

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Construcciones

Departamento de Ingeniería Civil



TRABAJO DE DIPLOMA

Métodos para la detección y localización de daños en vigas de puentes basados en la Transformada Continua Wavelet a partir de parámetros modales.

Autor: Madiel Castellanos Trocones.

Tutor: Ing. Dairo R. Ballate Reina.

Consultante: Prof. Titular Dr. Ing. Ernesto L. Chagoyén Méndez.

Santa Clara

2017

"Año 59 de la Revolución"

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Construcciones

Departamento de Ingeniería Civil



TRABAJO DE DIPLOMA

**Métodos para la detección y localización de daños en
vigas de puentes basados en la Transformada Continua
Wavelet a partir de parámetros modales.**

Autor: Madiel Castellanos Trocones.

Tutor: Ing. Dairo R. Ballate Reina.

Consultante: Prof. Titular Dr. Ing. Ernesto L. Chagoyén Méndez.

Santa Clara

2017

" Año 59 de la Revolución "



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Automática, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Tutor

Firma del Jefe de Departamento
donde se defiende el trabajo

Firma del Responsable de
Información Científico-Técnica

PENSAMIENTO

“Debemos ir en la dirección de nuestro máximo temor, porque allí yace nuestra única esperanza”.

Gandalf.

DEDICATORIA

Todos los logros alcanzados en mi vida: los obtenidos con la realización de este trabajo de diploma y aquellos que de una u otra forma han contribuido a la formación de mi persona, van dedicado a la persona más especial en mi vida, la que vive para mí en todo momento y nunca se detiene en su lucha de exigencia hacia mi superación: MI MAMÁ.

AGRADECIMIENTOS

Después de cinco años de sacrificio, al fin comienzan a verse los primeros logros de mi vida; por ellos se me hace necesario el tener que agradecer a aquellas personas que nunca han desconfiado de mí y me han apoyado hasta para levitarme el aliento que en ocasiones estaba perdido:

Los primeros agradecimientos y los más importantes, no solo por este trabajo si no por la ardua tarea de formarme, comienzan en el hogar, para mí eso significa: Ana Ivis, Guillermo, Rafael, Francisca, quienes me han apoyado por más de dos décadas. Sin ellos, estaría todavía buscando que hacer en mi vida antes de escoger una excelente profesión.

Los otros agradecimientos y no menos importantes van para unas personas que me han acogido como su hijo y han confiado en mí tanto para vencer mis estudios, como para formar una familia junto a su preciosa hija, la cual se ha convertido en el amor de mi vida y ha dedicado tiempo a consolarme y aconsejarme cuando en ocasiones estaba demasiado estresado.

No puedo dejar de reconocer a aquellas personas, son muchas, que de una u otra forma han contribuido a la realización de este trabajo de diploma; dentro de ellos se resalta la presencia del siempre risueño y jaranero tutor Dairo, al cual no le han faltado palabras de aliento para mi motivación en la realización de este trabajo y para cumplir con el cronograma establecido.

Finalmente, quiero expresar mi gratitud a todos los integrantes del grupo, por ser partícipes de mi formación y dedicarme tiempo a explicaciones y relajar tensiones, generalmente en los momentos de pruebas; gracias por su apoyo y por el haberme enseñado a tomar decisiones en grupo.

La palabra gracias queda pequeña como muestra de agradecimiento a todas estas personas que han aportado en mi un granito de arena para mi formación como futuro profesional, por eso, los llevaré en mi corazón para seguir venciendo barreras a lo largo de mi recorrido por la vida.

RESUMEN

La determinación del estado técnico de los sistemas estructurales representa un factor importante para el correcto funcionamiento de los mismos. Existen diversos métodos, la mayoría de inspección visual, pero requieren el acceso directo a localidades del sistema y pueden ser poco prácticos cuando los elementos que conforman la estructura abarcan grandes dimensiones.

En las últimas décadas han emergido métodos basados en los parámetros dinámicos de las estructuras, para la detección y localización de daños, dentro de los cuales existe un grupo que aprovecha las potencialidades de la transformada wavelet.

En este trabajo se propone una metodología de detección de daño estructural, basada en el análisis mediante la transformada wavelet de la respuesta dinámica (formas modales y frecuencia de los modos) de elementos tipo viga. Para comprobar la eficiencia de dicha técnica se implementan dos casos generales de vigas; donde, el primer caso consiste en modelos analíticos de datos para comprobar el funcionamiento del algoritmo; la segunda es un caso real ensayado a nivel de laboratorio.

Se obtienen resultados positivos para el análisis en los modelos por elementos finitos, donde se detecta y localiza el daño, pero con sus limitaciones en cuanto a la cantidad de puntos medidos, de daños inducidos y magnitud de los mismos. Para la parte experimental donde se analiza un daño tipo grieta producido por cargas estáticas sostenidas, los algoritmos no son capaces de detectar ninguna singularidad en la señal.

ABSTRACT

The assessment of the technical state of the structural systems is an important factor for the correct functioning of the same. There are several methods for that purpose, most of them visual inspection, but they require direct access to localities of the system and may be impractical when the elements that make up the structure cover large dimensions.

In the last decades, methods based on the dynamic parameters of the structures, for detection and location of damages have emerged, within which there is a group that exploits the potentialities of the wavelet transform.

A methodology of detection of structural damage, based on the analysis of the wavelet transform of the dynamic response (mode shapes and frequency of the modes) of beam type elements is proposed. To verify the effectiveness of this technique, two general cases of beams are implemented; Where, the first case consists of analytical models of data to verify the operation of the algorithm; The second is a real case tested at the laboratory level.

Positive results are obtained for finite element models, where the damage is detected and localized, but with limitations on the number of measured points, induced damages and magnitude of the damage. For the experimental part where a crack-type damage produced by sustained static charges is analyzed, the algorithms are not able to detect any singularity in the signal.

TABLA DE CONTENIDOS

PENSAMIENTO	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
TAREA TÉCNICA	¡Error! Marcador no definido.
RESUMEN.....	iv
ABSTRACT.....	i
INTRODUCCIÓN	1
Problema científico de la investigación	2
Objeto de estudio	3
Campo de Acción.....	3
Objetivo general.....	3
Objetivos Específicos.....	3
Interrogantes científicas:	4
Justificación de la investigación	4
Hipótesis de la investigación.....	4
Novedad científica	4
Valor metodológico.....	4
Valor práctico.....	4
Relevancia Social.....	5
CAPÍTULO 1. ESTADO DEL CONOCIMIENTO ACERCA DE LOS MÉTODOS DE DETECCIÓN DE DAÑO BASADOS EN VIBRACIONES.	6
1.1 Generalidades	6

1.2	Tipos de daño estructural	7
1.3	Diseño de red de sensores	7
1.4	Procesamiento de datos	9
1.5	Monitorización de la integridad estructural (SHM)	10
1.6	Análisis Modal	12
1.6.1	Modos de vibración.....	13
1.6.2	Frecuencias naturales y formas modales.....	14
1.6.1	Análisis Modal Operacional (OMA)	15
1.6.2	Análisis Modal Experimental (EMA)	16
1.7	Métodos de detección de daños.....	18
1.7.1	Métodos clásicos de evaluación no destructiva	19
1.7.1	Métodos de detección de daños basados en vibraciones	19
1.7.1.1	Métodos de detección de daños tradicionales.....	20
1.7.1.2	Métodos de detección de daños modernos	25
1.8	Uso de la Transformada Wavelet	29
1.9	Estado de la técnica de los métodos de identificación de daños basados en Wavelet	
	30	
1.9.1	Estado de la técnica de los métodos de identificación de daños basados en Wavelet en el dominio del tiempo	30
1.9.2	Estado de la técnica de los métodos de identificación de daños basados en Wavelet en el dominio espacial	31
1.10	Conclusiones parciales.....	34
CAPÍTULO 2: ANÁLISIS WAVELET Y MÉTODOS DE IDENTIFICACIÓN DE DAÑOS.		
	36
2.1	Generalidades	36

2.2	Características y propiedades de las Wavelets	37
2.3	Análisis Wavelet	38
2.3.1	El escalamiento	41
2.3.2	El desplazamiento	41
2.4	Métodos de identificación de daños basados en la Transformada Wavelet	42
2.4.1	Método basado en la Transformada Continua Wavelet (CWT - Continuous Wavelet Transform).	42
2.4.2	Método de Análisis Discreto de Wavelets (DWA - Discrete Wavelet Analysis).	44
2.4.3	Método basado en Paquetes de Wavelets (WPS - Wavelet Packet Signature). 45	
2.5	Algoritmos usados para la detección de daños aplicando la Transformada Continua Wavelet.....	47
2.5.1	Primer algoritmo basado en la Transformada Continua Wavelet	47
2.5.2	Segundo algoritmo basado en la Transformada Continua Wavelet	49
2.6	Efectos de borde en la detección de daños	51
2.6.1	Problema de efectos de borde en la detección de daños por la CWT espacial 51	
2.6.2	Análisis del método de extensión	53
2.7	Conclusiones parciales	58
CAPÍTULO 3 APLICACIÓN DE LOS ALGORITMOS DE IDENTIFICACIÓN DE DAÑOS A UN CASO DE ESTUDIO.		60
3.1	Procedimientos para la detección y localización de daños usando los algoritmos programados.....	60
3.1.1	Procedimiento usado para el primer algoritmo.	60
3.1.2	Procedimiento usado para el segundo algoritmo	61

3.2	Análisis analítico de los algoritmos de detección y localización de daños	61
3.2.1	Análisis del tipo de daño a detectar y localizar en las vigas	62
3.2.2	Análisis del número de puntos a medir	62
3.2.3	Análisis de la magnitud del daño	63
3.2.4	Análisis respecto a la detección y localización del daño	63
3.2.5	Análisis del número de daños combinado con la magnitud de estos	67
3.3	Comparación de los resultados con los de otros métodos	67
3.3.1	Viga de 4.8 metros con una reducción de la inercia hasta el 35% en el tramo 3 67	
3.3.2	Viga de 4.8 metros con una reducción de la inercia hasta el 35% en el tramo 3 y con una reducción de la inercia hasta el 10% en el tramo 10	69
3.4	Análisis de los resultados obtenidos a partir de una mayor cantidad de puntos en el elemento	71
3.4.1	Viga de 4.8 metros con una reducción de la inercia hasta el 35% en los tramos 9,10,11,12 y con 49 puntos	71
3.4.2	Viga de 4.8 metros con una reducción de la inercia hasta el 35% en los tramos 9,10,11,12 y con una reducción de la inercia hasta un 10% en los tramos 37,38,39,40 y con 49 puntos	72
3.4.3	Viga de 4.8 metros con una reducción de la inercia hasta el 35% en los tramos 9,10,11,12 y con 97 puntos	73
3.4.3	Viga de 4.8 metros con una reducción de la inercia hasta el 35% en los tramos 9,10,11,12 y con una reducción de la inercia hasta un 10% en los tramos 37,38,39,40 y con 97 puntos	74
3.5	Aplicación experimental de los algoritmos de detección de daños al caso en estudio	74
3.6	Análisis de los resultados	76
3.7	Conclusiones	77

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	78
Conclusiones	78
Recomendaciones.....	79
Bibliografía	81
ANEXOS	90
Anexo I. Características y propiedades de las wavelets más comunes	90
Anexo II. Wavelets más comunes.....	90
Anexo III. Algoritmo básico para producir la Transformada Continua Wavelet	91
Anexo IV. Programación de los algoritmos realizada en MATLAB para detectar y localizar el daño	93
Anexo IV.1. Función que obtiene las formas modales y las frecuencias naturales del modelo por elementos finitos	94
Anexo IV.2. Primer algoritmo de detección de daño.....	96
Anexo IV.3. Segundo algoritmo de detección de daño	97
Anexo IV.4. Programación en MATLAB del método que trata el efecto de borde	98
Anexo V. Forma de inducción del daño para el análisis experimental.....	101
Anexo VI. Factores de los que depende una adecuada detección de daños utilizando los métodos basados en vibraciones.	101
Anexo VII. Metodología de aplicación de los métodos de detección de daño basados en vibraciones	102

INTRODUCCIÓN

Las estructuras, tal y como se diseñan y construyen actualmente, son ideadas para que presten un adecuado servicio durante un tiempo de vida especificado, sin incluir en dicha estimación el aumento de la vida útil gracias al mantenimiento que se le aplique a las mismas. A medida que el tiempo transcurre, estas dejarán de servir de la misma manera que cuando fueron construidas; es decir, sus propiedades tanto mecánicas como geométricas e incluso estéticas se degradarán paulatinamente. Diferente es el caso cuando una estructura que se encuentra en plena capacidad de servicio es afectada por eventos extremos, tales como sismos, huracanes, tornados, inundaciones, explosiones, actos terroristas o medio ambientes agresivos, pues entonces se provoca una degradación mecánica acelerada, que puede verse reflejada de diversas formas en el comportamiento estructural de la misma. Todas las situaciones expuestas anteriormente, son causantes de daño. (Ancona Lazcano et al., 2011).

La mayoría de las estructuras que hoy ofrecen servicio en nuestro país, en especial los puentes, han tenido una prolongada vida de prestación (más de 60 años) enfrentándose a la agresión del medio, éstos sin lugar a dudas no conservan las propiedades físicas y mecánicas con las que fueron construidos, en muchos no se sabe el nivel de daños que puedan tener ni por cuánto tiempo podrán continuar en explotación, además que el régimen de carga al que se someten ha cambiado, son vehículos más pesados y veloces. Debido a estos factores y el desconocimiento del estado de la estructura para enfrentarlos, existe el riesgo de que ocurran colapsos que podrían atentar contra la integridad física de los seres humanos o daños directos a la propiedad.

La necesidad de darle respuesta a los problemas causados en las estructuras por los fenómenos ambientales y los impropios a éstos, ha abierto un nuevo dominio de investigación en la ingeniería civil, originando en los científicos la idea de desarrollar métodos de

evaluación que permitan conocer el estado general de la estructura basándose en los parámetros dinámicos.

El diagnóstico de estructuras se puede realizar mediante métodos destructivos y no destructivos. Los métodos destructivos además de ser el resultado de un daño que se le infringe a la estructura, por lo general son locales, parten de conocer el lugar dañado de la estructura o la vecindad del mismo, características estas que hacen que la aplicación sea limitada y/o complementaria a otros. La necesidad de evaluar una estructura integralmente, sin causarle daño alguno, es pragmática.

El desarrollo de pruebas de carácter no destructivo tiene un auge en las últimas décadas, los científicos han orientado su trabajo en métodos y técnicas de emisión acústica, procedimientos basados en análisis termal, y los métodos de análisis modal.

De los métodos no destructivos el que más ha resaltado es el fundamentado en el cambio en las propiedades dinámicas de la estructura (frecuencias naturales, modos de vibración y amortiguamiento) por la presencia de un defecto. Estos métodos modales son muy eficientes, además el costo de operación es bajo. Se conoce que las propiedades dinámicas de una estructura están en función de los parámetros estructurales del sistema (masa, rigidez, amortiguamiento, propiedades de los materiales, etc.). Un cambio en estas propiedades, ya sea debido a pérdida del material, corrosión, degradación o fatiga del material, erosión o grietas, van a tener una influencia directa en el comportamiento dinámico de la estructura. Para determinar estos cambios en las propiedades dinámicas se han usado modelos analíticos y experimentales o una combinación de ambos y se han propuesto numerosos indicadores. (Torres, et al., s.f.)

Las primeras pruebas dinámicas se formalizaron durante y después de la Segunda Guerra Mundial en la construcción de aeronaves. La realización de pruebas dinámicas en puentes es más reciente. Diversas razones justifican la realización de pruebas dinámicas en puentes: para enriquecer el conocimiento del comportamiento dinámico de las estructuras, para verificar la elección de modelos, para evaluar la integridad estructural. La mejora de las capacidades de cómputo ha permitido el desarrollo de algoritmos que permiten conocer el estado general de una estructura.

Problema científico de la investigación

La degradación de las propiedades mecánicas, geométricas y estéticas de las estructuras a través del tiempo se hace crítica, tal es el caso que en nuestro país la mayoría de las estructuras se encuentran en un estado de daño desconocido, esto trae consigo la necesidad de buscar vías alternativas para la inspección y diagnóstico de las mismas, principalmente los puentes que son de gran importancia y presentan los mayores índices de daño.

Una solución a este problema se puede encontrar en los métodos de detección de daños basados en vibraciones (VBDD por sus siglas en inglés).

Objeto de estudio

Métodos para la detección y localización de daños en vigas de puentes a partir de vibraciones.

Campo de Acción

Experimentación, Monitoreo, Modelación y Análisis estructural de puentes aplicado a vigas.

Objetivo general

Aplicar a distintos casos de estudio métodos basados en la transformada wavelet continua para la detección y localización de daños en estructuras de puentes a partir de ensayos dinámicos, mediante la elaboración de herramientas en forma de hojas de cálculo en Matlab.

Objetivos Específicos

1. Establecer el estado actual del conocimiento sobre métodos existentes basados en la transformada wavelet para la detección y localización de daños en estructuras de puentes.
2. Identificar los aspectos fundamentales de estos métodos que permitan hacer una comparación entre los mismos, estableciendo su campo de aplicación en cada caso.
3. Elaborar una herramienta computacional, programada en Matlab, que permita la aplicación de los diferentes métodos en distintos casos de estudio y arribar a conclusiones acerca de la aplicación de dichos métodos.
4. Comparar los nuevos métodos programados para la detección y localización de daños con los métodos precedentes para llegar a conclusiones que demuestren el comportamiento de estos.

Interrogantes científicas:

¿Qué se conoce actualmente de la aplicación de la Transformada de Wavelet en el monitoreo de estructuras?

¿Cuál es la disponibilidad de documentación que ofrezca información para programar las metodologías en Matlab?

¿Cuál es el desempeño de los métodos basados en la Transformada Continua de Wavelet aplicado a casos de estudio tanto con datos simulados como con datos reales obtenidos en laboratorio?

Justificación de la investigación

La investigación se justifica sobre la base del proyecto internacional VIBRAS, que nace a partir de la necesidad de implementar técnicas de monitoreo y diagnóstico de estructuras basados en ensayos dinámicos como una vía de solución al conocimiento del estado real de las estructuras de puentes en nuestro país.

Hipótesis de la investigación

La aplicación de los métodos de detección y localización de daños basados en la Transformada Continua de Wavelet, implementados en el presente trabajo, arrojan buenos resultados tanto para casos de estudio con datos modelados como para casos con datos reales obtenidos en laboratorio.

Novedad científica

La aplicación de la Transformada Continua de Wavelet es una herramienta poderosa para procesamiento de señales, sus aplicaciones abarcan diferentes campos de la ingeniería, uno de los campos es la Ingeniería Civil. No habiendo precedentes en nuestro país para esta aplicación podemos decir que la esencia de este trabajo en sí es una novedad en la actualidad.

Valor metodológico

Siendo esta una de las variables menos fuerte del trabajo, se puede considerar de valor metodológico, los algoritmos realizados en el Matlab para implementar los métodos de detección de daño.

Valor práctico

El desarrollo de esta investigación brinda una contribución al conocimiento de estos métodos para su aplicación por parte de los interesados. La localización de los daños en puentes permite la búsqueda de soluciones ante problemas que se puedan presentar cotidianamente y contribuye a la preservación de la vida humana y la conservación de los puentes que son de gran utilidad.

Relevancia Social

Los puentes son elementos esenciales de las vías de comunicación, de ahí la importancia social que representa la aplicación de estos métodos para detectar y localizar los daños que puedan atentar contra esta condición.

En general, el trabajo queda conformado según la siguiente **estructura**:

- **Resumen (Summary)**

- **Índice**

- **Introducción**

- **Desarrollo**

Capítulo I: “ESTADO DEL CONOCIMIENTO ACERCA DE LOS MÉTODOS DE DETECCIÓN DE DAÑO BASADOS EN VIBRACIONES.”

Capítulo II: “ANÁLISIS WAVELET Y MÉTODOS DE IDENTIFICACIÓN DE DAÑOS.”

Capítulo III: “APLICACIÓN DE LOS ALGORITMOS DE IDENTIFICACIÓN DE DAÑOS A UN CASO DE ESTUDIO.”

- **Conclusiones**

- **Recomendaciones**

- **Referencias bibliográficas.**

CAPÍTULO 1. ESTADO DEL CONOCIMIENTO ACERCA DE LOS MÉTODOS DE DETECCIÓN DE DAÑO BASADOS EN VIBRACIONES.

En este capítulo se realiza una revisión bibliográfica y un análisis del estado del conocimiento sobre los métodos de detección de daño. En este apartado se explican temáticas basadas en los tipos de daño estructural, diseño de red de sensores, procesamiento de datos, monitorización de la integridad estructural, análisis modal, métodos de detección de daños en estructuras, haciendo énfasis en las técnicas basadas en vibraciones; de la misma manera se expone una breve reseña de los principales métodos, así como sus posibles aplicaciones y se explica brevemente el uso en la actualidad de la Transformada Wavelet.

1.1 Generalidades

En la actualidad, la seguridad de la vida que pueden brindar las estructuras civiles toma un carácter primordial, lo que hace trabajar en el perfeccionamiento de técnicas para garantizar esta condición, los sistemas confiables de monitoreo y evaluación de daños en las estructuras son altamente solicitados.

Hoy en día varias estructuras de ingeniería se acercan o exceden su vida de diseño inicial. Sin embargo, por cuestiones económicas, todavía están en uso a pesar de su envejecimiento y la acumulación de daños asociados. Para tales estructuras, la evaluación de su estado es fundamental. Además, los sistemas de supervisión de la salud estructural (SHM) son de primera necesidad cuando se producen eventos extraordinarios fuertes (terremotos, explosiones, huracanes, etc.) para evaluar, por ejemplo, si un edificio es seguro para la reocupación (Montanari, 2014).

La estructura y la red de sensores deben ser tratadas como un sistema único en la fase de diseño. De hecho, no solo la estructura debe ser monitoreada, sino también los fallos de los

sensores deben ser tenidos en cuenta de tal manera que los sensores de estructura del sistema entero funcionen correctamente y con seguridad (Montanari, 2014).

El sistema de monitoreo tiene el objetivo de detectar el daño que, si no es detectado, conducirá a un fallo. Debe almacenar la información necesaria para tomar medidas correctivas para restaurar el sistema a una operación de alta calidad o al menos para garantizar la seguridad (Montanari, 2014).

1.2 Tipos de daño estructural

En primer lugar, vamos a definir tres tipologías principales de daño estructural: defecto, daño y falla. Debido a la variabilidad de la composición y el proceso de fabricación, todos los materiales tienen microestructuras estadísticamente diferentes y números o formas variables de inclusiones, vacíos y otros defectos. Estos defectos son inherentes al material y por lo tanto no se consideran como daños: la estructura funciona en su condición de diseño. Para las cargas operacionales y ambientales en servicio (fatiga, fluencia, corrosión, variaciones de temperatura, eventos extraordinarios, etc.), los defectos de la microestructura crecen y se unen evolucionando en daño. Cuando el daño se convierte en un sistema su comportamiento se modifica adversamente. Obsérvese que el daño se define de este modo en base a la comparación entre dos estados diferentes del sistema, donde el inicial es a menudo el estado no dañado. En sistemas estructurales, el daño está asociado a cambios en el material (grieta, plasticidad local, delaminación o separación en materiales compuestos, etc.) y/o propiedades geométricas (por ejemplo, cambios en las condiciones de contorno). La estructura ya no funciona de manera óptima, pero puede funcionar satisfactoriamente de manera sub-óptima. A medida que el daño continúa creciendo, el sistema alcanza un estado límite cuando ya no es aceptable para el usuario. En este estado el daño se llama falla (Montanari, 2014).

1.3 Diseño de red de sensores

La decisión del sistema de sensores apropiado para la estructura es una de las cuestiones más críticas en las especificaciones de un sistema de monitoreo. De hecho, no puede haber monitoreo sin el sistema de sensores apropiado. La elección del tipo óptimo y la ubicación de los sensores es una materia primaria. El conocimiento de los tipos de daños esperados y la estructura de los "puntos calientes" puede conducir esta elección. Además, la decisión entre

el monitoreo local y global debe ser tomada en esta etapa. Dado el denominado enfoque holístico para el monitoreo de la salud estructural, incluso la red de sensores se considera monitoreada. De hecho, un fallo en la red de sensores tendrá consecuencias indeseables: un fallo del sensor que provoque una alarma innecesaria puede incitar que el sistema se desvíe innecesariamente del servicio; un fallo del sensor que causa un daño estructural que pasa desapercibido puede tener graves costos o implicaciones de seguridad.

Existen esencialmente dos enfoques en la supervisión de los sensores. El primer enfoque consiste en sensores individuales que pueden ser autocontrolados. Este tipo de sensores es capaz de autodiagnóstico y también devuelve la incertidumbre en línea de las mediciones. El enfoque alternativo es permitir que los sensores se monitoreen entre sí como lo demuestra (Kramers, 1991) y (Kramers, 1992). Este enfoque es adecuado para sensores que no pueden acomodar elementos electrónicos sustanciales (por ejemplo, acelerómetros). Dado que las salidas del sensor están correlacionadas, existe una redundancia en la red de sensores, de modo que se permite no sólo la identificación de sensores defectuosos, sino también valores aproximados de lo que los sensores defectuosos deben leer. Tenga en cuenta que la función de redundancia para un sistema de monitoreo inteligente es crucial. Si un sensor es diagnosticado como defectuoso, la información que habría sido suministrada por el sensor debería estar disponible en otro lugar. Durante la fase de diseño, el tema de la optimización del sensor debe ser tratado. El enfoque más sencillo consiste en colocar los sensores en puntos críticos, pero para mantener sólo uno activo en un momento dado: los sensores redundantes se conectan cuando se produce un daño a un sensor activo (Montanari, 2014).

Otro enfoque consiste en diseñar en exceso la red de sensores de tal manera que el daño a un solo sensor deja una red que se optimiza para monitorizar de la manera deseada (el enfoque de optimización del sensor a prueba de fallos se discute en (Staszewski, et al., 2000)).

La nueva tecnología de sensores piezoeléctricos, como los sensores piezocerámicos o piezopolímeros, dada su capacidad de actuar tanto como sensores como actuadores, permite la posibilidad de validación activa para el monitoreo. A su vez, cada sensor puede actuar como un generador de señales y la respuesta de los otros sensores puede compararse con una plantilla para verificar su exactitud en la salud (Montanari, 2014).

Una vez que se ha cumplido la etapa de evaluación operacional y se ha diseñado la red de sensores, se pueden entregar los datos de respuesta del sistema. La elección e implementación de algoritmos para procesar los datos y llevar a cabo la identificación es un ingrediente crucial de una estrategia inteligente de identificación de daños. Todas las acciones, entre la adquisición de datos por sensores y la decisión final sobre la salud del sistema, se recogen en el proceso Data to Decision (D2D) (Lowe, 2000), que se basa en la idea de fusión de datos. El concepto de fusión de datos es integrar múltiples datos y conocimientos que representan el mismo objeto en una representación coherente, precisa y útil. Como ejemplo, la fusión de sensores, también conocida como fusión de datos de múltiples sensores, es un subconjunto de fusión de información en la que toda la información relevante generada por la red de sensores con diferentes tipos de sensores se fusiona entre sí. En general, la información se puede combinar en cualquier etapa del proceso. El objetivo es básicamente llegar a la decisión final con mayor confianza que la que se podría alcanzar utilizando cualquiera de las fuentes de información (Montanari, 2014).

1.4 Procesamiento de datos

El pretratamiento de datos tiene el propósito de elaborar los datos brutos adquiridos por los sensores y prepararlos para la extracción de características. La etapa de pre-procesamiento abarca tres tareas: normalización de datos, limpieza de datos y reducción de datos. La normalización de datos ayuda a generalizar los niveles de amplitud para diferentes tipos de datos. A menudo identifica las relaciones entre mediciones y características. Como se aplica a SHM, el proceso de normalización de datos ayuda a separar los cambios en la lectura de sensores causados por daños producidos por las condiciones operativas y ambientales variables (Sohn, 2007). Si se dispone de entradas medidas, el procedimiento más común es normalizar las respuestas medidas con respecto a ellas. Por otra parte, cuando la variabilidad ambiental u operacional es un problema, es oportuno normalizar los datos de manera temporal para facilitar la comparación de datos medidos en momentos similares de un ciclo ambiental u operacional (Montanari, 2014).

La limpieza de datos es el proceso de elegir selectivamente datos para pasar o rechazar para el proceso de extracción de características. Ejemplos de procesos de limpieza son: eliminación de ruido y picos, reducción de valores atípicos y tratamiento de valores de datos

faltantes. El ajuste de datos es un proceso de suavizado adicional que identifica relaciones no deseadas y temporales en los datos. “Outliers”, por el contrario, son señales que están estadísticamente lejos de la selección normal de las señales observadas. Pueden eliminarse utilizando un análisis estadístico estándar basado en la densidad de probabilidad o en la estimación de la distribución (Montanari, 2014).

Otro posible proceso de pre-procesamiento es la reducción de las dimensiones de los vectores de datos con eliminación de señal. El objetivo sería reducir la dimensión del conjunto de datos de posiblemente muchos miles a quizás un centenar. Por ejemplo, dada una serie temporal aleatoria con muchos puntos, a menudo es útil representar los datos en el dominio de la frecuencia por transformada de Fourier. Si la señal está dividida en bloques contiguos antes de la transformación y los espectros resultantes son promediados, el número de puntos en el espectro puede ser mucho menor que en la historia original del tiempo y el ruido es promediado. Tratando la señal de tiempo de esta manera, otra ventaja es que el vector de datos obtenido debe ser independiente del tiempo, y si, la serie de tiempo original es aleatoria, tiene poco sentido comparar mediciones en diferentes tiempos de inicio.

