	489	719	640	406	752	738	537	853
834	541	690	693	513	712	644	438	658	711	665	786
863	585	701	764	552	742	686	412	730	720	645	732
934	516	735	708	480	748	640	430	676	757	500	748
932	531	669	697	520	728	670	454	664	770	606	741
936	563	685	733	486	702	630	455	672	763	501	778
875	563	658	778	455	772	608	388	715	771	634	731
960	522	699	683	457	725	631	381	746	753	556	776
901	503	632	695	439	709	644	441	746	730	528	787
924	553	653	668	471	686	595	417	737	734	555	695
972	525	745	749	463	726	611	457	719	704	621	844
965	544	730	716	478	709	599	531	764	766	622	982
952	508	749	711	552	801	661	466	722	783	542	840
951	579	711	704	500	746	635	488	661	737	620	899
913	532	634	694	402	777	615	393	714	739	588	799
902	548	742	812	552	759	614	376	716	806	571	781
934	585	687	726	476	742	655	378	773	785	610	798
897	508	681	692	578	708	553	440	705	760	656	785
904	589	636	724	371	718	625	403	779	779	551	852
929	524	767	699	423	721	649	366	773	734	633	829
975	591	704	754	529	726	654	385	767	728	613	815
1004	591	704	757	501	714	614	400	662	780	491	776
1004	591	704	757	501	714	614	400	662	780	491	776

8. Bibliografía

- Abdeljaber, O., Avci, O., Kiranyaz, M. S., Boashash, B., Sodano, H., & Inman, D. J. (2017). 1-D CNNs for structural damage detection: Verification on a structural health monitoring benchmark data. *Neurocomputing*, 275, 1308–1317. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2017.09.069>
- Amézquita Sánchez, J. P. (2012). *Monitoreo de vibraciones en tiempo real para detectar daños en estructuras* [Doctorate Degree]. Universidad Autónoma de Querétaro.
- Amezquita-Sanchez, J. P., & Adeli, H. (2016). Signal Processing Techniques for Vibration-Based Health Monitoring of Smart Structures. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 23(1), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s11831-014-9135-7>
- An, Y., & Ou, J. (2012). Experimental and numerical studies on damage localization of simply supported beams based on curvature difference probability method of waveform fractal dimension. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 23(4), 415–426. <https://doi.org/10.1177/1045389X11434172>
- Arceo Mariñelarena, D. (2012). *Diseño de Algoritmos Genéticos (AG) para la detección de daños en estructuras* (Vol. 1) [Master Degree]. Universidad Autónoma de Querétaro.
- Atemático, M. (2006). *Una aproximación operativa a la IA*. 1(5001), 21–31.
- Avci, O., Abdeljaber, O., Kiranyaz, S., Boashash, B., Serkan Kiranyaz, M., Sodano, H., & Inman, D. J. (2018). *Efficiency Validation of One Dimensional Convolutional Neural Networks for Structural Damage Detection Using a SHM Benchmark*. <https://www.researchgate.net/publication/327833905>
- Avci, O., Abdeljaber, O., Kiranyaz, S., Hussein, M., Gabbouj, M., & Inman, D. J. (2021). A review of vibration-based damage detection in civil structures: From traditional methods to Machine Learning and Deep Learning applications. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 147, 107077. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107077>
- Bai, R., Cao, M., Su, Z., Ostachowicz, W., & Xu, H. (2012). Fractal dimension analysis of higher-order mode shapes for damage identification of beam structures. *Mathematical Problems in Engineering*, 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/454568>
- Bao, M. (2005). Mechanics of Beam and Diaphragm Structures BT - Analysis and Design Principles of MEMS Devices. *Analysis and Design Principles of MEMS Devices*, 33–114. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780444516169500035%0Apapers3://publication/doi/10.1016/B978-044451616-9/50003-5>
- Bathe, K. J. (2014). Finite Element Procedures. In *Englewood Cliffs New Jersey*. <https://www.amazon.com/Finite-Element-Procedures-Part-1-2/dp/0133014584>

