

**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  
estructuras de puentes a partir de parámetros modales.**

**Autora: Laura Ramírez Cabrera**

**Tutores: Prof. Titular Dr. Ing. Ernesto L. Chagoyén Méndez.**

**Ing. Dairo R. Ballate Reina.**

**Santa Clara**

**2017**

**"Año 59 de la Revolución Cubana"**



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**

*El esfuerzo y sacrificio valen mucho más cuando la constancia es testigo.*

## **DEDICATORIA**

Este trabajo va dedicado desde mi más profundo esfuerzo, y con todo el amor a mis padres y abuelos.

## AGRADECIMIENTOS

A mis padres y hermano: Por dejarme saber siempre que estarían a mi lado bajo cualquier circunstancia.

A mis abuelos: Por ser el motivo que me impulsa a seguir y conseguir mis metas.

A mi tío Jesús Manuel: Por estar presente siempre y ser un segundo papá para mí.

A mi pareja: Por apoyarme en estos 5 años de esfuerzo.

A mis tutores Dairo Ballate y Ernesto Chagoyén: Por la ayuda incondicional brindada en estos meses y los conocimientos adquiridos bajo su tutoría.

A mis amigos y compañeros de carrera: Por haber compartido los momentos de esfuerzos y sacrificio, las alegrías, las tristezas y haber sido una familia en estos 5 años.

A todos los profesores de la Facultad de Construcciones que contribuyeron con mi aprendizaje en estos 5 años.

A esas personas que tienen un lugar en mi corazón y que por ley de vida no pudieron verme convertida en ingeniera.

## **TAREA TÉCNICA**

Escriba aquí las tareas que debe ejecutar hasta la confección del informe final (Obligatoria)

Esta página debe estar firmada por el estudiante y por el tutor, expresión del compromiso entre ambos.

---

Firma del Autor

---

Firma del Tutor

## RESUMEN

El control y evaluación del estado de las estructuras es un tema que se ha venido desarrollando con el fin de mejorar las posibilidades de conocer el estado real en el que se encuentran las estructuras. Los métodos basados en vibraciones al arrojar criterios globales de estado toman una gran fuerza en las últimas décadas.

Dentro de estos métodos el actual trabajo trata el método del Operador Laplaciano propuesto por (Ratcliffe , 1997), creando un algoritmo para la aplicación del mismo y mejorando su desempeño por medio del índice de daño estandarizado propuesto por (Janeliukstis, 2015). Éste método se basa solo en las coordenadas modales para el estado dañado de la estructura.

El desempeño del método es evaluado para casos analíticos obtenidos de modelos de elementos finitos y para un caso experimental de una viga con daños inducidos por carga estática.

A partir de los resultados el método demuestra una sensibilidad alta ante las variables número de puntos medidos y severidad del daño, en los casos modelados. Los resultados para los datos experimentales demuestran ser insuficientes para la detección y localización del tipo de daño que contempla la viga.

## **ABSTRACT**

The control and evaluation of the state of the structures is an issue that has been developed in order to improve the possibilities of knowing the real state in which the structures are. Vibration-based Damage Detection Methods becomes as global status criteria that have taken on a great deal of force in recent decades.

In these methods the current work deals with the Laplacian Operator method proposed by (Ratcliffe, 1997), creating an algorithm for its application and improving its performance through the standardized damage index proposed by (Janeliukstis, 2015). This method is based only on the modal coordinates for the damaged state of the structure.

The performance of the method is evaluated for analytical cases obtained from finite element models and for an experimental case of a beam with static load induced damages.

From the results the method shows a high sensitivity to the variables number of measured points and severity of the damage, in the modeled cases. The results for the experimental data prove to be insufficient for the detection and location of the type of damage contemplated by the beam.

## TABLA DE CONTENIDOS

|                                                                                                        |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| PENSAMIENTO.....                                                                                       | i   |
| DEDICATORIA .....                                                                                      | ii  |
| AGRADECIMIENTOS.....                                                                                   | iii |
| TAREA TÉCNICA .....                                                                                    | iv  |
| RESUMEN .....                                                                                          | v   |
| ABSTRACT.....                                                                                          | vi  |
| INTRODUCCIÓN .....                                                                                     | 1   |
| Objeto de estudio: .....                                                                               | 2   |
| Campo de aplicación: .....                                                                             | 2   |
| Objetivo General: .....                                                                                | 3   |
| Objetivos Específicos: .....                                                                           | 3   |
| Justificación de la investigación: .....                                                               | 4   |
| Hipótesis de la investigación: .....                                                                   | 4   |
| Métodos de Investigación: .....                                                                        | 4   |
| Novedad de la Investigación: .....                                                                     | 4   |
| Aportes.....                                                                                           | 4   |
| Relevancia social.....                                                                                 | 5   |
| Organización del informe: .....                                                                        | 5   |
| CAPÍTULO 1. MÉTODOS DINÁMICOS PARA LA DETECCIÓN DE DAÑOS EN ESTRUCTURAS. ESTADO DEL CONOCIMIENTO. .... | 6   |
| 1.1. Generalidades.....                                                                                | 6   |
| 1.2. Detección de daños.....                                                                           | 8   |

|          |                                                                                                                                                                                  |    |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.2.1    | Daños en las estructuras .....                                                                                                                                                   | 11 |
| 1.2.2    | Métodos para la detección de Daños.....                                                                                                                                          | 12 |
| 1.3.     | Monitoreo del Comportamiento Estructural. ....                                                                                                                                   | 12 |
| 1.4.     | Métodos basados en vibraciones VBDD .....                                                                                                                                        | 16 |
| 1.4.1    | Métodos basados en parámetros modales básicos (correlación de formas modales).....                                                                                               | 18 |
| 1.4.1.1. | Criterio de Garantía Modal (MAC): .....                                                                                                                                          | 18 |
| 1.4.1.2. | Factor de escala modal (MSF):.....                                                                                                                                               | 19 |
| 1.4.1.3. | Criterio Coordinado de Correlación Modal (COMAC). ....                                                                                                                           | 19 |
| 1.4.1.4. | Factor coordinado de escala modal (COMSF):.....                                                                                                                                  | 19 |
| 1.4.2    | Métodos basados en cambios en parámetros estructurales derivados (curvaturas de formas modales, energías de deformación, rigideces y flexibilidades medidas dinámicamente) ..... | 20 |
| 1.4.2.1. | Método del cambio de la matriz de flexibilidad, medida dinámicamente.<br>20                                                                                                      |    |
| 1.4.2.2. | Método del cambio de la matriz de Rigidez, medida dinámicamente ....                                                                                                             | 20 |
| 1.4.2.3. | Comparación de curvaturas de las formas modales mediante Enfoque Mixto. 20                                                                                                       |    |
| 1.4.2.4. | Método de la Energía de Deformación (SEM) o del Índice de Daño (DI - Damage Index). ....                                                                                         | 21 |
| 1.4.2.5. | Índices basados en el cambio de la flexibilidad.....                                                                                                                             | 21 |
| 1.4.2.6. | Cambios de las características dinámicas:.....                                                                                                                                   | 21 |
| 1.4.2.7. | Cálculo de la Rigidez Directa. ....                                                                                                                                              | 21 |
| 1.4.2.1. | Operador Laplaciano o Gapped Smoothing Method (GSM). ....                                                                                                                        | 22 |
| 1.4.3    | Método de detección de daños basado en momentos estadísticos (SMBDD) 22                                                                                                          |    |
| 1.4.3.1. | SMBDD en el dominio de la frecuencia .....                                                                                                                                       | 22 |

|                                                                          |                                                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.4.3.2.                                                                 | SMBDD en el dominio del tiempo .....                                                                                                                           | 22 |
| 1.4.4                                                                    | Métodos de identificación de daños basados en técnicas de tiempo-frecuencia.<br>23                                                                             |    |
| 1.4.4.1.                                                                 | La Transformada Hilbert-Huang (HHT): .....                                                                                                                     | 23 |
| 1.4.4.2.                                                                 | Transformada de la Ondaleta (Wavelet). ....                                                                                                                    | 23 |
| 1.4.5                                                                    | Métodos basados en actualización de modelos (Model updating): .....                                                                                            | 24 |
| 1.5.                                                                     | Axiomas necesarios para el análisis de métodos dinámicos.....                                                                                                  | 26 |
| 1.6.                                                                     | Conclusiones parciales del Capítulo I .....                                                                                                                    | 27 |
| CAPÍTULO 2. MÉTODO PARA LA DETECCIÓN DE DAÑOS OPERADOR<br>LAPLACIANO. 28 |                                                                                                                                                                |    |
| 2.1                                                                      | Factores de los que depende una adecuada detección de daños utilizando los métodos<br>basados en vibraciones. ....                                             | 28 |
| 2.1.1                                                                    | Metodología de aplicación de los métodos de detección de daños a partir de<br>ensayos dinámicos .....                                                          | 29 |
| 2.2                                                                      | Procedimientos e instrumentos a utilizar para la aplicación de los métodos de<br>detección de daños a partir de ensayos modales en estructuras de puentes..... | 30 |
| 2.2.1                                                                    | Diseño de red de sensores .....                                                                                                                                | 31 |
| 2.2.2.                                                                   | Procesamiento de datos .....                                                                                                                                   | 32 |
| 2.2.3.                                                                   | Extracción de características y reducción de datos.....                                                                                                        | 33 |
| 2.3.                                                                     | Obtención de las propiedades dinámicas.....                                                                                                                    | 34 |
| 2.4.1.                                                                   | Datos Analíticos.....                                                                                                                                          | 34 |
| 2.4.2.                                                                   | Datos Experimentales.....                                                                                                                                      | 36 |
| 2.4.2.1.                                                                 | Descripción de la viga. ....                                                                                                                                   | 36 |
| 2.4.2.2.                                                                 | Etapas de carga. ....                                                                                                                                          | 37 |
| 2.4.2.3.                                                                 | Pruebas dinámicas y procesamiento de resultados. ....                                                                                                          | 39 |

|                                                                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.5. Método del operador Laplaciano. ....                                                                                                                | 40 |
| 2.6. Conclusiones parciales del capítulo 2 .....                                                                                                         | 43 |
| CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....                                                                                                                 | 44 |
| 3.1 Procedimiento para la detección y localización de daños a través del método del Operador Laplaciano. ....                                            | 44 |
| 3.2 Aplicación analítica del método del Operador Laplaciano de detección de daños basados en vibraciones .....                                           | 44 |
| 3.2.1 Análisis del tipo de daño a detectar y localizar en las vigas .....                                                                                | 45 |
| 3.2.2 Análisis del número de puntos a medir. ....                                                                                                        | 46 |
| 3.2.3 Análisis de la magnitud del daño .....                                                                                                             | 46 |
| 3.2.4 Análisis respecto a la detección y localización del daño: .....                                                                                    | 47 |
| 3.2.5 Análisis del número de daños combinado con la magnitud de estos. ....                                                                              | 49 |
| 3.3 Comparación de resultados con otros métodos de detección de daños. ....                                                                              | 49 |
| 3.3.1 Comparación con los métodos desarrollados por (García O'Reilly, 2016)....                                                                          | 49 |
| 3.2.1.1 Viga de 4.8 metros con una reducción de la inercia hasta el 35% en el tramo 3. 49                                                                |    |
| 3.2.1.2 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..... | 51 |
| 3.2.2 Comparación con los métodos desarrollados por (Castellanos Trocones., 2017). ....                                                                  | 52 |
| 3.2.2.1 Viga de 4.8 metros con una reducción de la inercia hasta el 35% en el tramo 3. ....                                                              | 52 |
| 3.2.2.2 Viga de 4.8 metros con una reducción de la inercia hasta el 35% en el tramo 3 y hasta el 10% en el tramo 10.....                                 | 54 |
| 3.4 Aplicación experimental del método del Operador Laplaciano de detección de daños basados en vibraciones. ....                                        | 57 |

|                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.5 Conclusiones parciales del capítulo 3. ....                                                                              | 58 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....                                                                                         | 60 |
| Conclusiones .....                                                                                                           | 60 |
| Recomendaciones .....                                                                                                        | 61 |
| Bibliografía .....                                                                                                           | 62 |
| ANEXOS .....                                                                                                                 | 66 |
| Anexo I. Función mshape que obtiene las formas modales y las frecuencias naturales<br>del modelo por elementos finitos ..... | 66 |
| Anexo II. Función Laplacian que contiene el desarrollo del método del Operador<br>Laplaciano.....                            | 68 |

## INTRODUCCIÓN

Las estructuras civiles han constituido a través del tiempo sistemas indispensables en el desarrollo social, así como en los avances alcanzados por la humanidad. Actualmente estas presentan diseños más complejos y relevantes destinados a satisfacer las necesidades para las cuales fueron concebidas. Debido a sobrecargas, envejecimiento, fatiga, eventos sísmicos o explosivos, cambio o deterioro de las propiedades físicas y mecánicas a que están sometidas, se generan fallas o daños que reducen la capacidad de carga y los años de servicio. Por tal motivo es imprescindible la evaluación y control del estado real de toda estructura para prevenir escenas de desastre, cierres parciales o totales de los servicios que se prestan.

Siendo los puentes una parte fundamental de la infraestructura vial, además de lo expresado en el párrafo anterior, sufren los cambios de las condiciones de las cargas. Debido a que una de las industrias que más se han desarrollado en los últimos años es el automovilismo las cargas que actúan en los puentes se han modificado en cuanto a peso y velocidad. Por tanto es necesario conocer el estado de los puentes y si son capaces de soportar las condiciones de carga que lo solicitan.

Con el fin de diagnosticar el estado de las estructuras se han realizado muchos estudios, desarrollándose métodos aplicables a diferentes escalas y situaciones, (Carrión Viramontes & Lozano Guzmán, 2001), (Atienza Pascual, 2004), (Ancona Lazcano, et al., 2011), (Morán Córdoba, 2011), (Peralta & Ercoli, 2012;2013), (Cuartas Ospina & Riveros Jerez, 2013), (Morales Fernández, 2014), (Montanari, 2014), (Chagoyén Méndez, et al., 2015), aplican métodos que van desde reconocimiento visual, ultrasonido, microfotografía, xilohigrometría, ultrasonidos, análisis de testigos, metodologías modales, entropía espectral, reconocimiento de características dinámicas, pruebas de vibración ambiental, algoritmos de reconocimientos de patrones estadísticos autoregresivos etc...

Los métodos basados en vibraciones para la determinación de daños, VBDD por sus siglas en inglés, tienen como principio el hecho de que una variación en las propiedades físicas de la estructura trae consigo una modificación en las propiedades dinámicas, pudiendo así a partir de mediciones de las vibraciones determinar si existe daño o no, la localización y la magnitud del mismo. En los últimos años estos métodos basados en ensayos modales han tomado fuerza, el hecho de tener la capacidad de realizar un análisis global sin un conocimiento a priori de la localización del daño y sin interrupción del servicio cotidiano, ofrece ventajas respecto a otros.

En nuestro país los puentes que conforman la red vial en su mayoría han sido sometidos a muchos años de explotación, en la actualidad la incertidumbre del estado de estos da origen a varias preguntas: ¿Existe daño en la estructura?, ¿Cuál es la magnitud del daño?, ¿Puede operar el puente o no?, ¿Con que inmediatez se necesita una intervención?, ¿Qué elementos necesitan ser intervenidos? Los estudios encaminados a estos fines que se deben realizar por parte de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) y de la Estación Comprobadora de Puentes exigen que sean implementados métodos de detección de daños de carácter global, lo que se podría traducir en una necesidad de implementar métodos de detección de daños basados en vibraciones (VBDD).

La situación actual apareada al insipiente uso y desarrollo en nuestro país de los métodos de detección de daños basados en vibraciones arrojan como **situación problemática** la necesidad de programar y aplicar métodos para la detección y localización de daños en estructuras de puentes a partir de ensayos modales, buscando complementar los métodos que se usan hoy para el diagnóstico estructural.

**Objeto de estudio:**

Métodos dinámicos para la detección y localización de daños a partir de ensayos modales.

**Campo de aplicación:**

Experimentación, Monitoreo, Modelación y Análisis estructural de puentes.

**Objetivo General:**

Aplicar a distintos casos de estudio el método del operador Laplaciano para la detección y localización de daños en estructuras de puentes a partir de ensayos dinámicos, mediante la elaboración de herramientas en forma de hoja de cálculo en Matlab.