La etapa de pre-procesamiento de datos es una tarea muy delicada y dependiente del caso y debe llevarse a cabo sobre la base del juicio y la experiencia de la ingeniería. Finalmente, el proceso de pre-procesamiento no debe ser estático: a partir de la selección de funciones y del proceso de reconocimiento de patrones puede surgir una visión para mejorar el proceso (Montanari, 2014).

1.5 Monitorización de la integridad estructural (SHM)

Actualmente y desde hace unos años se está estudiando la manera de controlar en tiempo real el estado de la estructura (conocida como monitorización de salud estructural o SHM por sus siglas en inglés) y así poder actuar de la forma más rápida posible en el momento en el que se detecte que se está empezando a producir un daño en la estructura o un cambio en sus propiedades que pueda derivar en un fallo en un futuro. La monitorización de salud estructural es un proceso en el que se usan técnicas de ensayos no destructivos que permiten la monitorización continua, como pueden ser los ya conocidos métodos basados en ultrasonidos, líquidos penetrantes o vibraciones en estructuras (Fernández, 2014).

CAPÍTULO 1. ESTADO DEL CONOCIMIENTO ACERCA DE LOS MÉTODOS DE 11 DETECCIÓN DE DAÑO BASADOS EN VIBRACIONES

Para una correcta monitorización e identificación de daños existen muchos aspectos críticos a tener en cuenta. Entre los aspectos más importantes se encuentran las condiciones de excitación y medición, incluyendo la selección del tipo de sensores y su localización, así como el tipo y localización del excitador. Otro punto fundamental es el procesado de la señal, que encuadra métodos como análisis de Fourier, análisis tiempo frecuencia o análisis wavelet (Córdoba, 2011).

La monitorización de daño estructural (Structural Health Monitoring, SHM, por sus siglas en inglés) es un proceso que busca analizar los datos recibidos de la estructura a partir de unos sensores colocados en la misma. Estos sensores son indicadores que permiten detectar cualquier tipo de anomalía para identificar daños, movimientos o degradación en la estructura que está siendo analizada. Este sistema es conocido como red sensorial no destructiva (Fernández, 2014).

Los datos obtenidos pueden ser llevados a cabo de forma periódica o en tiempo real y estar asociados a cambios de tipo corrosivo, deterioro, fatiga, reacciones químicas, humedad, ambientales, etc. y también a cambios físicos como cargas, esfuerzos, desplazamientos, deformaciones, agrietamientos, aceleraciones, vibraciones, dislocaciones o cualquier propiedad que se pueda analizar para evaluar correctamente el estado de la estructura (Fernández, 2014).

Estos datos obtenidos tienen que ser contrastados y comparados con los datos saludables que debe tener la estructura en perfecto estado para comparar las diferencias y ver si los datos recogidos indican peligrosidad para la integridad de la estructura (Fernández, 2014).

El SHM se aplica en varios campos de la ingeniería como la civil, aeronáutica, mecánica, electrónica o eléctrica. En la ingeniería civil es usado en puentes, edificios altos, estadios, túneles o cualquier estructura de alta responsabilidad. También podemos destacar que se está aplicando a edificios antiguos para controlar y arreglar los daños producidos por el paso del tiempo (Fernández, 2014).

Según (Rytter, 1993); (Worden & Duijck-Barton, 2004); los datos de la monitorización estructural se pueden utilizar para alcanzar diferentes niveles de evaluación de daños, dependiendo de las necesidades y los recursos de la infraestructura:

1. Detección: verificar la presencia de daños en la estructura;
2. Localización: identificar la posición del daño;
3. Clasificación: caracterizar el tipo de daño;
4. Evaluación: cuantificar la gravedad del daño;
5. Predicción: Predicción de la vida útil restante de sus componentes estructurales.

El campo de la monitorización de estructuras centra su atención en los niveles 1, 2, 3 y 4 ya que frecuentemente están relacionados directamente con las pruebas dinámicas de estructuras y afectan al modelado de esta. El nivel 5 está generalmente emplazado en el campo de la mecánica de la fractura, análisis de la resistencia a fatiga o evaluación del diseño estructural y, como tal, no está incluido en la literatura sobre análisis modal o vibración de la estructura. Al estudio y aplicaciones de los niveles de monitorización 1, 2, 3 y 4 se le conoce como SHM (Structural Health Monitoring) (Córdoba, 2011).

La identificación de daños presenta una estructura piramidal compuesta de diferentes niveles, de manera que cada nivel requiere la información relacionada con los inferiores. Existen básicamente dos enfoques complementarios para la identificación de daños estructurales:

- ✓ La identificación de daños se trata como un problema inverso;
- ✓ La identificación de daños se trata como un problema de reconocimiento de patrones.

El primer enfoque usualmente adopta un modelo de la estructura y trata de relacionar los cambios en los datos medidos de la estructura con los cambios en el modelo (Friswell, 2007). Para simplificar el análisis, a veces se utilizan modelos linealizados localmente. La correlación entre el comportamiento de la estructura real y el modelo correspondiente se calcula a través de algoritmos basados en el álgebra lineal o en la teoría de la optimización. El segundo enfoque se basa en la idea de Reconocimiento de Patrones (PR) (Montanari, 2014).

1.6 Análisis Modal

Durante los últimos años el análisis modal se ha estado convirtiendo en una tecnología de gran importancia en la investigación para la determinación, mejora y optimización de las características dinámicas en el ámbito de la ingeniería estructural. Al diseño de las actuales estructuras civiles se les requiere que sean más ligeras, más flexibles e igual de fuertes. Por todo ello, el modelado computacional no puede, por sí solo, determinar completamente el comportamiento dinámico de las estructuras porque ciertas propiedades estructurales como el amortiguamiento y el carácter no lineal no se ajustan con los tratamientos de modelación tradicionales. Las técnicas experimentales se nutren de la teoría del análisis modal y, a su vez proporcionan un nuevo impulso a la misma. (Fernández, 2014)

El análisis modal se basa en el hecho de que la respuesta de vibración de un sistema dinámico lineal invariante en el tiempo se puede expresar como la combinación lineal de un conjunto de movimientos armónicos simples llamados modos naturales de vibración. Este concepto está relacionado con el uso de la combinación de Fourier de ondas senoidales y cosenoidales para representar una onda compleja. Los modos naturales de vibración son inherentes al sistema dinámico y son determinados completamente como propiedades físicas como la masa, la rigidez y el amortiguamiento. (Fernández, 2014)

La base teórica de la aplicación del análisis modal para la detección de daños yace en el hecho de que la respuesta dinámica de una estructura varíe debido a su inherente daño dinámico. Esto da lugar a la posibilidad de identificar daño de la variación de respuestas de la estructura antes y después de que ocurra el daño. (Fernández, 2014)

La práctica más común es tener como base los parámetros de la estructura en condiciones perfectas de salud y una vez cambien los valores de estos parámetros será posible estudiar e investigar el daño de la estructura y por qué motivo son producidos. (Fernández, 2014)

El análisis modal se ha usado como un efectivo método no destructivo para localizar la presencia de daños críticos. Esto puede ser de vital importancia debido a la información que aporta para llevar a cabo la decisión de mantenimiento de la construcción (Fernández, 2014).

1.6.1 Modos de vibración

Los modos de vibración son propiedades inherentes de las estructuras. Estos se determinan por las propiedades del material (masa, rigidez y amortiguamiento, la geometría y por las

condiciones de frontera de la estructura). Cada modo se define por una frecuencia natural, un amortiguamiento modal y una forma modal. Cuando el sistema vibra con la frecuencia natural de un modo o cerca de ella, la forma modal general tiende a ser dominada por la forma modal de la resonancia (Schwarz & Richardson, 1999).

1.6.2 Frecuencias naturales y formas modales

Si un sistema se deja vibrar libremente después de recibir una perturbación inicial, la frecuencia a la cual oscila sin fuerzas externas es conocida como su frecuencia natural. Un sistema vibratorio de n grados de libertad tiene, por lo general, n frecuencias naturales de vibración distintas. (Rao, 2010)

Desde el punto de vista físico, un modo de vibración de una estructura es caracterizado por una frecuencia natural en la cual el movimiento predominante de la estructura es una forma de onda bien definida denominada forma modal (ver figura 1.1). El movimiento general de una estructura, cuando es excitada, puede ser representado como una combinación lineal de los movimientos de cada uno de sus modos. (Richardson & Formenti, 1985)

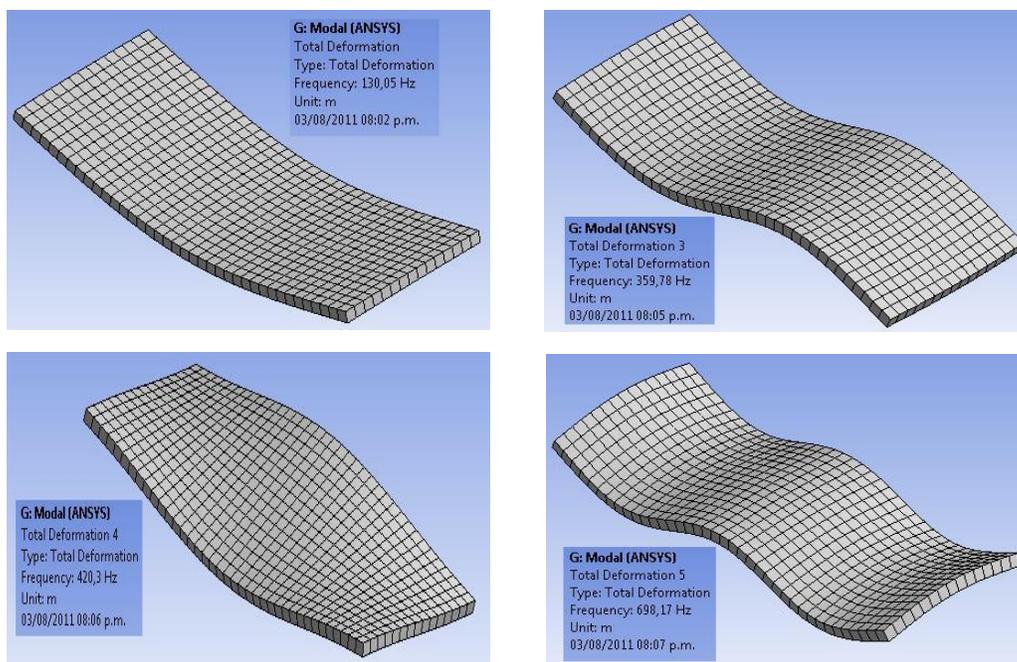


Figura 1.1. Primeros modos de vibración de una estructura. Tomado de (Anaya Saltarín & Barajas Ríos, 2011)

1.6.1 Análisis Modal Operacional (OMA)

El Análisis Modal Operacional se basa en la medida de la respuesta de la estructura usando sólo el ambiente y las fuerzas de servicio que actúan sobre la misma. Es muy usado para obtener una descripción modal de la estructura bajo sus condiciones de operación. Para caracterizar la estructura se emplea la función de densidad espectral de las repuestas en los puntos de medida. En esta función los picos ocurren para las frecuencias de resonancia de la estructura y no para las frecuencias naturales, las cuales son necesarias para la determinación de los modos de vibración. Ambas frecuencias están próximas cuando el amortiguamiento modal es pequeño, por lo que la aplicación de esta técnica está limitada a estructuras con pequeño amortiguamiento modal ($\xi < 0.05$) (Córdoba, 2011).

El OMA es usado en estructuras de ingeniería civil que no son fáciles de excitar artificialmente como los puentes o los edificios. Una de las mayores ventajas del OMA es que se realiza bajo las condiciones normales de servicio/operación de la estructura (Duménigo, 2015).

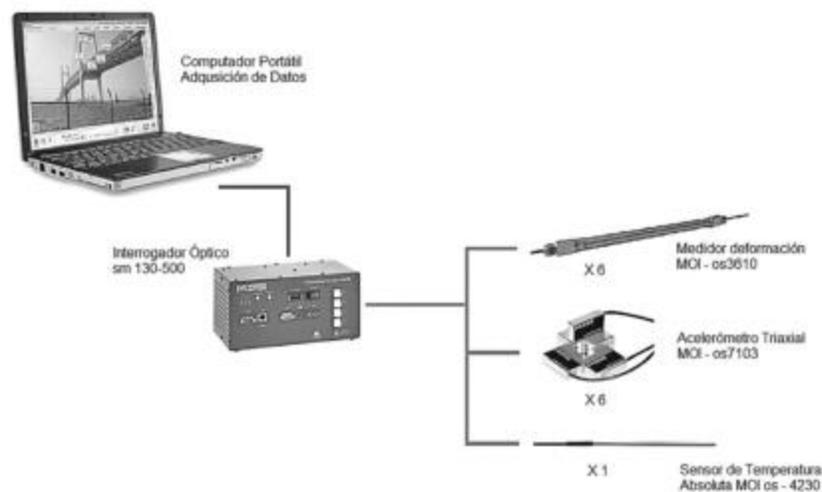


Figura 1.2. Esquema de instrumentación utilizado para el OMA. Tomado de (Navarro Henríquez & Ureña Muñoz, 2014)

1.6.2 Análisis Modal Experimental (EMA)

El análisis modal experimental se puede definir como el proceso de caracterización de las propiedades dinámicas de un sistema estructural en términos de sus modos de vibración y frecuencias naturales medidas en un modelo de laboratorio o en la estructura real en el campo. El análisis modal experimental se puede efectuar de dos maneras: a) excitando la estructura con una carga armónica de frecuencia creciente (o decreciente) hasta encontrar los picos de las Funciones de Respuesta en Frecuencia (FRF); b) aplicando una única excitación transitoria (impulsiva o aleatoria) y empleando la transformada de Fourier y el método de Respuesta en Frecuencia para hallar las FRF. (Torres, et al., s.f.)

El primer método es más robusto que el segundo, o sea menos sensible a ruidos y a otros factores que afectan la calidad de las mediciones. Sin embargo, y a pesar de además ser conceptualmente mucho más simple, es más lento que el segundo porque cada carga debe aplicarse numerosas veces hasta cubrir el rango de frecuencias de interés. Además, la excitación debe aplicarse durante un tiempo (que depende del nivel de amortiguamiento) hasta que la estructura esté vibrando en régimen. El segundo método es más sencillo de aplicar, pero su fundamento teórico es más complicado y es más susceptible a problemas numéricos y a perturbaciones en el proceso de medición. A diferencia del primer método, aquí se trata excitar simultáneamente a la estructura en un ancho de banda de frecuencias lo suficientemente amplio como para suplir energía a todas las frecuencias de interés. Para esto, a diferencia del método de la carga armónica, es necesario instrumentar tanto la estructura como la fuente de excitación. Usualmente la estructura debe ser instrumentada con uno o varios acelerómetros u otro sensor para medir la respuesta del elemento estructural, mientras que la fuerza impulsiva se aplica mediante un martillo modal que tiene un sensor (una celda de carga) para medir la fuerza aplicada. La desventaja de este método es que, como es sensible a errores de medición, debe corregirse las señales registradas para eliminar el ruido y otros fenómenos que aparecen cuando se trabaja con señales digitalizadas. El principal de estos efectos indeseables es el que se conoce como solapamiento (o más conocido por su nombre en inglés: “aliasing”) (Torres, et al., s.f.).

Procedimiento Integral de Análisis Modal Experimental

CAPÍTULO 1. ESTADO DEL CONOCIMIENTO ACERCA DE LOS MÉTODOS DE 17 DETECCIÓN DE DAÑO BASADOS EN VIBRACIONES

Para maximizar la posibilidad de detección de daño empleando métodos basados en vibraciones se recomienda seguir las siguientes recomendaciones durante el procesamiento de la respuesta dinámica (Menache, et al., 2012):

1. Agrupar señales, asignar ventanas y filtrar las señales.
2. Calcular las funciones de transferencia usando FFT (Trasformada Rápida de Fourier)
3. Calcular las funciones ordinarias de coherencia.
4. Calcular la curva n funciones de transferencia para expresar:

Después extraer

- ✓ Residuos
 - ✓ Frecuencias Naturales (amortiguamiento) ω
 - ✓ Factores de amortiguamiento ζ
 - ✓ Formar la matriz modal
5. Calcular
 - ✓ Matriz de masa:
 - ✓ Matriz de rigideces
 - ✓ Matriz de amortiguamiento
 6. Calcular el sistema modal

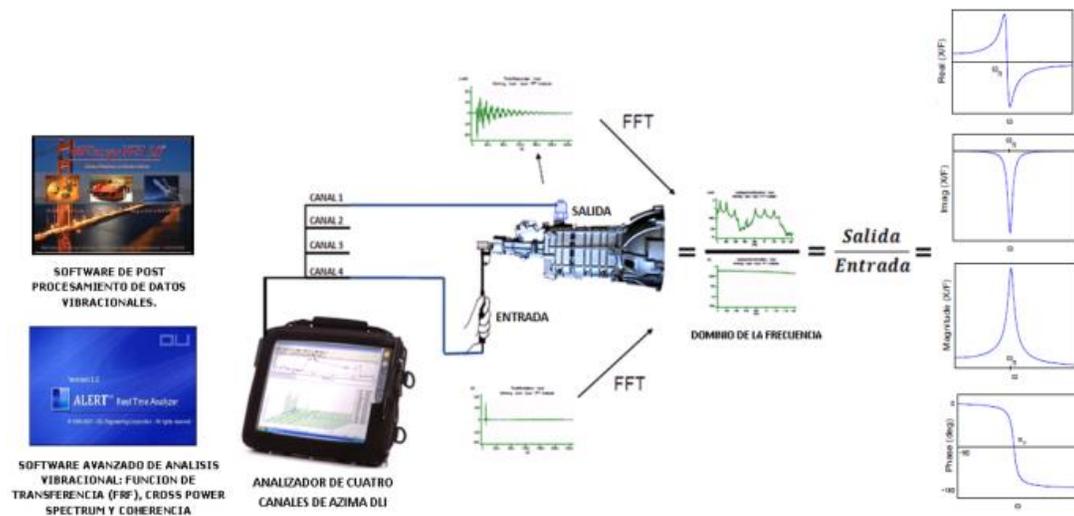


Figura 1.3. Procedimiento para realizar un análisis modal experimental. Tomado de (O'Reilly, 2016).

1.7 Métodos de detección de daños

El estado real de una estructura que se ha sometido determinado tiempo a condiciones de uso es una incógnita que es razón de estudio desde el mismo inicio de la ingeniería civil, con este fin se han desarrollado diferentes métodos de identificación de daños para resaltar, a partir de los datos obtenidos por los sensores, las características de daño (presencia, ubicación, extensión, etc.) en comparación con los de la estructura sana en sus condiciones operativas.

Idealmente, un sistema de identificación de daños debe permitir la detección de la presencia del daño en una etapa muy temprana, localizarlo, proporcionar una estimación de la intensidad del daño y predecir la restante vida útil de la estructura. Llevar a cabo esta tarea fijando un estado inicial de la estructura como referencia resulta una meta menos ambiciosa pero más realizable con la tecnología actual (Córdoba, 2011).

Las técnicas empleadas tienen diferentes clasificaciones en correspondencia con el contenido que las desarrolla. Centrándose en los métodos de identificación de daños no destructivos, la tendencia actual es clasificarlos en métodos clásicos de evaluación no destructiva (métodos locales) y métodos de detección de daños basados en vibraciones (métodos globales).

1.7.1 Métodos clásicos de evaluación no destructiva

Los métodos de evaluación no destructiva (NDE), a veces denominados inspección no destructiva (NDI), ensayos no destructivos (NDT) o no destructivos (NDEx), son los primeros métodos de identificación de daños desarrollados por los investigadores (Montanari, 2014). Las técnicas más utilizadas son:

- Inspección visual;
- Método del líquido penetrante;
- Método de emisión acústica;
- Método ultrasónico;
- Métodos de partículas magnéticas o de campo;
- Métodos de radiografía;
- Métodos electrónicos o de corriente de Foucault;
- Métodos de campo térmico.

Estos métodos de detección de daños no necesitan datos de referencia ni modelos teóricos de la estructura no dañada y evalúan directamente la estructura dañada. Su aplicación requiere conocer a priori la parte dañada de la estructura a inspeccionar y ser fácilmente accesible. El daño se analiza principalmente en o cerca de la superficie de la estructura y, en consecuencia, la investigación de daños es esencialmente local. El diagnóstico de daños resulta muy eficaz para estructuras pequeñas y regulares, como recipientes a presión, o algunos componentes especiales de una estructura, mientras que es difícil de aplicar para estructuras grandes y complejas. La necesidad de investigar el comportamiento global de estas estructuras, tales como edificios de varias plantas, puentes o sistemas aeroespaciales, ha llevado al desarrollo de métodos que examinan cambios en las características de vibración de la estructura (Montanari, 2014).

1.7.1 Métodos de detección de daños basados en vibraciones

El desarrollo revolucionario de estos métodos ha desembocado en el empleo de las características dinámicas como base para la detección de daños.

La idea básica de la detección de daños basada en la vibración es que el daño altera las propiedades físicas del sistema estructural (rigidez, amortiguación y masa) y consecuentemente, su respuesta dinámica y estática medida. A menudo, los métodos de detección de daños investigan el cambio de las propiedades modales del sistema (especialmente frecuencias naturales, relaciones de amortiguación, formas modales). Sin embargo, a pesar de su concepto básico intuitivamente simple, varios aspectos técnicos dificultan la aplicación real de la tecnología de detección de daños basada en vibraciones, que todavía hoy en día es un tema de investigación abierto en muchos campos de la ingeniería. (Montanari, 2014)

Estos métodos de detección de daño basados en vibraciones han ganado popularidad debido a los avances logrados en los métodos de análisis modal y en las tecnologías de monitoreo. (Menache, et al., 2012)

(Yan, et al., 2007) destacan que se ha producido un desarrollo significativo en las técnicas de detección de daños estructurales basadas en vibraciones, de modo que pueden dividirse en métodos de detección de daños de tipo tradicional y métodos de detección de daños de tipo moderno, también denominados diagnóstico inteligente de daños.

1.7.1.1 Métodos de detección de daños tradicionales

Los métodos tradicionales de detección de daños basados en vibraciones se fundamentan principalmente en las características estructurales de las vibraciones naturales, como las frecuencias naturales, las formas modales y el amortiguamiento modal. La localización y severidad del daño se puede determinar encontrando la diferencia de características dinámicas entre las condiciones estructurales intactas y dañadas (Montanari, 2014).

Generalmente, las características dinámicas relacionadas con el estado intacto del sistema se recogen a partir de datos de línea de base o de un modelo analítico / numérico de línea de base: el estado dañado del sistema se encuentra a partir de los datos medidos de las frecuencias naturales o formas de modo. Este tipo de métodos, debido a algunas desventajas, ha perdido interés en la investigación en la última década. Se requieren medidas experimentales de análisis modal o de función de transferencia, que son costosas, requieren mucho tiempo y son muy inadecuadas para la detección en línea de las estructuras debido a

sus instrumentos y operaciones manuales. Además, es difícil modelar con precisión el estado intacto de la estructura y establecer una metodología universal para varias estructuras. Los métodos de tipo tradicional se centran principalmente en la detección de daños lineales. Por último, en general, estos métodos no son sensibles al daño minúsculo inicial (Montanari, 2014).

Métodos basados en la frecuencia natural

La observación de que los cambios en la rigidez estructural y las propiedades de la masa causan cambios en las frecuencias de vibración provocó el uso de métodos modales para la identificación de daños y la vigilancia de la salud. Los métodos de identificación de daños basados en cambios de frecuencia naturales son uno de los primeros métodos basados en modalidad desarrollado, dada la facilidad para medir las frecuencias naturales (sólo se necesita un solo sensor en muchas aplicaciones). Como lo demuestran muchos investigadores, los cambios de frecuencia naturales para la identificación del daño se pueden utilizar con éxito en pequeñas estructuras de laboratorio simples con un solo lugar de daño. A la luz de lo anterior, a pesar de la gran cantidad de trabajos de investigación relacionados con esta clase de métodos de identificación de daños, los algoritmos exitosos se limitan a la identificación de un solo o pocos sitios de daño en pequeñas estructuras de laboratorio simples. Dado que las frecuencias modales son una propiedad global de la estructura, generalmente el desplazamiento de frecuencia sólo puede usarse para detectar la presencia / ausencia de daño, mientras que las limitaciones, por ejemplo, identifican de manera única la posición del daño o distinguen su tipología (Kessler, et al., 2002). Una excepción a estas limitaciones se produce en las frecuencias modales más altas, donde los modos están asociados con las respuestas locales, pero la excitación y la extracción de estos modos locales resultan ser difíciles en la práctica. La sensibilidad relativamente baja de los cambios de frecuencia en el daño requiere mediciones muy precisas o niveles significativos de daño para localizar y cuantificar (Farrar, et al., 1994), (Palacz & Krawczuk, 2002).

Métodos basados en la forma del modo

Muchas técnicas de análisis modal están disponibles para la extracción de formas de modo a partir de los datos medidos en el dominio del tiempo (Heylen, et al., 1997), (Ewins, 2000).

Los métodos de detección de daños se desarrollan para la identificación de daños basados directamente en formas de modo medidas o curvas de forma de modo.

Dos métodos comúnmente utilizados para comparar dos conjuntos de formas de modo son el Criterio de Garantía Modal, MAC, desarrollado por (Allemang & Brown, 1982) y el Criterio de Garantía Modal de Coordenadas, COMAC, desarrollado por (Lieven & Ewins, 1988). El valor MAC puede considerarse como una medida de la similitud de dos formas de modo. Un valor MAC de 1 es una coincidencia perfecta y un valor de 0 significa que son completamente diferentes. Por lo tanto, la reducción de un valor MAC puede ser una indicación de daño. (Salawu & Williams, 1995) ensayaron un puente de hormigón armado antes y después de la reparación y observaron que el método MAC basado en modos de onda es una técnica más fuerte para la detección de daños que los cambios en las frecuencias naturales.

El COMAC es un parámetro que mide puntualmente la diferencia entre dos conjuntos de formas de modo y toma un valor entre 1 y 0. Un valor COMAC bajo indicaría discordancia en un punto y, por lo tanto, puede utilizarse como indicador de localización de daños.

Un inconveniente de muchos métodos basados en formas de modo es la necesidad de tener mediciones de un gran número de ubicaciones. Concluyen que, aunque los métodos basados en la forma de modo son efectivos con datos simulados, existen dificultades significativas en la aplicación a estructuras reales, debido a errores de ruido y medición, a la expansión en forma de modo de mediciones incompletas y al modelado preciso de estructuras de prueba.

Las formas de modos de curvatura se calculan utilizando una aproximación de diferencia central a partir de las formas de desplazamiento simuladas. Además, los autores subrayan que los cambios en las formas del modo de curvatura aumentan con el aumento del tamaño del daño y este aumento, más pronunciado que el relacionado con los cambios en los desplazamientos de las formas de modo, puede utilizarse para calibrar la gravedad del daño.

Los métodos basados en la curvatura modal se aplican también en los datos medidos para identificar el daño.

El número de curvaturas modales utilizables en rutinas de identificación de daños es, naturalmente, limitado al número disponible de formas de modo de desplazamiento. En un esfuerzo por aumentar la cantidad de datos disponibles para la entrada en rutinas de

identificación de daños, (Sampaio, et al., 1999) amplían el enfoque de curvatura a todas las frecuencias en el rango de medición usando datos de FRF. Este método se prueba con datos relacionados con un puente dañado intencionalmente y se encuentra que tiene mayor rendimiento que el método de curvatura.

En conclusión, a pesar de los puntos débiles de las formas del modo de medición la precisión de las mediciones de las formas es más baja que la de las frecuencias naturales, ver (Farrar, et al., 1997) y (Doebbling, et al., 1997), y los modos de vibración medidos son a menudo incompletos de manera que tienen que ser expandidos con un consiguiente aumento de errores de medida ya que contienen más información sobre daños, son más fuertes que los métodos basados en la frecuencia natural para detectar, localizar y calibrar los daños.

Métodos basados en energía de deformación modal

Cuando un modo de vibración dado almacena una gran cantidad de energía de deformación para una trayectoria de carga estructural particular, la frecuencia y la forma de ese modo son altamente sensibles a cambios en la trayectoria de carga. En consecuencia, los cambios en la energía de deformación modal pueden considerarse como indicadores de la localización del daño.

En un esfuerzo por comparar los métodos, (Kim, et al., 2003) aplican tanto un método basado en la frecuencia como un método de energía de deformación modal para identificar un solo lugar y tamaño de daño en una viga simulada usando dos modos. Se encuentra que el método de energía de deformación modal proporciona una predicción más precisa de la localización de daños que el método basado en frecuencia.

Métodos basados en flexibilidad medidos dinámicamente

La matriz de flexibilidad se define como la inversa de la matriz de rigidez y, por tanto, relaciona las fuerzas estáticas aplicadas con los desplazamientos estructurales resultantes. Cada columna de la matriz de flexibilidad representa los desplazamientos asociados con una fuerza unitaria aplicada a un determinado grado de libertad (DOF).

Como se muestra por (Pandey & Biswas, 1994), la matriz de flexibilidad puede estimarse de forma sencilla y precisa a partir de unos pocos modos de vibración de menor frecuencia de la estructura, que son los más fáciles de medir. De hecho, el efecto de los componentes de

alta frecuencia en la matriz de flexibilidad disminuye rápidamente con el aumento de la frecuencia natural.

En conclusión, a la ocurrencia de daño en una estructura, los cambios en la Matriz de rigidez brinda más información que los de la matriz de masa. Sin embargo, si el daño es pequeño, este método no es efectivo.