- Borondo Rodríguez, F., Ruiz Ramos, M. A., Marco Cuellar, R., & Vázquez Hernández, F. J. (2005). *LAS TEORÍAS DEL CAOS Y LOS SISTEMAS COMPLEJOS: Proyecciones físicas, biológicas, sociales y económicas*.
- Bulleit, W. M. (2008). Uncertainty in Structural Engineering. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 13(1), 24–30.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)1084-0680\(2008\)13:1\(24\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1084-0680(2008)13:1(24))
- Chen, B., & Zang, C. (2011). A hybrid immune model for unsupervised structural damage pattern recognition. *Expert Systems with Applications*, 38(3), 1650–1658. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.07.087>
- Chopra, A. K. (2014). *Dinámica de estructuras* (Cuarta).
- Das, S., & Saha, P. (2020). Performance of hybrid decomposition algorithm under heavy noise condition for health monitoring of structure. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 10(4), 679–692. <https://doi.org/10.1007/s13349-020-00412-5>
- de Lautour, O. R., & Omenzetter, P. (2010). Damage classification and estimation in experimental structures using time series analysis and pattern recognition. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 24(5), 1556–1569.
<https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2009.12.008>
- Entezami, A., & Shariatmadar, H. (2019). Structural health monitoring by a new hybrid feature extraction and dynamic time warping methods under ambient vibration and non-stationary signals. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 134, 548–568.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.10.095>
- Eshragh, F., Pooyandeh, M., & Marceau, D. J. (2015). Automated negotiation in environmental resource management: Review and assessment. *Journal of Environmental Management*, 162, 148–157.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.07.051>
- Fernández Sanjúan, M. Á. (2016). Dinámica No Lineal, Teoría del Caos y Sistemas Complejos: una perspectiva histórica. *Cienc.Exact.Fís.Nat. (Esp)*, 109(2), 107–126.
- Ferrari Rojí, S. (2007). *Metodología Métrica Compleja Aplicada a Series Bursátiles Cortas Y Ruidosas*. 940–951.
- Frangopol, D. M., & Liu, M. (2007). Maintenance and management of civil infrastructure based on condition, safety, optimization, and life-cycle cost. *Structure and Infrastructure Engineering*, 3(1), 29–41.
<https://doi.org/10.1080/15732470500253164>
- Gallardo Amaya, A. A. (2012). *Estudio experimental para detectar fallas en estructuras del tipo Truss por medio del análisis vibracional*.
- García Meza, C. J. (1993). *La teoría de caos: algunas implicaciones en el área de la metodología de la ciencia*. [Estudios de Posgrado]. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Giurgiutiu, V. (2020). Structural health monitoring (SHM) of aerospace composites. In *Polymer Composites in the Aerospace Industry*. Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102679-3.00017-4>