**Objetivos Específicos:**

1. Establecer el estado actual del conocimiento sobre los métodos existentes para la detección, localización y evaluación de daños en estructuras de puentes.
2. Elaborar una herramienta computacional, programada en Matlab, que permita la aplicación del método en distintos casos de estudio en estructuras de las que se cuente con ensayos modales y arribar a conclusiones acerca de la aplicación de dicho método.
3. Analizar diferentes casos de estudio, tanto con datos modelados como con datos reales obtenidos en laboratorio.
4. Comparar el método del operador Laplaciano programado para la detección y localización de daños con los métodos implementados en (García O'Reilly, 2016) y (Castellanos Trocones., 2017) para llegar a conclusiones que demuestren el comportamiento del mismo.

Teniendo en cuenta estos objetivos, se pueden plantear las siguientes **interrogantes científicas**:

1. ¿En qué nivel se encuentra el estado actual de los conocimientos sobre otros métodos existentes para la detección y localización de daños en estructuras de puentes a partir de parámetros modales, que no fueran abordados por (García O'Reilly, 2016)?
2. ¿Cuáles son los aspectos fundamentales a tener en cuenta en la aplicación de cada uno de los métodos?
3. ¿Sería posible mediante la elaboración de una herramienta en forma de hoja de cálculo, aplicar este nuevo método de evaluación de daños a casos de estudio modelados y reales para arribar a conclusiones?
4. ¿Cuáles son las diferencias o similitudes que presenta este nuevo método con respecto a los anteriores programados?

**Justificación de la investigación:**

El desarrollo de esta investigación ofrece a los especialistas en monitoreo de estructuras de puentes, específicamente a la detección de daños, una solución más viable para resolver las situaciones que se puedan presentar en cuanto a este aspecto, una vez que se cuente con la instrumentación necesaria. El trabajo pretende brindar la posibilidad de saber con exactitud la localización del daño cuando estos no son visibles o se encuentran en una zona de la estructura a la que no se tiene acceso.

**Hipótesis de la investigación:**

Al aplicar el método del Operador Laplaciano o Gapped Smoothing Method (GSM), los resultados se corresponden con el estado real de la estructura tanto en casos modelados como en casos reales obtenidos en laboratorio.

**Métodos de Investigación:**Métodos del nivel teórico:

- **Método histórico lógico**, para el establecimiento del estado actual del conocimiento sobre los métodos para la detección y localización de daños en estructuras de puentes a partir de ensayos dinámicos, mediante el cual se realizará un análisis histórico de la temática y se determinará cuáles han sido las tendencias; se definirán los conceptos claves sobre estas temáticas así como se elaborará una síntesis de las principales concepciones al respecto, identificando los aspectos positivos y realizando análisis críticos de las deficiencias.
- **La modelación**, para estudiar las diferentes variables que inciden en el comportamiento dinámico del puente, mediante el empleo del software existente (SAP 2000 v.16).

**Novedad de la Investigación:**

Los ensayos dinámicos para la detección de daños en estructuras es un tema que en Cuba no se explota con la capacidad que brinda el campo, constituyendo este trabajo uno de los primeros pasos encaminados a potenciar estas técnicas en la producción.

**Aportes**

El hecho de que los especialistas de empresas dedicadas al diagnóstico de estructuras como son la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) y la Estación Comprobadora

de Puentes puedan contar con una herramienta capaz de implementar los métodos VBDD puede significar un ahorro económico y temporal para el país.

**Relevancia social**

Desde el punto de vista social el hecho de que las estructuras que prestan servicio se encuentren correctamente evaluadas es una garantía de seguridad y preservación de las vidas humanas.

**Organización del informe:**

Introducción

Desarrollo:

Capítulo I: Métodos dinámicos para la detección de daños en estructuras. Estado del conocimiento.

Capítulo II: Método para la detección de daños Operador Laplaciano.

Capítulo III: Resultados y Discusión.

Conclusiones y Recomendaciones

Bibliografía

Anexos

## **CAPÍTULO 1. MÉTODOS DINÁMICOS PARA LA DETECCIÓN DE DAÑOS EN ESTRUCTURAS. ESTADO DEL CONOCIMIENTO.**

En el presente capítulo se dan a conocer los métodos dinámicos para la detección de daños que se encuentran en la literatura disponible, se abordan diferentes aspectos que se relacionan con el tema de la investigación, como son el monitoreo estructural y las técnicas basadas en vibraciones, los criterios de clasificación de las mismas, los diferentes métodos que los componen y sus características esenciales.

### **1.1. Generalidades**

Las estructuras se conciben con el objetivo de cumplir con los años de servicio para las cuales son diseñadas. Cada día es más difícil su mantenimiento y protección a causa de sobrecargas, eventos ambientales, fatiga o cambio en las propiedades físicas. Por tal motivo, desde los años setenta del siglo pasado, debido a la creciente utilización de sistemas estructurales avanzados y al envejecimiento de construcciones antiguas a nivel mundial, diversos son los métodos o técnicas de carácter global o local utilizadas para la búsqueda y detección de daños en las estructuras, especialmente en los puentes.

Tradicionalmente se han utilizado las técnicas basadas en ensayos no destructivos (NDT), entre las que se encuentran las técnicas de acústica o ultrasonido, los métodos basados en campos magnéticos, radiografías o métodos térmicos que verifican la calidad y el estado de la estructura analizada sin dañarla ni dejar de ser operativa durante el procedimiento del ensayo o a la finalización de este. Aplicando estos ensayos obtenemos los resultados

necesarios para establecer un diagnóstico del estado de la estructura inspeccionada (Morales Fernández, 2014).

Cualquier sistema mecánico se caracteriza dinámicamente mediante los parámetros modales: frecuencias naturales, modos de vibración y amortiguamientos. Son las variaciones en dichos parámetros las que nos dan idea de la presencia de un daño en las estructuras (Rojas Díaz, 2006).

La evolución de los métodos basados en vibraciones (VBDD) de conjunto con los medios de tecnología de transferencia de datos ha desembocado en la monitorización de salud estructural SHM (System Healt Monitoring), esta consiste en el almacenamiento y procesamiento de datos en tiempo real, obtenidos de sensores ubicados en la estructura, se aplican las técnicas de identificación estructural y de determinación y localización de daños de manera que se puede conocer en el momento de ocurrencia de un evento extraordinario si la estructura está capacitada para continuar prestando servicio o si debe ser intervenida.

Aunque diversos estudios demostraron que, comparados con otras técnicas, los métodos basados en vibraciones son muy eficientes y el costo de operación es bajo, (Vázquez Torres, et al., n.d.) el monitoreo estructural encaminado a métodos basados en vibraciones no tomó fuerza sino hasta los comienzos de los años noventa, debido a varias razones expuestas por (Liu Kuan, 2013):

- a) La necesidad urgente de determinar el estado de deterioro de las estructuras civiles de gran escala, ya que una gran cantidad de estas han llegado o se aproximan a la etapa final de su vida útil.
- b) En términos de gestión, manejo y mitigación de las amenazas de los desastres, una base de datos que provee información sobre el estado de las estructuras civiles pre- y pos-desastre es crucial para la planificación y la toma de decisiones de las autoridades.
- c) Cada vez hay más estructuras en el mundo, tales como los puentes, de gran envergadura que constituyen líneas vitales para muchas ciudades. Su operación no puede ser interrumpida y garantizar su buen funcionamiento es un asunto crítico. Es necesario, entonces, un sistema de monitoreo continuo para detectar daños en tiempo real e implementar medidas correctivas a tiempo antes de que el daño se agrave o se extienda.

d) El concepto de alerta temprana toma cada vez mayor importancia en el mundo lo cual sólo se logra implementando sistemas de monitoreo continuo.

El monitoreo y evaluación estructural hoy en día es posible y es una alternativa para optimizar la aplicación de los recursos financieros de la conservación de la infraestructura de un país, así como poder detectar, prevenir y evaluar la integridad estructural, durabilidad y confiabilidad en todo el ciclo de vida de la estructura y asegurar el mantenimiento óptimo, planificación y operación de la misma ( Arceo Mariñelarena, et al., 2013).

## **1.2. Detección de daños**

La posibilidad de detectar daños en estructuras permite poder actuar de forma inmediata y reparar el lugar dañado teniendo en cuenta el ahorro económico y la seguridad de los usuarios de la estructura (Morales Fernández, 2014).

Según (Montanari, 2014) existen básicamente dos enfoques complementarios para la identificación de daños estructurales:

### **1. La identificación de daños se trata como un problema inverso.**

Este enfoque usualmente adopta un modelo de la estructura y trata de relacionar los cambios en los datos medidos en ella con cambios en el modelo. 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.

### **2. La identificación de daños se trata como un problema de reconocimiento de patrones.**

Los patrones representan diferentes condiciones de daño, tipo de daño (fisura, delaminación, deformación plástica), ubicación de daño y gravedad. La tarea principal en el problema es distinguir entre diferentes clases de patrones que representan estas condiciones. Por lo tanto, los datos que representan diferentes condiciones normales o sin daños deben ser adquiridos durante un período de tiempo para formar una plantilla, y los nuevos conjuntos de datos se comparan con la plantilla para detectar daños o para obtener información sobre el avance del daño.

De acuerdo con el segundo enfoque que es el más adecuado para los casos de detección de daños investigados, debe diseñarse un sistema inteligente de identificación de daños en

función de la situación del caso para: medir los datos apropiados (evaluación operativa y diseño de la red de sensores), procesar los datos con los algoritmos oportunos (extracción de características y reducción de datos) y operar sobre los vectores de características extraídos para cuantificar el estado de daño de la estructura (reconocimiento de patrones) (Montanari, 2014).

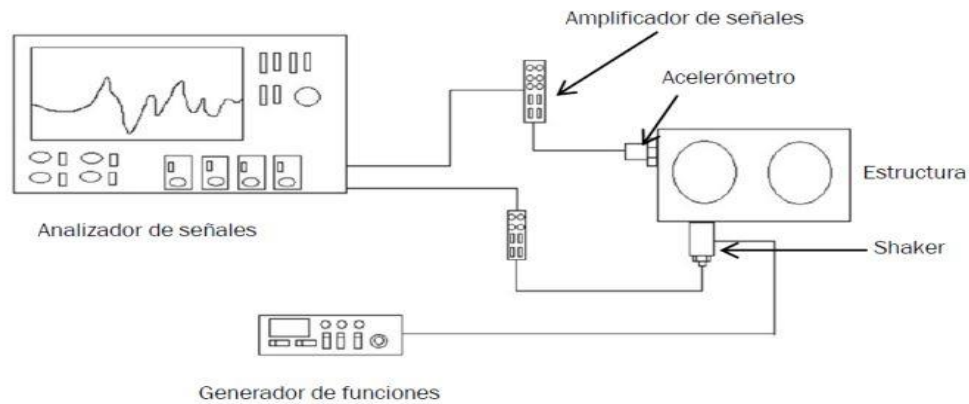
Además de contar con un sistema inteligente de identificación de daños, es imprescindible conocer qué tipo de análisis modal se va a utilizar para la búsqueda y evaluación de las características dinámicas inherentes de la estructura, representadas en sus frecuencias naturales, factores de amortiguamiento y formas modales, y emplearlas para la formulación de un modelo matemático para su comportamiento dinámico.

Existen principalmente dos formas de análisis modal en grandes estructuras (Rojas Díaz, 2006):

- Análisis modal experimental (EMA por sus siglas en inglés).
- Análisis modal operacional (OMA por sus siglas en inglés).

El primero (EMA) está basado en excitar artificialmente la estructura y medir, al mismo tiempo, la carga y la respuesta. Para caracterizar la estructura se emplea la función de respuesta en frecuencia. Este tipo de ensayos conlleva la utilización de grandes y costosos equipos, además de requerir que la estructura deje de estar en servicio (para conocer exactamente la excitación) (Rojas Díaz, 2006). Este análisis requiere de la utilización de varios componentes para la toma de datos:

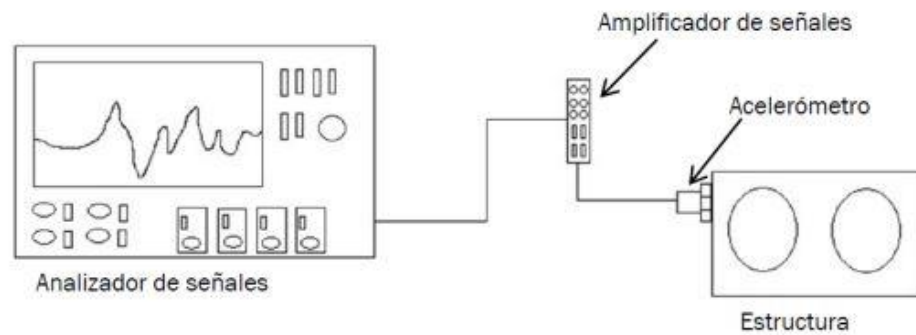
- ✓ Mecanismos de excitación
- ✓ Sensores de medida
- ✓ Aparatos de adquisición y procesamiento de datos



**Fig. (1.1) Esquema básico de los elementos necesarios para la realización de un EMA. Tomado de (Losa Miranda, 2015)**

El análisis modal operacional (OMA), se basa en determinar las propiedades dinámicas de la estructura sometida a sus cargas de servicio, sin conocer el valor de éstas. Las excitaciones se producen de manera arbitraria por el uso habitual de la estructura (viento, tráfico...) y, mediante la toma de datos de la respuesta dinámica, pueden extraerse las características modales (formas modales, frecuencias a las que se dan y factores de amortiguamiento) (Losa Miranda, 2015). Este hecho, unido a la simplicidad de los equipos utilizados, comparados con el análisis operacional clásico, constituyen las ventajas principales del OMA, y hace que este método sea el más usado en la caracterización de grandes estructuras donde ya no se emplea la función de respuesta en frecuencia, sino la función de densidad espectral de las respuestas en los puntos de medida (Rojas Díaz, 2006). Este análisis requiere de la utilización de varios componentes para la toma de datos:

- ✓ Sensores de medida
- ✓ Aparatos de adquisición de datos



*Fig. (1.2) Esquema básico de los elementos necesarios para la realización de un OMA (Losa Miranda, 2015).*

### 1.2.1 Daños en las estructuras

El daño se puede definir como el cambio en las propiedades materiales y/o geométricas de la estructura, incluyendo sus condiciones de frontera, conectividad entre elementos, secciones transversales geométricas, cargas, propiedades materiales y cualquier otro factor capaz de provocar un comportamiento inusual, presente o futuro, de la estructura (Doebbling, et al., 1996).

(Montanari, 2014) define la evolución del daño de una estructura en tres momentos principales, 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 pudiendo así la estructura funcionar en su condición de diseño. Para las cargas operacionales y ambientales en servicio debido a la fatiga, fluencia, corrosión, variaciones de temperatura o eventos extraordinarios, los defectos de la microestructura crecen y evolucionan hasta convertirse en daño. Cuando el daño se convierte en un sistema su comportamiento se modifica adversamente y la estructura ya no funciona de manera óptima. A medida que el daño continúa creciendo, el sistema alcanza el estado límite último cuando ya no es aceptable para el usuario y el daño se convierte en falla (Montanari, 2014).

### **1.2.2 Métodos para la detección de Daños**

Los métodos de detección de daños comprenden las técnicas globales y locales, las cuales varían en cuanto al alcance de su análisis en la estructura. Los métodos locales de detección de daño han sido utilizados para evaluar la condición estructural de pequeñas áreas debido a que para una mayor eficiencia es necesario conocer una probable ubicación del daño, además es importante que el daño se encuentre en una ubicación de fácil acceso para realizar la prueba ( Arceo Mariñelarena, et al., 2013). Estos métodos corresponden al uso de ondas de ultrasonidos, radiografías, campos electromagnéticos, inspección visual, método del líquido penetrante, emisión acústica, métodos de radiografía, métodos eléctricos o de corriente de Foucault y métodos de campo térmico (Montanari, 2014).

Por otro lado, los métodos de detección de daño considerados como globales, se refieren a aquellos que se basan en los cambios estructurales globales ocasionados por el daño, la cual es una ventaja, ya que permite conocer si la estructura es apta o no para su uso de manera integral. (Carpio Santamaria, 2015).