Métodos basados en la función de respuesta de frecuencia

Algunos autores investigan el uso de las mediciones de la función de respuesta de frecuencia (FRF), como una alternativa a los datos modales extraídos de las mediciones de la FRF. Según (Lee & Shin, 2002) hay dos ventajas principales de usar los datos de la FRF. En primer lugar, los datos modales son datos derivados y, por lo tanto, pueden estar contaminados por errores de extracción. En un segundo lugar, un conjunto completo de datos modales sólo puede medirse en estructuras simples. Además, los datos de la FRF pueden obtener mucha más información sobre el daño en un rango de frecuencias deseado en comparación con los datos modales que se extraen de un rango muy limitado alrededor de las resonancias. El inconveniente de los métodos de FRF es que la precisión de la detección de daños estructurales depende en gran medida de la cantidad y la posición de los puntos de medición.

Modelos basados en métodos de actualización

Muchos métodos de identificación de daños se basan en la actualización de los parámetros físicos (por ejemplo, matrices de masa, amortiguación y rigidez) del modelo numérico de la estructura (generalmente un modelo de elementos finitos) con el fin de reproducir lo más posible los datos de respuesta estática o dinámica medida. Esta técnica es esencialmente un problema de optimización basado normalmente en las ecuaciones estructurales de movimiento, un modelo base de la configuración no dañada de la estructura y los datos medidos (por ejemplo, frecuencias naturales, formas de modo, FRFs). Una vez que el modelo numérico actualizado reproduce los datos medidos con un grado de precisión suficiente, la identificación de la localización y el alcance del daño se logra comparando los parámetros actualizados del modelo con los correspondientes parámetros del modelo de referencia. En primer lugar, estos métodos se basan en las ecuaciones de movimiento y difieren básicamente en la función objetivo a minimizar, en las limitaciones impuestas y en el esquema numérico

utilizado para implementar la optimización. Los principales métodos desarrollados son: los métodos de actualización de la matriz, los métodos óptimos de matriz, los métodos basados en la sensibilidad y los métodos de inteligencia computacional más recientes (Marwala, 2010).

La metodología es costosa desde el punto de vista computacional y, además, es difícil encontrar un mínimo global a través de la técnica de optimización, debido a la presencia de múltiples puntos estacionarios (Janter & Sas, 1990).

Los métodos de matriz óptima utilizan una solución directa de forma cerrada para calcular las matrices del modelo dañado o las matrices de perturbación. El problema se formula generalmente como un multiplicador de LaGrange o una optimización basada en la penalización.

En presencia de ruido, se necesitan modos múltiples para ser considerados para una identificación apropiada.

Otra aproximación al problema óptimo de la matriz implica la minimización del rango de la matriz de perturbación, en lugar de su norma. La idea detrás de este enfoque es que las matrices de perturbación tienden a ser de rango pequeño, ya que el daño se concentra generalmente en algunos miembros estructurales. Los diversos métodos de actualización basados en sensibilidad difieren en el esquema utilizado para estimar la matriz de sensibilidad. Básicamente, las propiedades modales experimentales o analíticas o las funciones de respuesta en frecuencia se utilizan en la diferenciación (Montanari, 2014).

1.7.1.2 Métodos de detección de daños modernos

Los métodos de tipo moderno se refieren a métodos de detección de daños estructurales basados en la señal de respuesta medida en línea de estructuras en servicio. Estos métodos utilizan principalmente técnicas modernas de procesamiento de señal e inteligencia artificial para analizar la respuesta estructural y extraer información característica útil del estado estructural dañado (Montanari, 2014).

Las ventajas de estas técnicas deben ser menos dependientes de los experimentos y de la forma estructural, más económica y factible en línea, y ser capaces de detectar pequeños daños estructurales. Algunos de los problemas abiertos a resolver son los siguientes: las

señales medidas son generalmente contaminadas por el ruido, por lo que la información de pequeños daños en las estructuras puede ser enmascarada; estos métodos tienen que depender de la excitación del entorno a las estructuras (identificación de daños sólo de salida); la selección y construcción del índice de características sensibles del daño estructural son muy flexibles y variables. Métodos representativos entre ellos son las técnicas de tiempo-frecuencia (por ejemplo, análisis de onda, transformación de Hilbert-Huang), algoritmos genéticos y redes neuronales artificiales (Montanari, 2014).

Los métodos de tipo moderno consideran la detección de daños tanto lineal como no lineal.

Métodos de identificación de daños no lineales

Un sistema estructural inicialmente lineal, consecuentemente a la ocurrencia de daños, puede responder a sus cargas operativas y ambientales de una manera no lineal. Ejemplos típicos son las grietas que se abren y cierran bajo carga operativa, produciendo componentes estructurales que, debido a tensiones cíclicas, tienen comportamiento histérico y delaminación en materiales compuestos (introducidos por ejemplo por carga de impacto). En todos estos casos, los métodos de identificación de daños para SHM, basados en la hipótesis del comportamiento lineal del sistema (por ejemplo, los métodos basados en parámetros modales, los métodos basados en la actualización de modelos y los métodos basados en la FRF, son pobres y por lo tanto no es adecuado para la mayoría de las aplicaciones del mundo real (Montanari, 2014). Consecuentemente, se desarrollan métodos de identificación de daños no lineales.

Los análisis numéricos y las investigaciones experimentales sobre las vibraciones forzadas de vigas con una grieta respiratoria muestran la aparición de resonancias sub y superarmónicas y demuestran que sus características de no linealidad de las vibraciones de la viga son mucho más afectadas por la presencia de una grieta que los cambios de Frecuencias naturales y modales. Algunos autores (Tsyfansky & Beresnevich, 2000), (Andreas & Baragatti, 2011), (Andreas & Baragatti, 2012) y (Giannini, et al., 2013) proponen estas características de vibración no lineal como indicadores de la presencia de una grieta en una fase muy temprana de su nucleación y para cuantificar los parámetros de daño (Tipo, tamaño y ubicación). En lo que respecta a las aplicaciones prácticas, (Bovsunovsky &

Surace, 2005) destacan tres obstáculos esenciales a considerar. En primer lugar, las características no lineales antes mencionadas pueden surgir en presencia de cualquier tipo de no linealidad de un sistema vibratorio (por ejemplo, no linealidad material, no linealidad geométrica, contacto no lineal), entonces es difícil asegurar la aplicación de excitaciones armónicas precisas y la manifestación de no lineal, estas características no sólo dependen de los parámetros de la grieta, sino también del nivel de amortiguación en el sistema vibratorio (Montanari, 2014).

El concepto reciente introducido por (Lang & Billings, 1996), (Lang & Billings, 2005), denominado Funciones de Respuesta de Frecuencia de salida no lineal (NOFRFs), que permite analizar los sistemas no lineales de manera similar a los sistemas lineales, parece ser un buen enfoque en el diagnóstico de defectos estructurales. (Peng, et al., 2008) utilizan el concepto NOFRFs para analizar la respuesta no lineal de una viga con una grieta de cierre. Los NOFRFs de alto orden resultan ser extremadamente sensibles a la aparición de una grieta en la viga, y por lo tanto parecen ser útiles como indicador de daño de grieta en términos de existencia y tamaño de la grieta. Más tarde, (Peng, et al., 2011) demuestran mediante prueba experimental en una placa de aluminio dañada el potencial y la eficacia de una nueva técnica de detección de daños basada en el conocido método de modelado NARMAX y los análisis basados en NOFRFs. En primer lugar, se aplica el método de modelado NARMAX para establecer un modelo NARX a partir de datos de entrada y salida de prueba de un sistema estructural inspeccionado. Los NOFRFs y el índice asociado para la estructura inspeccionada se determinan a partir del modelo NARX establecido. Finalmente, la detección de daños estructurales se realiza comparando los valores del índice NOFRFs de la estructura inspeccionada y los valores del índice para una estructura sin daños. (Lang, et al., 2011) introducen el concepto de transmisibilidad relacionado con los NOFRFs y desarrollan una técnica dirigida a detectar y localizar daños tanto lineales como no lineales en sistemas estructurales MDOF. Los resultados de simulación numérica y los estudios experimentales sobre una estructura de edificios de tres pisos verifican la efectividad de la nueva técnica (Montanari, 2014).

Técnicas de tiempo-frecuencia

Las técnicas de tiempo y frecuencia han demostrado ser herramientas de análisis para la identificación de daños debido a su capacidad multitarea en el preprocesado de datos, extracción y selección de características, reconocimiento de patrones y fusión de datos e información. Entre estas técnicas, el análisis wavelet y la Transformada Hilbert-Huang (HHT) son las más potentes en la detección de daños. En comparación con la Transformada de Fourier Rápida (FFT), que analiza globalmente una señal tal como sería estacionaria y descubre sus componentes de frecuencia a partir de una media en toda su longitud, estas técnicas pueden tratar con señales no estacionarias (por ejemplo, respuestas de impulso, vibraciones debidas a terremotos o tormentas de viento, etc.) y descubrir sus contenidos locales (Staszewski & Robertson, 2007), (Nagarajaiah & Basu, 2009). El análisis wavelet (Mallat, 2001), gracias a sus propiedades de resolución múltiple, funciona como un microscopio de señal que identifica los detalles de las señales no estacionarias a la inversa de las herramientas tradicionales de análisis, como la FFT.

Métodos de redes neuronales artificiales

El cerebro es capaz de un alto rendimiento en las tareas de procesamiento de información natural, como la percepción, comprensión del lenguaje, control del motor, etc., dada la idoneidad del sistema neuronal. El algoritmo de las redes neuronales artificiales (ANNs) ha sido inspirado exactamente por la arquitectura neuronal y la operación del cerebro (Anderson & Davis, 1995), (Haykin, 1999). El modelo básico de una neurona individual fue desarrollado en 1943 por Warren McCulloch y Walter Pitts y todavía se considera el corazón de la mayoría de las redes neuronales (McCulloch & Pitts, 1943).

Las ANNs son una técnica de inteligencia artificial moderna y poderosa que funciona como una herramienta de caja negra, libre de modelos y adaptable para capturar y aprender estructuras significativas en los datos. Son adecuados especialmente para problemas demasiado complejos para ser modelados y resueltos por la matemática clásica y procedimientos tradicionales.

Métodos de algoritmos genéticos

Algoritmo genético (GA) es un poderoso método de optimización universal basado en la teoría de Darwin de la evolución y la supervivencia del más apto. Análogamente a los genes

en genética, GA representa los parámetros en un problema dado por la codificación en una cadena. Diferentemente de los métodos de optimización convencionales que encuentran el óptimo desde un solo punto, el GA utiliza un conjunto de puntos, es decir, una población de cadenas codificadas, para buscar la solución óptima (Montanari, 2014).

Simple GA (Goldberg, 1989) consiste en tres operadores básicos: reproducción, cruce y mutación. En genética, los genes, que consisten en alelos, constituyen un cromosoma. De manera similar, en GA simple, las cadenas codificadas están compuestas de bits. En los problemas de identificación de daños, los parámetros de los elementos estructurales a codificar son las relaciones entre el valor dañado y el valor no dañado de una o más variables especificadas (por ejemplo, módulo de Young, área de sección transversal, etc.). Por lo tanto, los valores de las variables especificadas pertenecientes a los elementos de estructura a identificar son iguales a la relación anterior de sus valores de línea de base de la estructura original no dañada. Los valores de las variables calculadas a partir del procedimiento anterior se utilizarán en el análisis de FE para calcular la respuesta estructural, que debe compararse con la correspondiente respuesta medida para identificar el daño estructural (Montanari, 2014).

1.8 Uso de la Transformada Wavelet

Debido a la falta de técnicas de tiempo-frecuencia para analizar adecuadamente las señales no estacionarias, en las últimas décadas se ha desarrollado la moderna teoría wavelet. La Transformación Wavelet Continua (CWT), la Transformación Wavelet Discreta (DWT), la Transformación Wavelet Estacionaria (SWT) y la transformada discreta de paquete wavelet son las herramientas de análisis de wavelet más conocidas, utilizadas hoy en día en campos de aplicación muy diversos, como la compresión de imágenes, procesamiento del habla, química, neurofisiología, evaluación no destructiva, fractales y economía.

Para introducir las funciones wavelet y la transformación wavelet, podemos partir de la idea original de Fourier, donde una función compleja es aproximada por la suma ponderada de funciones más simples, que se obtienen a partir de una función de base simple. La función de base puede entonces ser pensada como un bloque de construcción, y la función original puede ser aproximada, o bajo ciertas condiciones ser representada completamente, usando

bloques de construcción similares. Hay ventajas significativas por medio de una aproximación tal como funciones complicadas pueden ser descritas por algunos de estos bloques de construcción con una buena aproximación (Montanari, 2014).

1.9 Estado de la técnica de los métodos de identificación de daños basados en Wavelet

Seguidamente, se presenta una revisión en profundidad del estado de la técnica de los métodos de identificación de daños basados en wavelet en el dominio del tiempo y en los dominios espaciales.

1.9.1 Estado de la técnica de los métodos de identificación de daños basados en Wavelet en el dominio del tiempo

En el procesamiento de datos tiempo-historia de la respuesta estructural, el análisis de wavelets es ampliamente reconocido como una herramienta eficaz para identificar la degradación repentina o gradual de la rigidez del sistema y para localizar temporalmente y espacialmente la ocurrencia de daños. El trabajo de (Surace & Ruotolo, 1994) es uno de los primeros estudios en los que se aplica el análisis wavelet para detectar daños en estructuras de viga. Los autores consideran un modelo por FE para simular la respuesta dinámica de un voladizo con una sola grieta sometida a cargas impulsivas. El comportamiento de abertura-cierre de la grieta se tiene en cuenta, dando lugar a una respuesta de viga no lineal. Al analizar a través de la CWT el tiempo-historia del desplazamiento en el extremo libre, se identifican la presencia de la grieta y la variación del comportamiento dinámico que se produce en el estado de cambio de fisura.

(Hou, et al., 2000) presentan un enfoque basado en wavelet para el SHM en un simple modelo estructural con muelles de rotura y datos reales registrados de la respuesta del edificio durante un evento de terremoto. Muestran que el instante de tiempo de la ocurrencia de daño o del cambio en la rigidez del sistema es detectado por picos en los detalles de la descomposición discreta de la transformada wavelet de los datos de respuesta. (Melhem & Kim, 2003) analizan la respuesta de dos estructuras de concreto a gran escala, una losa de pavimento sobre cimentación y una viga pretensada de simple apoyo. La eficacia del uso de la transformada wavelet como herramienta para la detección de daños y el control del estado

sobre la transformada de Fourier tradicional se resalta tanto en la identificación de los componentes de frecuencia que existen en la señal como en la detección de la variación entre los estados inicial y dañado.

En el trabajo de (Hera & Hou, 2003) se aplica el análisis discreto wavelet para procesar los datos simulados de respuesta de aceleración en algunos puntos representativos de un edificio de cuatro pisos cuando ocurren uno o más daños repentinos. Los autores destacan que el análisis de los datos de respuesta a la aceleración es más eficaz que el de los datos de desplazamiento y que este método de SHM en línea no es en general adecuado para los daños acumulativos durante un período relativamente largo como los causados por la fatiga y corrosión.

(Han, et al., 2005) proponen un Paquete Wavelet Transformado (WPT), basado en el índice de la tasa de energía para la identificación de la ubicación de los daños estructurales. Aunque la metodología propuesta presenta un gran potencial en vigas de laboratorio su aplicación tiene dos limitaciones importantes: la primera, un modelo estructural de referencia para las condiciones no dañadas y la segunda, el algoritmo puede detectar daños sólo cuando un sensor se coloca en una ubicación dañada.

Se presenta un método de identificación de daños estructurales a base de entropía wavelet demostrado por (Ren & Sun, 2008). La entropía wavelet; la entropía wavelet relativa y la entropía wavelet-tiempo se investigan y comparan en términos de resultados numéricamente simulados y resultados de pruebas de laboratorio. La entropía wavelet-tiempo se encuentra poderosa en la detección de características anormales en las señales de vibración recogidas de un sistema de vigilancia de la salud estructural en línea. La entropía relativa de la wavelet, en cambio, es una característica de daño sensible para localizar el daño, con la ventaja de que, si se conoce la ubicación no dañada de la estructura y se mide simultáneamente, no se requiere una estructura intacta adicional.

1.9.2 Estado de la técnica de los métodos de identificación de daños basados en Wavelet en el dominio espacial

(Liew & Wang, 1998) y (Wang & Deng, 1999) usan por primera vez la transformada wavelet para analizar las respuestas estructurales analíticas y experimentales, estáticas y dinámicas

del dominio espacial de las vigas agrietadas simples, e identificar el daño. Destacan que el WA es capaz de identificar la variación abrupta en la deflexión de la viga debido a daños a través de una anomalía local de los coeficientes wavelet en esa posición. Posteriormente, muchos autores estudiaron y mostraron la efectividad y versatilidad del análisis wavelet como herramienta para detectar, localizar y cuantificar el daño en deflexiones estructurales genéricas.

Centrándose en las wavelets gaussianas, (Gentile & Messina, 2003) discuten en un teórico-numérico las características de la CWT de derivación, convolución y suavizado de datos ruidosos. Debido a la limitación de la CWT en presencia de ruido (de hecho, la CWT se comporta como un filtro de paso alto en las escalas bajas y pierde detalles en las grandes escalas), ponen de relieve la necesidad de un trade-off para las escalas en la detección de daños. Además, debido a la redundancia de la CWT con respecto a la libre elección de escalas, los autores recomiendan el uso de la WT continua en lugar de la WT discreta. Al analizar diferentes formas de modos de vigas agrietadas, los autores advierten que la sensibilidad en la detección de daños con respecto a la localización de la grieta depende de la forma de onda de la curvatura local en el área dañada. Además, (Messina, 2004), que trata de las vibraciones transversales de las vigas en los dominios no transformados y transformados por Fourier, discute la capacidad de la CWT en conjunción con operadores diferenciales para actuar como filtro de frecuencia y por lo tanto para reducir el ruido indeseado de alta frecuencia.

(Loutridis, et al., 2004) analizan a través de la CWT tanto el modo de vibración fundamental analítico como experimental de una viga en voladizo doblemente-agrietada usando la wavelet de Symlet de 4to orden. Además de la tarea de localizar las posiciones de la grieta, proponen un factor de intensidad como indicador del tamaño de la grieta.

A través de un estudio analítico y experimental, (Wang & Wu, 2011) detectan la localización de una delaminación en un elemento tipo viga bajo carga estática con una transformación wavelet espacial usando wavelet de Gabor. Una perturbación apenas invisible en el perfil de desviación de la viga delaminada en los dos bordes de delaminación debido a la discontinuidad de la curvatura se discierne a través del WA.

(Pakrashi, et al., 2007) presentan un estudio numérico y experimental detallado con respecto a la cuestión de la calibración eficiente y robusta de la posición y el alcance de los daños en las estructuras. Se observa que el análisis wavelet en el modo o la forma estática deflexionada de una estructura puede identificar con éxito la presencia y la localización del daño incluso a niveles de ruido significativos usando la wavelet Coiflet de 4to orden. Se observa que la ventana parcial de las formas desviadas y el consiguiente análisis de onda de los segmentos mejoran la localización. En cuanto a la cuantificación de los daños, mientras que una calibración basada en wavelet de daño se encuentra inconsistente e inestable debido al ruido, los autores proponen una técnica de calibración basado en wavelet-kurtosis que es más fuerte y consistente. (Montanari, et al., 2013) consideran un modelo por FE de una viga reforzada con fibra agrietada para analizar su deflexión estática. El efecto de la fibra en la respuesta de abertura de fisura se tiene en cuenta a través de un modelo de grieta puentado. La detección de daños y la calibración se estudian en presencia de ruido sintético variando la profundidad de fisura y la condición de rendimiento de la fibra. De nuevo (Pakrashi, et al., 2009) tratan estadísticamente la identificación de la existencia, localización y extensión de una grieta abierta de la primera forma de modos fundamental de una viga simplemente apoyada usando la CWT con la wavelet Coiflet de 4to orden. Se ilustra el problema de la falsa alarma y su reducción significativa mediante el uso de múltiples mediciones.

(Zhong & Oyadiji, 2011a) comparan la Transformación Wavelet Estacionaria (SWT) y la Transformada Wavelet Discreta (DWT) como herramientas para la detección de pequeñas fisuras en elementos tipo vigas. Se analizan las primeras cuatro formas de modo de vigas dañadas simplemente apoyadas, obtenidos analíticamente y experimentalmente. Aunque la información de la grieta se puede obtener a partir de los coeficientes de detalle de la SWT o de la DWT de formas de modo, debido a que la DWT es un algoritmo de muestreo descendente mientras que la SWT es un muestreo ascendente, la SWT proporciona una mejor identificación de la grieta que la DWT, especialmente cuando la grieta es relativamente pequeña y el ruido es relevante. (Cao & Qiao, 2008) proponen y validan analíticamente y experimentalmente, bajo un entorno de ruido relativamente alto, una metodología novedosa, denominada Transformación Wavelet Integrada (IWT), para la detección de daños en formas de modo de vibración estructural. El algoritmo de la IWT tiene el mérito de integrar la SWT,

para extraer la información de daños puros eliminando el ruido aleatorio y las interferencias regulares, y la CWT para revelar la anomalía del daño extraído. Además, se proporciona una directriz para elegir racionalmente la wavelet madre óptima para la identificación eficaz del daño.

(Rucka, 2011) investiga tanto experimental como analíticamente el comportamiento de la técnica de detección de daños por la CWT al analizar las ocho primeras formas de modo de una viga en voladizo con daños en forma de muesca de profundidad del 20%, 10% y 5% del peralte de la viga. El análisis se realiza utilizando las wavelets gaussianas de 4^o, 6^o y 8^o orden, con respectivamente 4, 6 y 8 momentos de desaparición. Los resultados experimentales ponen de relieve que la detección de daños por el análisis wavelet es más eficaz en formas de modo medido más alto y usando wavelets con menor número de momentos de desaparición. Dado que los modos superiores contienen más regiones en las que la curvatura es nula y, por consiguiente, hay menos sensibilidad al daño, una localización de daño fiable necesita al menos dos modos.

(Umescha, et al., 2009) presentan un método para la detección y cuantificación de fisuras en vigas basado en el análisis de wavelet de Symlet. La deformación estática se mide en un punto particular para varias ubicaciones de una carga puntual a lo largo de la viga. Este perfil de deflexión se utiliza como señal de entrada para el análisis wavelet. Debido a la variación de la deflexión en algunos puntos, en comparación con sus puntos adyacentes, se observan picos en los coeficientes wavelet. Dado que estos puntos de pico pueden estar relacionados con daños, puntos de sensor o soportes, para localizar la posición de daño real, los indicadores falsos de daño se eliminan mediante la realización de análisis wavelet del perfil de deflexión medido en otro punto. Se propone una curva generalizada, considerando las variaciones del tamaño y ubicación del daño, la intensidad de carga, la rigidez a la flexión y la longitud de la viga, para cuantificar el daño.

1.10 Conclusiones parciales

- ✓ El pretratamiento de datos tiene el propósito de elaborar los datos brutos adquiridos por los sensores y prepararlos para la extracción de características del sistema. Esta etapa abarca tres tareas: normalización de datos, limpieza de datos y reducción de datos; las

que lo convierte en un trabajo muy delicado y dependiente del caso y debe llevarse a cabo sobre la base del juicio y la experiencia de la ingeniería. Este proceso no debe ser estático: a partir de la selección de funciones y del asunto de reconocimiento de patrones puede surgir una visión para mejorarlo.

- ✓ La monitorización de daño estructural es un proceso que busca analizar los datos recibidos de la estructura de forma periódica o en tiempo real a partir de sensores colocados en la misma, estos permiten detectar cualquier tipo de anomalía para identificar daños, movimientos o degradación en la estructura que está siendo analizada. Para lograr una correcta monitorización e identificación de daños existen muchos aspectos críticos a tener en cuenta. Entre los más importantes se encuentran: las condiciones de excitación y medición, incluyendo la selección del tipo de sensores y su localización, así como el tipo y localización del excitador.
- ✓ Los métodos de detección de daños han evolucionado desde métodos locales que requieren la intervención y el conocimiento de la zona dañada, hasta otros métodos globales que no requieren el acceso al lugar dañado, evaluando la estructura de forma integral.
- ✓ La transformada de wavelet es una herramienta potencial para la detección de daños debido a la capacidad de agrupar diferentes acciones como la atenuación del ruido en las señales, el señalamiento de singularidades y ofrecer información combinada en el dominio del tiempo (espacio) y la frecuencia.

CAPÍTULO 2: ANÁLISIS WAVELET Y MÉTODOS DE IDENTIFICACIÓN DE DAÑOS.

Por medio del análisis de señales basado en funciones wavelets se pueden generar datos confiables que permiten determinar y localizar el daño en estructuras. El análisis wavelets permite incluir herramientas matemáticas que se relacionan intrínsecamente con la detección de daños, derivada, convolución y filtros para señales con niveles de ruido, tales son estas potencialidades que en los últimos años se han desarrollado métodos tanto en el dominio del tiempo para el monitoreo estructural como en el dominio del espacio para la localización del daño. En el presente capítulo se definen los principales tipos de análisis que se realizan con la Transformada Wavelet, haciendo énfasis en la Transformada Continua Wavelet (CWT) y los métodos desarrollados a partir de ella.

2.1 Generalidades

Una wavelet es una “función con forma de onda y de pequeña dimensión, finita y nula fuera de un determinado intervalo”. La forma de onda implica una integración a cero (oscilando por encima y por debajo del eje de abscisas x) y su tamaño pequeño implica que su amplitud decrece a medida que se aleja de su origen. También es definida como “forma de onda de duración limitada que tiene un valor medio cero”, o incluso como “pequeña onda que tiene su energía concentrada en el tiempo para servir como herramienta de análisis de fenómenos cambiantes, no estacionarios o variables en el tiempo”.

Permite realizar análisis localizados en el tiempo (o espacio) de una gran señal, brindando la posibilidad de encontrar discontinuidades o picos de corta duración que de otra manera sería complicado detectar y tratar. El análisis Wavelet es capaz de mostrar aspectos de los datos que con otras técnicas del análisis de señales no pueden ser apreciadas y se dejan pasar por alto, como son: la tendencia, puntos de ruptura y discontinuidades en las derivadas de orden superior (Alexander Cortés, et al., 2007).

Una cualidad muy importante de las funciones wavelet es la de poder analizar una señal a diversas escalas. En el análisis wavelet, la escala juega un papel muy importante, ya que los diversos algoritmos procesan los datos en diferentes escalas y resoluciones espaciales.

Las funciones wavelet son la base para poder aplicar el análisis o transformada del mismo nombre, la cual permite descomponer señales jerárquicamente y su posterior reconstrucción, además de extraer ciertos tipos de información de ellas.

La transformada wavelet actúa como un operador diferencial y puede aplicarse eficazmente incluso para señales ruidosas. Los daños que no pueden identificarse directamente a partir de las formas de los modos, pueden observarse en las transformadas wavelet, ya que las anomalías locales en una señal conducen a variaciones sustanciales de los coeficientes de las ondas en el entorno del daño (Rucka, 2011).

La transformada wavelet (WT) puede ser vista como una extensión de la FT tradicional con la ubicación y tamaño de ventana ajustable que ha surgido como una herramienta prometedora para el Monitoreo de Salud Estructural (SHM) y la detección de daños debido a sus propiedades inherentes (Bo Chen, et al., 2014).

Los estudios previos han demostrado muy buena exactitud y eficacia de la transformada wavelet, aunque la mayoría de las investigaciones se realizaron sobre datos numéricos sin verificación experimental. Para una aplicación práctica de las técnicas de detección de daños por wavelet, la investigación sobre datos experimentales es la más importante. La aplicabilidad de las técnicas de detección de daños por wavelet depende de la precisión de la medición y de las distancias de muestreo (Rucka, 2011).

2.2 Características y propiedades de las Wavelets

Momentos de desvanecimiento. Es una propiedad relacionada con la compresión de información y eliminación de ruido. En términos prácticos, la cantidad de momentos de desvanecimiento está directamente relacionada con la selectividad de la descomposición wavelet, vista como proceso de filtrado.

Tamaño del soporte. Está directamente relacionado con la cantidad de momentos de desvanecimiento, debido a que en una wavelet con p momentos de desvanecimiento el tamaño del soporte es $2p-1$. Normalmente esta propiedad está directamente relacionada con la cantidad de coeficientes del filtro (teniendo en cuenta que una wavelet se puede ver como un filtro), e influye directamente en el tiempo de cálculo y en la distorsión que se produce en los extremos al procesar una señal; dado esto, aunque se prefiere una gran cantidad de

momentos de desvanecimiento, se debe lograr un equilibrio entre ambos parámetros para llevar a cabo un análisis apropiado.

Regularidad. Es la capacidad de una wavelet de reconstruir fielmente una señal a partir de los coeficientes calculados en el proceso de transformación, o, dicho de otro modo, representa la suavidad de la wavelet.

Simetría. Si la wavelet es simétrica, al verla como un filtro se puede decir que tiene fase lineal, si no es simétrica se introduce distorsión en la fase.

Función de escala. Es una función ortogonal a la wavelet y, eventualmente, si ambas funciones son normalizadas constituyen una base ortonormal del espacio. Al no tener definida una función de escala, una wavelet determinada no puede ser utilizada en la aplicación de la DWT.

2.3 Análisis Wavelet

Frente a las limitaciones de las metodologías basadas en la transformada de Fourier, la transformada wavelet surge como una alternativa matemática que permite obtener una buena resolución en tiempo y frecuencia, adaptándose a las necesidades de cada caso.