- Hasni, H., Jiao, P., Alavi, A. H., Lajnef, N., & Masri, S. F. (2018). Structural health monitoring of steel frames using a network of self-powered strain and acceleration sensors: A numerical study. *Automation in Construction*, 85(October 2017), 344–357. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.10.022>
- Hou, R., & Xia, Y. (2021). Review on the new development of vibration-based damage identification for civil engineering structures: 2010–2019. *Journal of Sound and Vibration*, 491, 115741. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2020.115741>
- Huang, Y., Beck, J. L., & Li, H. (2016). Hierarchical sparse Bayesian learning for structural damage detection: Theory, computation and application. *Structural Safety*, 64, 37–53. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2016.09.001>
- Hughes, A. J., Barthorpe, R. J., Dervilis, N., Farrar, C. R., & Worden, K. (2021). A probabilistic risk-based decision framework for structural health monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 150, 107339. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2020.107339>
- Jalili, S., & Daneshmehr, A. R. (2018). Application of chaotic attractor analysis in crack assessment of plates. *Results in Physics*, 8, 836–847. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2017.12.049>
- Jiang, X., Mahadevan, S., & Yuan, Y. (2017). Fuzzy stochastic neural network model for structural system identification. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 82, 394–411. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2016.05.030>
- Jiang, Y., Sun, G., He, Y., Beer, M., & Zhang, J. (2015). A nonlinear model of failure function for reliability analysis of RC frame columns with tension failure. *Engineering Structures*, 98, 74–80. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.04.030>
- Josa, I., & Aguado, A. (2019). Infrastructures and society: from a literature review to a conceptual framework. *Journal of Cleaner Production*, 238, 117741. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117741>
- Kang, J. (2018). Calculation of Lyapunov exponents in impacted beam on distributed contact. *Journal of Sound and Vibration*, 431, 295–303. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.06.023>
- Kim, J. T., & Stubbs, N. (2002). Improved damage identification method based on modal information. *Journal of Sound and Vibration*, 252(2), 223–238. <https://doi.org/10.1006/jsvi.2001.3749>
- Layek, G. C. (2015). An introduction to dynamical systems and chaos. In *An Introduction to Dynamical Systems and Chaos*. Springer India. <https://doi.org/10.1007/978-81-322-2556-0>
- Lee, E. T., & Eun, H. C. (2015). Damage Detection of Steel Beam Using Frequency Response Function Measurement Data and Fractal Dimension. *Journal of Vibration and Acoustics, Transactions of the ASME*, 137(3), 1–5. <https://doi.org/10.1115/1.4029687>
- Li, B. (2016). *Uncertainty Quantification in Vibration-based Structural Health Monitoring using Bayesian Statistics* (Vol. 1) [Doctorate Degree, University of California, Berkeley]. <http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/monografias/GEBIS - RJ/RBG/RBG>

1995

v57_n1.pdf%0Ahttps://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/234295

- Li, D., Cao, M., Manoach, E., Jia, H., Ragulskis, M., Shen, L., & Sha, G. (2021). A multiscale reconstructed attractors-based method for identification of structural damage under impact excitations. *Journal of Sound and Vibration*, 495. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2020.115925>
- Li, H., Huang, Y., Ou, J., & Bao, Y. (2011). Fractal dimension-based damage detection method for beams with a uniform cross-section. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 26(3), 190–206. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2010.00686.x>
- Li, H., Tao, D., Huang, Y., & Bao, Y. (2013). A data-driven approach for seismic damage detection of building structures using fractal dimension of time-frequency features. *Structural Control and Health Monitoring*, 20, 1191–1210. <https://doi.org/10.1002/stc>
- Li, Q., He, Y., Zhou, K., Han, X., He, Y., & Shu, Z. (2018). Structural health monitoring for a 600 m high skyscraper. *Structural Design of Tall and Special Buildings*, 27(12). <https://doi.org/10.1002/tal.1490>
- Li, Z., Park, H. S., & Adeli, H. (2016). New method for modal identification of super high-rise building structures using discretized synchrosqueezed wavelet and Hilbert transforms. *Structural Design of Tall and Special Buildings*, 26(3). <https://doi.org/10.1002/tal.1312>
- Machorro-Lopez, J. M., Amezquita-Sanchez, J. P., Valtierra-Rodriguez, M., Carrion-Viramontes, F. J., Quintana-Rodriguez, J. A., & Valenzuela-Delgado, J. I. (2021). Wavelet energy accumulation method applied on the Rio Papaloapan bridge for damage identification. *Mathematics*, 9(4), 1–31. <https://doi.org/10.3390/math9040422>
- Martinez de Jesús, S. (2018). *Metodología para la estimación de parámetros dinámicos de una estructura de acero escalada de 4 niveles empleando la transformada MUSIC-EWT* [Master Degree]. Universidad Autónoma de Querétaro.
- Meneghetti, G., Guzzella, C., & Atzori, B. (2014). The peak stress method combined with 3D finite element models for fatigue assessment of toe and root cracking in steel welded joints subjected to axial or bending loading. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 37(7), 722–739. <https://doi.org/10.1111/ffe.12171>
- Mishra, M. (2021). Machine learning techniques for structural health monitoring of heritage buildings: A state-of-the-art review and case studies. *Journal of Cultural Heritage*, 47(1), 227–245. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2020.09.005>
- Moreno Gómez, A. (2019). *Detección, localización y cuantificación de danos en estructuras civiles metálicas midiendo vibraciones* (Vol. 1) [Doctorate Degree]. Universidad Autónoma de Querétaro.
- Moreno-Gomez, A., Amezquita-Sanchez, J. P., Valtierra-Rodriguez, M., Perez-Ramirez, C. A., Dominguez-Gonzalez, A., & Chavez-Alegria, O. (2018). EMD-Shannon Entropy-Based methodology to detect incipient damages in a truss