El hecho de que estos métodos tengan un carácter global, implica que la instrumentación que utilizan para la evaluación estructural, sea distribuida por toda la estructura y que la información que se obtiene de ésta, únicamente tenga sentido si se analiza en su conjunto ( Arceo Mariñelarena, et al., 2013).

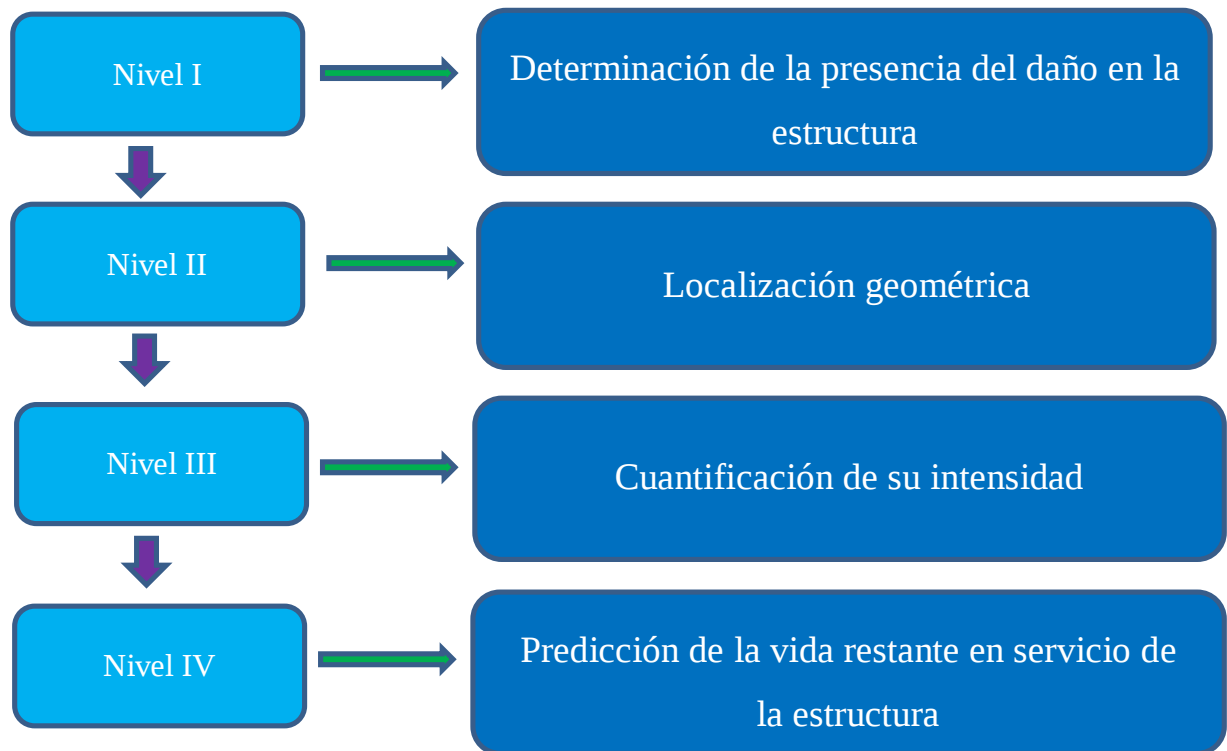
En un principio, la evolución de daño a través de este tipo de análisis se realiza en forma cuantitativa buscando establecer correlaciones entre los valores medidos y los niveles de daño conocidos. Como resultado, se obtienen factores de correlación con diferentes grados de sensibilidad dependiendo de la magnitud, localización de daño y la técnica de detección de daño empleada. ( Arceo Mariñelarena, et al., 2013)

### **1.3. Monitoreo del Comportamiento Estructural.**

Monitoreo del Comportamiento Estructural (SHM, por sus siglas en inglés) se le llama a la implementación de estrategias de detección de daños en la ingeniería espacial, mecánica y civil.

La monitorización de daño estructural (SHM a partir de ahora) es un proceso que busca analizar los datos recibidos de la estructura a partir de sensores colocados en la misma. Estos sensores son indicadores que permiten detectar cualquier tipo de anomalía para identificar daños, movimiento o degradación en la estructura que está siendo analizada. Este sistema es conocido como red sensorial no destructiva. Los datos obtenidos pueden ser llevados a cabo de forma periódica o en tiempo real y estar asociados a cambios de tipo corrosivo, ambientales, deterioro, fatiga, reacciones químicas, humedad, 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. 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 (Morales Fernández, 2014).

Para la monitorización del estado estructural se identifican cuatro niveles para la caracterización del daño como se observa en el esquema de la figura 1.3 (Morán Córdoba, 2011).



**Fig. (1.3) Proceso de detección de daños en el SHM.**

El campo de la monitorización de estructuras centra su atención en los niveles 1, 2 y 3 ya que frecuentemente están relacionados directamente con las pruebas dinámicas de estructuras y afectan al modelado de esta. Cada nivel, para ser clasificado con un nivel superior, debe cumplir con los niveles subsecuentes. Hasta el día de hoy, todos los métodos que se basan en la medición de vibraciones para la detección de daño, pueden proporcionar información de nivel 1 o 2. Cuando el análisis se complementa con el análisis de simulación de un modelo estructural, es posible llegar a una identificación de nivel 3. El nivel 4, además de utilizar modelos estructurales, está asociado con modelos de mecánica de la fractura, de análisis de fatiga, para obtener una predicción de la vida residual de la estructura. ( Arceo Mariñelarena, et al., 2013)

Para llegar a la obtención de cada uno de estos niveles, la Monitorización del Comportamiento Estructural cuenta con varias etapas que son de extrema importancia en el exhaustivo análisis para la localización y detección de daños (Morales Fernández, 2014):

➤ Razones y variables para la evaluación operacional.

Para decidir si la estructura debe ser monitorizada se tienen en cuenta el tipo y la importancia de la misma, así como criterios económicos, estratégicos o de seguridad y las fuerzas a las que está sometida. Todos estos criterios se seleccionan para conocer los posibles daños que pueda sufrir la estructura. Otro factor a tener en cuenta es la posibilidad y limitaciones para medir y monitorear todas las variables, incluyendo las disponibilidades tecnológicas y las necesidades de frecuencia de medición de los datos.

➤ Adquisición y gestión de datos.

En este punto se determinan los métodos de estímulo, los sensores más apropiados para cada estructura y factor a analizar, así como su distribución y el número de sensores. Hay que tener siempre en cuenta la necesidad de normalizar los datos, es decir, conocer las condiciones externas (ambientales, por ejemplo) que pueden alterar los datos y no serían directamente comparables. También existen ruidos evitables y estadísticamente cuantificables de los no predecibles. Se necesita ocasionalmente una limpieza de datos y filtros que permitan determinar los datos transmitidos y formas para comprobar sensores que no estén operando correctamente.

➤ Identificación antes y después del daño.

Debemos tener total certeza si el dato transmitido se corresponde a la estructura en estado sano o dañado. Dependiendo del tipo de análisis que nos convenga podemos verificar las variables de amplitud, frecuencia, temperatura o fractura.

➤ Cuantificación del daño.

La monitorización debe dar lugar a una información cuantificada de la magnitud del daño. Esto se debe a uno o más algoritmos que incluso pueden estar asociados a sistemas de aprendizaje para conocer mejor si la estructura está dañada o no.

➤ Predicción.

El objetivo de monitorización de salud estructural es el de prevenir si la estructura será dañada para, así, poder tomar las medidas correctivas necesarias. Por ese motivo la

información histórica que registra tiene que servir para establecer parámetros que faciliten un sistema de aviso o alerta.

➤ Acción.

Si la monitorización funciona correctamente el mantenimiento podrá ser realizado solo cuando es necesario, así pues, el sistema recoge y transmite información y se envía para analizarla, conservarla y poder reaccionar de la forma más adecuada y rápida.

Con el objetivo de garantizar la seguridad estructural, el SHM se ha transformado en un enfoque fiable, eficaz y económico dentro de la supervisión del rendimiento estructural, detectar posibles daños y la toma de decisiones correspondientes al mantenimiento y la conservación. (Molina Menache, et al., 2012)

La principal ventaja de las técnicas de monitorización de salud estructural para la detección de daños es que permiten un análisis veloz y en tiempo real de la salud de una estructura tras un evento extremo como por ejemplo vientos fuertes, terremotos, explosiones o simplemente el paso del tiempo. El hecho de ofrecer una mejor comprensión del comportamiento in situ de la estructura, detección temprana de daños, garantía de fortaleza, capacidad de servicio, mejor mantenimiento y estrategias de asignación de recursos, permite poner en conocimiento rápidamente los posibles fallos que pudieran presentarse en la estructura e informar de forma concisa qué está ocurriendo para poder solucionarlo. (Morales Fernández, 2014).

La base fundamental del SHM se encuentra en los métodos basados en vibraciones para la detección de daños, los cuales se abordan a continuación.

#### **1.4. Métodos basados en vibraciones VBDD**

Los métodos basados en vibraciones son de los más habituales en el campo de la monitorización de la salud estructural, aunque no fueron completamente desarrollados sino hasta que los procesos computacionales de obtención y tratamiento de parámetros dinámicos y el desarrollo de sistemas de sensores para la adquisición de los mismos fueron lo suficientemente robustos y accesibles. (Ancona Lazcano, et al., 2011)

La base de estos métodos es el principio de que cualquier daño en una estructura produce un cambio local de la flexibilidad por lo que sus propiedades también varían y estos cambios

son detectados en la variación de sus frecuencias naturales, por tanto, el daño puede ser hallado analizando estos cambios. (Morales Fernández, 2014)

En general cualquier, técnica experimental para la medición de vibraciones en estructuras, considera los siguientes factores: (Carpio Santamaria, 2015)

- **Los métodos empleados para la excitación de la estructura.** Existen distintas técnicas disponibles para efectuar la excitación de vibraciones en puentes por ejemplo vibraciones ambientales, desplazamiento, liberación de carga, vibradores e impacto.
- **Los transductores utilizados para medir la vibración.** Se pueden emplear distintos tipos de transductores como son acelerómetros, galgas extensométricas, medidores de desplazamiento y velocidad.
- **Los procedimientos de prueba empleados.** Las metodologías seguidas para realizar las pruebas deben ser compatibles para el caso que sean aplicadas y los resultados deben ser confiables. Para lo anterior se debe considerar siempre en cada caso aspectos como el número de puntos a instrumentar, cambios en las condiciones ambientales entre otros.

Las técnicas de detección de daños estructurales basadas en vibraciones, se pueden dividir en métodos de detección de daños de tipo tradicional y métodos de detección de daños de tipo moderno, también denominados diagnóstico inteligente de daños. Los métodos tradicionales de detección de daños basados en vibraciones son principalmente basados en las características estructurales de la vibración natural, tales como frecuencias naturales, formas modales, amortiguación modal. 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 en las frecuencias naturales o formas modales obtenidas de los datos medidos sensibles al daño. (Montanari, 2014)

Los métodos de tipo modernos se refieren a métodos de detección de daños 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. Tienen la ventaja de 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. A su vez estas técnicas modernas comprenden algunos problemas abiertos a resolver tales como (Montanari, 2014):

- 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.

Estos métodos basados en vibraciones pueden clasificarse, de manera muy general, de la siguiente forma:

- a) Métodos basados en parámetros modales básicos (correlación de formas modales).
- b) Métodos basados en cambios de parámetros estructurales derivados (curvaturas de formas modales, energías de deformación, rigideces y flexibilidades medidas dinámicamente.
- c) Método de detección de daños basado en momentos estadísticos (SMBDD).
- d) Métodos de identificación de daños no lineales basados en técnicas de tiempo-frecuencia.
- e) Métodos basados en modelos de actualización (Model updating).

#### **1.4.1 Métodos basados en parámetros modales básicos (correlación de formas modales).**

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. Estos métodos se desarrollan para la identificación de daños basados directamente en formas modales medidas. (Montanari, 2014)

##### **1.4.1.1. Criterio de Garantía Modal (MAC):**

Este método proporciona una medida de la consistencia (grado de linealidad) entre estimaciones de un vector modal  $\phi$ , mediante la determinación de la desviación mínima

cuadrada de una estimación sobre otra (Ancona Lazcano, et al., 2011). 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, estableciendo para cada valor característico una medida de la correlación de los vectores característicos (formas modales) entre la condición dañada y la no dañada (Montanari, 2014).

#### **1.4.1.2. Factor de escala modal (MSF):**

El factor de escala modal (MSF, por sus siglas en inglés) es otra forma de cuantificar el daño y representa la medida de la pendiente de la recta que mejor ajusta la relación entre los coeficientes de los vectores modales de la condición dañada contra la condición sin daño (Ewins, 2000). El intervalo de valores de este factor va de cero a infinito, que corresponde a ángulos que van de 0 a 90 grados. Un valor de 1.0, significa que hay una correlación total entre la condición con daño y la condición sin daño, por lo que no existe diferencia en los parámetros y, por lo tanto, no existe daño (Carrión Viramontes, 1999).

#### **1.4.1.3. Criterio Coordinado de Correlación Modal (COMAC).**

El valor COMAC se introduce como una variación del MAC y se calcula sobre un conjunto de pares de formas modales (con daño y sin daño) (Ancona Lazcano, et al., 2011) Para cada punto o nodo, se establece un criterio de aseguramiento modal que puede tener valores entre cero y uno. De igual forma que el MAC, este criterio tiene valores de 1.0 cuando existe una correlación total, es decir, cuando no está dañada la estructura. En términos generales, este criterio identifica las variaciones más grandes que se presentan en los vectores característicos y asocia la localización del daño con las coordenadas del punto en el que se presentan dichas variaciones. ( Arceo Mariñelarena, et al., 2013)

#### **1.4.1.4. Factor coordinado de escala modal (COMSF):**

El método de Factor Coordinado de Escala Modal (COMSF) cuantifica en un punto determinado el grado de diferencia que hay en la medida de un parámetro modal con daño, respecto a la condición sin daño (Ewins, 2000). La expresión de este factor se calcula de la

misma forma que el Factor de Escala Modal (MSF), pero asociando las coordenadas del punto y analizando con la ubicación física del daño (COMSF(j)); por lo tanto; se tendrá un factor de escala modal para cada nodo (Carrión Viramontes, 1999).

#### **1.4.2 Métodos basados en cambios en parámetros estructurales derivados (curvaturas de formas modales, energías de deformación, rigideces y flexibilidades medidas dinámicamente)**

##### **1.4.2.1. Método del cambio de la matriz de flexibilidad, medida 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. (Montanari, 2014)

El daño estructural, puede ser tomado como una reducción de la rigidez. Por lo tanto, donde éste se presenta habrá un aumento en la flexibilidad, la cual, si es posible medirla, indicará la posición del daño. La presencia de daño se detecta a partir de los cambios en la matriz de flexibilidad calculada usando los parámetros modales de la estructura. (Ancona Lazcano, et al., 2011)

##### **1.4.2.2. Método del cambio de la matriz de Rigidez, medida dinámicamente**

Este método se basa en cuantificar el cambio que presentan las matrices de rigidez, medidas mediante parámetros modales, antes y después de la ocurrencia del daño. Se basa en el problema de valores característicos que define el comportamiento dinámico de cualquier sistema estructural, para casos sin daño y sin amortiguamiento (Ancona Lazcano, et al., 2011).

##### **1.4.2.3. Comparación de curvaturas de las formas modales mediante Enfoque Mixto.**

La curvatura de la forma modal es un parámetro sensible al daño, al estar directamente relacionada con la rigidez estructural, en el sentido de que cualquier cambio en la rigidez

afectará en forma inversamente proporcional a la curvatura modal (Ancona Lazcano, et al., 2011). Las formas modales de curvatura se calculan utilizando una aproximación de diferencia central a partir de las formas de desplazamiento simuladas. Los cambios en las formas modales aumentan con la extensión del tamaño del daño y este aumento, más pronunciado que el relacionado con los cambios en los desplazamientos de las formas modales, puede utilizarse para calibrar la gravedad del daño. (Montanari, 2014).