La construcción de una familia de funciones wavelets linealmente independientes, se realiza a partir de una función $\psi(x)$ llamada wavelet madre, la cual está confinada en un intervalo finito. Las wavelets hijas o simplemente wavelets $\psi_{a,b}(x)$ se forman por traslación y escalado de la función madre, siendo a la dilatación (la cual es inversamente proporcional a la frecuencia y debe cumplir que $a \neq 0$) y b la traslación o desplazamiento (localización en el tiempo o en el espacio), obteniendo así la expresión de todas las versiones trasladadas y escaladas de ella, conocida como familia wavelet, considerando que se trata de funciones continuas y que tanto a como b se definen en el espacio de los reales (\mathbb{R}):

$$\psi_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) \quad (2.1)$$

. Las wavelets generadas de la misma función wavelet madre tienen diferente escala (**a**) y ubicación (**b**), pero todas tienen la misma forma.

Como se detalla en el epígrafe 2.2, una wavelet $\psi(x)$ es una función en forma de onda que está limitada en un cierto intervalo (o que tiene una extensión limitada). La función wavelet puede ser definida por cualquier función $\psi(x)$ que satisfaga las siguientes condiciones:

- 1) que la integral de su cuadrado sea finita (la función debe tener una energía finita o expresado de otra manera, debe pertenecer al espacio $L^2(\mathbb{R})$, espacio de funciones con integral cuadrada finita);

$$E_\psi = \int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(x)|^2 dx < \infty \quad (2.2)$$

donde normalmente la función wavelet se normaliza para tener $E_\psi = 1$;

- 2) la integral de la función $\psi(x)$, que al menos tiene un momento de desaparición debe ser igual a cero y por tanto debe ser oscilatoria, es decir, debe ser una onda con:

$$M_0 = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(x) dx = 0 \quad (2.3)$$

Esta condición viene justificada por el rápido decaimiento a cero de la transformada de Fourier de la función en la frecuencia $w=0$.

- 3) **Condición de admisibilidad:** se define por la expresión 2.4 cuyas consecuencias son: que la función está bien localizada en el tiempo o en el espacio; que la transformación con esa función es invertible, es decir, se puede conseguir la reconstrucción perfecta; que su transformada de Fourier es un filtro continuo paso banda, con rápido decaimiento hacia el infinito y hacia $w=0$; y que la función debe tener un valor cero en la frecuencia cero, lo cual se cumplirá si la wavelet tiene una media de cero y se trata de una función oscilatoria donde los valores negativos anulan a los positivos.

$$C_\psi = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\hat{\psi}(w)|^2}{|w|} dw < \infty \quad (2.4)$$

Donde $\hat{\psi}_{(w)}$ es la FT de $\psi(t)$ y C_ψ se denomina admisibilidad constante, en función de la wavelet elegida.

- 4) **Condición de regularidad:** Las dos propiedades básicas de las funciones wavelet, soporte compacto y correcta localización en frecuencia y tiempo, no son las únicas. La llamada condición de regularidad expresa que la wavelet madre ha de ser localmente suave y concentrada en los dominios del tiempo (o espacio) y la frecuencia. Como resultado de esta condición aparece el concepto de “*vanishing moment*” o momento nulo o momento de desaparición (M_k). Si se definen los M_k momentos de la wavelet $\psi(x)$ como:

$$M_k = \int_{-\infty}^{+\infty} x^k \psi(x) dx, \quad k=0,1,2,\dots,p-1 \quad (2.5)$$

entonces se dice que esa función tendrá M_k momentos nulos si la expresión anterior es igual a cero, p depende de la wavelet madre:

$$M_k = \int_{-\infty}^{+\infty} x^k \psi(x) dx = 0 \quad k=0,1,\dots,p-1 \quad (2.6)$$

significando ello que $\psi(x)$ es ortogonal a cualquier polinomio de grado p-1. Por la condición de admisibilidad tenemos que el momento cero es nulo. Si los demás momentos se anulan, entonces los coeficientes de la transformada wavelet tendrán un decaimiento exponencial (a^{n+2}) para una señal suave $\eta(x)$. Esto es conocido como momentos nulos u orden de aproximación. Si una wavelet tiene N momentos nulos, entonces el orden de aproximación de la transformada wavelet también será N. Los momentos no tienen que ser exactamente igual a cero, ya que pequeños valores son suficientes a menudo.

En general, cuanto mayor es el orden del momento de desaparición, mayor es la frecuencia de la wavelet madre, y cuanto más potente es el contenido relacionado con la transformada wavelet para procesar los componentes de alta frecuencia de una señal. Esta propiedad es fundamental en la detección de daños a través de la CWT, ya que el daño está representado por altas frecuencias en la señal (Montanari, 2014).

2.3.1 El escalamiento

La variable escala (**a**) lleva en sí la información de la dilatación y la contracción temporal (o espacial) de la señal, pudiéndose interpretar como un cambio en su contenido en frecuencia y con ello al dilatarse la wavelet (escalas mayores) la frecuencia se reduce, y al contraerse (escalas menores) la frecuencia aumenta.

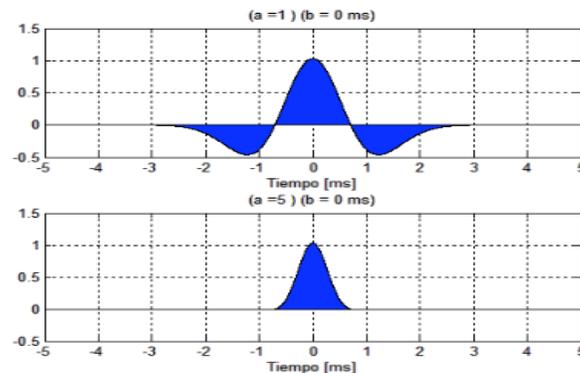


Fig.2.1. Escalamiento Wavelet en el dominio del tiempo. Tomado de (Alexander Cortés, et al., 2007).

2.3.2 El desplazamiento

La variable desplazamiento (o traslación) (**b**) aporta la información de tiempo (o espacio) según convenga, al igual que ocurría en la STFT, pues nos indica en qué lugar del eje del tiempo (o espacio) se encuentra la wavelet.

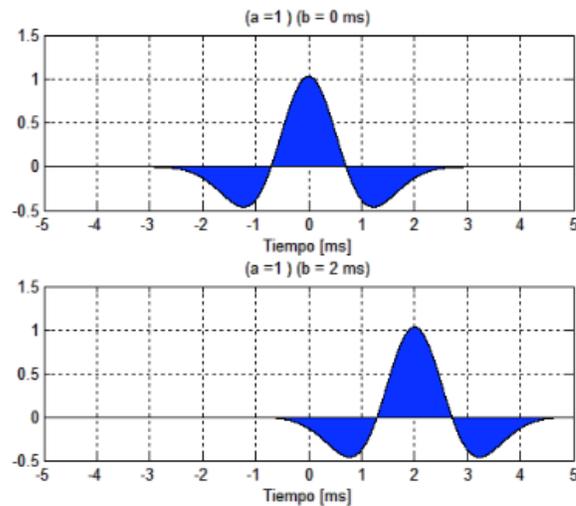


Fig.2.2. Desplazamiento Wavelet en el dominio del tiempo. Tomado de (Alexander Cortés, et al., 2007).

2.4 Métodos de identificación de daños basados en la Transformada Wavelet

Dentro de los métodos modernos de identificación de daños basados en vibraciones, el análisis wavelet es recomendado por su capacidad para procesar señales no estacionarias, condición que lo convierte en una técnica confiable.

2.4.1 Método basado en la Transformada Continua Wavelet (CWT - Continuous Wavelet Transform).

Como se ha demostrado en epígrafes anteriores las wavelets son funciones que tienen propiedades matemáticas que las hacen muy apropiadas para el análisis de señales, la idea no es nueva, pues se fundamenta en el hecho que una señal o función $f(x)$ puede expandirse mediante una descomposición lineal como la indicada:

$$f(x) = \sum C * \psi(x) \quad (2.7)$$

donde los términos C son los coeficientes de la expansión y $\psi(x)$ representa un conjunto de funciones bases. Dependiendo del tipo de base que se utilice se obtendrán diferentes tipos de transformaciones (de Castro, et al., 2004).

Si la base es ortogonal los coeficientes C pueden determinarse a partir del producto interior, siendo el resultado final el que se muestra en (2.8)

$$C = \int f(x) * \psi(x) dx \quad (2.8)$$

Al emplear una expansión basada en wavelets, surgen dos nuevas variables: la escala y la traslación, que permiten a partir de (2.9) definir los coeficientes de la denominada Transformada Wavelet Continua (CWT) como la suma en el tiempo del producto de la señal por la versión escalada y trasladada de una wavelet madre original (Ancona Lazcano, et al., 2011):

$$CWT(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) dx = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi_{a,b}(x) dx \quad (2.9)$$

En donde a es la escala, b es el factor de traslación y $\psi(x)$ es una Wavelet Madre. El resultado de la transformada es la descomposición de la señal en el tiempo (o espacio) en una serie de coeficientes $CWT(a,b)$ reales o complejos (dependiendo de la wavelet usada), que son llamados Coeficientes Wavelets y son función de dos parámetros reales $a \neq 0$ y b . El resultado de todos los coeficientes wavelets puede ser graficado en un mapa wavelet como el de la Figura 2.3 (Ancona Lazcano, et al., 2011).

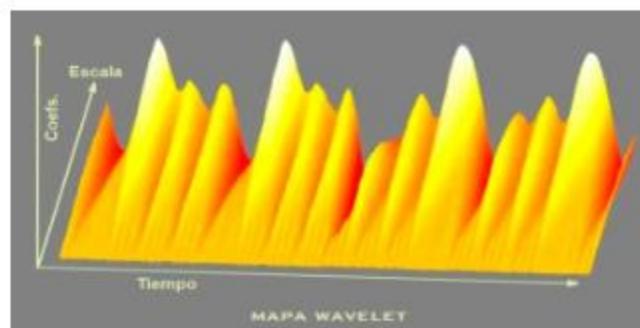


Figura 2.3. Ejemplo de Mapa Wavelet. Tomado de (Misiti, et al., 2007).

Por definición la Transformada Continua Wavelet es más una representación tiempo - escala que una representación tiempo - frecuencia. En particular, para valores pequeños de a la

CWT obtiene información de $f(t)$ que está esencialmente localizada en el dominio del tiempo mientras que para valores grandes de a la CWT obtiene información de $f(w)$ que está localizada en el dominio de la frecuencia. En otras palabras, para escalas pequeñas la CWT nos entrega una buena resolución en el dominio del tiempo mientras que para escalas grandes la CWT nos entrega una buena resolución en el dominio de la frecuencia. Cuando cambia, tanto la duración como el ancho de banda de la wavelet cambian, pero su forma se mantiene igual (Faundez & Fuentes, s.f.).

Aunque la CWT trabaja con el término escala en vez de frecuencia, es posible mediante una constante $c > 0$ realizar un cambio de variable de una escala “ a ” a una frecuencia de la forma

$$a \rightarrow w = \frac{c}{a} \quad (2.10)$$

donde c recibe el nombre de constante de calibración en unidades de frecuencia (tal como Hz). Con este cambio de variable podemos observar que la CWT localiza tanto la señal $f(t)$ en el dominio del tiempo como su espectro $f(w)$ en el dominio de la frecuencia en forma simultánea (Faundez & Fuentes, s.f.).

La CWT puede servir de base para un procedimiento de detección de daño basada en la premisa de que el daño debido a una pérdida repentina de rigidez puede ser detectado mediante formas modales con coeficientes wavelet que desarrollan grandes amplitudes (como picos o impulsos) en la localización del daño. Dicha perturbación de los coeficientes wavelets debida al daño es mucho más apreciable para las escalas más pequeñas de la CWT (Ancona Lazcano, et al., 2011).

2.4.2 Método de Análisis Discreto de Wavelets (DWA - Discrete Wavelet Analysis).

Para aplicaciones prácticas, se pueden obtener coeficientes wavelets para datos discretos mediante la Transformada Rápida Wavelet (FWT), la cual descompone la señal medida, a través de filtros de alta y baja frecuencia, en dos señales con aproximadamente la mitad de datos cada uno con respecto a la señal original, denominadas aproximaciones y detalles. Los detalles contienen los componentes de alta frecuencia-baja escala de la señal, mientras que las aproximaciones contienen los de baja frecuencia-alta escala. El resultado de este proceso

son los coeficientes DWT, denominados cA y cD (Figura 2.4a), el cual puede seguir mediante la descomposición iterativa de las aproximaciones en nuevas aproximaciones y detalles, dando lugar al Árbol de descomposición Wavelet (Figura 2.4b) (Ancona Lazcano, et al., 2011).



Figura 2.4. Descomposición DWT. a) Proceso de filtrado: aproximaciones y detalles, b) Árbol de descomposición Wavelet. Tomado de (Misti, et al., 2007)

El procedimiento de detección de daño DWT consiste en seleccionar una wavelet madre adecuada y en base a ella aplicar el algoritmo FWT a una señal en función del espacio (forma modal) para encontrar un árbol de descomposición wavelet de la señal. Es muy probable que la información sobre discontinuidades de la forma modal debidas a la presencia de daño pueda ser contenida en mayor cantidad en los detalles del árbol wavelet. El último paso del método consiste entonces en escoger un nivel de descomposición para el árbol y examinar el detalle de ese nivel en busca de discontinuidades de la señal (Ancona Lazcano, et al., 2011).

2.4.3 Método basado en Paquetes de Wavelets (WPS - Wavelet Packet Signature).

Este método está basado en la Transformada Wavelet por paquetes para la localización del daño en estructuras. En dicho método, denominado Método Basado En Paquetes Wavelets (WPS, por sus siglas en inglés), es requerida la respuesta dinámica de la estructura para las condiciones exentas del daño y el estado actual. El proceso a seguir en la detección del daño es el siguiente (Ancona Lazcano, et al., 2011):

- 1) La respuesta dinámica a lo largo de varios puntos de medición en la estructura es descompuesta usando la WPT.
- 2) Se determina la entropía de los componentes de energía de la señal descompuesta.

- 3) Se calculan las diferencias entre las componentes de energía entre los estados íntegro y dañado de la estructura.
- 4) Se selecciona un componente de energía apropiado, de los disponibles del árbol de descomposición wavelet, para todos los puntos de medición y se calculan las curvaturas de dichas formas de energía WPT.

En la WPT, la señal es descompuesta también en aproximaciones y detalles. La principal diferencia entre ambos procesos es que en la WPT también los detalles son descompuestos de la misma forma ejemplificada en la Figura 2.4b para las aproximaciones. Dicho procedimiento es repetido hasta alcanzar un nivel de exactitud adecuado, consiguiendo realizar el Árbol de Descomposición de Paquetes Wavelets, mostrado en la Figura 2.5 (Ancona Lazcano, et al., 2011).

Al fondo del árbol WPT $f_j^i(x)$ presenta una adecuada resolución en frecuencia y baja resolución en el tiempo. Por el contrario, en los niveles más altos del árbol, $f_j^i(x)$ tiene baja resolución en frecuencia y una buena resolución en el tiempo (Ancona Lazcano, et al., 2011).

La descripción matemática del método propone que la energía de la respuesta dinámica (las aceleraciones medidas), en puntos discretos de medición, puede ser obtenida y normalizada de acuerdo a las ecuaciones: 2.7, 2.8 y 2.9 (Ancona Lazcano, et al., 2011):

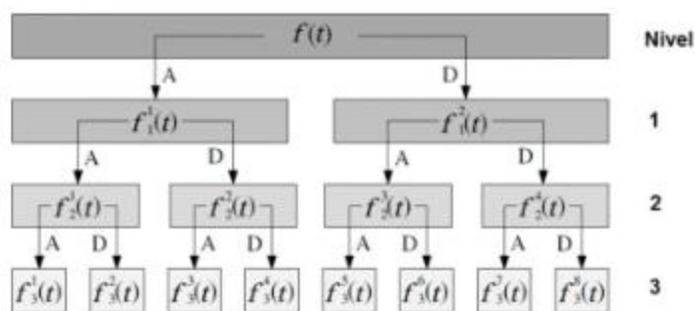


Figura 2.5. Árbol de paquetes de energía WPT al tercer nivel de descomposición.

Tomado de (Misiti, et al., 2007).

$$E_j^i = - \sum_x f_j^i(x)^2 \log[f_j^i(x)] \quad (2.7)$$

$$E_f(n) = - \sum_x f(x)^2 \log[f(x)] = \sum_{i=1}^{2j} E_j^i \quad (2.8)$$

$$WPS_j^i(n) = \frac{E_j^i(n)}{\max(E_j^i)} \quad (2.9)$$

Donde f_j^i es la combinación lineal de las funciones de paquetes wavelets $\psi_{j,k}^i$. $E_f(n)$ y $E_j^i(n)$ representan a la energía de la función original y la energía de la función descompuesta $f_j^i(x)$ en el punto de medición n , respectivamente. $WPS_j^i(n)$ son los coeficientes de energía WPS normalizados. Se debe resaltar que éste método es el único que trabaja con datos de entrada producto de la medición de aceleraciones por nodo en lugar de las formas modales (Ancona Lazcano, et al., 2011).

2.5 Algoritmos usados para la detección de daños aplicando la Transformada Continua Wavelet

2.5.1 Primer algoritmo basado en la Transformada Continua Wavelet

Considerando como dato las formas modales de un elemento estructural tipo viga la CWT para formas modales se representa de la siguiente manera (Janeliukstis, et al., 2015):

$$DI_i^n = W_{i,a,b}^n = \int_L w_i^n \times \psi_{a,b}(x) dx \quad (2.10)$$

Siendo L la longitud de la viga, w_i^n es la coordenada modal del modo n en el punto i , $\psi_{a,b}$ es una función wavelet particular, que puede ser representada por Daubechies, Gaussian y Symlet de los órdenes 2, 4 y 8 (db2, db4, db8, gaus2, gaus4, gaus8, sym2, sym4, sym8), Coiflet de órdenes 2 y 4 (coif2, coif4), Morlet (Morl), Meyer, Haar y sombrero mexicano (Mex) entre otras. DI_i^n , sería el índice de daños para cada modo.

En la práctica, las formas modales medidas experimentalmente se corrompen inevitablemente por el ruido de medición que causan las perturbaciones locales en la forma de modo, lo que puede conducir a falsos picos en los perfiles de índice de daños. Estos picos podrían ser erróneamente interpretados como daños o podrían enmascarar los picos inducidos por daño real y conducir a una detección falsa o pérdida de daño. Para superar este problema, se propone resumir los resultados para todos los modos. El índice de daños resumido entonces se define como la suma media de los índices de daño para todos los modos N , normalizados con respecto al valor más grande de cada modo.

$$DI_i = \frac{1}{N} \times \sum_{n=1}^N \frac{D_i^n}{D_{i,max}^n} \quad (2.11)$$

Los índices de daños, determinados para cada elemento, se normalizan y se aplica un concepto de prueba de hipótesis estadística para clasificar elementos dañados y sanos y para localizar daños en función del valor de umbral de daño predefinido. En la prueba de hipótesis, la hipótesis nula y la hipótesis alternativa se definen como H_0 (elemento i de la estructura es saludable); H_1 (elemento i de la estructura está dañado), respectivamente. Con el fin de probar la hipótesis, el índice de daños resumido, dado en la ecuación (2.11), es estandarizado por:

$$Z_i = \frac{DI_i - \mu_{DI}}{\sigma_{DI}} \quad (2.12)$$

Donde μ_{DI} y σ_{DI} son el valor medio y la desviación estándar de los índices de daños en la ecuación (2.11), respectivamente. La decisión para la localización del daño se establece en función del nivel de significación utilizado en la prueba de hipótesis, que puede determinarse a partir de un criterio de clasificación asignado previamente: elegir H_0 si $Z_i < C_r$ o elegir H_1 si $Z_i \geq C_r$, donde C_r es un valor umbral. Los valores típicos de C_r , ampliamente utilizados en la literatura son 1,28, 2 y 3 para los niveles de confianza del 90%, 95% y 99% para la presencia de daño.

2.5.2 Segundo algoritmo basado en la Transformada Continua Wavelet

La metodología propuesta para la identificación de daños se describe en cuatro pasos, además, requiere información sobre dos estados de la estructura: no dañada y dañada. Los datos pueden obtenerse en condiciones de laboratorio o mediciones de campo si es posible (Serra & Lopez, 2016).

Paso 1: Extensión de formas modales

La Transformada Wavelet se define para un intervalo infinito. Por otro lado, las formas modales son espaciales y se definen en un intervalo finito. Al realizar la transformación Wavelet, este problema conduce a un comportamiento incorrecto al principio y al final de la señal. Existen cambios locales en los puntos mencionados desde que la señal comienza y termina, sin embargo, esas discontinuidades no son causadas por daños. Los daños cercanos al principio y al final de la estructura pueden ser enmascarados debido a los altos valores de los coeficientes cerca de los bordes.

Las escalas más altas de la CWT utilizan más puntos para evaluar la señal, por lo tanto, la longitud de la extensión de la señal depende de las escalas usadas en la transformación.

Cuando el análisis wavelet se realiza en la señal ampliada, el efecto de borde aparecerá al final e inicio de la señal extendida. La señal ampliada con efectos de frontera va a ser reformada después que se realice la transformación Wavelet, dejando la señal original libre de efectos de borde.

Paso 2: Refinamiento y diferencia de formas modales

La combinación de la DWT y CWT propuesta por (Cao & Qiao, 2008) consiste en el refinamiento de la forma de modo aprovechando la característica del análisis de multiresolución de la DWT y luego la revelación de daño usando la CWT. Las formas modales refinadas son los coeficientes aproximados que resultan de analizar los datos de entrada con la DWT. Si el nivel de descomposición realizado por la DWT es demasiado elevado, existe el riesgo de que la discontinuidad en formas modales provocada por un daño pueda desaparecer. Además, depende del nivel de ruido presentado en la señal.

Como ya se ha dicho, la metodología propuesta por (Cao & Qiao, 2008) sólo se aplica a la primera forma de modo, que se considera insuficiente para la detección de daños ya que la sensibilidad de una forma de modo a un daño puntual depende de su posición. (Solis, et al., 2013) propusieron un método de detección basado en la adición de los coeficientes de la Transformada Wavelet Continua de la diferencia de formas modales entre estados no dañados y dañados de la estructura. En primer lugar, se calcula la diferencia de las formas modales refinadas extendidas:

$$\phi_{dif}(x) = \phi_{dam}(x) - \phi_{undam}(x) \quad (2.13)$$

Después de que se obtiene la diferencia de las formas modales, se realiza la Transformada Wavelet de la diferencia de las formas modales. El paso anterior para la i -ésima forma modal se puede escribir como:

$$CWT^i(a,b) = \int_{-\infty}^{+\infty} \phi_{dif}^i(x) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi^* \left(\frac{x-b}{a} \right) dx \quad (2.14)$$

Paso 3: Adición y ponderación de formas de modo

(Oyadiji & Zhong, 2011) propusieron un parámetro de daño basado en la adición de los resultados para todas las formas modales. (Radziński, et al., 2011) emplearon el cambio en las frecuencias naturales para cada modo para definir una función de probabilidad de daño que se utilizó para pesar los coeficientes de onda a lo largo de la viga para cada forma de modo y se sumaron los resultados para cada forma de modo. La ponderación del coeficiente se utiliza para enfatizar las formas de modo más sensibles. Se supone que cuando el cambio en la frecuencia natural es alto, la diferencia entre formas modales también será importante. De esta manera las formas modales que no cambian sus frecuencias naturales casi no se tienen en cuenta ya que no aportan nueva información; lo que, podrían convertirse en una fuente de ruido.

$$CWT_{weighted}^i(a,b) = CWT^i(a,b) * \left(1 - \frac{w_{undam}^i}{w_{dam}^i} \right)^2 \quad (2.15)$$

Donde w_{undam}^i y w_{dam}^i son frecuencias naturales de la forma modal i para estados no dañados y dañados, respectivamente. El paso final es combinar los resultados de cada forma modal agregándolos. El resultado es un coeficiente wavelet global.

$$CWT_{global}(a, b) = \sum_{i=1}^m CWT_{weighted}^i(a, b) \quad (2.16)$$

Donde m representan el número de modos sumados.

Paso 4: Normalización y análisis de los resultados

El valor de los coeficientes de la Transformada Wavelet Continua aumenta con la escala. Este problema podría conducir a una interpretación errónea al analizar los coeficientes para cada escala en un escalograma ya que los valores para las pequeñas escalas podrían enmascarse por los de escalas más altas. Por esta razón, los coeficientes globales de la Transformada Wavelet se normalizan a la unidad para cada escala para obtener resultados más claros:

$$[CWT_{norm}]_a = \frac{[CWT_{global}(a, b)]_a}{\max[CWT_{global}(a, b)]_a} \quad (2.17)$$

La versión normalizada de los coeficientes de la Transformada de Wavelet Continua se va a analizar para detectar y localizar el daño en la estructura. Basándose en el análisis realizado anteriormente, cualquier cambio abrupto en los coeficientes se interpretará como el efecto de un daño estructural.

2.6 Efectos de borde en la detección de daños.

2.6.1 Problema de efectos de borde en la detección de daños por la CWT espacial.

Como se ha expuesto en secciones anteriores, la transformada continua de onda es definida por la convolución de la señal de entrada, $\eta(x)$, con una función wavelet generada a partir de la wavelet madre, $\psi(x)$, escalándola y trasladándola. Para una señal de longitud finita, cuando la operación de convolución se ejecuta cerca de la señal termina, la ventana wavelet

se extiende hacia una región sin datos disponibles (Fig. 2.6a). Por lo tanto, la transformada de la señal cercana a los bordes es corrompida por los datos no existentes: en estas regiones los valores de los coeficientes de la CWT surgen anormalmente (distorsiones de borde o efectos de borde) y las características reales de la señal son corrompidas por la transformación (Fig. 2.6b). Los efectos de borde pueden provocar el enmascaramiento de los daños y las situaciones de rendimiento de falsos indicadores o falsas alarmas.

Entre los diferentes enfoques para manejar los efectos de borde, el más comúnmente utilizado es pre-procesar la señal a través de la extensión extrema (Mallat, 2001), (Mertins, 1999). Las técnicas de extensión tradicionales incluyen extensión por cero rellenos, periodicidad, simetría y linealización (Misiti, et al., 2000). Estos métodos hacen suposiciones simples sobre las características de la señal fuera de las fronteras, pero resultan insatisfactorias para muchas aplicaciones (por ejemplo, análisis de fuertes señales oscilantes, compresión de imágenes, aplicaciones de codificación, etc.), incluida la detección de daños (Rucka & Wilde, 2006a), (Rucka & Wilde, 2006b).

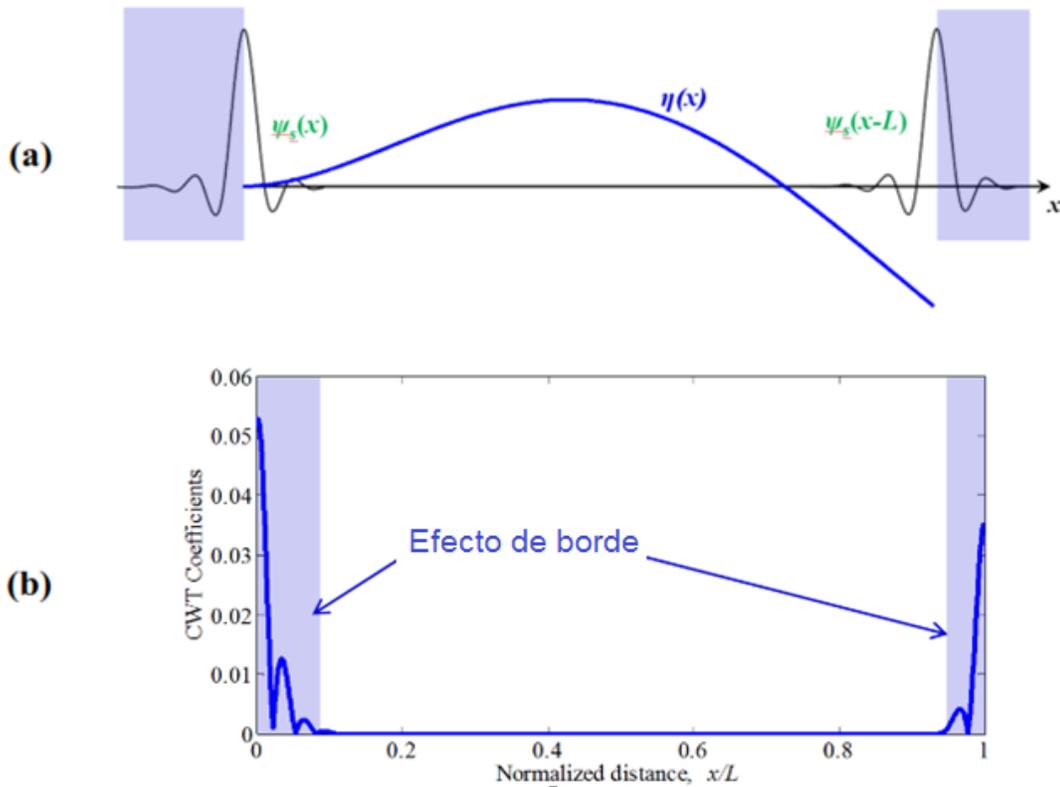


Fig.2.6. a) En la convolución de la CWT, la ventana wavelet, cerca de los extremos de la señal, se extiende hacia una región sin datos disponibles; (b) los efectos de borde se producen cerca de los extremos de la señal, corrompiendo la transformación. Tomado de (Montanari, 2014)

Los métodos de relleno tradicionales citados anteriormente introducen discontinuidades en los extremos de la señal y / o en sus derivadas primera o segunda, de manera que los daños pequeños próximos a los extremos de la viga son enmascarados por distorsiones de frontera de la CWT.