- structure. *Applied Sciences (Switzerland)*, 8(11).
<https://doi.org/10.3390/app8112068>
- Pachecho Ortega, D. O. (2018). *Metodología basada en dimensión fractal para detectar y localizar grietas y aflojamiento de uniones en una estructura escalada de cuatro pisos* [Master Degree]. Universidad Autónoma de Querétaro.
- Pan, B., Yu, L., Wu, D., & Tang, L. (2013). Systematic errors in two-dimensional digital image correlation due to lens distortion. *Optics and Lasers in Engineering*, 51(2), 140–147. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2012.08.012>
- Pascacio Abarca, R. A. (2019). *Metodología basada en fractales y entropías para monitoreo estructural en armaduras* [Master Degree]. Universidad Autónoma de Querétaro.
- Pérez Macías, F. (2018). *Metodología para la detección de daños en estructuras tipo truss empleando la teoría del caos* [Master Degree]. Universidad Autónoma de Querétaro.
- Pérez Ramírez, C. A. (2014). *Instrumentación y monitoreo de estructuras civiles para la obtención de parámetros modales basado en excitaciones ambientales* [Master Degree]. Universidad Autónoma de Querétaro.
- Perez-Macias, F. J., Perez-Ramirez, C. A., Valtierra-Rodriguez, M., Dominguez-Gonzalez, A., & Amezcua-Sanchez, J. P. (2017). Wavelet transform-fractal dimension-based methodology for damage assessment in truss type structures. *Proceedings IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2017-Janua*, 3251–3256.
<https://doi.org/10.1109/IECON.2017.8216549>
- Perez-Ramirez, C. A., Amezcua-Sanchez, J. P., Adeli, H., Valtierra-Rodriguez, M., Camarena-Martinez, D., & Romero-Troncoso, R. J. (2016). New methodology for modal parameters identification of smart civil structures using ambient vibrations and synchrosqueezed wavelet transform. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 48, 1–12.
<https://doi.org/10.1016/j.engappai.2015.10.005>
- Perez-Ramirez, C. A., Machorro-Lopez, J. M., Valtierra-Rodriguez, M., Amezcua-Sanchez, J. P., Garcia-Perez, A., Camarena-Martinez, D., & de J. Romero-Troncoso, R. (2020). Location of multiple damage types in a truss-type structure using multiple signal classification method and vibration signals. *Mathematics*, 8(6), 1–16. <https://doi.org/10.3390/math8060932>
- Qiao, P., & Cao, M. (2008). Waveform fractal dimension for mode shape-based damage identification of beam-type structures. *International Journal of Solids and Structures*, 45(22–23), 5946–5961.
<https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2008.07.006>
- Rafiei, M. H., & Adeli, H. (2017). A novel machine learning-based algorithm to detect damage in high-rise building structures. *Structural Design of Tall and Special Buildings*, 26(18), 1–11. <https://doi.org/10.1002/tal.1400>
- Reynolds, P., & Pavic, A. (2000). Impulse hammer versus shaker excitation for the modal testing of building floors. *Experimental Techniques*, 24(3), 39–44.