#### **1.4.2.4. Método de la Energía de Deformación (SEM) o del Índice de Daño (DI - Damage Index).**

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. (Montanari, 2014)

#### **1.4.2.5. Índices basados en el cambio de la flexibilidad.**

Este índice de daño está basado en la suposición de que un daño localizado en una estructura causa una disminución de la rigidez y, por consiguiente, un incremento en la flexibilidad. Si existen dos escenarios de medición, uno para el estado sin daño y otro para el estado con daño, es posible identificar las matrices de flexibilidad para ambos estados. Considerando estas dos matrices de flexibilidad, se han definido dos vectores de índice global de dimensiones igual al número de grados de libertad de la estructura, cuyos valores dan a una estimación de la cantidad de daño y posición (Cavalieri, et al., 2012).

#### **1.4.2.6. Cambios de las características dinámicas:**

Uno de los métodos más simples para la detección de daños es el análisis de los cambios de las características dinámicas debido a una alteración de la rigidez (o daño) (Cremona, 2012).

#### **1.4.2.7. Cálculo de la Rigidez Directa.**

El cálculo de la rigidez directa se basa en la relación de que la rigidez a flexión en cada sección de una estructura puede ser escrita como el cociente del momento flector por la

curvatura correspondiente. Este método utiliza las frecuencias propias y formas modales experimentales en la obtención de la rigidez dinámica (Maeck & De Roeck, 1999).

#### **1.4.2.1. Operador Laplaciano o Gapped Smoothing Method (GSM).**

Esta técnica utiliza exclusivamente la forma modal obtenida a partir del estado dañado sin requerir de ninguna información de referencia. La primera parte del procedimiento de identificación es aplicar el Operador Laplaciano a la forma modal discretamente medida. Cuando el daño es severo, este paso es suficiente para identificar la localización del daño. Sin embargo, cuando el daño es menos severo (menor de un 40%), el procesamiento adicional del laplaciano produce un procedimiento de detección de daños que puede identificar un cambio de espesor localizado tan pequeño como 5% (Ratcliffe , 1997).

### **1.4.3 Método de detección de daños basado en momentos estadísticos (SMBDD)**

#### **1.4.3.1. SMBDD en el dominio de la frecuencia**

El principio básico del método SMBDD en el dominio de la frecuencia es identificar los parámetros de rigidez de una estructura antes y después de la ocurrencia de daño mediante una actualización del modelo de elemento finito (FE) utilizando los momentos estadísticos de respuestas estructurales completas o, probablemente, parcialmente medidas y luego determinar ubicaciones y gravedad de los daños mediante la comparación de los parámetros de rigidez estructural identificados en las dos etapas ( Xu, et al., 2011).

#### **1.4.3.2. SMBDD en el dominio del tiempo**

El método de SMBDD puede aplicarse a las estructuras en el dominio de frecuencia solo cuando las excitaciones externas obedecen las distribuciones Gaussianas. Este requisito limita la aplicación del método de SMBDD a las excitaciones externas no-Gaussianas. En este aspecto, el método de SMBDD ha sido extendido y se ha llevado a cabo en el dominio del tiempo para las excitaciones externas no-Gaussianas y no-estacionarias con la consideración de medidas incompletas ( Xu, et al., 2011).

#### **1.4.4 Métodos de identificación de daños basados en técnicas de tiempo-frecuencia.**

##### **1.4.4.1. La Transformada Hilbert-Huang (HHT):**

La Transformada de Hilbert-Huang (HHT) es una técnica de tiempo-frecuencia obtenida por la combinación de la Descomposición en Modo Empírico (EMD) y la Transformada de Hilbert (HT). La parte clave del método es la descomposición de la señal original en las "Funciones del Modo Intrínseco" (FMI) a través del EMD. Estas funciones son ideales para ser utilizadas con la HT y, por lo tanto, para obtener una distribución completa de energía-frecuencia-tiempo de los datos (es decir, el espectro de Hilbert y la frecuencia instantánea para cada FMI) (Montanari, 2014).

##### **1.4.4.2. Transformada de la Ondaleta (Wavelet).**

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

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 detectada mediante formas modales con coeficientes wavelet que desarrollan grandes amplitudes (como picos o impulsos) en la localización del daño (Ancona Lazcano, et al., 2011)

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

El procedimiento de detección de daño DWA consiste en seleccionar una wavelet madre adecuada y en base a ella aplicar el algoritmo Transformada Rápida Wavelet (FWT por sus siglas en inglés) a una señal en función del espacio (forma modal) para encontrar un árbol de descomposición wavelet de la señal (Ancona Lazcano, et al., 2011).

- 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 (Ancona Lazcano, et al., 2011)

➤ Método combinado CWT-DI.

Como una extensión en la teoría de wavelets, mediante el uso de una wavelet madre Gaussiana, la CWT puede ser considerada como una función equivalente de la segunda derivada de la función analizada alisada por la wavelet madre. Tomando en cuenta dicha propiedad, se puede proponer una variante del método del Índice de Daño para datos discretos (Ancona Lazcano, et al., 2011)

#### **1.4.5 Métodos basados en actualización de modelos (Model updating):**

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 se basan en: actualización y optimización de matrices, la sensibilidad, asignación de la estructura e inteligencia computacional (Montanari, 2014).

Las técnicas de actualización de la matriz se basan en la modificación de matrices modelo, por ejemplo, las matrices de masa, rigidez y amortiguación, para identificar daños en las estructuras. El método tiene como objetivo minimizar la norma del vector de fuerza residual mediante la actualización de los parámetros físicos (Montanari, 2014).

Los métodos de matriz óptima utilizan una solución directa de forma cerrada para calcular las matrices del modelo dañado o las matrices de perturbación (Montanari, 2014).

Los métodos basados en sensibilidad explotan técnicas refinadas que se basan en el supuesto de que los datos experimentales son perturbaciones de los datos de diseño sobre el modelo numérico de línea de base (Montanari, 2014).

Los métodos de asignación de la estructura se basan en la teoría del sistema de control. La estructura bajo investigación se ve obligada a responder de una manera predeterminada. Durante la detección de daños, la estructura electrónica deseada es la que se mide en la prueba (Montanari, 2014).

Los métodos de inteligencia computacional utilizan métodos modernos de optimización para minimizar la distancia entre los datos predichos de elementos finitos y los datos medidos (Montanari, 2014).

➤ Método inverso por subdominios (MISD).

El MISD está basado en el análisis de la propagación de ondas en las estructuras, por lo que requiere menos pruebas experimentales, se escala a un gran número de incógnitas y puede manejar diferentes tipos de sensores. Una distribución adecuada de los sensores, limitando regiones en la estructura, permite identificar la presencia de daño en las sub-regiones. El análisis por sub-dominios es posible sin pérdida de generalidad y a partir de un mismo conjunto de datos, se puede seleccionar la información de acuerdo al nivel de evaluación que se desee realizar (Carrión Viramontes & Lozano Guzmán, 2001).

➤ Método que utiliza submatrices de daños.

Se basa en el cálculo de valores y vectores característicos, asignándole a cada elemento de la estructura un indicador de daño apoyándose en las submatrices de daños conformadas a través de la matriz de rigidez dañada ( Rodríguez, et al., 2005).

➤ Método de búsqueda global (MBG).

El análisis de la propagación de ondas en la estructura es un método que permite conocer el daño a partir de los cambios en la propagación de las ondas transmitidas y reflejadas sobre la estructura. El MBG se fundamenta en análisis de la propagación de ondas basándose en un algoritmo de búsqueda de cambios en los parámetros globales que minimiza una función de mínimos cuadrados ( Arceo Mariñelarena, et al., 2013).

➤ Método de análisis de propagación de ondas, utilizando los algoritmos genéticos (AG) como método de optimización.

Los algoritmos genéticos (AG) generan casos hipotéticos de daño que, a su vez, se comparan con un modelo inicial de la estructura que se analiza, determinando en un inicio las propiedades, características y daño a buscar, lo cual permite observar la convergencia del AG diseñado ( Arceo Mariñelarena, et al., 2013).

La identificación del daño se basa en el análisis de propagación de ondas en estructuras y en la búsqueda del mínimo de una función de error que se define como una función de mínimos cuadrados de la diferencia de las respuestas dinámicas entre la condición dañada y una condición con un escenario de daño propuesto por el algoritmo genético; la primera obtenida de mediciones experimentales, mientras que la segunda se obtiene de un modelo calibrado de elemento finito ( Arceo Mariñelarena, et al., 2013).

➤ Métodos de redes neuronales artificiales (ANNS)

Los métodos de redes neuronales artificiales son una técnica de inteligencia artificial moderna y poderosa que funciona libre de modelos y herramienta adaptativa para capturar y aprender estructuras significativas en los datos. Son adecuados especialmente para problemas demasiado complejos de modelar (Montanari, 2014).

### **1.5. Axiomas necesarios para el análisis de métodos dinámicos.**

El uso creciente de los VBDD y las investigaciones para desarrollar nuevos métodos a través de los años arrojan diferentes axiomas o elementos que se deben considerar cuando entramos al mundo de la detección de daños.

Un resumen de los diferentes aspectos que se deben tener en cuenta se expone en (Worden, et al., 2007) de los cuales se presentan los de mayor implicación:

- La evaluación del daño no requiere necesariamente de una comparación entre dos sistemas de estados.
- Los sensores no pueden medir el daño. La extracción de características a través del procesamiento de la señal y la clasificación estadística es necesario para convertir el sensor y dar información de daños.
- El tamaño del daño que se puede detectar de los cambios en el sistema de la dinámica es inversamente proporcional al rango de frecuencia de la excitación.

### **1.6. Conclusiones parciales del Capítulo I**

- La posibilidad de detectar daños en estructuras permite poder actuar de forma inmediata y reparar el lugar dañado teniendo en cuenta el ahorro económico y la seguridad de los usuarios de la estructura.
- Las técnicas de monitorización de salud estructural (SHM) para la detección del daño permiten un análisis veloz y en tiempo real de la estructura tras un evento extremo, deterioros o envejecimiento. El hecho de ofrecer una mejor comprensión del comportamiento de la estructura permite la detección temprana de daños, capacidad de servicio y estrategias de asignación de recursos.
- Los métodos de detección de daños basados en vibraciones constituyen una herramienta importante en el conocimiento del estado global de una estructura. Para la aplicación de algunos de ellos, no es necesario conocer el estado de la estructura previo al daño.
- La detección y localización de daños es un tema actual en la literatura que promete grandes resultados debido a que cada día surgen nuevos métodos basados en diferentes criterios que facilitan el trabajo de los profesionales que se dedican al monitoreo de estructuras. En la actualidad estos aspectos definen el tema abordado, así como el presente trabajo de diploma.

## CAPÍTULO 2. MÉTODO PARA LA DETECCIÓN DE DAÑOS OPERADOR LAPLACIANO.

En este capítulo se abordan los principales procedimientos y metodologías a implementar en una adecuada detección de daños, exponiéndose a su vez el desarrollo matemático, algoritmos y funciones a utilizar para la programación por medio del software Matlab del método del Operador Laplaciano, introduciéndonos en la obtención de las propiedades dinámicas de elementos estructurales analíticos y experimentales que constituyen los casos de estudios para la aplicación del método.

### 2.1 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 expuestos en el capítulo I dependerá de factores tratados por (Ancona Lazcano, et al., 2011) tales 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.

### 2.1.1 Metodología de aplicación de los métodos de detección de daños a partir de ensayos dinámicos

(Ancona Lazcano, et al., 2011) propone una metodología para la aplicación de los métodos para la localización, detección y evaluación de daños a partir de ensayos dinámicos de la siguiente manera:

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.

### 2.2 Procedimientos e instrumentos a utilizar para la aplicación de los métodos de detección de daños a partir de ensayos modales en estructuras de puentes.

El éxito del monitoreo estructural depende en gran medida de la correcta interpretación de la información que se obtiene a través de los sensores. Es por ello que la selección del tipo de sensores, la ubicación de éstos, la configuración del sistema de adquisición de datos (frecuencia de monitoreo) y el procesamiento de datos, son fundamentales para obtener información suficiente, pero no excesiva, para poder identificar cambios que pudieran estar asociados con condiciones de daño o falla (Pérez Cardozo, et al., 2012).

El hecho de que los métodos a analizar tengan un carácter global, implica que la instrumentación que utilizan para sus mediciones sea distribuida por toda la estructura y que la información que se obtiene de esta, únicamente tiene sentido si se analiza en su conjunto, por lo que la configuración del sistema de sensores es fundamental y de éste depende la

sensibilidad del sistema para identificar los problemas que pudieran llegar a presentarse en un determinado puente ( Pérez Cardozo, et al., 2012).

### 2.2.1 Diseño de red de sensores

Un sensor, es un instrumento de medición diseñado para captar información de una magnitud externa y transformarla en otra magnitud, de manera que el usuario sea capaz de cuantificar y manipular. Existen diferentes tipos de sensores que sensan distintos tipos de variables, tales como: temperatura, fuerza, distancia, aceleración, humedad, presión, movimiento, torsión, etc. Los valores devueltos pueden mostrarse directamente (un termómetro) o conectados a un indicador (una computadora o una pantalla), ya sea de manera alámbrica o inalámbrica, de tal manera que puedan ser interpretados y usados (Montanari, 2014).

Dentro del SHM, suelen utilizarse sensores que entregan valores con relación a la aceleración, masa, rigidez y amortiguamiento de la estructura; resultando valores útiles, ya que son sensibles para determinar la presencia de daño. Estos sensores, usualmente son instalados en puntos específicos de la estructura de manera alámbrica; aunque algunas veces, por las dimensiones y/o accesibilidad de la estructura, son utilizados sensores que envían los datos de manera inalámbrica ( Pérez Cardozo, et al., 2012).

Dentro de las características mínimas necesarias que se requieren para la obtención de valores, podemos destacar las siguientes ( Pérez Cardozo, et al., 2012):

- **Rango de medida:** Referente al dominio de la magnitud mínima y máxima que puede aplicarse al sensor.
- **Precisión:** Es la cualidad del sensor para dar lecturas próximas al valor real de la magnitud medida.
- **Rapidez de respuesta:** Referente al tiempo que tarda en responder el dispositivo para medir las magnitudes.
- **Sensibilidad:** Es la capacidad de percibir estímulos externos y dar un valor de cambio a la salida.

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. De hecho, un fallo en la red de sensores tendrá consecuencias indeseables; un fallo del sensor que provoque una alarma innecesaria puede provocar que el sistema se desvíe innecesariamente del servicio y tener graves costos o implicaciones de seguridad (Montanari, 2014).

Existen esencialmente dos enfoques en la supervisión de los sensores. El primer enfoque consiste en sensores individuales que pueden ser autocontrolados capaces de autodiagnosticar y devolver la incertidumbre en línea de las mediciones. El enfoque alternativo es permitir que los sensores se monitoreen entre sí, siendo 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. 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 (Montanari, 2014).

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 daño.

### **2.2.2. 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 preprocesamiento abarca tres tareas: normalización de datos, limpieza de datos y reducción de datos (Montanari, 2014).

La normalización de datos ayuda a generalizar los niveles de amplitud para diferentes tipos de datos identificando las relaciones entre mediciones y características, ayudando a separar los cambios en la lectura de sensores causados por daños debido a las condiciones operativas y ambientales variables.

La limpieza de datos es el proceso de escoger selectivamente datos para pasar o rechazar para el proceso de extracción de características. Ejemplos de procesos de limpieza son: eliminación de ruido y espigas, 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 (Montanari, 2014).

Otro 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 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 (Montanari, 2014).

La etapa de preprocesamiento 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. Debe tenerse en cuenta que dicho proceso no debe ser estático y a partir de la selección de funciones y del proceso de reconocimiento de patrones puede surgir una visión para mejorarlo (Montanari, 2014).

### **2.2.3. Extracción de características y reducción de datos**

El proceso de extracción de características es fundamental en el problema de identificación de daños. Su tarea es enfatizar las características de los diversos rasgos de daño y suprimir los efectos de fondo. Una vez que las características dominantes del daño se aíslan en los datos, el problema de la identificación del daño se puede resolver fácilmente. Sin embargo, en general, los componentes de la señal referentes a las diversas características de daños están ocultos por aquellos relacionados con las condiciones normales de funcionamiento de la estructura, particularmente cuando el daño no es severo. Existe un número de diferentes tipos

de procedimientos utilizados para la extracción de características. Los métodos simples se basan en procedimientos de reducción de datos con el fin de obtener características escalares. Los procedimientos avanzados conducen a representaciones vectoriales o de patrones tales como espectro de potencia (Montanari, 2014).