Con el fin de considerar los datos reales medidos, el ruido se superpone a las formas de deflexión simuladas por la $\eta(x)$. De hecho, la situación ideal en ausencia de ruido produciría una identificación de daños trivial extendiendo la señal $\eta(x)$ a través de su función de empalme suave de interpolación o su función de empalme suave de ajuste (Rucka & Wilde, 2006a), (Rucka & Wilde, 2006b). Las distorsiones fronterizas se suprimirían y la localización de daños muy pequeños cerca de los bordes sería fácilmente identificada por la WT. Por otro lado, los experimentos numéricos demuestran que este enfoque no es eficaz para extender las señales ruidosas. Obsérvese también que, en ausencia de ruido, el WA no sería necesario para detectar la posición del daño ya que, calculando numéricamente la segunda derivada de la señal original, se puede identificar fácilmente el lugar del daño (Pandey, et al., 1991).

2.6.2 Análisis del método de extensión.

Se propone un método simple y computacionalmente eficiente basado en el uso de dos funciones polinomiales $f_1(x_1)$ y $f_2(x_2)$ para extender, en el rango $x \leq 0$ y $x \geq L$, respectivamente, a la señal $\eta(x)$ propuesta en la (Fig.2.7) (Montanari, 2014).

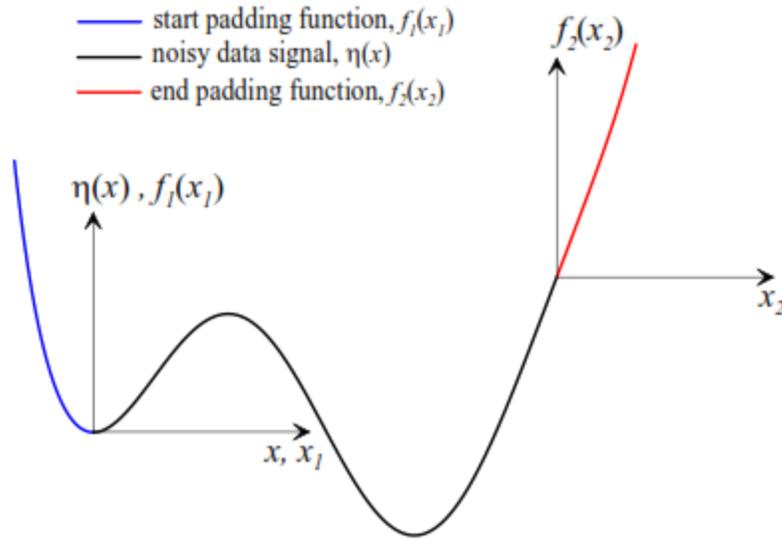


Fig.2.7. Una señal genérica de ruido de datos, $\eta(x)$, se extiende suavemente antes del inicio por $f_1(x_1)$ y después del final por $f_2(x_2)$. Tomado de (Montanari, 2014).

Estas funciones se obtienen mediante un procedimiento de ajuste para:

- (i) describir correctamente la $\eta(x)$ de tal manera que amplíe suavemente la tendencia de la señal y de sus derivadas hasta el orden igual al m-ésimo momento de desaparición de la wavelet adoptada;

- (ii) asegurar la continuidad en los límites hasta m-ésimo orden derivativo.

Dado que la señal original está dañada por el ruido, las condiciones (i) y (ii) sólo pueden satisfacerse en un sentido medio.

Para extrapolar con precisión la tendencia ruidosa de la señal se recomiendan las funciones polinomiales de grado 8.

Para definir las funciones de extensión, en primer lugar se ajusta $\eta(x)$ en un sentido de mínimos cuadrados a través de las dos funciones polinomiales $\bar{f}_1(x_1)$ y $\bar{f}_2(x_2)$ como

$$\bar{f}_1(x_1) = \bar{A}_1 x_1^8 + \bar{B}_1 x_1^7 + \bar{C}_1 x_1^6 + \bar{D}_1 x_1^5 + \bar{E}_1 x_1^4 + \bar{F}_1 x_1^3 + \bar{G}_1 x_1^2 + \bar{H}_1 x_1 + \bar{I}_1 \quad (2.18)$$

con $0 \leq x_1 \leq \beta_1 L$

y

$$\bar{f}_2(x_2) = \bar{A}_2 x_2^8 + \bar{B}_2 x_2^7 + \bar{C}_2 x_2^6 + \bar{D}_2 x_2^5 + \bar{E}_2 x_2^4 + \bar{F}_2 x_2^3 + \bar{G}_2 x_2^2 + \bar{H}_2 x_2 + \bar{I}_2 \quad (2.19)$$

con $-L(1 - \beta_2) \leq x_2 \leq 0$

Donde $\bar{A}_1, \bar{B}_1, \dots, \bar{I}_1$ y $\bar{A}_2, \bar{B}_2, \dots, \bar{I}_2$ son los coeficientes del polinomio de ajuste $\bar{f}_1(x_1)$ y $\bar{f}_2(x_2)$, respectivamente. La función $\bar{f}_1(x_1)$ ajusta la señal $\eta(x)$ de $x=0$ a $x=\beta_1 L$; mientras $\bar{f}_2(x_2)$ ajusta la señal $\eta(x)$ de $x=L(1 - \beta_2)$ a $x=L$, donde los parámetros β_1 y β_2 pueden variar en el rango de 0.1-1. No hay un valor óptimo para estos parámetros, ya que dependen de la tendencia de la señal y el nivel de ruido. Por ejemplo, en el caso de las señales caracterizadas sin cambio de signo, los valores en el rango de 0.7-1 funcionan bien mientras que, para las señales oscilantes, valores en el rango de 0.1-0.4 se sugieren, además, los últimos valores son en general preferidos en presencia de bajo contenido de ruido.

Los polinomios de extensión $f_1(x_1)$ y $f_2(x_2)$ tienen las expresiones:

$$f_1(x_1) = A_1 x_1^8 + B_1 x_1^7 + C_1 x_1^6 + D_1 x_1^5 + E_1 x_1^4 + F_1 x_1^3 + G_1 x_1^2 + H_1 x_1 + I_1 \quad (2.20)$$

con $-\Lambda a \leq x_1 \leq 0$

y

$$f_2(x_2) = A_2 x_2^8 + B_2 x_2^7 + C_2 x_2^6 + D_2 x_2^5 + E_2 x_2^4 + F_2 x_2^3 + G_2 x_2^2 + H_2 x_2 + I_2 \quad (2.21)$$

con $0 \leq x_2 \leq \Lambda a$

Donde a es el parámetro de escala considerado en el WA, Λ representa la distancia desde el centro de la wavelet madre hasta la posición donde la wavelet alcanza valores insignificantes. Los coeficientes polinomiales A_1, B_1, \dots, I_1 y A_2, B_2, \dots, I_2 se obtienen de la siguiente manera:

$$A_1 = \bar{A}_1; B_1 = \bar{B}_1; C_1 = \bar{C}_1; D_1 = \bar{D}_1; E_1 = \bar{E}_1; F_1 = \bar{F}_1; G_1 = \bar{G}_1; H_1 = \bar{H}_1; \quad (2.22)$$

$$I_1 = \eta(x = 0)$$

y

$$A_2 = \bar{A}_2; B_2 = \bar{B}_2; C_2 = \bar{C}_2; D_2 = \bar{D}_2; E_2 = \bar{E}_2; F_2 = \bar{F}_2; G_2 = \bar{G}_2; H_2 = \bar{H}_2; \quad (2.23)$$

$$I_2 = \eta(x = L)$$

A continuación, los coeficientes H_1 y H_2 se ajustan a través de un procedimiento iterativo a la primera derivada $\gamma(x)$ de los datos ruidosos de $\eta(x)$, siendo $0 \leq x \leq L$. A partir de la señal rellenada $f_1(x_1) \cup \eta(x) \cup f_2(x_2)$, donde $x_1 \leq 0$ y $x_2 \geq L$, $\gamma(x)$ es calculada numéricamente a través de la extrapolación de Richardson (Atkinson, 1989), lo que permite una aproximación de orden alto (por ejemplo, $O(dx^8)$, $O(dx^{10})$ o $O(dx^{12})$) de la derivada.

El procedimiento iterativo consta de los siguientes pasos:

- 1) $\gamma(x)$ se ajusta en un sentido de mínimos cuadrados a través de dos funciones polinomiales $\tilde{f}_1(x_1)$ y $\tilde{f}_2(x_2)$, de un grado menor con respecto a la de $f_1(x_1)$ y $f_2(x_2)$, tales como:

$$\tilde{f}_1(x_1) = \tilde{A}_1 x_1^7 + \tilde{B}_1 x_1^6 + \tilde{C}_1 x_1^5 + \tilde{D}_1 x_1^4 + \tilde{E}_1 x_1^3 + \tilde{F}_1 x_1^2 + \tilde{G}_1 x_1 + \tilde{H}_1 \quad (2.24)$$

con $0 \leq x_1 \leq \tilde{\beta}_1 L$

y

$$\tilde{f}_2(x_2) = \tilde{A}_2 x_2^7 + \tilde{B}_2 x_2^6 + \tilde{C}_2 x_2^5 + \tilde{D}_2 x_2^4 + \tilde{E}_2 x_2^3 + \tilde{F}_2 x_2^2 + \tilde{G}_2 x_2 + \tilde{H}_2 \quad (2.25)$$

con $-L(1 - \tilde{\beta}_2) \leq x_2 \leq 0$

Donde $\tilde{A}_1, \tilde{B}_1, \dots, \tilde{H}_1$ y $\tilde{A}_2, \tilde{B}_2, \dots, \tilde{H}_2$ son los coeficientes de la funciones polinomiales de ajuste, $\tilde{f}_1(x_1)$ y $\tilde{f}_2(x_2)$, respectivamente. La función $\tilde{f}_1(x_1)$ ajusta $\gamma(x)$ de $x = 0$ a $x = \tilde{\beta}_1 L$; mientras $\tilde{f}_2(x_2)$ ajusta $\gamma(x)$ $x = L(1 - \tilde{\beta}_2)$ a $x = L$; donde $\tilde{\beta}_1$ y $\tilde{\beta}_2$ puede variar en el rango de 0.1-1. En lo que sigue, a menos que no se especifique lo contrario, $\tilde{\beta}_1 = \beta_1$ y $\tilde{\beta}_2 = \beta_2$.

- 2) $\gamma(x)$ se recalcula a través de la extrapolación de Richardson a partir de la señal rellenada modificada $f_1(x_1) \cup \eta(x) \cup f_2(x_2)$, donde en $f_1(x_1)$ H_1 se sustituye por \tilde{H}_1 y en $f_2(x_2)$ H_2 se sustituye por \tilde{H}_2 .

Los pasos (1) y (2) se repiten hasta que los valores de H_1 y H_2 converjan. Puesto que la diferenciación de la señal original aumenta la cantidad de ruido, la aproximación de optimización descrita anteriormente no es efectiva para los otros coeficientes polinómicos, A_1, \dots, G_1 y A_2, \dots, G_2 . Obsérvese que las dos últimas igualdades de las ecuaciones (2.22) y (2.23) imponen la condición fundamental de la continuidad de la señal en los dos extremos. Además, hay que subrayar que se pueden lograr buenos resultados sin realizar el procedimiento de optimización relacionado con la primera derivada (es decir, asumiendo $H_1 = \bar{H}_1$ y $H_2 = \bar{H}_2$) y, de hecho, se podrían obtener mejores resultados en algunos casos, por ejemplo, cuando el nivel de ruido es alto. Las Figuras 2.7, 2.8 y 2.9 muestran respectivamente una señal de datos ruidosa genérica y sus derivadas primera y segunda extendidas a través de las funciones polinómicas $f_1(x_1)$ y $f_2(x_2)$ propuestas, y sus derivadas correspondientes. Estas figuras señalan que se cumplen las condiciones (i) y (ii), explicadas anteriormente.

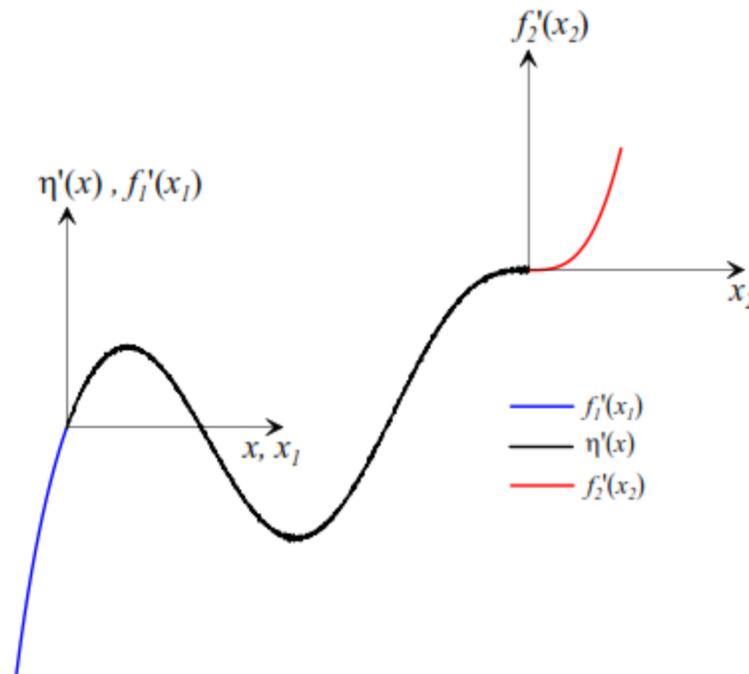


Fig.2.8. Se muestra la primera derivada de la señal ruidosa rellenada. Las funciones $\hat{f}_1(x_1)$ y $\hat{f}_2(x_2)$ extienden $\eta(x)$ suavemente. Tomado de (Montanari, 2014).

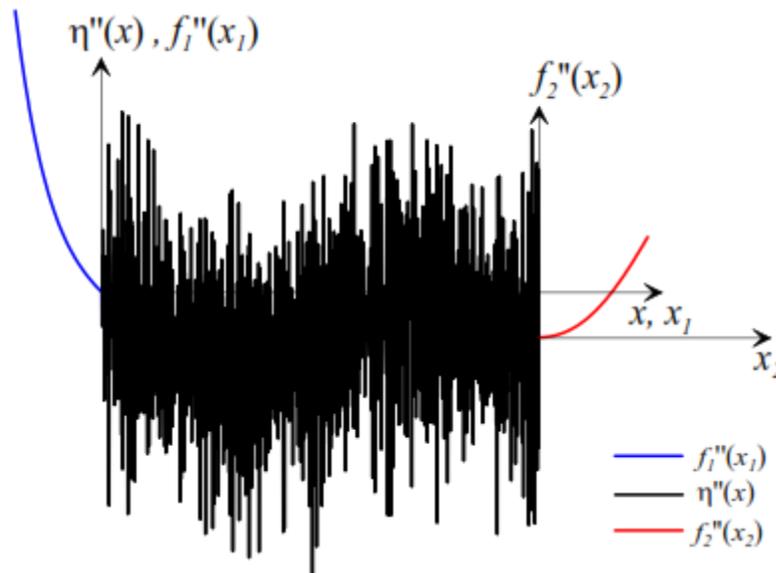


Fig.2.9. Se muestra la segunda derivada de la señal ruidosa rellenada. Aumentar el orden derivado de $\eta(x)$ conduce a un aumento del ruido. Sin embargo $f_1''(x_1)$ y $f_2''(x_2)$ siguen la tendencia media de $\eta''(x)$. Tomado de (Montanari, 2014).

2.7 Conclusiones parciales

- ✓ Los métodos basados en vibraciones presentan grandes ventajas, entre las que se encuentran: poder obtener un estado global de la estructura aun en condiciones de difícil acceso o instrumentación y no se interrumpe el servicio cotidiano. Además, brinda una detección temprana del daño minimizando los costos de reparación.
- ✓ Si en el sistema existen causas para producir discontinuidades en la señal que no se deban a defectos, estas se deben tener en cuenta para no producir informaciones

falsas. Tal es el caso de puntos de unión, articulaciones, apoyos rígidos, variaciones de cuantía de refuerzo, etc.

- ✓ En síntesis, para el análisis frecuencial de señales no estacionarias, las propiedades más importantes son: la cantidad de momentos de desvanecimiento que se asocia a la derivada y el tamaño del soporte que influye considerablemente en el tiempo de cálculo. También se debe considerar la existencia de la función de escala, ya que dependiendo del tipo de aplicación (CWT o DWT), algunas wavelets no podrán ser utilizadas. Sin embargo, la importancia de una propiedad sobre otra depende fundamentalmente de las necesidades del caso de aplicación.
- ✓ Comparada con la transformada continua, la DWT es más útil en compresión y eliminación del ruido mientras que la CWT se emplea más en reconocimiento de formas y detección y extracción de características de una señal.

CAPÍTULO 3 APLICACIÓN DE LOS ALGORITMOS DE IDENTIFICACIÓN DE DAÑOS A UN CASO DE ESTUDIO.

En este capítulo se aplican los algoritmos programados en MATLAB para la identificación de daños basados en la Transformada Wavelet Continua con el fin de determinar el daño inducido en los modelos por elementos finitos y en las señales obtenidas experimentalmente de la viga objeto de estudio, como parte fundamental del proceso de validación de los mismos. La metodología necesaria para desarrollar con éxito este procedimiento se especifica a continuación.

3.1 Procedimientos para la detección y localización de daños usando los algoritmos programados

La detección de daños puede realizarse de varias maneras en cuanto al estado de la estructura, este estudio aborda dos formas: la primera se basa en la detección del daño a partir del estado real de la estructura; la segunda ha sido muy usada durante años basada en la comparación entre dos estados diferentes del sistema, donde el inicial es a menudo el estado no dañado. Con el fin de resaltar la forma más eficiente se contrastan los resultados obtenidos por ambas.

3.1.1 Procedimiento usado para el primer algoritmo.

Analítico:

- 1) Modelado de la estructura dañada en SAP2000 mediante el MEF.
- 2) Llamar al modelo con la función mshape.
- 3) Analizar los datos obtenidos en mshape con el algoritmo de detección de daño.

Experimental:

- 1) Estructurar los datos en forma de una matriz de orden (N° de modos+1 por N° de nodos), que contiene en su primera fila, la ubicación de los nodos en la viga (coordenadas geométricas) y en las restantes filas las coordenadas modales.
- 2) Analizar los datos con el algoritmo de detección de daño.

3.1.2 Procedimiento usado para el segundo algoritmo

Analítico:

- 1) Modelado de la estructura dañada en SAP2000 mediante el MEF.
- 2) Modelado de la estructura sana (estado de referencia) en SAP2000 mediante el MEF.
- 3) Se llama a los modelos con la función mshape.
- 4) Analizar los datos obtenidos para cada modelo en mshape con el algoritmo de detección de daño.

Experimental:

- 1) Estructurar los datos del estado de referencia en forma de una matriz de orden (N° de modos+1 por N° de nodos), que contiene en su primera fila la ubicación de los nodos en la viga (coordenadas geométricas) y en las restantes filas los modos.
- 2) Estructurar los datos del estado real del elemento en forma de una matriz de orden (N° de modos+1 por N° de nodos), que contiene en su primera fila la ubicación de los nodos en la viga (coordenadas geométricas) y en las restantes filas los modos.
- 3) Obtener las frecuencias naturales de ubicación para cada modo, tanto del estado de referencia como del estado dañado. La variable que contiene las frecuencias debe ser un vector columna distribuido de manera que el primer elemento se corresponda con el primer modo que aparece en la matriz (fila 2) y así hasta el último valor de frecuencia que se corresponde con el último modo que aparece en la matriz de los modos.
- 4) Analizar los datos obtenidos con el algoritmo de detección de daño.

3.2 Análisis de los algoritmos de detección y localización de daños para datos analíticos.

Para el análisis de estos algoritmos se toman los modelos realizados por (O'Relly, 2016), modelados con ayuda del software SAP2000, dos vigas simplemente apoyadas de 4.8 m, con sección transversal de 0.25x0.40m y dividida a 12,48 y 96 tramos es decir 13, 49 y 97 puntos respectivamente. Al primer modelo se le reduce la inercia hasta un 35% en el tramo 3, mientras que para el segundo se le reduce hasta un 35% en el tramo 3 y hasta un 10% en el tramo 10. Este trabajo se realiza con el objetivo de obtener las i -ésimas formas modales de dicha viga, para los estados sin daño y dañado, que constituyen los principales datos de entrada para la aplicación de los métodos basados en vibraciones.

3.2.1 Análisis del tipo de daño a detectar y localizar en las vigas

En estos modelos realizados por (O'Relly, 2016) el daño se implementa como una delaminación, por lo que seguiremos la misma línea para al final llegar a comparaciones entre los métodos abordados por (O'Relly, 2016), los tratados por (Ramírez Cabrera, 2017) y los abordados en este trabajo de diploma. Es necesario resaltar que en la vida real no solo se encuentra la presencia de este tipo de daño, también podemos localizar grietas de diferentes tipos, por lo que se recomienda ampliar las investigaciones posteriores a este tipo de daños.

3.2.2 Análisis del número de puntos a medir

Se conoce que, en nuestro país las mediciones experimentales para estos métodos basados en vibraciones, se ven limitadas por la instrumentación debido al alto costo que poseen, lo que trae consigo, un análisis del elemento con la menor cantidad de puntos posibles, esto a su vez, puede enmascarar el daño. En este trabajo se realiza un estudio en cuanto a la cantidad de puntos o localidades necesarias en el análisis de un elemento estructural tipo viga por los algoritmos basados en la Transformada Continua Wavelet con el objetivo de resaltar en que rango estos brindan mejores resultados.

Para tratar este problema se toman como referencia los modelos de (O'Relly, 2016) pero se le hacen modificaciones en cuanto a la cantidad de divisiones (12,48,96) con el objetivo de ir variando los puntos analizados (13,49,97) del elemento para llegar a conclusiones sobre el funcionamiento de estos algoritmos en función de los puntos.

Después de desarrollar estos modelos con la cantidad de puntos descritos, se puede observar claramente que este aspecto es de suma importancia para lograr una correcta y segura detección y localización del daño, porque es evidente que, a medida que aumentan dichos

puntos los algoritmos visualizan con mayor exactitud el daño y lo representan en forma de picos en las zonas afectadas.

3.2.3 Análisis de la magnitud del daño

Para el análisis de este parámetro fue necesario inducir en los modelos de vigas, daños de diferentes magnitudes (reducción de la rigidez en un 65% y 90%) con el fin de describir el comportamiento de estos algoritmos a tales magnitudes.

Al analizar los resultados de los algoritmos, obtenidos a partir de la inducción de las diferentes magnitudes de daño descritas anteriormente, se puede observar que mientras mayor es el daño, mejor detectado y localizado podrá ser, dependiendo también de: la cantidad de puntos medidos, de la wavelet madre y de la escala para el procesamiento de los datos obtenidos (ver figura 3.1).

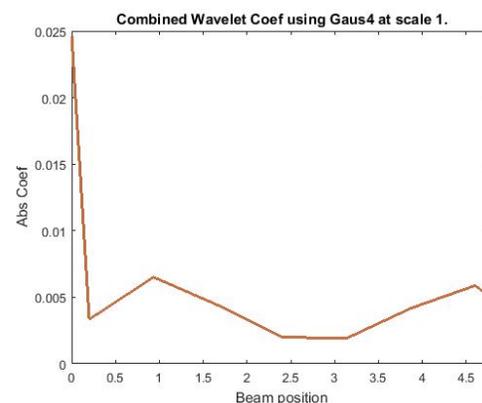
3.2.4 Análisis respecto a la detección y localización del daño

Resultados de los algoritmos a partir del modelo con un daño inducido:

a)

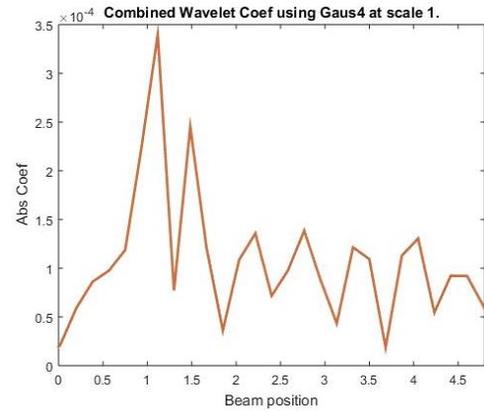


b)



c)

d)



e)

f)

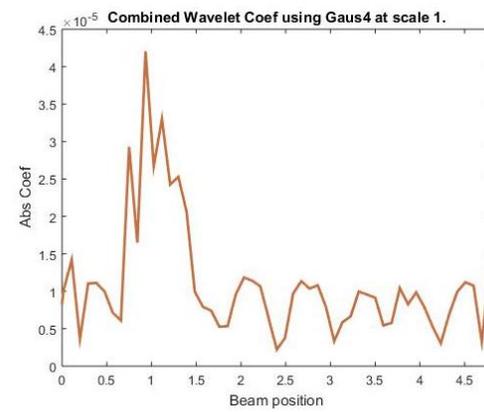


Fig.3.1. a),c) y e) Resultados obtenidos por el primer algoritmo mediante modelos variantes en la cantidad de puntos analizados: 13,49 y 97 puntos respectivamente; b), d) y f) Resultados obtenidos por el segundo algoritmo mediante modelos variantes en la cantidad de puntos analizados: 13,49 y 97 puntos respectivamente.

Resultados de los algoritmos a partir del modelo con dos daños inducidos:

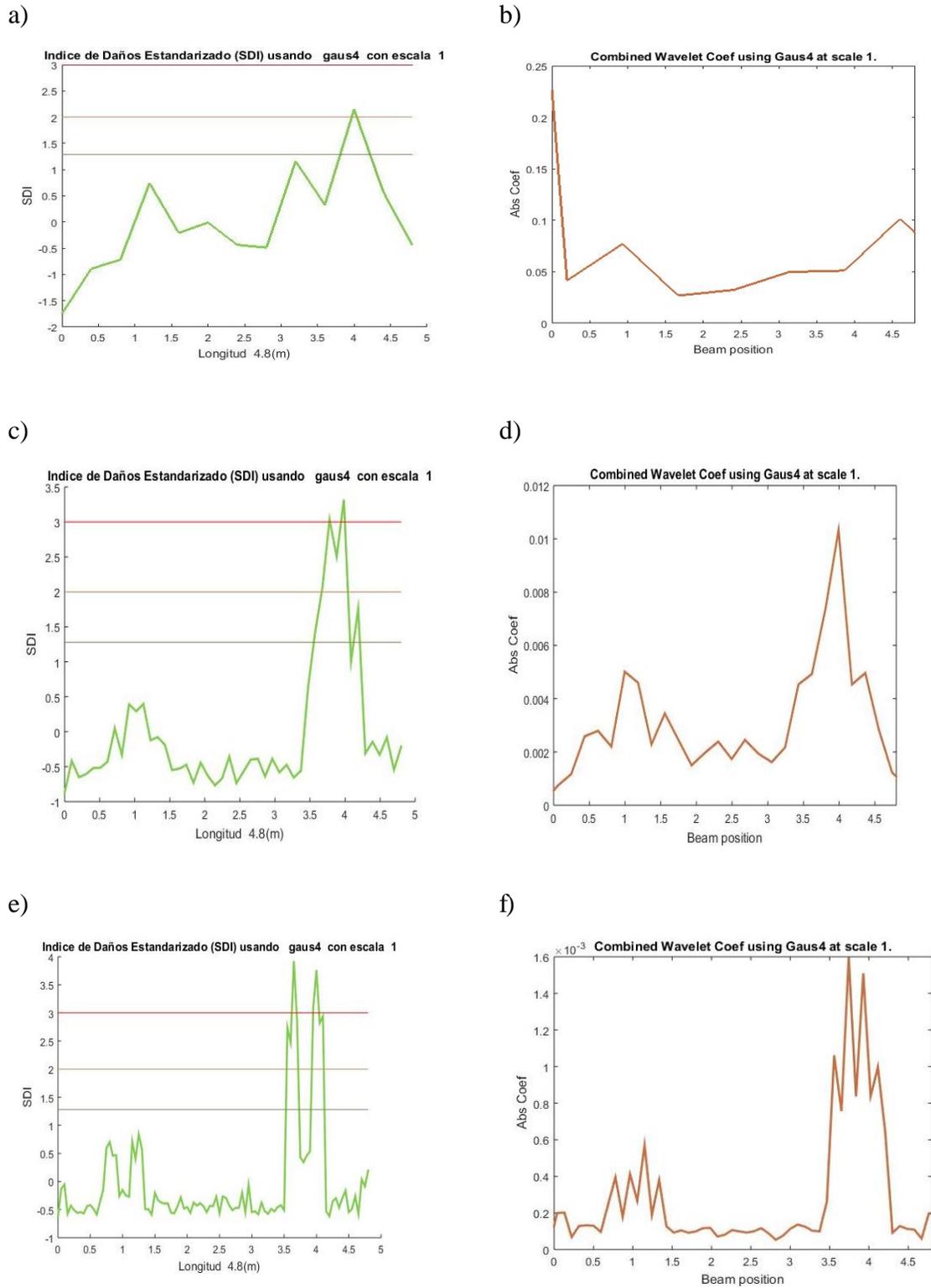


Fig.3.2. a),c) y e) Resultados obtenidos por el primer algoritmo mediante modelos variantes en la cantidad de puntos analizados: 13,49 y 97 puntos respectivamente; b), d) y f) Resultados obtenidos por el segundo algoritmo mediante modelos variantes en la cantidad de puntos analizados: 13,49 y 97 puntos respectivamente.