- Romanelli, L. (2006). Teoría del caos en sistemas biológicos. *Revista Argentina de Cardiología*, 74(6), 478–482.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=305326824012>
- Saisi, A., Gentile, C., & Ruccolo, A. (2017). Continuous monitoring of a challenging heritage tower in Monza, Italy. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 8(1), 77–90. <https://doi.org/10.1007/s13349-017-0260-5>
- Su, Y., Zhang, Q., Fang, Z., Wang, Y., Liu, Y., & Wu, S. (2019). Elimination of systematic error in digital image correlation caused by intensity interpolation by introducing position randomness to subset points. *Optics and Lasers in Engineering*, 114(September 2018), 60–75.
<https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2018.10.012>
- Suratkar, A., Sajjadi, A. Y., & Mitra, K. (2013). Non-destructive evaluation (NDE) of composites for marine structures: Detecting flaws using infrared thermography (IRT). *Non-Destructive Evaluation (NDE) of Polymer Matrix Composites: Techniques and Applications*, 649–667.
<https://doi.org/10.1533/9780857093554.4.649>
- Toh, G., & Park, J. (2020). Review of vibration-based structural health monitoring using deep learning. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 10, Issue 5). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/app10051680>
- Tran-Ngoc, H., Khatir, S., de Roeck, G., Bui-Tien, T., & Abdel Wahab, M. (2019). An efficient artificial neural network for damage detection in bridges and beam-like structures by improving training parameters using cuckoo search algorithm. *Engineering Structures*, 199(August), 109637.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109637>
- Vázquez Sánchez, G. (2004). *Análisis por onduletas de daño en estructuras* [Master Degree]. Universidad Autónoma de Querétaro.
- Walczak, S., & Cerpa, N. (2003). Artificial Neural Networks. *Artificial Neural Networks*, 6, 1–17. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53632-7.01101-1>
- Wallemacq, P., House, R., McClean, D., Below, R., & SPRL, M. (2018). *Pérdidas económicas, pobreza y DESASTRES*.
- Wang, M., Shi, Y., Wang, Y., & Yang, W. (2015). Influencing factors analysis of degradation and damage and the effect on steel frame. *International Journal of Steel Structures*, 15(1), 17–30. <https://doi.org/10.1007/s13296-015-3002-8>
- Xu, N., & Liu, Y. (2021). Fractal-based Manifold Learning for Structure Health Monitoring. *American Institute of Aeronautics and Astronautics*.
<https://doi.org/10.2514/6.2021-1167>
- Yang, J. N., Xia, Y., & Loh, C.-H. (2014). Damage Identification of Bolt Connections in a Steel Frame. *Journal of Structural Engineering*, 140(3), 04013064. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0000831](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0000831)
- Yang, W. (2014). Introduction to the Wave Theory. *Reflection Seismology*, 1–18.
<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409538-0.00001-4>
- Ye, X. W., Dong, C. Z., & Liu, T. (2016). A Review of Machine Vision-Based Structural Health Monitoring: Methodologies and Applications. *Journal of Sensors*, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/7103039>

- Zamen, S., & Dehghan-Niri, E. (2020). Fractal analysis of nonlinear ultrasonic waves in phase-space domain as a quantitative method for damage assessment of concrete structures. *NDT and E International*, 111(January), 102235. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2020.102235>
- Zhang, W., Hao, H., Wu, J., Li, J., Ma, H., & Li, C. (2018). Detection of minor damage in structures with guided wave signals and nonlinear oscillator. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 122, 532–544. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.06.033>
- Zhang, Y., Quan, S., & Liu, G. (2021). Fatigue damage evaluation of metallic components based on the maximum Lyapunov exponent of modified Duffing system. *Results in Physics*, 25(418), 104252. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2021.104252>
- Zhou, J., Chen, Y., & Yin, L. (2010). Lyapunov exponent analysis on real-time monitoring information of extractive structure health based on chaos time sequence. *Intelligent Automation and Soft Computing*, 16(5), 737–745. <https://doi.org/10.1080/10798587.2010.10643116>
- Zhou, L., Yan, G., Wang, L., & Ou, J. (2013). Review of benchmark studies and guidelines for structural health monitoring. *Advances in Structural Engineering*, 16(7), 1187–1206. <https://doi.org/10.1260/1369-4332.16.7.1187>