Existen dos categorías principales de procedimientos de reducción de características. La primera implica el proceso de reducción de redundancias en el espacio de características. El segundo incluye Lineales (por ejemplo, el análisis de componentes principales) y transformadas no lineales, y técnicas de mapeo. Sin embargo, la reducción de la dimensión de datos debe llevarse a cabo cuidadosamente para no descartar la información relevante para diagnosticar el daño (Montanari, 2014).

### **2.3. Obtención de las propiedades dinámicas.**

Para todos los casos se debe contar con los datos que arroja el análisis modal pues como es obvio, constituye la entrada del método usado para la detección del daño. En el trabajo se abordan dos grupos de datos, un primer grupo que consiste en datos obtenidos de modelos analíticos y un segundo grupo de datos experimentales que se corresponden con una viga ensayada en los laboratorios de KU Leuven.

#### **2.4.1. Datos Analíticos.**

Se modelan varias vigas (según los casos de estudio) en SAP 2000 y se les realiza el análisis modal para oscilaciones libres, las resultantes formas modales son consideradas las señales a analizar.

Para obtener las formas modales a procesar se usa una función creada en Matlab, nombrada *mshape*, esta función es la encargada de, mediante la interface OAPI SAP-Matlab, abrir el modelo, correrlo, extraer las formas modales por cada modo, extraer las coordenadas de cada nodo, y la frecuencia de cada modo identificado, en el directorio especificado dentro de la función se crea una carpeta con el archivo *modal\_shapes.mat*, este contiene la variable *ShapeMatrix* que es una matriz que contiene en su primera fila la ubicación del nodo y en las restantes filas la coordenada modal correspondiente a cada coordenada, de manera que el número de modos sería el número de filas menos uno, la dimensión de esta matriz sería

$[(n\_m + 1) \times n\_nodes]$ , siendo  $n\_m$  el número de modos considerados y  $n\_nodes$  el número de nodos para los cuales se obtiene la coordenada modal. El fichero *modal\_shapes.mat* contiene también la variable *omega* que no es más que un vector contenido con la frecuencia de los modos, el primer valor se corresponde con la segunda fila de la matriz *ShapeMatrix*, que sería el primer modo.

Buscando una analogía con mediciones reales se consideran solo los modos en la dirección vertical de la viga, la justificación no es más que la dificultad para obtener modos torsionales para elementos tipo viga en el terreno, también para obtener modos horizontales se debe instrumentar en tal sentido, al tener que colocar sensores en el sentido vertical y en el sentido horizontal se requiere un número elevado de sensores con los que no se prevé contar en la práctica.

El tema del número de puntos medidos en el análisis modal es muy sensible en los resultados que posteriormente se obtienen, por lo que esto no se puede quedar fuera, la analogía se encuentra en el número de divisiones que se hacen al modelo de la viga ya que el SAP a partir de esas divisiones concentra la masa en los puntos resultantes, quedando un modelo de  $n$  grados de libertad, siendo  $n$  igual al número de divisiones más uno. Atendiendo a lo anterior si quisiéramos un modelo donde se simulen 20 puntos medidos, bastaría con realizarle 19 divisiones a la viga en cuestión.

Un aspecto que puede cuestionarse es la distribución o espaciamiento de los puntos considerados, ya que en la práctica existen lugares ciegos en la viga para ciertos modos, es decir que la coordenada teórica del modo es cero y en ese caso el sensor ubicado en el lugar no ofrece información alguna, si se quisiera analizar una distribución de puntos, en tal vía se puede sugerir hacer las divisiones pertinentes en la viga y crear un grupo de elementos, que serían a los cuales se le obtendrían las coordenadas modales, luego de creado el modelo con el grupo de los nodos a ser medidos se introduciría dentro de la función *mshape* en la línea 76 en lugar de ALL el nombre del grupo creado (ej. Nodes), de esta manera vamos a tener los puntos deseados como medidos. Se pasa de los objetivos de este trabajo el análisis de la ubicación de los nodos, lo que sería un atractivo estudio para posteriores.

Para el propósito de este trabajo y el de (Castellanos Trocones., 2017), el cual se realiza en paralelo y usa la función *mshape*, es suficiente con los datos antes presentados (*ShapeMatrix*

y *Omega*), para futuros trabajos donde se requieran más datos, se puede utilizar la función *mshape* incorporándole la extracción de los datos necesarios y así obtener bancos analíticos de datos que sirvan, de cierta forma, para validar métodos de detección de daños.

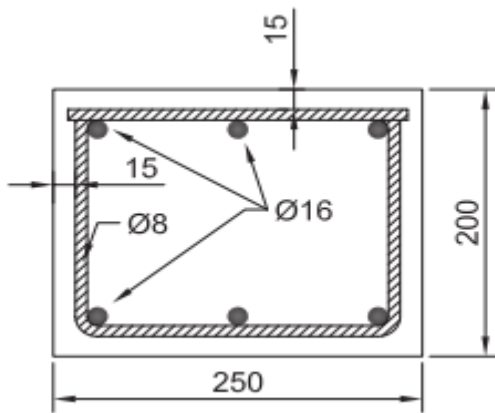
Hasta ahora se ha visto de forma práctica como se pueden obtener los datos de forma analítica con el uso combinado de Matlab y SAP, debajo de esto se oculta una teoría densa de dinámica de estructuras y del Método de los Elementos Finitos (MEF o FEM por sus siglas en inglés), de estos elementos nos podemos servir en (Kiseliov, 1983) y (Chapra & Canale, 2007).

#### **2.4.2. Datos Experimentales.**

La consideración de datos reales es un factor fundamental para juzgar el desempeño del método de detección de daño, para tal propósito se cuenta con ensayos realizados a una viga en laboratorios pertenecientes a KU Leuven (Viga 4 de (Maeck, 2003)). Los resultados de los ensayos son discutidos en los trabajos ( (Maeck & De Roeck, 1999); (Maeck, et al., 2002)), estos resultados ya han sido usados para la validación de diferentes métodos de daño como el del cálculo de la rigidez directa (DSC) en (Maeck, 2003) y el método de flexibilidad local en (Reynders & De Roeck, 2010).

##### **2.4.2.1. Descripción de la viga.**

La viga tiene una longitud de 6 m con una sección transversal de 200x250 (ver figura 2.), el refuerzo transversal está constituido por estribos de 8 mm de diámetro espaciados a 200 mm, el peso total de la viga es de aproximadamente 0.75 t.



*Fig.(2.1) Sección transversal de la viga ensayada.*

Durante la etapa de diseño de la viga se tuvieron en cuenta los siguientes factores (Peeters , et al., 2001):

- El valor de la frecuencia del primer modo debe estar en el orden de los más bajos para estructuras de puentes (2-10 Hz).
- La cuantía de refuerzo un rango realista y la calidad del acero seleccionado deben garantizar que el intervalo entre la aparición de la primera grieta y la falla del elemento sea lo suficientemente grande para estudiar la degradación progresiva de la viga y su influencia en los cambios de los modos.

#### **2.4.2.2. Etapas de carga.**

El daño es inducido progresivamente mediante diferentes cargas estáticas (figura 2.2), dos zonas de daño son inducidas con sus respectivos valores máximos de grieta en el punto de aplicación de las cargas estáticas, esto se logra moviendo el punto de aplicación de la carga luego de 5 cargas para lograr las dos zonas de daño de diferente magnitud de daño no simétrico. Las cargas a un lado de la viga son detenidas antes de la fluencia del acero (#5, 25 kN), mientras que al otro lado las cargas continúan hasta la falla de la viga (#12, 54 kN) (Tabla 2.1).

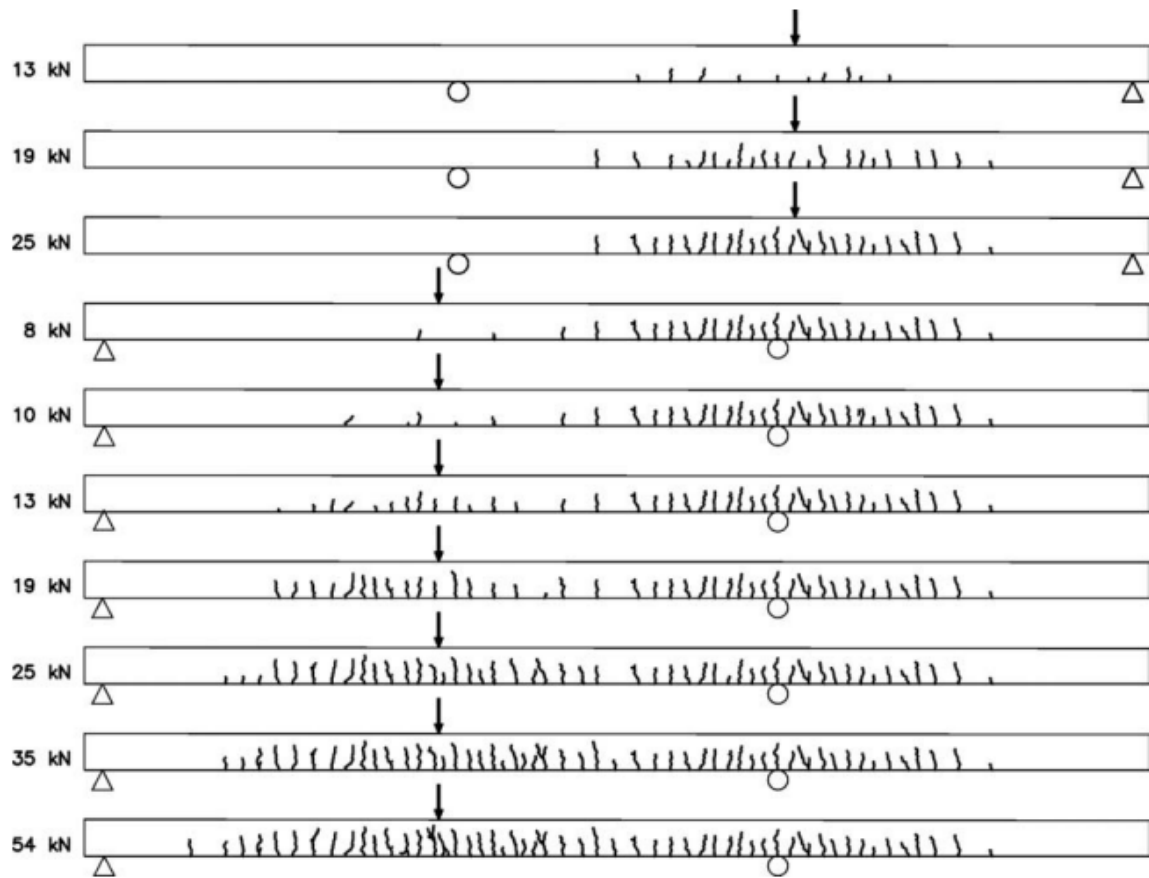


*Fig.(2.2) Viga flectada debido a la carga estática.*

| load step       | load at 4 m [kN] | load step       | load at 2 m [kN] |
|-----------------|------------------|-----------------|------------------|
| phase 1 loading |                  | phase 2 loading |                  |
| #0              | 0                | #6              | 8                |
| #1              | 8                | #7              | 10               |
| #2              | 10               | #8              | 13               |
| #3              | 13               | #9              | 19               |
| #4              | 19               | #10             | 25               |
| #5              | 25               | #11             | 35               |
|                 |                  | #12             | 54               |

**Table 4.4** Static loading sequence for beam 4

*Tabla (2.1) Cargas estáticas para la viga 4.*



*Fig.(2.3) Evolución de la grieta para las diferentes cargas estáticas.*

#### 2.4.2.3. Pruebas dinámicas y procesamiento de resultados.

Tras cada prueba estática, se descarga la viga, se remueven los apoyos y se somete la viga a ensayos dinámicos suspendida por muelles que pretenden simular un estado libre de apoyos.

Cada uno de los ensayos dinámicos son realizados con las siguientes características:

- Las fuentes de excitación son un martillo de impulso y un vibrador electrónico.
- La fuerza dinámica es aplicada en la dirección vertical en un punto fuera del centro en uno de los extremos libres de la viga, de manera que sean excitados los modos flexionantes y los torsionales.
- Las aceleraciones son medidas cada 200 mm en los dos bordes de la parte superior de la viga.

El procesamiento de los datos es basado en el dominio del tiempo por el método de subespacio estocástico. ( (Peeters, 2000); (Peeters B, 2000)). En la figura 2.4 se observan los primeros cuatro modos resultantes (tres flexionantes y uno torsional).

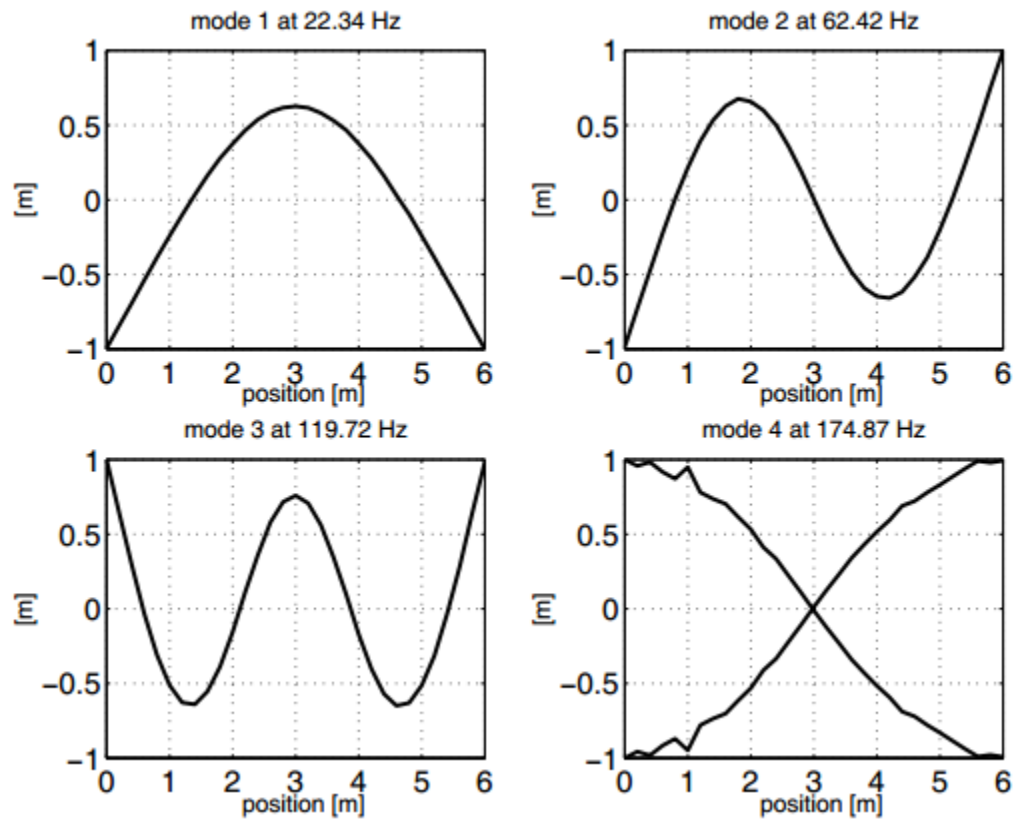


Fig. (2.4) Primeros 4 modos de la viga ensayada para el estado sano.

## 2.5. Método del operador Laplaciano.

El operador laplaciano puede ser también llamado Gapped Smoothing Method (GSM), fue propuesto por C. P. Ratcliffe en el año 1997 como una técnica para determinar la localización del daño en vigas usando la información que contienen las formas modales.

Cambios locales en la rigidez de un elemento arrojan una forma modal con una variación en la pendiente para el lugar donde existe el cambio en la rigidez. Las formas modales medidas son datos discretos en el espacio por lo que la forma de obtener la pendiente es usando una

aproximación de diferencia finita (Ratcliffe , 1997). Una viga puede ser analizada como una estructura unidimensional, el Laplaciano para los datos de la forma modal está dado por:

$$L_i = (y_{i+1} + y_{i-1}) - 2y_i \quad (2.0)$$

Esta técnica utiliza exclusivamente la forma modal obtenida a partir del estado dañado sin requerir de ninguna información de referencia. La primera parte del procedimiento de identificación es aplicar el Operador Laplaciano a la forma modal discretamente medida. Cuando el daño es severo, este paso es suficiente para identificar la localización del daño. Sin embargo, cuando el daño es menos severo (menor de un 40%), el procesamiento adicional del laplaciano produce un procedimiento de detección de daños que puede identificar un cambio de espesor localizado tan pequeño como 5% (Ratcliffe , 1997).