Se procesan las formas modales de ambos tipos de modelos con y sin daño en MATLAB y se prueban varias wavelets, del análisis se concluyó que la función gaussiana de orden 4 con nivel de escala $a=1$ (es el más sensible a los cambios y singularidades en la señal de entrada, permitiendo así una detección más clara del defecto) brinda resultados muy claros, tal como se muestra en las figuras 3.1 y 3.2.

En presencia de un daño en el elemento se obtienen mejores resultados por el primer algoritmo basado en la Transformada Continua Wavelet, logrando este, detectar y localizar el daño hasta para la mínima cantidad de puntos y con la menor magnitud de daño considerada, en el rango establecido (ver figura 3.1a, c y e); no siendo así para el segundo algoritmo, donde, solo se detecta y localiza el daño a partir del aumento de los puntos analizados (ver figura 3.1b, d y f).

En presencia de dos daños distribuidos en tramos diferentes del elemento, el primer algoritmo detecta y localiza con más precisión el daño de mayor magnitud para la menor cantidad de puntos examinados con respecto al segundo algoritmo, pero no detecta ni localiza para la magnitud más pequeña de daño empleada (ver figura 3.2a). Puede interpretarse este fenómeno como una ausencia de daño en el elemento analizado, debido a que solo lo detecta y localiza cuando lo crea suficiente como para alcanzar el estado de falla o puede ser consecuencia de la cantidad de puntos analizados, porque, para elementos examinados con una cantidad de puntos en el orden de las centenas se puede detectar y localizar sin problemas.

Además, se recomienda, si se tienen dos estados de referencia del sistema (donde el inicial es a menudo el no dañado), una comprobación por el segundo algoritmo, porque este, logra una detección y localización mucho más real, incluso, para la menor magnitud de daño, pero con la limitante de que necesita una mayor cantidad de localidades analizadas en el elemento (ver figura 3.2b, d y f).

De forma general, el primer algoritmo tiende a presentar mejores resultados que el segundo en cuanto a la detección del daño en el elemento con la menor cantidad de puntos analizados, no siendo así en la medida que se aumentan los puntos y la cantidad de daños, porque deja de reconocer aquellos de menor magnitud, aspecto que lo pone en desventaja con el segundo algoritmo.

3.2.5 Análisis del número de daños combinado con la magnitud de estos

Para el modelo que posee solo un daño, producido por una reducción de la inercia hasta un 35% en el tramo 3, el primer algoritmo muestra mejores resultados de detección y localización del daño para todos los casos analizados (con 13, 49 y 97 puntos).

Para el modelo con dos daños inducidos de magnitudes desiguales en diferentes tramos (reducción de la inercia hasta un 35% en el tramo 3 y hasta un 10% en el tramo 10), se verifica el comportamiento de este ante tal situación mediante el procesamiento por los algoritmos desarrollados, arrojando como resultados lo expuesto en epígrafes anteriores con respecto al primer algoritmo, pero, para magnitudes pequeñas no reconoce las zonas afectadas; aspecto que es vencido por el segundo algoritmo a medida que se aumentan los puntos analizados, manifestándose así, la eficiencia de este a la hora de detectar los daños con sus respectivas magnitudes.

3.3 Comparación de los resultados con los de otros métodos

Para darle veracidad a los algoritmos desarrollados y destacar bajo qué condiciones son recomendables usarlos, fue necesario contrastar con los métodos analizados por (O'Relly, 2016) y el tratado por (Ramírez Cabrera, 2017); estas comparaciones se realizan con los resultados obtenidos de los modelos tratados para 12 divisiones, es decir, 13 puntos. Luego se realiza un análisis entre los algoritmos tratados en este trabajo para la detección y localización de daños con el abordado por (Ramírez Cabrera, 2017) pero con una mayor cantidad de puntos.

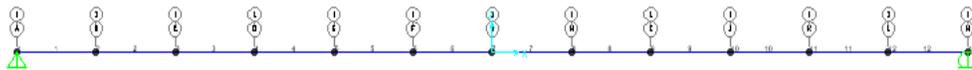


Fig.3.3. Modelo de viga utilizada.

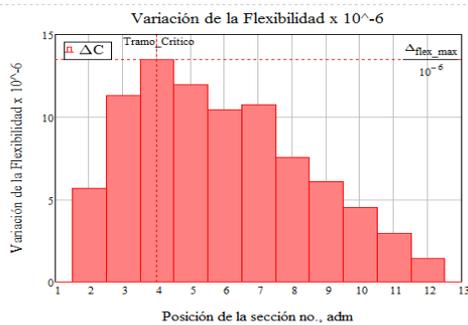
3.3.1 Viga de 4.8 metros con una reducción de la inercia hasta el 35% en el tramo 3.

Métodos tomados para el análisis:

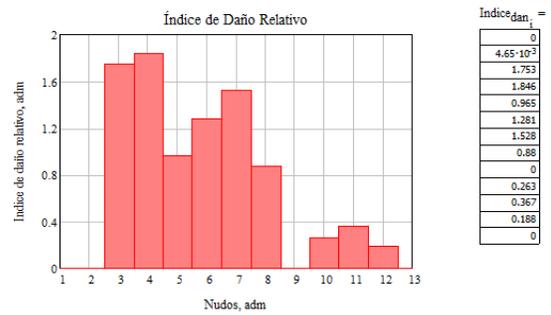
- 1) Método del cambio de la matriz de flexibilidad, medida dinámicamente (FM – Flexibility Method).

- 2) Método de Cálculo de la Rigidez Directa.
- 3) Método de Curvatura de las Formas Modales.
- 4) Método del Operador Laplaciano.
- 5) Primer algoritmo basado en Transformada Continua Wavelet.
- 6) Segundo algoritmo basado en Transformada Continua Wavelet.

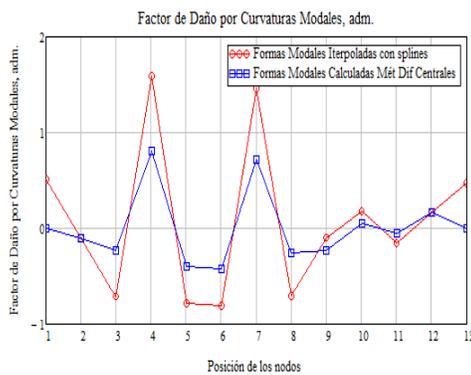
a)



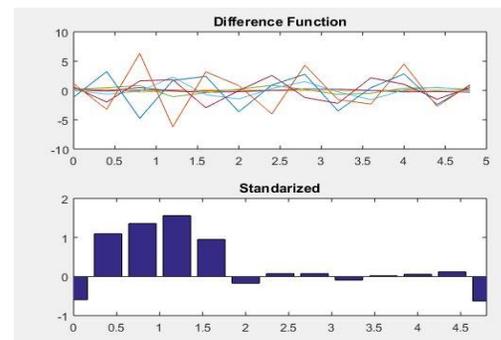
b)



c)



d)



e)

f)

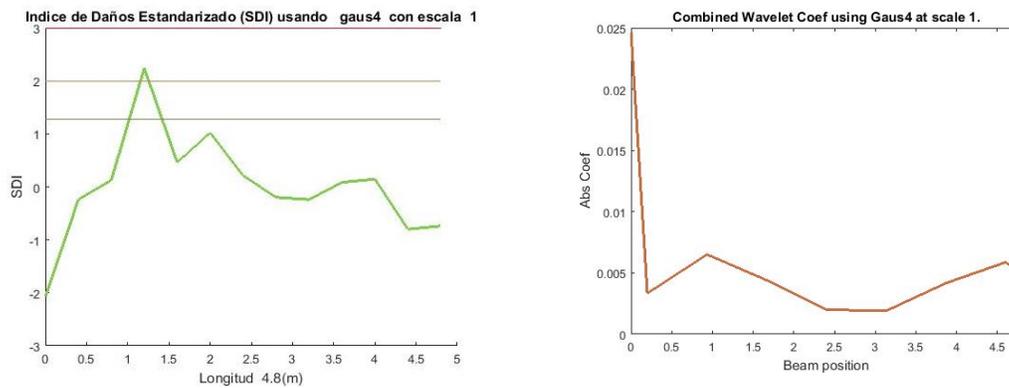


Fig.3.4. Resultados; a) por el método del cambio de la matriz de flexibilidad, medida dinámicamente, b) Por el método de Cálculo de la Rigidez Directa, c) Por el método de Curvatura de las Formas Modales, d) Por el método del Operador Laplaciano, e) Por el primer algoritmo basado en la Transformada Continua Wavelet, f) Por el segundo algoritmo basado en la Transformada Continua Wavelet.

Después de observar los resultados (figura 3.4) de cada uno de los métodos y analizar lo expuesto por (O'Relly, 2016) y por (Ramírez Cabrera, 2017) en sus respectivos trabajos se puede decir que: el método de Curvatura de las Formas Modales, detecta el daño inducido en el modelo(ver figura 3.4c); mientras que el método del cambio de la matriz de flexibilidad, el método de Cálculo de la Rigidez Directa, el método del Operador Laplaciano y el primer algoritmo basado en la Transformada Continua Wavelet detectan y localizan dicho daño (ver figura 3.4 a, b, d, e); no siendo posible lo antes expresado para el segundo algoritmo basado en la Transformada Continua Wavelet (ver figura 3.4 f).

De forma general se recomienda analizar los elementos estructurales con cada uno de los métodos que detectan el daño, una vez encontrado este en cada método, se pasaría a descubrir con los que localizan, la correcta ubicación del mismo.

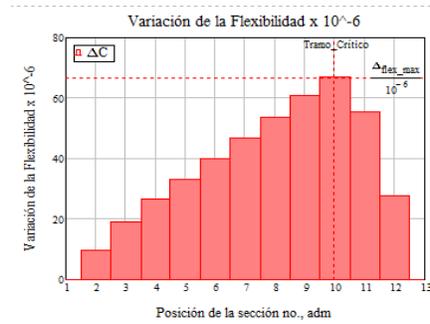
3.3.2 Viga de 4.8 metros con una reducción de la inercia hasta el 35% en el tramo 3 y con una reducción de la inercia hasta el 10% en el tramo 10

Métodos tomados para el análisis:

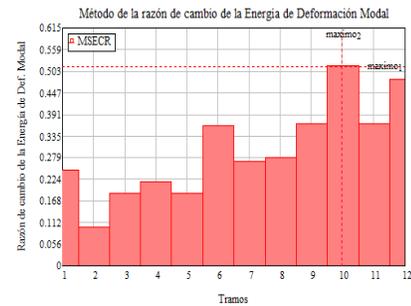
- 1) Método del cambio de la matriz de flexibilidad, medida dinámicamente (FM – Flexibility Method).
- 2) Relación de Cambio de la Energía de Deformación Modal (MSECR por sus siglas en inglés).

- 3) Método de Cálculo de la Rigidez Directa.
- 4) Método del Operador Laplaciano.
- 5) Primer algoritmo basado en la Transformada Continua Wavelet.
- 6) Segundo algoritmo basado en la Transformada Continua Wavelet.

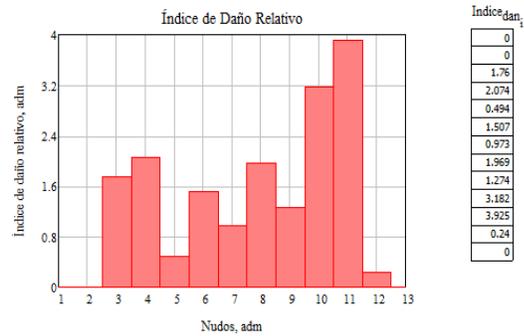
a)



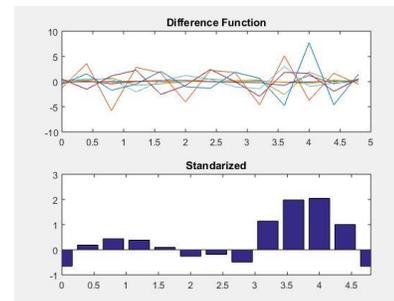
b)



c)



d)



e)



f)

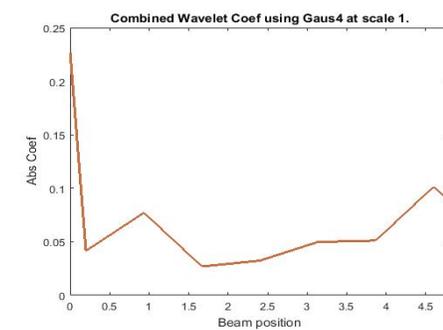


Fig.3.5. Resultados; a) por el método del cambio de la matriz de flexibilidad, medida dinámicamente, b) Por el método de Relación de Cambio de la Energía de Deformación Modal, c) Por el método de Cálculo

de la Rigidez Directa, d) Por el método del Operador Laplaciano, e) Por el primer algoritmo basado en la Transformada Continua Wavelet, f) Por el segundo algoritmo basado en la Transformada Continua Wavelet.

Después de observar los resultados (figura 3.5) de cada uno de los métodos y analizar lo expuesto por (O'Reilly, 2016) y por (Ramírez Cabrera, 2017) en sus respectivos trabajos se puede decir que: el método de Cálculo de la Rigidez Directa solo detecta los daños inducidos en el modelo(ver figura 3.5c) y el método del cambio de la matriz de flexibilidad, el método de Relación de Cambio de la Energía de Deformación Modal, el método del Operador Laplaciano y el primer algoritmo basado en la Transformada Continua Wavelet detectan y localizan el daño de mayor magnitud inducido en el modelo(ver figura 3.5a, b, d, e). Para el segundo algoritmo basado en la Transformada Continua Wavelet los daños no son reconocidos (ver figura 3.5f).

3.4 Análisis de los resultados obtenidos a partir de una mayor cantidad de puntos en el elemento

Métodos tomados para el análisis:

- 1) Método del Operador Laplaciano.
- 2) Primer algoritmo basado en la Transformada Continua Wavelet.
- 3) Segundo algoritmo basado en la Transformada Continua Wavelet.

3.4.1 Viga de 4.8 metros con una reducción de la inercia hasta el 35% en los tramos 9,10,11,12 y con 49 puntos

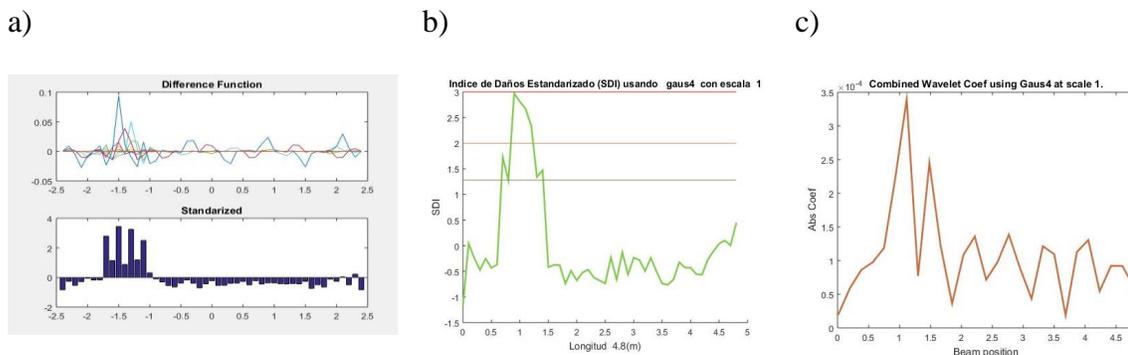


Fig.3.6. Resultados obtenidos con 49 puntos; a) por el método del Operador Laplaciano, b) Por el primer algoritmo basado en la Transformada Continua Wavelet y c) Por el segundo algoritmo basado en la Transformada Continua Wavelet.

De acuerdo a los resultados obtenidos por los métodos en el modelo que presenta 49 puntos (ver figura 3.6), se puede apreciar como el daño provocado por una reducción de la rigidez es detectado y localizado por: el método del Operador Laplaciano, el primer algoritmo y el segundo algoritmo basados en la Transformada Continua Wavelet (ver figura 3.6 a, b y c).

En caso de que se cuente solo con los datos reales del elemento se debe utilizar el método del Operador Laplaciano y el primer algoritmo basado en la Transformada Continua Wavelet para detectar y localizar el daño; pero si hay datos de un estado de referencia con respecto al estado deteriorado se recomienda detectar y localizar el daño por los dos algoritmos y el método del Operador Laplaciano para comprobar si es cierta la existencia del daño en el elemento. En la práctica al no saber la cantidad de daños existentes en el elemento y la magnitud de los mismos, se recomienda el empleo de los tres y a partir de los resultados arrojados, llegar a decisiones sobre si existe el daño y si este a su vez puede ocasionar la incapacidad de la estructura.

Se recomienda, siempre que se utilice uno de estos métodos para detectar y localizar daños, la verificación de la presencia por los demás, con el objetivo de lograr una mayor seguridad ante la existencia de los deterioros severos que puedan afectar el funcionamiento de la estructura en análisis.

3.4.2 Viga de 4.8 metros con una reducción de la inercia hasta el 35% en los tramos 9,10,11,12 y con una reducción de la inercia hasta un 10% en los tramos 37,38,39,40 y con 49 puntos

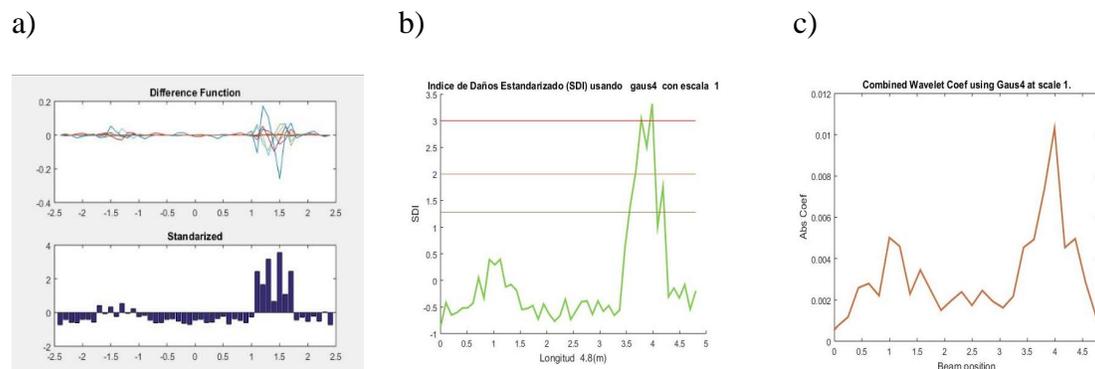


Fig.3.7. Resultados obtenidos con 49 puntos; a) por el método del Operador Laplaciano, b) Por el primer algoritmo basado en la Transformada Continua Wavelet y c) Por el segundo algoritmo basado en la Transformada Continua Wavelet.

Cuando se tienen dos daños en el elemento surgen nuevos resultados (ver figura 3.7), el segundo algoritmo basado en la Transformada Continua Wavelet detecta y localiza los daños (ver figura 3.7 c), no sucediendo lo mismo por el método del Operador Laplaciano y por el primer algoritmo basado en la Transformada Continua Wavelet, los cuales solo detectan y localizan el daño de mayor magnitud (ver figura 3.7 a, b). Recordar la limitante que tiene el segundo algoritmo con respecto a la necesidad del uso de estados de referencia para poder obtener resultados.

Cuando hay más de un daño en el elemento se recomienda utilizar el segundo algoritmo basado en la Transformada Continua Wavelet para detectar y localizar los daños siempre que se tengan los datos del estado de referencia con respecto al dañado. Además, se debe hacer uso del método del Operador Laplaciano y del primer algoritmo basado en la Transformada Continua Wavelet para verificar la presencia del daño de mayor magnitud.

En la práctica al no saber la cantidad de daños existentes en el elemento y la magnitud de los mismos, se recomienda el empleo de los tres y a partir de los resultados arrojados, llegar a decisiones sobre si existen daños y si estos a su vez pueden ocasionar la incapacidad de la estructura.

3.4.3 Viga de 4.8 metros con una reducción de la inercia hasta el 35% en los tramos 9,10,11,12 y con 97 puntos

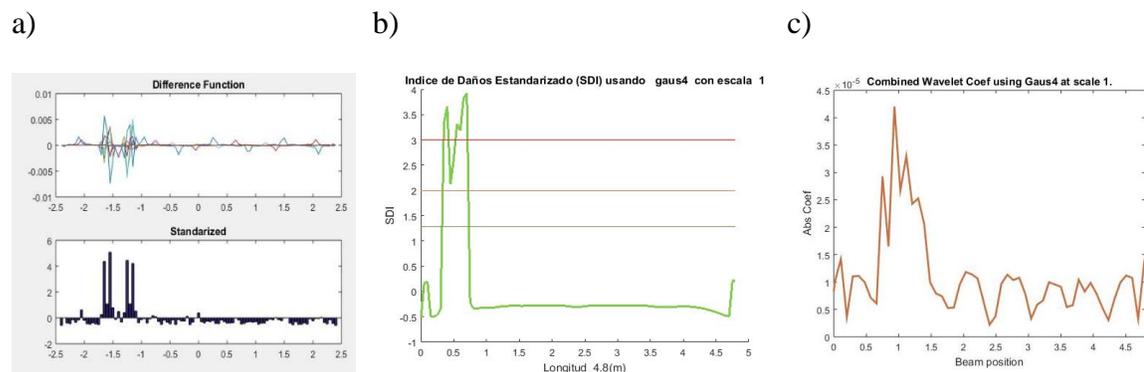


Fig.3.8. Resultados obtenidos con 97 puntos; a) por el método del Operador Laplaciano, b) Por el primer algoritmo basado en la Transformada Continua Wavelet y c) Por el segundo algoritmo basado en la Transformada Continua Wavelet.

Se puede observar a través de los resultados obtenidos (ver figura 3.8) como se mantiene lo expresado para la viga analizada con 49 puntos, resaltando, que, a medida que se aumentan las localidades examinadas se obtiene más exactitud a la hora de detectar y localizar el daño.

3.4.3 Viga de 4.8 metros con una reducción de la inercia hasta el 35% en los tramos 9,10,11,12 y con una reducción de la inercia hasta un 10% en los tramos 37,38,39,40 y con 97 puntos

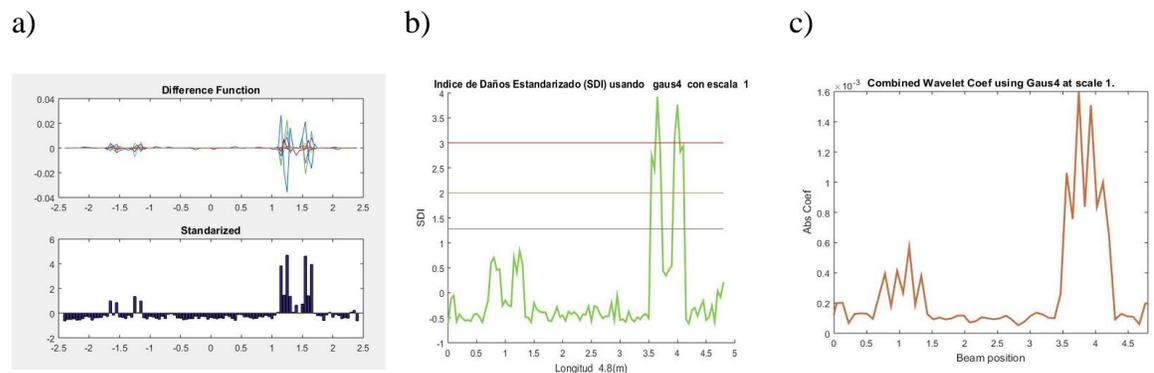


Fig.3.9. Resultados obtenidos con 97 puntos; a) por el método del Operador Laplaciano, b) Por el primer algoritmo basado en la Transformada Continua Wavelet y c) Por el segundo algoritmo basado en la Transformada Continua Wavelet.

Se puede observar a través de los resultados obtenidos (ver figura 3.9) como el segundo algoritmo mantiene su condición de detectar y localizar los daños, sumándose a él, el método del Operador Laplaciano; no siendo así para el primer algoritmo, el cual solo detecta y localiza el daño de mayor magnitud. Resaltándose que, en la medida que se aumentan las localidades examinadas se obtiene más exactitud a la hora de detectar y localizar los daños.

3.5 Aplicación de los algoritmos de detección de daños al caso en estudio experimental.

Como parte del análisis experimental de estos algoritmos, fue necesario poseer señales reales de un elemento tipo viga obtenidas a partir de ensayos dinámicos en dicho elemento; estos ensayos se realizaron en un laboratorio en la “Universidad Católica de Leuven”, en Bélgica. De donde se tomaron los resultados correspondientes a la viga designada por el número 4 en

la tesis de doctorado de (Maeck , 2003), la cual posee una longitud de 6m con sección transversal mostrada en la figura 3.10, con acero de refuerzo de 16 mm distribuido simétricamente y estribos de 8 mm espaciados a 200 mm en la longitud de la viga. Dando como peso total del elemento 750Kg.



Fig.3.10. Sección transversal de la viga y colocación del acero de refuerzo. Tomado de (Maeck , 2003).

De 12 estados de daño de la viga 4 (ver anexo V, figura V.1) producido por 8 magnitudes de cargas diferentes, en 2 fases de cargas del elemento (ver anexo V, figura V.1), se seleccionó el estado número 5 ver figura 3.11, al cual corresponde un daño producido por una carga puntual de 25 kN ubicada a 4 m, para ser evaluado por los algoritmos propuestos con el fin de darle veracidad a los mismos a la hora de detectar daños en las estructuras.

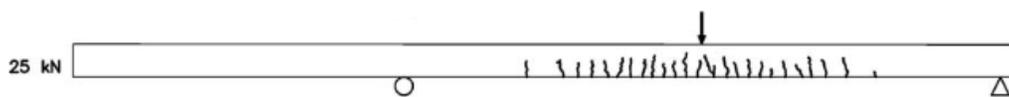


Fig.3.11. Grieta progresiva para la carga de 25 kN en la viga 4 correspondiente al estado de daño 6. Tomado de (Maeck , 2003).

Para la obtención de la respuesta dinámica (formas modales y frecuencias naturales; se mencionan solo estas porque son las que se requieren para un correcto funcionamiento de los algoritmos propuestos) de la viga número 4, se hizo necesario su ensayo a nivel de laboratorio con un total de 62 puntos medidos (ver figura 3.12).

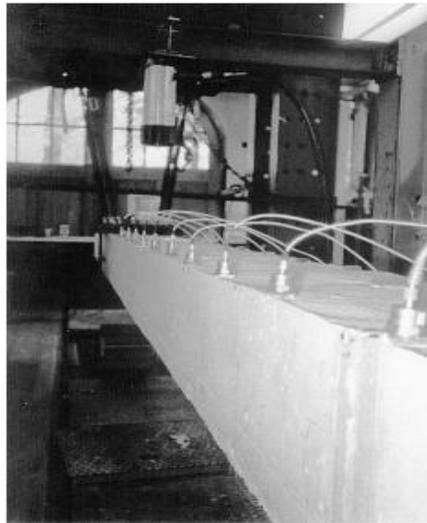


Fig.3.12. Colocación de los acelerómetros cada 200 mm por ambas direcciones. Tomado de (Maeck , 2003).

3.6 Análisis de los resultados

Se aplican los algoritmos propuestos basados en la Transformada Continua Wavelet a la respuesta dinámica de una viga simplemente apoyada. La metodología implementada supone la obtención de la respuesta para una carga puntual ubicada a 4 m, analizándose los resultados obtenidos a partir del estado de carga 6 correspondiente a la fase de carga 1. A partir de los resultados obtenidos, se caracteriza el efecto de la presencia de una grieta y se analiza la capacidad del método para la detección del daño.

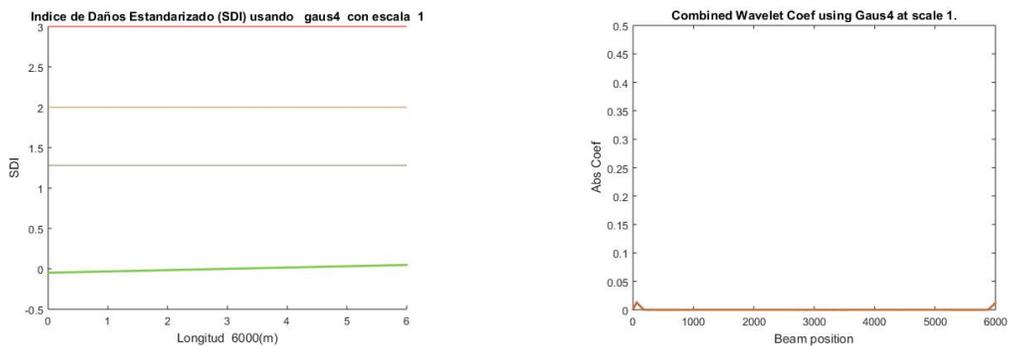


Fig.3.13. Resultados obtenidos por los dos algoritmos.

Se puede apreciar como ninguno de los dos algoritmos propuestos es capaz de detectar el daño correspondiente a una zona agrietada producida por una carga estática sostenida de 25 kN.