Cuando el nivel de daño es grave, próximo o mayor que un 50% causa una notable anomalía en la forma del modo y se aprecia con mayor facilidad la existencia del daño. A medida que el nivel de daño se reduce, la forma distintiva del Laplaciano continúa haciéndose menos pronunciada y aunque todavía tiene la información necesaria para localizar el daño, la ubicación no es evidente.

Una forma de hacer más apreciable la discontinuidad en el gráfico es, ajustar un polinomio cúbico por tramos usando el Laplaciano, el hecho es usar cuatro puntos del Operador Laplaciano alrededor del lugar donde se va a calcular la diferencia, para crear una función polinómica de grado 3, esa función se evalúa para el punto y se obtiene el valor a restar con el Laplaciano del mismo punto, luego esta operación se realiza para cada punto medido, el resultado es la función diferencia. Según (Ratcliffe , 1997) al graficar la función diferencia se pueden apreciar daños de magnitudes pequeñas (5%).

El polinomio cúbico calculado para el  $i$ -ésimo elemento del Laplaciano,  $L_i$ , en la posición  $x_i$  a lo largo de la viga, estaría dado por el polinomio:

$$a_0 + a_1x_i + a_2x_i^2 + a_3x_i^3 \quad (2.1)$$

Para determinar los coeficientes  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  y  $a_3$  se resuelve es sistema de ecuaciones que determinan los cuatro puntos alrededor del punto  $i$  determina según el Laplaciano:

$$L_{i-2}, L_{i-1}, L_{i+1}, L_{i+2} \quad (2.2)$$

Luego la función de diferencia,  $\delta_i$  se calcula a partir de la resta entre el polinomio cúbico evaluado en el punto  $i$  y el Laplaciano para el mismo punto:

$$\delta_i = (a_0 + a_1x_i + a_2x_i^2 + a_3x_i^3) - L_i \quad (2.3)$$

Como consecuencia para cada modo se obtienen resultados de la función diferencia, (Ratcliffe , 1997) destaca que los primeros modos son los que mayor información del daño aportan.

Se puede obtener la información de daño para cada modo mediante el procedimiento antes descrito, para señales que no contengan ruido o el daño afecte claramente la forma modal y se observe en la función diferencia.

(Janeliukstis, 2015) propone una forma de considerar la información de todos los modos para atenuar el ruido en las señales a consideración de que el ruido se manifiesta irregularmente mientras que las irregularidades debidas a daño se deben manifestar de igual manera para cada daño. Al proceso se le llama estandarización del índice de daño, el cual en nuestro trabajo se adopta como un aporte al método propuesto por (Ratcliffe , 1997). Como forma de obtener una comparación entre la función diferencia y el índice estandarizado de daño se mantienen los dos enfoques. A continuación se muestra el proceso de estandarización del daño según lo presentado en (Janeliukstis, 2015).

El índice de daño se define estandarizado como la suma media de los índices de daño para todos los modos  $N$ , normalizados con respecto al valor más grande de cada modo.

$$DI_i = \frac{1}{N} \times \sum_{n=1}^N \frac{D_i^n}{D_{i,max}^n} \quad (2.4)$$

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 (6), es estandarizado por:

$$Z_i = \frac{DI_i - \mu_{DI}}{\sigma_{DI}} \quad (2.5)$$

Donde  $\mu_{DI}$  y  $\sigma_{DI}$  son el valor medio y la desviación estándar de los índices de daños en la ecuación (6), 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.

## 2.6. Conclusiones parciales del capítulo 2

- La selección del tipo de sensores, configuración del sistema de adquisición de datos (frecuencia de monitoreo) y el procesamiento de datos, son fundamentales para obtener información suficiente, pero no excesiva, para poder identificar cambios que pudieran estar asociados con condiciones de daño o falla.
- Los métodos basados en la curvatura modal son útiles y precisos ya que las formas modales contienen información que las hace más sensibles a los deterioros o cambios en las propiedades existentes en elementos permitiéndoles ser utilizadas directamente en la detección de daños múltiples.
- La ventaja que ofrece el método del Operador Laplaciano con respecto a otros métodos de detección de daños es que, para su aplicación, no necesita de la información de un estado de referencia de la estructura.
- Una solución sencilla para el tratamiento de señales con ruido es la consideración de la información que aporta cada modo en la obtención del índice de daño estandarizado.

## **CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

En el siguiente capítulo se aplica el método del Operador Laplaciano para la identificación de daños en distintos modelos analíticos de vigas y en las señales experimentales de vigas utilizadas como objeto de estudio, para luego llegar al análisis de los resultados y establecer comparaciones con otros métodos de detección de daños para los mismos elementos modelados, con el propósito de darle veracidad al trabajo realizado y conocer bajo qué condiciones se debe utilizar este método.

### **3.1 Procedimiento para la detección y localización de daños a través del método del Operador Laplaciano.**

Para la obtención de resultados en la aplicación del método desarrollado en este trabajo se realiza un análisis a través de la detección del daño a partir del estado real de la estructura para casos analíticos de vigas modeladas tomados de (García O'Reilly, 2016) y para casos experimentales de vigas realizados en un laboratorio en la “Universidad Católica de Leuven”, en Bélgica tomado de (Maeck, 2003).

Además del análisis de estos casos de estudio, se realizan comparaciones entre los resultados obtenidos con este método del Operador Laplaciano y los abordados por (García O'Reilly, 2016) en su trabajo de diploma y los desarrollados por (Castellanos Trocones., 2017).

### **3.2 Aplicación analítica del método del Operador Laplaciano de detección de daños basados en vibraciones**

En el análisis para la aplicación analítica del método Laplaciano se toman varios casos de estudio, dentro de ellos los desarrollados por (García O'Reilly, 2016) modelados con la ayuda del software SAP2000 proponiendo una viga simplemente apoyada con una luz de 4.8m y

con sección transversal de  $0.25 \times 0.40\text{m}$  (ver figura 3.1) . Para la obtención de resultados se proponen 6 modelos de vigas dañados divididos en 12, 48 y 96 tramos iguales para una cantidad de puntos medidos de 13, 49 y 97 respectivamente, reduciéndole a tres de los modelos la inercia hasta un 35% en el tramo 3, mientras que para los 3 restantes se tiene una reducción hasta un 35% en el tramo 3 y hasta un 10% en el tramo 10.



**Figura 3.1. Modelo de viga utilizada.**

Este trabajo se realiza con el objetivo de obtener las  $i$ -ésimas formas modales de dicha viga, para su estado dañado, que constituyen los principales datos de entrada para la aplicación del método, detectándose el daño donde exista una mayor discontinuidad en la función diferencia y en consecuencia un notable índice estandarizado de daños. Con la posible detección y localización realizada se llega a resultados teniendo en cuenta aspectos como:

- Tipo de daño
- Magnitud del daño
- Número de puntos
- Localización del daño
- Número de daños combinado con magnitud del daño.

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

El tipo de daño en un elemento juega un papel fundamental en cuanto a la detección y localización del mismo debido a que su comportamiento difiere según las determinadas condiciones que posea este. En estos casos de estudio analizados estamos en presencia de un daño conocido como delaminación, el cual se introduce modelando en la viga una abertura de  $0.4\text{m}$  que provoca una reducción de inercia en un dicho tramo y que puede ser detectado o no por el método en estudio.

### 3.2.2 Análisis del número de puntos a medir.

Se conoce que la cantidad de mediciones obtenidas durante el SHM son de extrema importancia en la obtención de las formas modales que constituyen los datos de entrada en la detección de daños por los métodos basados en vibraciones. El caso es que, la cantidad de instrumentos a utilizar para la obtención de estas mediciones en nuestro país se ve limitado por su alto costo y nivel de precisión generando que la cantidad de puntos obtenidos sea mínima debido a estas razones, siendo más difícil la detección y localización de daños en elementos estructurales llegando hasta introducir o simular falsos daños.

Con el objetivo de profundizar en el tema y evaluar la detección y localización de daños del método del Operador Laplaciano en cuanto a este aspecto, se dividen los modelos realizados por (García O'Reilly, 2016) en 12, 48 y 96 tramos iguales obteniendo 13,49 y 97 puntos a analizar.

Al analizar la aplicación del método en estos casos de estudio se evidencia que a mayor cantidad de puntos medidos es más efectiva la detección y localización del daño como se muestra en la figura 3.3 e). Pero también se pone de manifiesto que al aumentar este factor la localización varía, mostrándose como si hubiesen dos tramos dañados en los extremos del tramo dañado real, generado por el hecho de que, al existir mayor cantidad de puntos en dicho tramo para la obtención de la función diferencia, (según sub-epígrafe 2.4.1) los puntos con los que se trabajan poseen el mismo tipo de señal dañada provocando una disminución en el índice estandarizado de daños, mientras que en los extremos, al tomar puntos donde se encuentra la parte dañada y la no dañada si va a existir una singularidad en la señal y la función diferencia tendrá una discontinuidad notable aumentando a su vez el índice estandarizado de daño mostrándose en esa zona.

### 3.2.3 Análisis de la magnitud del daño

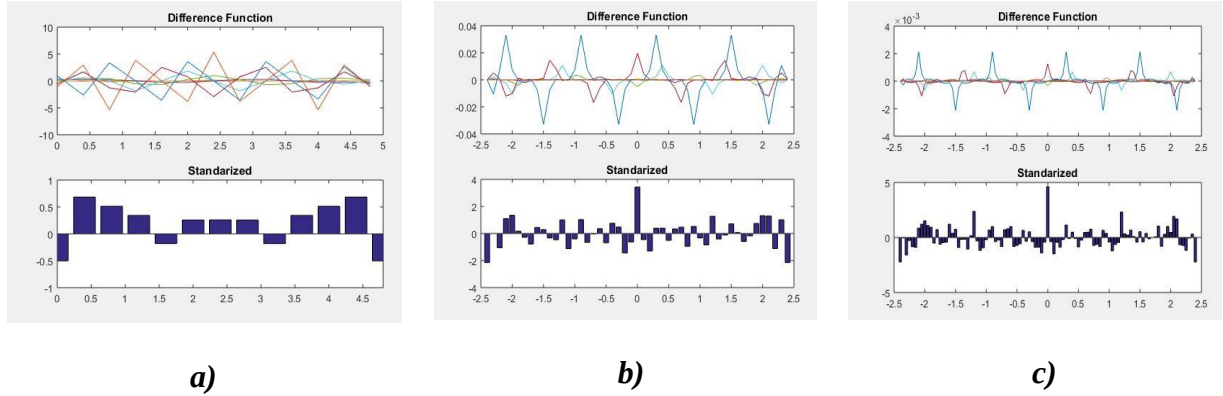
La discontinuidad en la función diferencia es la que nos da la posibilidad de detección y localización del daño y cuando esta es más pronunciada arroja resultados más precisos.

En cuanto a los daños introducidos en los modelos de vigas analizados que ocasionan una reducción de inercia en el tramo o tramos dañados se obtuvieron como resultados que a medida que el daño es mayor es más notable la anomalía en la forma del modo y en

consecuencia más fácil y evidente su detección y localización teniendo en cuenta además la cantidad de puntos a medidos (ver figura3.4).

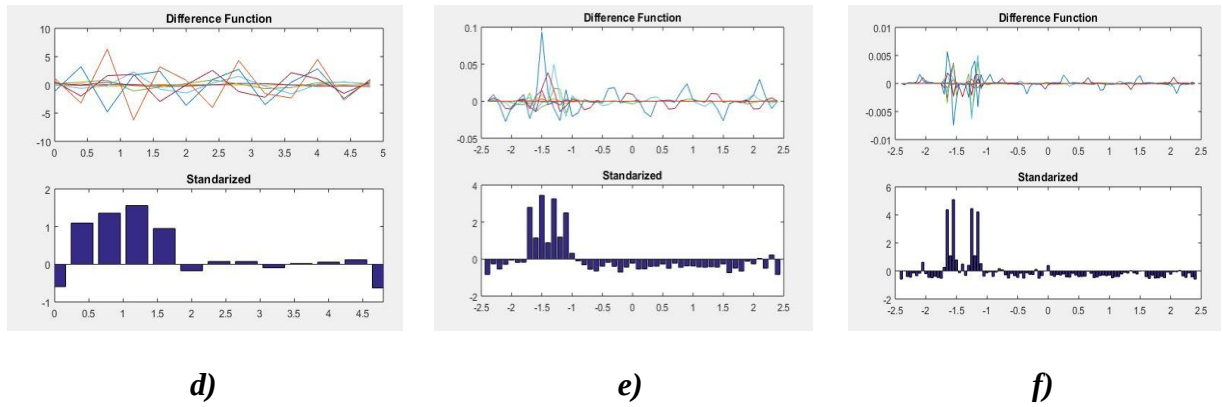
### 3.2.4 Análisis respecto a la detección y localización del daño:

Resultados del método Laplaciano para el modelo de viga en estado sano:



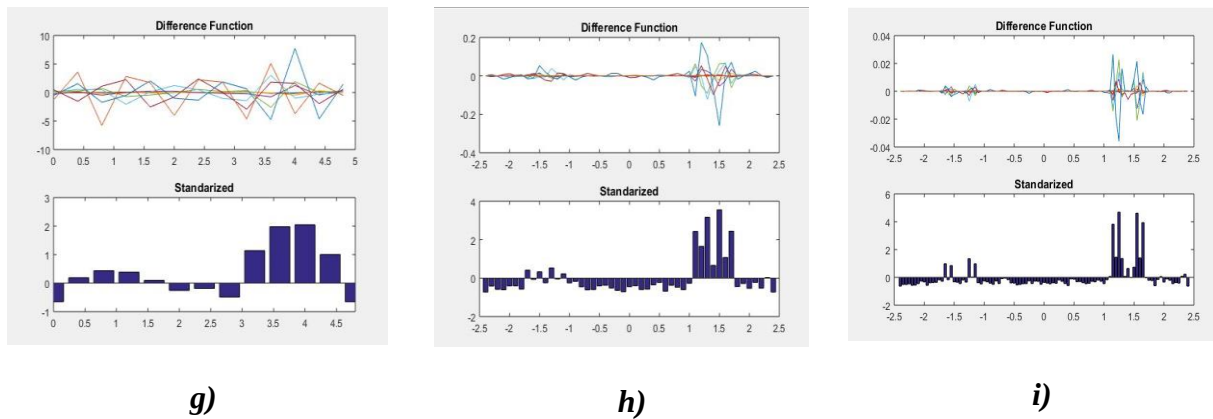
**Figura 3.2. a), b) y c) Resultados obtenidos para el Modelo de viga sano para 13, 49 y 97 puntos medidos**

Resultados del método Laplaciano para el modelo de la viga con un daño inducido:



**Figura 3.3. d), e) y f) Resultados obtenidos para el Modelo de viga con un daño para 13, 49 y 97 puntos medidos**

Resultados del método Laplaciano para el modelo de la viga con dos daños inducidos:



**Figura 3.4. g), h) e i) Resultados obtenidos para el Modelo de viga con dos daño para 13, 49 y 97 puntos medidos**

Luego de realizar el procedimiento descrito en el capítulo 2 en el sub-epígrafe (2.4.1) y obtener las formas modales a través de la función *mshape* en MATLAB, se probó el comportamiento del método desarrollado demostrando que como se aprecia en las figura 3.2 este método no ofrece información necesaria en caso del modelo sano para conocer si el mismo está dañado o no, argumentando que dicho método no es sólido en cuanto a la detección del daño ya que no muestra una diferencia que pueda distinguir fielmente y con exactitud los resultados del modelo sano con respecto al dañado.

En los casos para los modelos dañados en un solo tramo en la figura 3.3 se evidencia la existencia del daño proporcionando la localización del mismo, pero con la particularidad de tomar un tramo más allá de los extremos del propio tramo dañado en el caso de 13 puntos medidos y mostrando que a medida que aumentan la cantidad de puntos mejora la localización del daño y a la vez ocurre que para 97 puntos el daño se muestra en los extremos del tramo debido a lo expuesto en el sub-epígrafe 3.2.2.