3.7 Conclusiones

Sobre la aplicación de los algoritmos se puede plantear lo siguiente:

- ✓ Para definir, de los algoritmos desarrollados, el más eficiente analíticamente para detectar una delaminación, se debe hacer un proceso iterativo de comprobación entre ambos, el cual depende, en gran medida, de las variables: puntos analizados, tipo de daño, magnitud del daño, wavelet madre, escala para el procesamiento de los datos obtenidos y de los estados de referencia del elemento.
- ✓ Existen diferentes funciones wavelet madres que pudieran ser empleadas para el análisis de los datos. En este trabajo se obtienen resultados muy claros con la Gaussiana de orden 4. A los efectos de la selección se deben tener en cuenta varios factores, entre estos: regularidad, soporte y número de momentos de desvanecimiento. En particular este último es decisivo para detectar singularidades en la señal.
- ✓ Se puede apreciar como los resultados obtenidos por los algoritmos del análisis de los datos alcanzados experimentalmente, no destacan ninguna discontinuidad en la localización del daño; por lo que no son recomendados para daños tipo grietas.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- ✓ La monitorización de daño estructural es un proceso que busca analizar los datos recibidos de la estructura de forma periódica o en tiempo real a partir de sensores colocados en la misma, estos permiten detectar cualquier tipo de anomalía para identificar daños, movimientos o degradación en la estructura que está siendo analizada. Para lograr una correcta monitorización e identificación de daños existen muchos aspectos críticos a tener en cuenta. Entre los más importantes se encuentran: las condiciones de excitación y medición, incluyendo la selección del tipo de sensores y su localización, así como el tipo y localización del excitador.
- ✓ Los métodos basados en vibraciones presentan grandes ventajas, entre las que se encuentran: poder obtener un estado global de la estructura aun en condiciones de difícil acceso o instrumentación y no se interrumpe el servicio cotidiano. Además, brinda una detección temprana del daño minimizando los costos anuales de reparación.
- ✓ Si en el sistema existen causas para producir discontinuidades en la señal que no se deban a defectos, estas se deben tener en cuenta para no producir informaciones falsas. Tal es el caso de puntos de unión, articulaciones, apoyos rígidos, variaciones de cuantía de acero, etc.
- ✓ En síntesis, para el análisis frecuencial de señales no estacionarias, las propiedades más importantes son: la cantidad de momentos de desvanecimiento que se asocia a la derivada y el tamaño del soporte que influye considerablemente en el tiempo de cálculo. También se debe considerar la existencia de la función de escala, ya que dependiendo del tipo de aplicación (CWT o DWT), algunas wavelets no podrán ser

utilizadas. Sin embargo, la importancia de una propiedad sobre otra depende fundamentalmente de las necesidades del caso de aplicación.

- ✓ Para definir, de los algoritmos desarrollados, el más eficiente analíticamente para detectar una delaminación, se debe hacer un proceso iterativo de comprobación entre ambos, el cual depende, en gran medida, de las variables: puntos analizados, tipo de daño, magnitud del daño, wavelet madre, escala para el procesamiento de los datos obtenidos y de los estados de referencia del elemento.
- ✓ Existen diferentes funciones wavelet madres que pudieran ser empleadas para el análisis de los datos. En este trabajo se obtienen resultados muy claros con la Gaussiana de orden 4. A los efectos de la selección se deben tener en cuenta varios factores, entre estos: regularidad, soporte y número de momentos de desvanecimiento. En particular este último es decisivo para detectar singularidades en la señal.
- ✓ Se puede apreciar como los resultados obtenidos por los algoritmos del análisis de los datos alcanzados experimentalmente, no destacan ninguna discontinuidad en la localización del daño; por lo que no son recomendados para daños tipo grietas.
- ✓ Para alcanzar un mayor grado de certeza en el diagnóstico de una determinada estructura es recomendable realizar el análisis por medio de los métodos presentados en este trabajo y en (Ramírez Cabrera, 2017) simultáneamente pues usan los mismos datos y tienen un pequeño costo computacional.

Recomendaciones

- Se recomienda usar los algoritmos empleados solo para delaminaciones y con una gran cantidad de puntos medidos en el elemento; además se deben contrastar los resultados con otros métodos con el fin de tomar una correcta decisión sobre la existencia del daño.
- Aplicar los algoritmos desarrollados en este trabajo a un elemento tipo viga de la estructura real de un puente, de la que se cuente con ensayos modales de calidad, donde el daño inducido sea una delaminación para comprobar su veracidad.

- Seguir profundizando en otros algoritmos (basados en el análisis wavelet) de detección y localización de daños en estructuras de puentes a partir de parámetros modales, que es un tema que es reciente en nuestro país.

Bibliografía

Janeliukstis, R. y otros, 2015. *Damage Identification in Beam Structure using Spatial Continuous Wavelet Transform*. Poland, s.n.

Maeck, J., 2003. *Damage Assessment of Civil Engineering Structures by Vibration Monitoring*. Bélgica: s.n.

Ramírez Cabrera, L., 2017. *Métodos para la detección de daños*. Cuba: s.n.

Alexander Cortés, J., Cano Garzón, H. B. & Chaves O., J. A., 2007. DEL ANÁLISIS DE FOURIER A LAS WAVELETS - TRANSFORMADA CONTINUA WAVELET (CWT). *Scientia et Technica Año XIII*, Issue 37, pp. 133-138.

Allemang, R. J. & Brown, D. L., 1982. *Correlation coefficient for modal vector analysis*. Orlando, Florida, USA: s.n.

Anaya Saltarín, C. E. & Barajas Ríos, C. A., 2011. *METODOLOGÍA PARA LA DETECCIÓN DE DAÑOS EN ESTRUCTURAS METÁLICAS EMPLEANDO LA TÉCNICA DE ANÁLISIS MODAL TEÓRICO-EXPERIMENTAL*, s.l.: s.n.

Ancona Lazcano, A. R., Salgado Estrada, R., Zamora Castro, S. A. & Marcial Martínez, F., 2011. *EVALUACIÓN DE MÉTODOS DE DETECCIÓN DE DAÑO EN ESTRUCTURAS MEDIANTE EL USO DE VIBRACIONES*.

Anderson, J. A. & Davis, J., 1995. *An introduction to neural networks (vol. 1)*. Cambridge, MA: s.n.

Andreus, U. & Baragatti, P., 2011. Cracked beam identification by numerically analysing the nonlinear behaviour of the harmonically forced response.. *Journal of Sound and Vibration*, 330(4), pp. 721-742.

Andreus, U. & Baragatti, P., 2012. Experimental damage detection of cracked beams by using nonlinear characteristics of forced response.. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volumen 31, pp. 382-404.

Atkinson, K., 1989. *An introduction to numerical analysis, 2nd edition*. New York: s.n.

Bo Chen, Zhi-wei Chen, Gan-jun Wang & Wei-pingXie, 2014. Damage Detection on Sudden Stiffness Reduction.

Bovsunovsky, A. P. & Surace, C., 2005. Considerations regarding superharmonic vibrations of a cracked beam and the variation in damping caused by the presence of the crack.. *Journal of Sound and vibration*, 288(4), pp. 865-886.

Cao, M. & Qiao, P., 2008. Integrated wavelet transform and its application to vibration mode shapes for the damage detection of beam-type structures.. *Smart materials and structures*, 17(5).

Cao, M. & Qiao, P., 2008. Integrated wavelet transform and its application to vibration mode shapes for the damage detection of beam-type structures.. *Smart Materials and Structures*, 17(5).

Córdoba, C. M., 2011. *Detección, localización y cuantificación de daño en material compuesto. Estudio numérico y experimental.*, s.l.: s.n.

Cremona, C., s.f. Dynamic monitoring of a high speed line bridge.

de Castro, R. M. y otros, 2004. *Introducción a la Transformada Wavelet para ingenieros: un enfoque didáctico.* México, s.n.

Doebbling, S. W., Farrar, C. R. & Goodman, R. S., 1997. *Effects of Measurement Statistics on the Detection of Damage in the Alamosa Canyon Bridge*, Orlando, Florida, 919-929: Proceedings of the 15th International Modal Analysis Conf.

Duménigo, A. C., 2015. *Métodos para la modelación y el análisis experimental de puentes frente a cargas dinámicas.* , s.l.: s.n.

Ewins, D. J., 2000. *Modal testing: theory, practice and application (vol.2).* s.l.:s.n.

Farrar, C. R. y otros, 1994. *Dynamic characterization and damage detection in the I-40 bridge over the Río Grande (No. LA-12767-MS).*. USA: s.n.

Farrar, C. R., Doebbling, S. W., Cornwell, P. J. & Straser, E. G., 1997. *Variability of Modal Parameters Measured on the Alamosa Canyon Bridge.*, Orlando, Florida, 257-263: Proceedings of the 15th International Modal Analysis Conf.

- Faundez, P. & Fuentes, A., s.f. *Procesamiento Digital de Señales Acústicas utilizando Wavelets.*, s.l.: s.n.
- Fernández, F. D. M., 2014. *Análisis de daños en estructuras mediante entropía espectral*, s.l.: s.n.
- Friswell, M. I., 2007. Damage identification using inverse methods. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365(1851), pp. 393-410.
- Gentile, A. & Messina, A., 2003. On the continuous wavelet transforms applied to discrete vibrational data for detecting open cracks in damaged beams.. *International Journal of Solids and Structures*, 40(2), pp. 295-315.
- Giannini, O., Casini, P. & Vestroni, F., 2013. Nonlinear harmonic identification of breathing cracks in beams.. *Computers & Structures*, Volumen 129, pp. 166-177.
- Goldberg, D. E., 1989. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning.* Reading, MA: s.n.
- Gómez-Luna, E., Silva, D. & Aponte, G., 2013. Selección de una wavelet madre para el análisis frecuencial de señales eléctricas transitorias usando WPD. *Ingeniare*, 21(2), pp. 262-272.
- Han, J. G., Ren, W. X. & Sun, Z. S., 2005. Wavelet packet based damage identification of beam structures.. *Journal of Solids and Structures*, 42(26), pp. 6610-6627.
- Haykin, S., 1999. *Neural Networks: A Comprehensive Foundation.* Englewood Cliffs, New Jersey: s.n.
- He, J. & Fu, Z. F., 2001. *Modal Analysis.* s.l.:s.n.
- Hera, A. & Hou, Z., 2003. Application of wavelet approach for ASCE structural health monitoring benchmark studies.. *Journal of Engineering Mechanics*, 130(1), pp. 96-104.
- Heylen, W., Lammens, S. & Sas, P., 1997. *Modal analysis theory and testing.* Leuven: s.n.
- Hou, Z., Noon, M. & Amand, R. S., 2000. Wavelet-based approach for structural damage detection.. *Journal of Engineering Mechanics*, 126(7), pp. 677-683.

- Janter, T. & Sas, P., 1990. Uniqueness aspects of model-updating procedures.. *AIAA journal*, 28(3), pp. 538-543.
- Kessler, S. S. y otros, 2002. Damage detection in composite materials using frequency response methods.. *Composites Part B: Engineering*, 33(1), pp. 87-95.
- Kim, J. T., Ryu, Y. S., Cho, H. M. & Stubbs, N., 2003. Damage identification in beam-type structures: frequency-based method vs mode-shape-based method.. *Engineering structures*, 2(1), pp. 57-67.
- Kramers, M. A., 1991. Nonlinear principal component analysis using autoassociative neural networks. *AICHE journal*, 37(2), pp. 233-243.
- Kramers, M. A., 1992. Autoassociative neural networks. *Computers in Chemical Engineering*, Volumen 16, pp. 313-328.
- Lang, Z. Q. & Billings, S. A., 1996. Output frequency characteristics of nonlinear systems.. *International Journal of Control*, 64(6), pp. 1049-1067.
- Lang, Z. Q. & Billings, S. A., 2005. Energy transfer properties of non-linear systems in the frequency domain.. *International Journal of control*, 78(5), pp. 345-362.
- Lang, Z. Q. y otros, 2011. Transmissibility of non-linear output frequency response functions with application in detection and location of damage in MDOF structural systems.. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 46(6), pp. 841-853.
- Lee, U. & Shin, J., 2002. A frequency response function-based structural damage identification method.. *Computers & Structures*, 80(2), pp. 117-132.
- Lieven, N. A. J. & Ewins, D. J., 1988. *Spatial correlation of modespaces: the coordinate modal assurance criterion (COMAC)*. Florida, USA: Proceedings of the 6 International Modal Analysis Conference 1063-1070.
- Liew, K. M. & Wang, Q., 1998. Application of wavelet theory for crack identification in structures.. *Journal of Engineering Mechanics*, Volumen 124, pp. 152-157.
- Loutridis, S., Douka, E. & Trochidis, A., 2004. Crack identification in doblecracked beams using wavelet analysis.. *Journal of Sound and Vibration*, 277(4), pp. 1025-1039.

- Lowe, D., 2000. *Feature extraction, data visualisation, classification and fusion for damage assessment*. Derby, UK., Oral Presentation at EPSRC SIDANet Meeting.
- Mallat, S., 2001. *A wavelet tour on signal processing*.. New York: s.n.
- Marwala, T., 2010. *Finite Element Model Updating Using Computational Intelligence Techniques: Applications to Structural Dynamics*. s.l.:Springer.
- McCulloch, W. S. & Pitts, W., 1943. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity.. *The Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5(4), pp. 115-133.
- Melhem, H. & Kim, H., 2003. Damage detection in concrete by Fourier and wavelet analyses.. *Journal of Engineering Mechanics*, 129(5), pp. 571-577.
- Menache, M. M., Rolando Salgado Estrada, Castro y Elsa G. Lagunes Lagunes & Sergio A. Zamora, 2012. Detección de daño en puentes mediante un modelo experimental.
- Mertins, A., 1999. *Signal Anaysis: Wavelet, Fitter Banks, Time-Frequency, Transforms and applications*.. Chichester: s.n.
- Messina, A., 2004. Detecting damage in beams through digital differentiator filters and continuous wavelet transforms.. *Journal of Sound and vibration*, 272(1), pp. 385-412.
- Misiti, M., Misiti, Y., Oppenheim, G. & Poggi, J., 2000. *Wavelet Toolbox*.. s.l.:s.n.
- Misiti, M., Misiti, Y., Oppenheim, G. & Poggi, J., 2007. *MatLab Wavelet Toolbox 4. Guía del Usuario*.
- Montanari, L., 2014. *VIBRATION-BASED DAMAGE IDENTIFICATION IN BEAM STRUCTURES THROUGH WAVELET ANALYSIS* , s.l.: s.n.
- Montanari, L., Basu, B., Spagnoli, A. & Broderick, B. M., 2013. Damage Assessment in a Cracked Fiber-Reinforced Cantilever Beam Using Wavelet Kurtosis Techniques.. *Key Engineering Materials*, Volumen 569, pp. 1226-1233.
- Nagarajaiah, S. & Basu, B., 2009. Output only modal identification and structural damage detection using time frequency & wavelet techniques.. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 8(4), pp. 583-605.

Navarro Henríquez, F. & Ureña Muñoz, D., 2014. Mediciones y análisis de vibraciones en el puente Virilla, ruta nacional N° 1.. *Tecnología en Marcha*, pp. 28, 16-32.

O'Reilly, I. B. G., 2016. *Métodos para la detección, localización y evaluación de daños en estructuras de puentes a partir de parámetros modales.*, s.l.: s.n.

Oyadiji, S. O. & Zhong, S., 2011. Detection of cracks in simply-supported beams by continuous wavelet transform of reconstructed modal data.. *Computers & Structures*, 89(1-2), pp. 127-148.

Pakrashi, V., Basu, B. & O'Connor, A., 2007. Structural damage detection and calibration using a wavelet-kurtosis technique.. *Engineering Structures*, 29(9), pp. 2097-2108.

Pakrashi, V., Basu, B. & O'Connor, A., 2009. A statistical measure for wavelet based singularity detection.. *Journal of vibration and acoustics*, 131(4).

Palacz, M. & Krawczuk, M., 2002. Vibration parameters for damage detection in structures.. *Journal of Sound and Vibration*, 249(5), pp. 999-1010.

Pandey, A. K. & Biswas, M., 1994. Damage detection in structures using changes in flexibility.. *Journal of sound and vibration*, 169(1), pp. 3-17.

Pandey, A. K., Biswas, M. & Samman, M. M., 1991. Damage detection from changes in curvature mode shapes.. *Journal of sound and vibration*, 145(2), pp. 321-332.

Peng, Z. K., Lang, Z. Q. & Chu, F. L., 2008. Numerical analysis of cracked beams using non linear output frequency response functions.. *Computers & Structures*, 86(17), pp. 1809-1818.

Peng, Z. K. y otros, 2011. Feasibility study of structural damage detection using NARMAX modelling and Nonlinear Output Frequency Response Function based analysis.. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25(3), pp. 1045-1061.

Radzieński, M., Krawczuk, M. & Palacz, M., 2011. Improvement of damage detection methods based on experimental modal parameters.. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25(6), pp. 2169-2190.

Rao, S. S., 2010. *Mechanical vibrations.* s.l.:s.n.

Ren, W. X. & Sun, Z. S., 2008. Structural damage identification by using wavelet entropy.. *Engineering Structures*, 30(10), pp. 2840-2849.

- Richardson, M. H. & Formenti, D. L., 1985. *Gloval Curve Fitting of Frequency Response Measurements using the Rational Fraction Polynomial Method*. s.l., s.n.
- Rucka, M., 2011. DAMAGE DETECTION IN BEAMS USING WAVELET TRANSFORM ON HIGHER VIBRATION MODES.
- Rucka, M., 2011. Damage detection in beams using wavelet transform on higher vibration modes.. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, Volumen 49, pp. 399-417.
- Rucka, M. & Wilde, K., 2006a. Crack identification using wavelets on experimental static deflection profiles.. *Engineering structures*, 28(2), pp. 279-288.
- Rucka, M. & Wilde, K., 2006b. Application of continuous wavelet transform in vibration based damage detection method for beams and plates.. *Journal of Sound and Vibration*, 297(3), pp. 536-550.
- Rytter, A., 1993. *Vibration based inspection of Civil Engineering structures*, Denmark: s.n.
- Salawu, O. S. & Williams, C., 1995. Bridge assessment using forced-vibration testing.. *Journal of Structural Engineering*, 121(2), pp. 161-173.
- Sampaio, R. P. C., Maia, N. M. M. & Silva, J. M. M., 1999. Damage detection using the frequency-response-function curvature method.. *Journal of Sound and Vibration*, 226(5), pp. 1029-1042.
- Schwarz, B. & Richardson, M., 1999. *Experimental Modal Analysis*.. s.l.:s.n.
- Serra, R. & Lopez, L., 2016. *NEW COMBINED WAVELET METHODOLOGY FOR VIBRATION-BASED DAMAGE DETECTION*. Francia, s.n.
- Sohn, H., 2007. Effects of environmental and operational variability on structural health monitoring.. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365(1851), pp. 539-560.
- Solis, M., Algaba, M. & Galvan, P., 2013. A combined wavelet-modal analysis for damage location in beams.. *Proc. Int. Conf. Noise Vib. Eng.ISMA 2012*, pp. 777-790.
- Staszewski, W. J. & Robertson, A. N., 2007. Time frequency and time scale analyses for structural health monitoring.. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*., 365(1851), pp. 449-477.

Staszewski, W. J., Worden, K., Wardle, R. & Tomlinson, G. R., 2000. Failsafe sensor distributions for impact detection in composite materials. *Smart Materials and Structures*, 9(3), p. 298.

Surace, C. & Ruotolo, R., 1994. *Crack detection of a beam using the wavelet transform..* Honolulu, Hawaii, 1141-1147, s.n.

Torres, D. E. V., Luis E. Suárez & Ricardo R. López, s.f. IDENTIFICACIÓN DE DAÑOS EN VIGAS DE HORMIGÓN EXPERIMENTALES Y ANALÍTICAS UTILIZANDO MÉTODOS MODALES.

Tsyfansky, S. L. & Beresnevich, V. I., 2000. Non-linear vibration method for detection of fatigue cracks in aircraft wings.. *Journal of sound and vibration*, 236(1), pp. 49-60.

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

Wang, Q. & Wu, N., 2011. Detecting the delamination location of a beam with a wavelet transform: an experimental study.. *Smart Materials and Structures*, 20(1).

Wang, Q. & Deng, X., 1999. Damage detection with spatial wavelets.. *International Journal of Solids and Structures*, Volumen 36, pp. 3443-3468.

Worden, K. & Duijvelde, J. M., 2004. An overview of intelligent fault detection in systems and structures.. *Structural Health Monitoring*, 3(1), pp. 85-98.

Yan, Y. J., Cheng, L., Wu, Z. Y. & Yam, L. H., 2007. Development in vibration-based structural damage detection technique. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21(5), pp. 2198-2211.

Zhong, S. & Ouyang, S. O., 2011a. Crack detection in simply supported beams using stationary wavelet transform of modal data.. *Structural Control and Health monitoring*, 18(2), pp. 169-190.

Zhong, S. & Ouyang, S. O., 2011. Detection of cracks in simply-supported beams by continuous wavelet transform of reconstructed modal data.. *Computers & Structures*, 89(1-2), pp. 127-148.

ANEXOS

Anexo I. Características y propiedades de las wavelets más comunes

Tabla I. 1. Características y propiedades de las wavelets más comunes. Tomado de (Gómez-Luna, et al., 2013)

	Haar	Mexican Hat	Morlet	Daubechies	Symmlets	Coiflets	Gaussiana	Biorthogonal	Reverse Biorthogonal	Meyer	Discrete Meyer
Propiedades	(haar)	(mexh)	(morl)	(dbN)	(symN)	(coifN)	(gausN)	(biorNr.Nd)	(rbioNr.Nd)	(meyr)	(dmeY)
Orden (N)	---	---	---	1,2,...,45	1,2,...,41	1,2,...,5	1,2,...,44	1.1,1.3,...,6.8	1.1,1.3,...,6.8	---	---
Regularidad	No	Sí	Sí	Relativa	Relativa	Relativa	Sí	Relativa	Relativa	Sí	Sí
Tamaño del soporte	1	(-5,5)	(-4,4)	2N-1	2N-1	6N-1	(-5,5)	2Nd+1	2Nr+1	(-8,8)	(-8,8)
Longitud del filtro	2	---	---	2N	2N	6N	---	---	---	---	---
Simetría	Sí	Sí	Sí	No	Aproximada	Aproximada	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Momentos de desvanecimiento	1	---	---	N	N	2N	---	Nr	Nd	---	---
Función de escala	Sí	No	No	Sí	Sí	Sí	No	Sí	Sí	No	Sí
CWT	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible
DWT	Posible	No Permite	No Permite	Posible	Posible	Posible	No Permite	Posible	Posible	No Permite	Posible
Expresión explícita	Sí	Sí	Sí	No	No	No	Sí	No	No	Sí	Sí

Anexo II. Wavelets más comunes

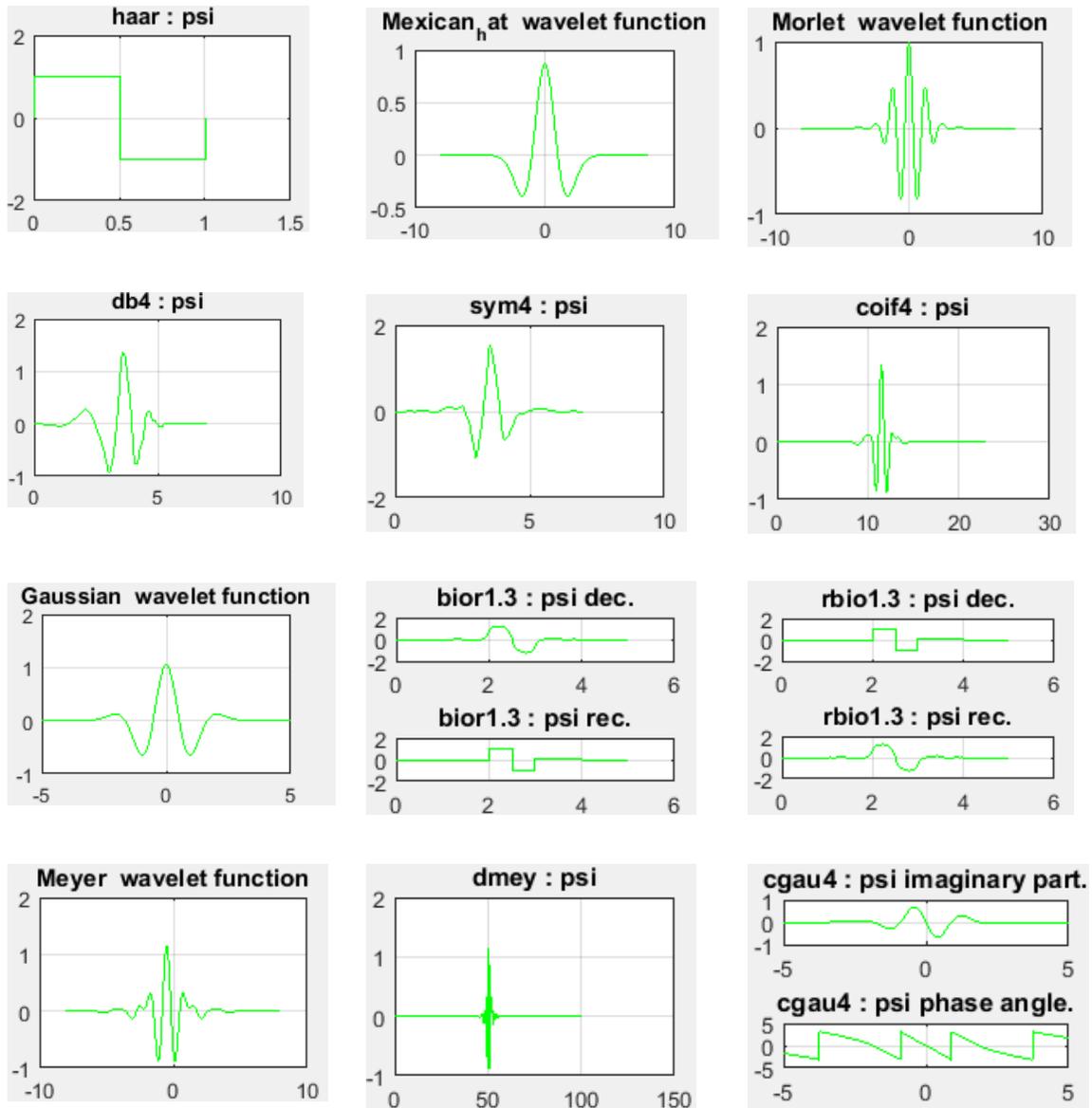


Fig.II.1. Representación de las wavelets más comunes.

Anexo III. Algoritmo básico para producir la Transformada Continua Wavelet

La transformada Wavelet continua es la suma para todo x o t de la señal multiplicada por la versión escalada y multiplicada de la Wavelet. Al efectuar este cálculo, se obtienen valores denominados coeficientes que son función de la escala y la posición donde se efectuó la convolución. Esta tarea se puede resumir en 5 pasos que se describen así (Alexander Cortés, et al., 2007):

- 1) Escoja una Wavelet, que, de ser posible, se aproxime en su forma a la señal a tratar. Compárela con la parte inicial de la señal original. Una vez seleccionada la Wavelet se inicia el algoritmo con $b=1$ y se calcula la transformada continua para todos los valores de b , mayores y menores que 1. No obstante, dependiendo de la señal no siempre es necesaria una transformación total. Para efectos prácticos, los intervalos de la señal se limitan en ancho de banda, por lo que la carga computacional de la transformación se limita a un intervalo de escalas estrictamente adecuado.
- 2) Determine el valor del coeficiente C efectuando la integral de la convolución entre la señal y la Wavelet. El resultado de la integración es multiplicado por un número constante $1/\sqrt{b}$ con el objeto de normalizar la energía de tal forma que la señal transformada tenga la misma energía para cada escala. El resultado indica que tanto se parece la parte escogida de la señal con la Wavelet. Cuanto mayor sea el valor del coeficiente C , más próxima es la similaridad entre la Wavelet y la parte de la señal tratada en este tramo.
- 3) Desplace la señal hacia la derecha y repita los dos primeros pasos hasta que se cubra toda la señal.
- 4) Ajuste la escalar de la Wavelet (estírela o encójala) y repita desde los pasos 1 al 3 hasta el nivel de escalamiento a deseado.
- 5) Repita los pasos 1 al 4 para todas las escalas.

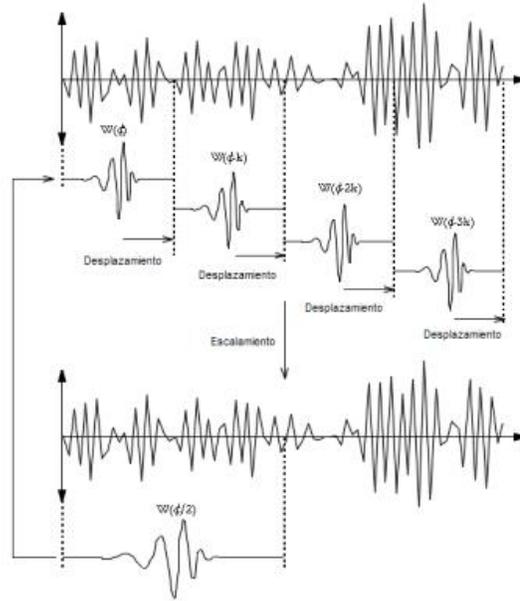


Fig.III.1. Ilustración del algoritmo. Tomado de (Alexander Cortés, et al., 2007).

Anexo IV. Programación de los algoritmos realizada en MATLAB para detectar y localizar el daño

En este anexo se presentan las programaciones realizadas en MATLAB para la detección y localización del daño en elementos estructurales. Se describen las programaciones de los dos algoritmos desarrollados, la función de obtención de las formas modales y frecuencias naturales y el método para tratar el efecto de borde.

Anexo IV.1. Función que obtiene las formas modales y las frecuencias naturales del modelo por elementos finitos

```

ComW_2.m x mshape.m x Padding2.m x W_A2.m x +
1  function [ShapeMatrix] = mshape(-)
2  % (la función mshape obtiene las coordenadas modales del modelo FEM de una viga, así
3  % como la coordenada x de cada punto que se le obtenga la forma modal, su
4  % objetivo fundamental es simular datos experimentales para ser procesados
5  % con métodos de detección de daños.
6  clear ShapeMatrix n_node;
7  feature('COM_SafeArraySingleDim', 1);
8  feature('COM_PassSafeArrayByRef', 1);
9  SapObject = actxserver('sap2000v16.SapObject');
10 SapObject.ApplicationStart;
11 filepath='D:\UNIVERSIDAD\MI TESIS\DETECCIÓN DE DAÑOS\MIS COSAS\Dairo1-5\modelos_de_SAP\Ines\';%Directorio del modelo SAP.
12 fileName='V_SANA.96dv';
13 ret = SapObject.SapModel.File.OpenFile...
14 ([filepath,fileName,'.sdb']);%Poner la dirección del fichero de matcad, incluido el nombre del mismo con la extensión.sdb
15
16 %% Creando el Objeto SapModel
17
18 %% Creando el Objeto SapModel
19 SapModel = SapObject.SapModel;
20
21 % Para desbloquear el modelo
22
23 ret = SapModel.SetModelIsLocked(0);
24
25 % Creando el modelo de análisis
26 ret = SapModel.Analyze.CreateAnalysisModel;
27
28 %% UNITS SELECTION
29 ret = SapModel.SetPresentUnits(6);
30 %% Set solver analysis options
31 ret=SapModel.Analyze.SetSolverOption(1,false,'MODAL');
32
33 %% Correr Análisis
34 ret = SapObject.SapModel.Analyze.RunAnalysis();
35
36 %% Deseleccionando todos los casos y combinaciones de salida
37 ret = SapModel.Results.Setup.DeselectAllCasesAndCombosForOutput;
38
39 %% Seleccionando el caso y combinación de salida
40 ret = SapModel.Results.Setup.SetCaseSelectedForOutput('MODAL');
41
42 %% Obtención del periodo modal
43 NumberResults = 0;
44 Obj = cellstr(' ');
45 Elm = cellstr(' ');
46 LoadCase = cellstr('MODAL');
47 StepType = cellstr('Mode');
48
49 StepNum = zeros(1,1,'double');
50 Period = zeros(1,1,'double');
51 Frequency = zeros(1,1,'double');
52 CircFreq = zeros(1,1,'double');
53 EigenValue = zeros(1,1,'double');
54
55 [~, ~, ~, ~, ~, ~, Frequency, CircFreq, ~] = ...
56 SapModel.Results.ModalPeriod(NumberResults, LoadCase, StepType, StepNum, Period, Frequency, CircFreq, EigenValue);
57
58 omega = CircFreq.'; % Natural frequency [rad/s]
59 %% Obtención de las formas modales (coordenadas modales)
60
61 NumberResults = 0;
62 Obj = cellstr(' ');
63 Elm = cellstr(' ');
64 ACase = cellstr('MODAL');

```

```

63 - StepType = cellstr('Mode');
64 - StepNum = zeros(1,1,'double');
65 - U1 = zeros(1,1,'double');
66 - U2 = zeros(1,1,'double');
67 - U3 = zeros(1,1,'double');
68 - R1 = zeros(1,1,'double');
69 - R2 = zeros(1,1,'double');
70 - R3 = zeros(1,1,'double');
71 - GroupElm = 2;
72 - %para ver lo que significan los parametros de la funcion siguiente, de la
73 - %OAPI poner en la ayuda csi oapi documentation "modal shape".
74 - [~, ~, Obj, ~, ~, ~, StepNum, ~, ~, U3, ~, ~, ~] = ...
75 - SapModel.Results.ModeShape...
76 - ('All', GroupElm, NumberResults, Obj, Elm, ACase, StepType, StepNum, U1, U2, U3, R1, R2, R3);
77 -
78 - % phix = U1; % COordenadas de las formas modales en X

79 - % phiy = U2; % COordenadas de las formas modales en Y
80 - phiz = U3; % COordenadas de las formas modales en Z
81 -
82 -
83 - n_m=max(StepNum); % number of modes
84 - n_node=length(phiz)/n_m; % number of nodes
85 -
86 - phiz_=zeros(n_node,n_m); % intermediate matrix
87 - for ind1=1:n_m
88 -     phiz_(:,ind1)= phiz(:,1:n_node);
89 -     phiz(:,1:n_node)=[];
90 - end
91 - phi=phiz_;
92 - nodes=zeros(n_node,1);
93 - for ind1=1:n_node
94 -     nodes(ind1)=str2double(Obj{ind1});

95 - end
96 - %% Coordenadas de los nodos.
97 -
98 - % Punto=zeros(1,n_node);%preallocating
99 - Coord=zeros(1,n_node);%preallocating
100 - for i=1:n_node
101 -     Name=num2str(nodes(i));%define entry type
102 -     x=zeros(1,1,'double');%define entry type
103 -     y=zeros(1,1,'double');%define entry type
104 -     z=zeros(1,1,'double');%define entry type for the OAPI function below
105 -     [~,x]=SapObject.SapModel.PointElm.GetCoordCartesian(Name,x,y,z);
106 -     % Punto(i)=Name;
107 -     Coord(i)=x;
108 - end
109 - % b=[phi' omega];
110 - b=(0:n_m)';

111 - a=[Coord;phi'];
112 - for j=1:n_node-1;
113 -     for i=1:n_node-1;
114 -         if a(1,i+1)<a(1,i);
115 -             a(1:n_m+1,i:i+1)=fliplr(a(1:n_m+1,i:i+1));%intercambia las columnas de manera que quedan las coordenadas de los puntos en orden
116 -             end
117 -         end
118 -     end
119 - %Se pueden eliminar de la matriz los modos identificados que no tengan
120 - %coordenadas en z.
121 - isg=round(a,4)==0;
122 - j=0;
123 - a=[b a];
124 - for i=1:n_m
125 -     if all(isg(i,:))=1
126 -         a(i-j,:)=[];

```

```

127 -         j=j+1;%seria el numero de filas eliminadas
128 -     else
129 -     end
130 - end
131 - b=a(:,1);
132 - omega=omega(b(2:end));
133 -
134 - ShapeMatrix=a(:,2:end);
135 - cd('D:\UNIVERSIDAD\MI TESIS\DETECCIÓN DE DAÑOS\MIS COSAS\Dairo1-5\Casos de Estudio')%para trabajar en la carpeta señalada. Poner la dirección
136 - mkdir(fileName)%Crea una nueva carpeta en la dirección señalada con el nombre del caso de estudio.
137 - cd(['D:\UNIVERSIDAD\MI TESIS\DETECCIÓN DE DAÑOS\MIS COSAS\Dairo1-5\Casos de Estudio\',fileName]);
138 - save modal_shapes ShapeMatrix omega ;
139 - cd('D:\UNIVERSIDAD\MI TESIS\DETECCIÓN DE DAÑOS\MIS COSAS\Dairo1-5\matlabfiles_damage_assessment');
140 -
141 - %% Cerrando la aplicación Sap2000
142 -     ret = SapObject.ApplicationExit(false());
143 -
144 -     SapModel = 0;
145 -     SapObject = 0;
146 -     %% Copia de los documentos que contienen las matrices de rigidez y de masa.
147 -     [status,message] = copyfile([filepath,fileName,'.txk'],['D:\UNIVERSIDAD\MI TESIS\DETECCIÓN DE DAÑOS\MIS COSAS\Dairo1-5\Casos de Estudio\',fileName]);
148 -     [status,message] = copyfile([filepath,fileName,'.txm'],['D:\UNIVERSIDAD\MI TESIS\DETECCIÓN DE DAÑOS\MIS COSAS\Dairo1-5\Casos de Estudio\',fileName]);
149 -     status
150 -     message
151 -
152 - end

```

Fig.IV.1.1. Programación en MATLAB para la función de extracción de los parámetros dinámicos del modelo.

Anexo IV.2. Primer algoritmo de detección de daño

```

1  function []=W_A2(-)
2  %Metodo de detección de daño basado en Janeliukstis 2015.
3  scale=1;
4  wav='gaus4';
5  nvalues=97;%Numero de puntos que interpola usando como dato las coordenadas modales.
6
7  %% Directorio del caso de estudio
8
9  fileName='V_35.96div';%nombre del caso de estudio.
10
11  filePath=['D:\UNIVERSIDAD\MI TESIS\DETECCIÓN DE DAÑOS\MIS COSAS\Dairo1-5\Casos de Estudio\',fileName,'\'];%Directorio donde se encuentra el caso
12
13  load([filePath,'modal_shapes']);
14
15  % load('E:\Cosas de Dairo\VIBRAS\Deteccion de Daños\matlabfiles_damage_assessment\Coordenadas Modales\Viga_0.45x0.25x5m10dv.mat');
16  [a,n_node]=size(ShapeMatrix);
17
18  n_m=a-1;
19
20  ShapeMatrix1=ShapeMatrix(2:end,:);
21  xs=ShapeMatrix(1,:);%Valores de las abscisas que corresponden con el modelo en SAP.
22
23  L=xs(end)-xs(1);%Longitud de la viga.
24
25  x=linspace(0,L,nvalues);%Valores de las abscisas que van de cero a L.
26  step=x(2)-x(1);
27  step1=xs(end)-xs(end-1);
28  x_0=(0:-step:-2);
29  x_0=flip1r(x_0);x_0=x_0(1:end-1);
30  x_f=(L:step:L+2);x_f=x_f(2:end);
31  xref=linspace(0,L,n_node);
32  x_c=[x_0 x_f];%Vector que contiene las abscisas
33  w=length(x_c);%cantidad de valores de la señal incrementada.

```

```

33 - mode=zeros(n_m,w);%Preallocating
34 - for i=1:n_m
35 -     y=ShapeMatrix1(i,:);
36 -     mode(i,:)=interp1(xref,y,x_c,'pchip');
37 - end
38 - DI_matrix=ones(n_m,nvalues);
39 - DI_norm=ones(n_m,nvalues);
40 - r=length(x_0);
41 - for i=1:n_m
42 -     Y=mode(i,:);
43 -     CWTcoeffs=cwt(Y,scale,wav);
44 -     DI_matrix(i,:)=CWTcoeffs(r+1:r+nvalues);
45 -     DI_norm(i,:)=DI_matrix(i,:)/max(abs(DI_matrix(i,:)));
46 - end
47 -
48 - DI=sum(abs(DI_norm))/n_m;

49 - SDI=(DI-mean(DI))/(std(DI));
50 - figure
51 - hold on
52 - plot(x,SDI,'color',[0.5 0.8 0.3],'linewidth',2);
53 - plot(x,3*ones(1,length(x)),'r');
54 - plot(x,2*ones(1,length(x)),'color',[0.8 0.5 0.3]);
55 - plot(x,1.28*ones(1,length(x)),'color',[0.5 0.5 0.3]);
56 - xlabel(['Longitud ',num2str(L),' (m)']);
57 - ylabel('SDI');
58 - title(['Índice de Daños Estandarizado (SDI) usando ',wav,' ...
59 -       ' con escala ',num2str(scale)]);
60 - end

```

Fig.IV.2.1. Programación en MATLAB del primer algoritmo basado en la transformada continua wavelet.

Anexo IV.3. Segundo algoritmo de detección de daño

```

ComW_2.m x mshape.m x Padding2.m x W_A2.m x +
1 %%Metodo de detección de daño propuesto por Serra 2016.
2 function[]=ComN_2(-)
3 scale=1;
4 close all
5 wav='Gaus4';
6 nvalues=97;%Numero de puntos que interpola usando como dato las coordenadas modales.
7
8 fileName1='V_SANA.96dv';%nombre del caso de estudio. Estado de Referencia.
9 fileName2='V_SANA.96dv';%nombre del caso de estudio. Estado Deteriorado.
10
11 filePath1=['D:\UNIVERSIDAD\MI TESIS\DETECCIÓN DE DAÑOS\MIS COSAS\Dairo1-5\Casos de Estudio\',fileName1,'\'];%Directorio donde se encuentra el
12 filePath2=['D:\UNIVERSIDAD\MI TESIS\DETECCIÓN DE DAÑOS\MIS COSAS\Dairo1-5\Casos de Estudio\',fileName2,'\'];
13
14 load([filePath1,'modal_shapes']);
15 % load('E:\Cosas de Dairo\VIBRAS\Deteccion de Daños\matlabfiles_damage_assessment\Coordenadas Modales\VigaSana_0.45x0.25x5m10dv.mat');
16 [e,n_node]=size(ShapeMatrix);

17 - omegal=omega;
18 - n_m=a-1;
19 - ShapeMatrix1=ShapeMatrix(2:end,:);
20 - xs=ShapeMatrix(1,:);%Valores de las absisas que corresponden con el modelo en SAP.
21 -
22 - L=xs(end)-xs(1);%Longitud de la viga.
23 -
24 - x=linspace(-2,L+2,nvalues);%Valores de las absisas que van de cero a L.
25 -
26 - xref=linspace(0,L,n_node);
27 -
28 - model=zeros(n_m,nvalues);
29 - for i=1:n_m
30 -     y=ShapeMatrix1(i,:);
31 -
32 -     model(i,:)=interp1(xref,y,x,'pchip');

```

```

33 - end
34
35 - %% Damaged state.
36 - load([filePath2,'modal_shapes']);
37 - mode2=zeros(n_m,nvalues);
38 - ShapeMatrix1=ShapeMatrix(2:end,:);
39 - omega2=omega;
40 - for i=1:n_m
41 -     y=ShapeMatrix1(i,:);
42 -     mode2(i,:)=interp1(xref,y,x,'pchip');
43 - end
44
45 - difMode=mode2-mode1;
46 - wcoeff_difmode=difMode;
47 - CWTweighted=wcoeff_difmode;
48 - for i=1:n_m
49 -     wcoeff_difmode(i,:)=cwt(difMode(i,:),scale,wav);
50 -     CWTweighted(i,:)=wcoeff_difmode(i,:)*(1-omega1(i)/omega2(i))^2;
51 - end
52 - sumCWTweighted=sum(abs(CWTweighted));
53 - plot(x,sumCWTweighted,'color',[200 111 66] ./ 255,'linewidth',2);
54 - xlim([0 L]);
55 - title(['Combined Wavelet Coef using ',wav,' at scale ',num2str(scale),'.']);
56 - ylabel('Abs Coef')
57 - xlabel('Beam position')
58
59 - % plot(x,mode2(1,:),xref,ShapeMatrix1(1,:),'o');
60 - % xlim([0 L]);
61 - end

```

Fig.IV.3.1. Programación en MATLAB del segundo algoritmo basado en la transformada continua wavelet.

Anexo IV.4. Programación en MATLAB del método que trata el efecto de borde

```

ComW_2.m x mshape.m x Padding2.m x W_A2.m x +
1 - metodo tratado para el efecto de borde
2
3
4 - function [x_axis,y_ord,L]=Padding2(s,dis_med,mode,ShapeMatrix)
5
6 - %% load modal_shapes; % Cuando leemos modal_shapes se obtienen las variables ShapeMatrix y n_node
7
8 - global n_node n_m n_values L
9
10 - ShapeMatrix1=ShapeMatrix(2:end,:); %Matriz que solo contiene las coordenadas modales.
11
12 - [n_m,n_node]=size(ShapeMatrix1); %Numero de nodos.
13
14 - xs=ShapeMatrix(1,:); %Valores de las absisas que corresponden con el modelo en SAP.
15
16 - L=xs(end)-xs(1); %Longitud de la viga.
17
18 - delta_x=abs(xs(2)-xs(1)); %Intervalo de muestreo. (Puntos de mediciones)
19
20 - x=linspace(0,L,n_node); %Valores de las absisas que van de cero a L.
21
22 - n_values=round(dis_med*s); %Puntos a considerar hacia afuera de la senal.
23
24 - beta=0.9/mode; %Valores de beta (ver apartado(poner el apartado) de Castellanos 2017).
25
26 - fit_points=round(beta*L/delta_x); %Puntos hacia adentro que se toman en cuenta para hacer el ajuste de curva.
27
28 - if fit_points<9
29 -     fit_points=9;
30 - end
31
32 - %Adding Noisse.
33 - %%
34 - p_noise=0; %Porciento de ruido en la senal(0.01=1%)

```

```

35 - ShapeMatrix1=ShapeMatrix1+ShapeMatrix1.*(p_noise*(2*rand(n_m,n_node)-1));
36 - %=====
37 - %%
38 - %Definicion de las absisas
39 -
40 - X1=zeros(1,fit_points);
41 - X2=zeros(1,fit_points);
42 - for i=1:fit_points
43 -     X1(i)=(i-1)*delta_x;
44 -     X2(i)=-(i-1)*delta_x;
45 - end
46 - X2=fliplr(X2);
47 -
48 - x_0=zeros(1,n_values);
49 - x_f=zeros(1,n_values);
50 - X_0=zeros(1,n_values);
51 - X_f=zeros(1,n_values);
52 - for i=1:n_values
53 -     x_0(i)=x(1)-(i-1)*delta_x;
54 -     x_f(i)=x(end)+(i-1)*delta_x;
55 -     X_0(i)=-(i-1)*delta_x;
56 -     X_f(i)=(i-1)*delta_x;
57 - end
58 - x_0=fliplr(x_0);
59 - X_0=fliplr(X_0);
60 - X_axis=[x_0(1:end-1) x x_f(2:end)];
61 - %=====
62 - %%
63 - %Obtencion de los polinomios que austan en los puntos a la izquierda y la
64 - %derecha de la curva.
65 -
66 - %Seleccion de los puntos a considerar
67 - y1=ShapeMatrix1(mode,1:fit_points);
68 -
69 - y2=ShapeMatrix1(mode,(n_node-fit_points+1:n_node));
70 - % y2=fliplr(y2);
71 -
72 - coef_fx1=polyfit(X1,y1,8);
73 - coef_fx2=polyfit(X2,y2,8);
74 -
75 - %%
76 - %=====
77 - %si se le quita el estado de comentario a esta parte del script se obtiene
78 - %la comparacion entre los datos y la funcion de interpolacion.
79 - %
80 -
81 - % ss=polyval(coef_fx2,X2);
82 - % subplot(2,1,1);
83 - % plot(X2,ss);
84 - % title('Fitting Function');
85 - % subplot(2,1,2);
86 -
87 - % plot(x,ShapeMatrix1(mode,:));
88 - % title('Modal Shape');
89 - %=====
90 - %%
91 - coef_fx1(end)=ShapeMatrix1(mode,1);%igualando los coeficientes a los extremos de la senal
92 - coef_fx2(end)=ShapeMatrix1(mode,end);
93 -
94 - %obtencion de los puntos fuera de la senal.
95 - fx1=polyval(coef_fx1,X_0);
96 - fx2=polyval(coef_fx2,X_f);
97 -
98 - y_ord=[fx1(1:end-1) ShapeMatrix1(mode,:) fx2(2:end)];%Senal extendida
99 -
100 - %=====
101 - %Cálculo de la primera derivada de la senal usando la extrapolacion de
102 - %Richardson

```

```

103 - y_ordDer1=zeros(1,n_node);
104 - y_ordDer2=zeros(1,n_node);
105 - for i=n_values:n_node+n_values-1
106 -     y_ordDer1(i-n_values+1)=(y_ord(i+2)-y_ord(i-2))/(4*delta_x);
107 -     y_ordDer2(i-n_values+1)=(y_ord(i+1)-y_ord(i-1))/(2*delta_x);
108 -     % y_ordDer1(:,i-n_values)=-y_ord(:,i+4)+8*y_ord(:,i+2)-...
109 -     %     8*y_ord(:,i-2)+y_ord(:,i-4))/(24*delta_x);
110 -     % y_ordDer2(:,i-n_values)=-y_ord(:,i+2)+8*y_ord(:,i+1)-...
111 -     %     8*y_ord(:,i-1)+y_ord(:,i-2))/(12*delta_x);
112 - end
113 - y_ordDer=4/3*y_ordDer2-1/3*y_ordDer1;
114 - % p_sigDer=[x;y_ordDer];
115 - %=====
116 - %Obtencion de los polinomios que austan en los puntos a la izquierda y la
117 - %derecha de la derivada de los modos.
118 -
119 - yd1=y_ordDer(1:fit_points);

120 -
121 - yd2=y_ordDer(end-fit_points+1:end);
122 - % yd2=fliplr(yd2);
123 -
124 -
125 - coefD_fx1=polyfit(X1,yd1,7);
126 - coefD_fx2=polyfit(X2,yd2,7);
127 - %%
128 - %Proceso iterativo para hacer converger los coeficientes H1 y H2. Ver
129 - %apartado (poner el numero del apartado)de Castellanos 2017.
130 -
131 - n=1;
132 - for k=1:50
133 -     if (coefD_fx1(end)~=coef_fx1(end-1)) || (coefD_fx2(end)~=coef_fx2(end-1))
134 -         coef_fx1(end-1)=coefD_fx1(end);
135 -         coef_fx2(end-1)=coefD_fx2(end);
136 -
137 -         %evaluacion del polinomio con los coeficientes cambiados en el modo i.
138 -
139 -         fx1=polyval(coef_fx1,X_0);
140 -         fx2=polyval(coef_fx2,X_f);
141 -
142 -         %senal renovada
143 -         y_ord=[fx1(1:end-1) ShapeMatrix1(mode,:) fx2(2:end)];
144 -
145 -         %Derivada de la senal renovada
146 -         for j=n_values:n_node+n_values-1
147 -             y_ordDer1(j-n_values+1)=(y_ord(j+2)-y_ord(j-2))/(4*delta_x);
148 -             y_ordDer2(j-n_values+1)=(y_ord(j+1)-y_ord(j-1))/(2*delta_x);
149 -             % y_ordDer1(i,j-n_values)=-y_ord(i,j+4)+8*y_ord(i,j+2)-...
150 -             %     8*y_ord(i,j-2)+y_ord(i,j-4))/(24*delta_x);
151 -             % y_ordDer2(i,j-n_values)=-y_ord(i,j+2)+8*y_ord(i,j+1)-...
152 -             %     8*y_ord(i,j-1)+y_ord(i,j-2))/(12*delta_x);
153 -         end

154 -         y_ordDer=4/3*y_ordDer2-1/3*y_ordDer1;
155 -
156 -         yd1=y_ordDer(1:fit_points);
157 -
158 -         yd2=y_ordDer(n_node-fit_points+1:n_node);
159 -         % yd2=fliplr(yd2);
160 -
161 -         coefD_fx1=polyfit(X1,yd1,7);
162 -         coefD_fx2=polyfit(X2,yd2,7);
163 -         n=n+1;
164 -     end
165 - end
166 -
167 -
168 - %%
169 -
170 - % Obtencion de la senal extendida.

```

```

171     % fx1(i,:)=polyval(coef_fx1(i,:),X_0);
172     % fx2(i,:)=polyval(coef_fx2(i,:),X_f);
173
174
175
176 -   x_axis=[x_0(1:end-1) x x_f(2:end)];%eje "x" de la senal extndida.
177 -   y_ord=[fx1(1:end-1) ShapeMatrix1(mode,:) fx2(2:end)];%Senal extendida
178     % p_signal=[x_axis;y_ord];%Matriz que contiene los pares ordenados, por columnas.
179     % n
180     % coef_fx1(end-1)
181     % coefD_fx1(end)
182     % coef_fx2(end-1)
183     % coefD_fx2(end)
184     % y_ord
185     % X2
186     %
187     % plot(x_0,fx1,'r',x,ShapeMatrix1(mode,:),'b',x_f,fx2,'r')
188
189 -   % xlim([-1 L+1]);
190 -   end

```

Fig.IV.4.1. Programación en MATLAB del método que trata el efecto de borde.

Anexo V. Forma de inducción del daño para el análisis experimental

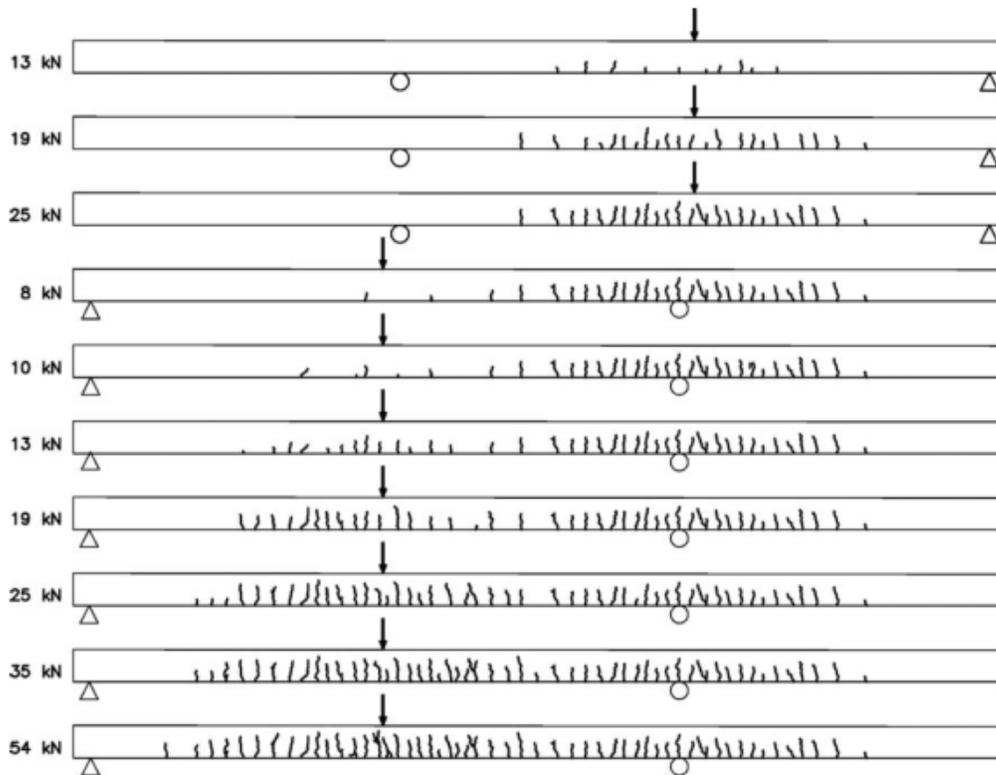


Fig. V.1. Grieta progresiva producida por diferentes cargas en las vigas. Tomado de (Maeck , 2003).

Anexo VI. Factores de los que depende una adecuada detección de daños utilizando los métodos basados en vibraciones.

La adecuada detección del daño en estructuras con los métodos de detección de daño propuestos dependerá de factores como:

- ✓ **Severidad del daño:** Porcentajes mayores al 10% de la reducción de la rigidez del elemento son adecuadamente detectados con el uso de uno de los métodos de mejor comportamiento, porcentajes menores de dicha cantidad solo pueden ser detectados por la combinación de uno o más métodos de detección de daño.
- ✓ **Localización del daño:** Tendrán más probabilidad de detección los daños localizados en las amplitudes más grandes de las formas modales. Dicho daño puede ser mejor detectado con la combinación de varios métodos.
- ✓ **Extensión del daño:** Cuando el daño afecta una región extensa es más probable que sea detectado. Sin embargo, la localización y la severidad en conjunto con la extensión determinan la calidad de la detección, principalmente si se tratan de delaminaciones (daño presente cerca de los extremos del elemento, con una extensión grande y de poca severidad) de los materiales estructurales.
- ✓ **Condiciones de frontera:** No influye demasiado en la detección y localización del daño. Sin embargo, afectan en su magnitud.
- ✓ **Número de formas modales:** El daño tiene muchas más probabilidades de ser detectado con el uso de un mayor número de formas modales en el análisis.
- ✓ **Elección de los parámetros de detección:** Elegir correctamente los valores constantes usados en el análisis determinan en gran parte la detección del daño (Ancona Lazcano, et al., 2011).

Anexo VII. Metodología de aplicación de los métodos de detección de daño basados en vibraciones

A continuación, se propone una metodología para la aplicación de los métodos para la localización, detección y evaluación de daños a partir de ensayos dinámicos. Una de ellas es la siguiente, tomada de (Ancona Lazcano, et al., 2011):

- 1) **Inspección visual de la estructura.** Si el daño no es detectado visualmente entonces es posible empezar un proceso de detección de daño basados en vibraciones. En caso

contrario, se pueden aplicar métodos locales de detección para estimar la correcta localización del daño y si es posible su magnitud.

2) Investigación de la respuesta dinámica de la estructura previa al daño. En todo caso, es conveniente realizar un modelo de elementos finitos de la estructura no detallado que simule las condiciones dinámicas previas al daño.

3) Análisis Modal Experimental u Operacional

- ✓ Elección de un mecanismo de excitación (en el caso del análisis operacional no será necesario un mecanismo de excitación, pues la estructura se encontrará en etapa de servicio y esto proporcionará los datos necesarios).
- ✓ Definición de los parámetros dinámicos, el tipo y número de sensores y la localización de los mismos.
- ✓ Determinación de parámetros de adquisición de datos.

4) Detección y localización preliminar del daño.

- ✓ Actualización del modelo de elementos finitos. En caso de haber realizado un modelo de elementos finitos, éste debe ser actualizado y calibrado con respecto a los datos obtenidos en las pruebas de vibración.
- ✓ Selección del método más apropiado para cada tipo de estructura, en función de sus características, pues todavía no se cuenta con una herramienta que permita decidir cuál método es más eficiente para aplicar en cada caso.
- ✓ Después de seleccionado el método adecuado, elegir los parámetros de detección de daño necesarios para su aplicación.
- ✓ Puesta en práctica del método de detección de daño seleccionado.

5) Iteraciones necesarias. Si la detección y localización del daño se ha comprobado por más de un método de detección, se considera que el daño fue caracterizado exitosamente. En cambio, si los métodos arrojan localizaciones posibles del daño, se deben repetir las pruebas de vibración en la estructura con los sensores de medición en posiciones más cercanas a la posible localización del daño, de manera que

iteraciones sucesivas de los pasos 2, 3 y 4 detecten exitosamente la localización del daño.