En presencia de dos daños en el elemento se tiene que para las mínimas cantidades de puntos el método solo reconoce y localiza el daño de mayor magnitud y del mismo modo que el explicado anteriormente con la diferencia que para 97 puntos si se reconocen ambos daños ocurriendo la misma situación donde el daño se localiza a los extremos del tramo dañado.

### **3.2.5 Análisis del número de daños combinado con la magnitud de estos.**

Como se ha venido tratando, la magnitud del daño tiene una indiscutible influencia en la detección y localización del mismo, y cuando se analiza combinado al número de daños inducidos en un mismo modelo, este método tiene como dificultad que no reconoce para la menor cantidad de puntos ambos daños introducidos en el caso de estudio, distinguiendo solamente el de mayor magnitud, debido al hecho de la no existencia de la cantidad de puntos necesarios para una mayor cantidad de datos referente a los daños, proporcionando información solo de aquel que alcanza con mayor facilidad el estado de falla.

A medida que se aumenta la cantidad de puntos es más visible la detección y localización de ambos daños hasta llegar a distinguir ambos en la aplicación del método para el modelo de 97 puntos medidos, ilustrándose que, aunque se evidencian sus presencias, el de mayor magnitud presenta un mayor índice estandarizado de daños que el de menor magnitud.

## **3.3 Comparación de resultados con otros métodos de detección de daños.**

Con el objetivo de darle veracidad al método del Operador Laplaciano desarrollado en este trabajo y resaltar bajo qué condiciones es recomendable usarlo, fue necesario contrastarlo con los métodos analizados por (García O'Reilly, 2016) y los basados en la transformada Wavelet tratados por (Castellanos Trocones., 2017). En el caso de los métodos tratados por (García O'Reilly, 2016) se establecen comparaciones solo con los resultados de los modelos de viga dañada que contienen 13 puntos medidos mientras que con los abordados por (Castellanos Trocones., 2017) se analizan comparaciones con todos los resultados obtenidos de los modelos de viga dañado para 13,49 y 97 puntos medidos.

### **3.3.1 Comparación con los métodos desarrollados por (García O'Reilly, 2016).**

(García O'Reilly, 2016) aborda en su trabajo el desarrollo de siete métodos de detección de daños de los cuales todos no cumplieron su función de detección y localización del daño introducido, por lo que las comparaciones se establecerán con aquellos métodos que obtuvieron resultados satisfactorios.

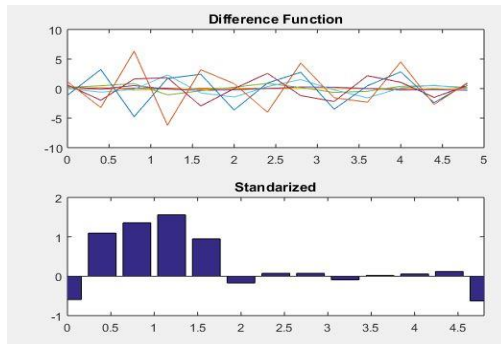
#### **3.2.1.1 Viga de 4.8 metros con una reducción de la inercia hasta el 35% en el tramo 3.**

Métodos tomados de (García O'Reilly, 2016) para la comparación:

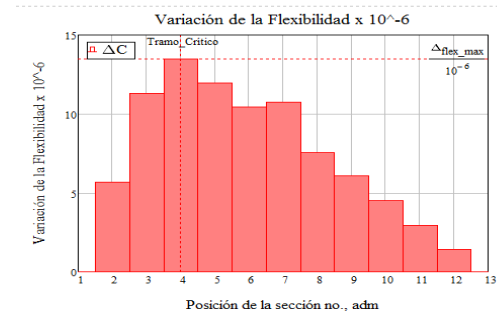
- 1) Método del cambio de la matriz de flexibilidad, medida dinámicamente (FM – Flexibility Method).
- 2) Método de Cálculo de la Rigidez Directa.
- 3) Método de Curvatura de las Formas Modales.

#### Resultados obtenidos en la comparación:

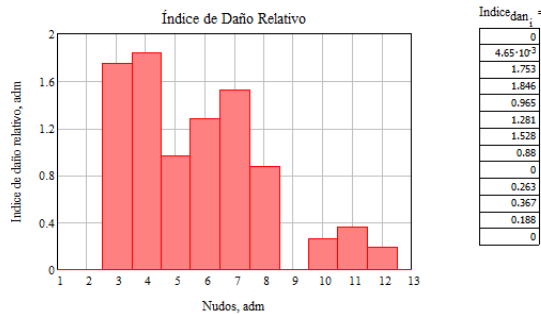
a)



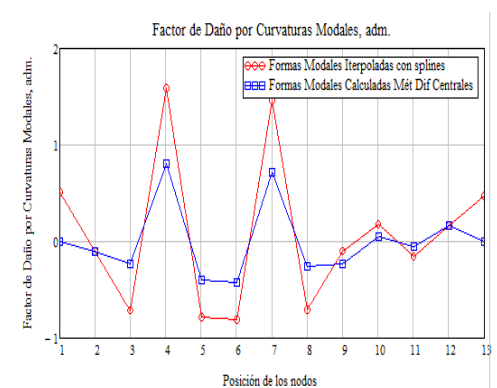
b)



c)



d)



**Fig.3.5. Resultados; a) Por el método del Operador Laplaciano b) Por el método del cambio de la matriz de flexibilidad, medida dinámicamente, c) Por el método de Cálculo de la Rigidez Directa, d) Por el método de Curvatura de las Formas Modales**

Luego de la comparación de resultados realizados por (García O'Reilly, 2016) (ver figura 3.5 b, c y d) con el método abordado en este trabajo (ver figura 3.5 a) se puede llegar a la conclusión que : el método del cambio de la matriz de flexibilidad y el método de Cálculo de la Rigidez Directa tienen en común con el método del Operador que detectan y localizan el daño, mientras que el método de Curvatura de las Formas Modales solo detecta el daño inducido en el modelo. Por lo que, se llega a la proposición de utilizar el método del cambio

de la matriz de flexibilidad, el método de Cálculo de la Rigidez Directa y el método de Curvatura de las Formas Modales para una adecuada detección tomándose el de más exactos resultados y recurriendo a los dos primeros mencionados unidos al método del Operador Laplaciano para una localización más clara tomando de igual manera la respuesta más acertada.

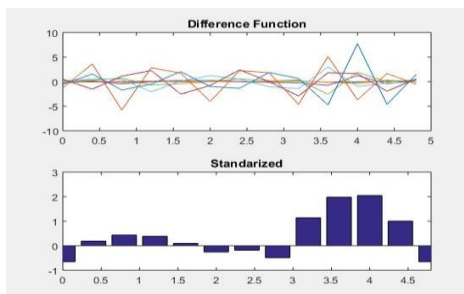
### 3.2.1.2 Viga de 4.8 metros con una reducción de la inercia hasta el 35% en el tramo 3 y con una reducción de la inercia hasta el 10% en el tramo 10.

Métodos tomados de (García O'Reilly, 2016) para la comparación:

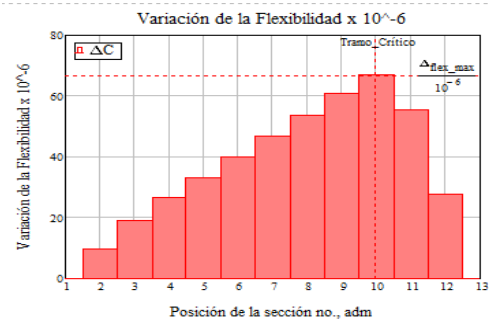
- 1) Método del cambio de la matriz de flexibilidad, medida dinámicamente (FM – Flexibility Method).
- 2) Relación de Cambio de la Energía de Deformación Modal (MSECR por sus siglas en inglés).
- 3) Método de Cálculo de la Rigidez Directa.

Resultados obtenidos en la comparación:

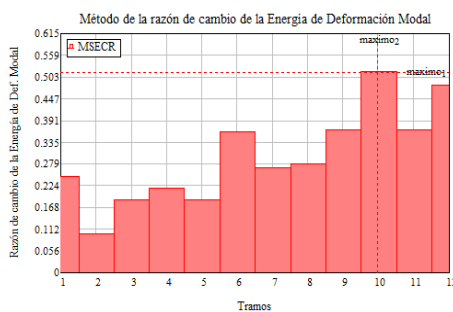
a)



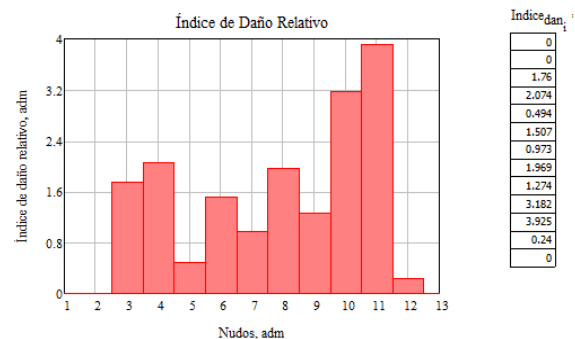
b)



c)



d)



**Fig.3.6. Resultados; a) Por el método del Operador Laplaciano, b) Por el método del cambio de la matriz de flexibilidad, medida dinámicamente, c) Por el método de Relación de Cambio de la Energía de Deformación Modal, d) Por el método de Cálculo de la Rigidez Directa.**

Luego de la comparación de resultados realizados por (García O'Reilly, 2016) (ver figura 3.5 b, c y d) con el método abordado en este trabajo (ver figura 3.5 a) se puede decir que: el método de Cálculo de la Rigidez Directa solo detecta los dos daños inducidos en el modelo mientras que el método del cambio de la matriz de flexibilidad, el método de Relación de Cambio de la Energía de Deformación Modal y el método del Operador Laplaciano detectan y localizan el daño solo de mayor magnitud inducido en el modelo. Por lo que, se llega a la proposición de que se puede utilizar el método de Cálculo de la Rigidez Directa para la detección y si se fuera a utilizar los demás métodos para una localización se recomienda comprobar otros criterios que lleven a una mayor seguridad en cuanto a la presencia y localización del deterioro.

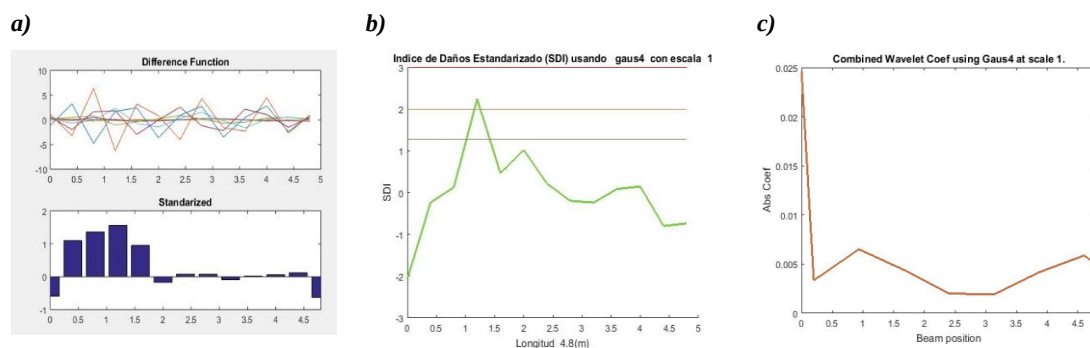
### 3.2.2 Comparación con los métodos desarrollados por (Castellanos Trocones., 2017).

(Castellanos Trocones., 2017) se refiere en su trabajo a la detección de daños con el uso de métodos basados en técnicas de tiempo-frecuencia enfocándose en la transformada Wavelet desarrollando dos de estos métodos los cuales se toman para la comparación, siendo:

- 1) Primer algoritmo basado en la Transformada Continua Wavelet.
- 2) Segundo algoritmo basado en la Transformada Continua Wavelet.

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

Resultados para la comparación con 13 puntos medidos:

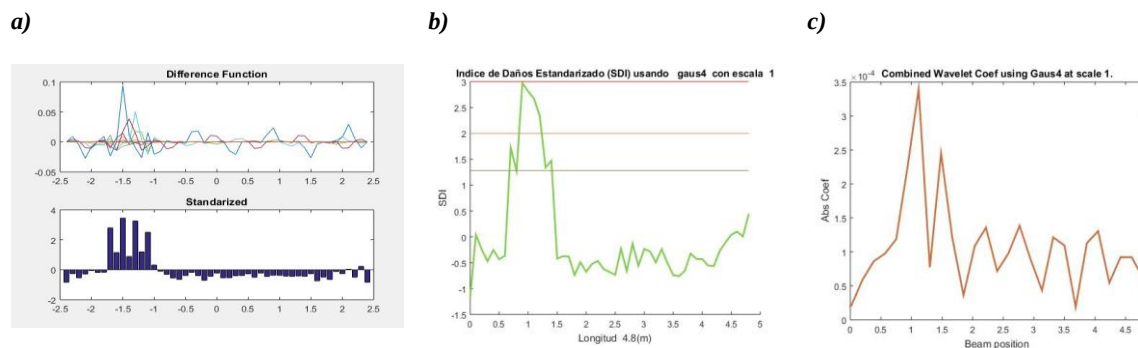


**Fig.3.7. Resultados obtenidos con 13 puntos; a) Por el método del Operador Laplaciano, b) Por el primer algoritmo basado en la Transformada Continua Wavelet y c) Por el segundo algoritmo basado en la Transformada Continua Wavelet.**

Para la cantidad mínima de puntos medidos se puede evidenciar en la figura 3.7 que el primer algoritmo basado en la Transformada Continua Wavelet y el método del operador Laplaciano detectan y localizan el daño inducido mientras que el segundo algoritmo basado en la Transformada Continua Wavelet es ineficiente en este caso de estudio.

El hecho de que, el primer algoritmo basado en la Transformada Continua Wavelet y el método del Operador Laplaciano utilicen para la obtención de las formas modales solo el estado real de la estructura sin necesidad de conocer el estado sano de la misma, nos da la idea de que, en la utilización de ambos métodos en un mismo caso de estudio, se recomienda tomar los resultados del que arroje una mayor información y exactitud referente a la localización del daño y tomar el primer algoritmo para una acertada detección.

#### Resultados para la comparación con 49 puntos medidos:



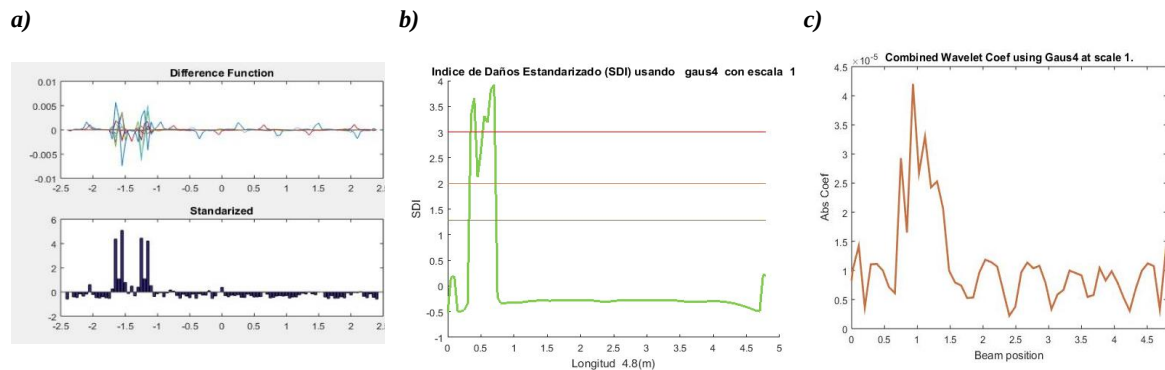
**Fig.3.8. Resultados obtenidos con 49 puntos; a) por el método del Operador Laplaciano, b) Por el primer algoritmo basado en la Transformada Continua Wavelet y c) Por el segundo algoritmo basado en la Transformada Continua Wavelet.**

Según los resultados obtenidos por cada uno de los métodos en comparación en el modelo analítico que contiene 49 puntos medidos se puede distinguir en este caso que el daño 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 3.8 a, b y c).

La implementación de cada uno de estos métodos se limita al tipo de datos con que se cuenten, ya que, al poseer solo la información del estado real del elemento se debe recurrir

al primer algoritmo basado en la Transformada Continua Wavelet y al método del Operador Laplaciano para la localización del daño, y para una mayor confiabilidad en la detección utilizar el primero mencionado. En caso de contar con los dos estados de referencia, sano y dañado, se recomienda detectar y localizar el daño por los dos algoritmos, y tomar el método del Operador Laplaciano para comprobar la localización del mismo en el elemento, hasta quedarnos con el resultado de más credibilidad y exactitud.

Resultados para la comparación con 97 puntos medidos:

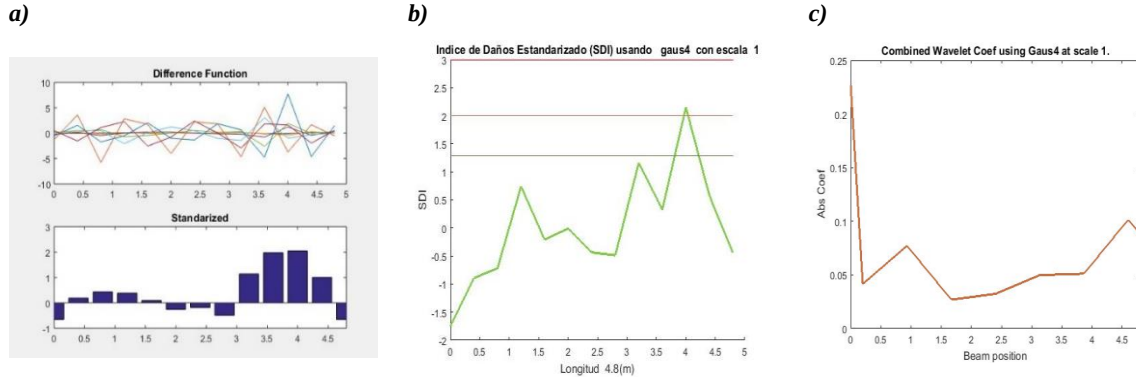


**Fig.3.9. Resultados obtenidos con 97 puntos; a) por el método del Operador Laplaciano ,b) Por el primer algoritmo basado en la Transformada Continua Wavelet y c) Por el segundo algoritmo basado en la Transformada Continua Wavelet.**

En este caso se observa que a través de los resultados obtenidos (ver figura 3.9) se corrobora lo expuesto anteriormente para la viga analizada con 49 puntos, recalcando que, a medida que se aumentan la cantidad de puntos en el análisis, se obtiene con más exactitud la detección y localización del daño.

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

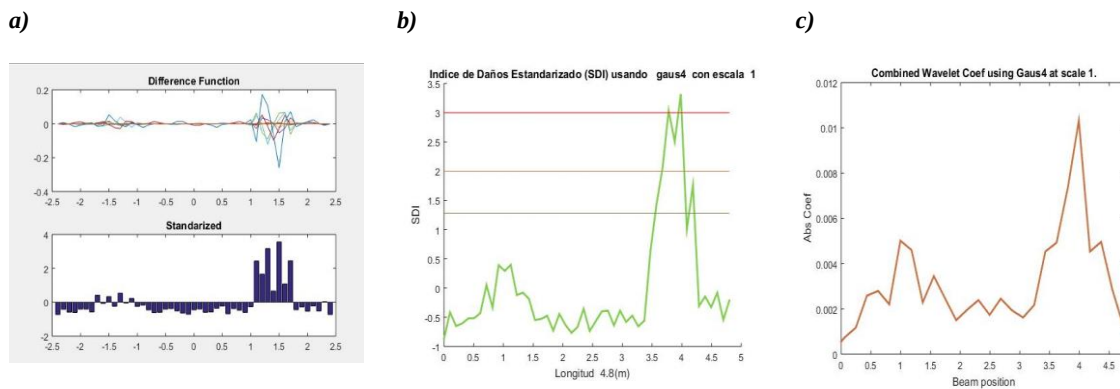
Resultados para la comparación con 13 puntos medidos:



**Fig.3.10. Resultados obtenidos con 13 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.**

Para la cantidad mínima de puntos medidos, con dos daños de diferente magnitud introducidos en el modelo se puede evidenciar en la figura 3.10 que ninguno de los métodos analizados contiene una información real y precisa del daño, ya que el primer algoritmo basado en la Transformada Continua Wavelet y el método del operador Laplaciano detectan y localizan solo el daño de mayor magnitud mientras que el segundo algoritmo basado en la Transformada Continua Wavelet no ofrece resultados con respecto a ninguno de los daños.

#### Resultados para la comparación con 49 puntos medidos:

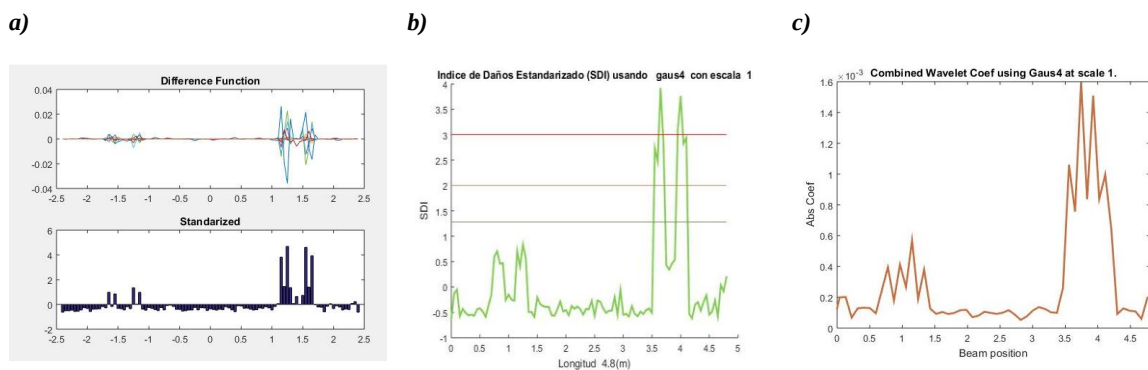


**Fig.3.11. Resultados obtenidos con 49 puntos; a) por el método del Operador Laplaciano ,b) Por el primer algoritmo basado en la Transformada Continua Wavelet y c) Por el segundo algoritmo basado en la Transformada Continua Wavelet.**

En este caso donde la cantidad de puntos es de 49 y presenta las mismas condiciones de daño que el modelo anterior, ocurre que, para el primer algoritmo basado en la Transformada Continua Wavelet y el método del Operador Laplaciano solo se detecta y localiza el daño de mayor magnitud mientras que el segundo algoritmo basado en la Transformada Continua Wavelet detecta y localiza ambos daños.

El hecho de que, el segundo algoritmo basado en la Transformada Continua Wavelet posea una mayor eficiencia para la detección y localización del daño en este modelo, se debe una vez más al aumento de la cantidad de mediciones en la viga y al hecho de que (a pesar que puede ser tomado como una desventaja con respecto a los otros dos métodos) este método requiere en su proceso del conocimiento del estado de referencia, siendo en este caso una ventaja ya que amerita mayor información en la adquisición de datos utilizados para su funcionamiento. Por lo que, cuando existe la presencia de más de un daño en el elemento se recomienda utilizar este algoritmo para detectar y localizar los daños siempre que se tengan los antecedentes del estado de referencia. Además, se puede 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.

#### Resultados para la comparación con 97 puntos medidos:



**Fig.3.12. 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.**

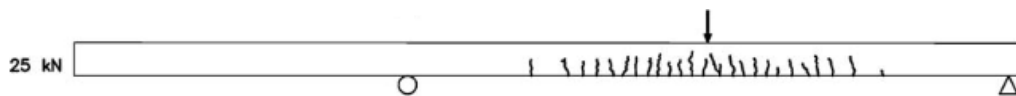
A través de los resultados obtenidos en este modelo (ver figura 3.12) se evidencia como el segundo algoritmo conserva su condición de detectar y localizar ambos daños, incorporándose a él, el método del Operador Laplaciano; mientras que el primer algoritmo

mantiene su posición de solo detectar y localizar el daño de mayor magnitud. Proponiéndose en este caso localizar el daño con los que arrojan resultados satisfactorios para ambos tramos dañados logrando una detección más exacta con el segundo algoritmo.

### 3.4 Aplicación experimental del método del Operador Laplaciano de detección de daños basados en vibraciones.

Para el análisis experimental del método desarrollado en este trabajo fue imprescindible obtener señales reales a partir de ensayos dinámicos de un elemento tipo viga, realizados en un laboratorio en la “Universidad Católica de Leuven”, en Bélgica. De los diferentes modelos de vigas ensayadas se tomaron los resultados correspondientes a la viga designada por el número 4 en la tesis de doctorado de ( Maeck , 2003), la cual posee un peso de 750Kg, una longitud de 6m con sección transversal mostrada en la figura 2.1, con acero de refuerzo de 16 mm distribuido simétricamente y estribos de 8 mm espaciados a 200 mm en la longitud de la viga.

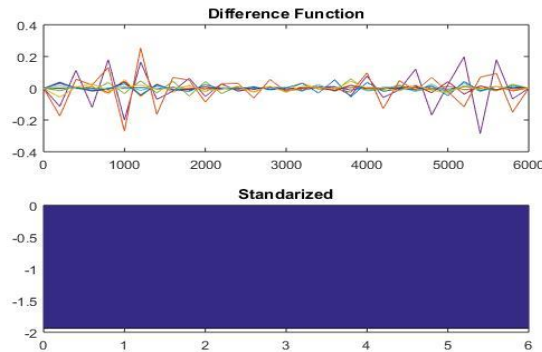
En la viga se introducen 12 estados de daños producidos al estar sometido dicho elemento a 8 magnitudes de cargas diferentes siendo aplicadas en dos fases, una primera fase con 5 tipos de cargas distintos a 4m del borde izquierdo y otra fase con 7 tipos de cargas distintos a 2m del mismo borde (ver figura 2.3). Se seleccionó el estado de daño número 5 (ver figura 3.14), correspondiéndole un daño producido por una carga puntual de 25 kN ubicada a 4m del borde izquierdo con la que se evaluará el método del Operador Laplaciano para otorgarle veracidad al mismo y conocer si funciona la detección y localización del daño en presencia de este tipo de situación.



*Fig.3.14. 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 de la viga número 4, se realizó el ensayo a nivel de laboratorio con un total de 62 puntos medidos.

### Análisis de resultados:



*Fig.3.15. Resultado obtenido por el método del Operador Laplaciano para la viga 4 correspondiente al estado de daño 6.*

Como se observa en la figura 3.15 el método del Operador Laplaciano no ofrece información respecto a la detección y localización del daño en el modelo experimental analizado llegando a manifestar que este método no es factible para todas las condiciones ni tipos de daños.

### **3.5 Conclusiones parciales del capítulo 3.**

Con la aplicación del método del Operador Laplaciano en distintos casos de estudio se llegaron a las siguientes conclusiones:

- Este método tiene como inconveniente que no es idóneo en la detección del daño ya que no distingue los resultados de la viga en estado sano con los de la propia viga en estado dañado, siendo posible solo la localización de la zona dañada.
- Al considerar solo el estado dañado de la estructura se necesita un número de puntos medidos suficientes para obtener las singularidades, se puede establecer una densidad de puntos de aproximadamente cuatro lecturas por metro para obtener localizaciones para daños severos, mientras que a medida que la magnitud del daño disminuye se necesita un número mayor de mediciones al punto de no ser viable en la práctica.
- Este método que no considera un estado de referencia ofrece como desventaja la necesidad de contar con mayor cantidad de puntos medidos en la estructura para conocer mayor información del daño existente.

- En la aplicación para el caso experimental de viga analizado este método es insuficiente para la detección y localización del daño introducido.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

- La posibilidad de detectar daños en estructuras permite poder actuar de forma inmediata y reparar el lugar dañado teniendo en cuenta el ahorro económico y la seguridad de los usuarios de la estructura.
- Los métodos de detección de daños basados en vibraciones constituyen una herramienta importante en el conocimiento del estado actual de una estructura. Para la aplicación de algunos de ellos, no es necesario conocer el estado de la estructura previo al daño y, en general, vigilan todo el sistema observando cambios en sus parámetros dinámicos, obteniendo de esta forma una localización real del daño para su posterior evaluación.
- La selección del tipo de sensores, configuración del sistema de adquisición de datos (frecuencia de monitoreo) y el procesamiento de datos, son fundamentales para obtener información suficiente, pero no excesiva, para poder identificar cambios que pudieran estar asociados con condiciones de daño o falla.
- La ventaja que ofrece el método del Operador Laplaciano con respecto a otros métodos de detección de daños es que, para su aplicación, no necesita de la información de un estado de referencia de la estructura.
- Este método que no considera un estado de referencia ofrece como desventaja la necesidad de contar con mayor cantidad de puntos medidos en la estructura para conocer mayor información del daño existente.
- Este método tiene como inconveniente que no es idóneo en la detección del daño ya que no distingue los resultados de la viga en estado sano con los de la propia viga en estado dañado, siendo posible solo la localización de la zona dañada.

- Al considerar solo el estado dañado de la estructura se necesita un número de puntos medidos suficientes para obtener las singularidades, se puede establecer una densidad de puntos de aproximadamente cuatro lecturas por metro para obtener localizaciones para daños severos, mientras que a medida que la magnitud del daño disminuye se necesita un número mayor de mediciones al punto de no ser viable en la práctica.
- En la aplicación para el caso experimental de viga analizado este método es insuficiente para la detección y localización del daño introducido.

### **Recomendaciones**

- Profundizar en el estudio para aplicar el método del Operador Laplaciano a los datos de deformaciones de vigas extraídas del Georadar IBIS-FC.
- Aplicar al método estudiado otros casos de vigas experimentales que contengan otro tipo de deterioro para conocer si arroja resultados satisfactorios o no.
- Aplicar el método del Operador Laplaciano en una viga real parte de un puente que contenga una delaminación como daño en su estructura para comprobar la veracidad del método desarrollado.
- Se recomienda seguir investigando en cuanto a la aplicación de otros métodos de detección de daños basados en vibraciones con el objetivo de seguir conociendo el campo en que se esta trabajando para llegar a establecer en que tipo de condiciones utilizarlos y si sus resultados pueden ser aplicados a la práctica.

## Bibliografía

Arceo Mariñelarena, D. y otros, 2013. *Diseño de algoritmos genéticos para la detección de daños en estructuras.* Sanfandila: s.n.

Chagoyén Méndez, E. L., Ramírez Díaz, R., Gámez Breto, Y. & Pérez Lecusay, H., 2015. *Evaluación de un puente de vías férrea mediante ensayos estructurales y modelación computacional.* Habana: s.n.

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

Molina Menache, S. M. y otros, 2012. *Detección de daño en puentes mediante un modelo experimental.* Acapulco: s.n.

Pérez Cardozo, M. Á. y otros, 2012. *Análisis de sensibilidad para la ubicación de sensores en estructuras.* s.l.:s.n.

Radzienski, M., Krawczuk, M. & Palacz, M., 2011. *Improvement of damage detection methods based on experimental.* s.l.:s.n.

Rodríguez, R., Escobar S. , J. A. & Gómez, R., 2005. *Detección de daños en edificios utilizando submatrices de daños.* DF, México: s.n.

Xu, Y.-L. y otros, 2011. *Damage Detection and Reliability Assessment of Building Structures Using Stochastic Approaches.* Dalian, China: s.n.

Alfonso Aspiro, Y., 2016. *Estimación de parámetros estructurales en puentes usando la OAPI SAP2000 - MATLAB.* Santa Clara: s.n.

Anaya Saltarín, C. E. & Baraja Ríos, C. A., 2011. *Metodología para la detección de daños en estructuras metálicas empleando la técnica de análisis modal teórico-experimental.* Santander: s.n.

Ancona Lazcano, A. R., Salgado Estrada, R., Zamora Castro, S. A. & Marcial Martínez, F., 2011. *Evaluación de Métodos de daño en estructuras mediante el uso de vibraciones.* Aguascalientes: s.n.

- Atienza Pascual, R., 2004. *Técnicas de actualización aplicadas a la detección de daños*.. Madrid: s.n.
- Burricaudy Portal, 2015. *Evaluación de daños estructurales en puentes típicos cubanos de ferrocarril*. s.l.:s.n.
- Carpio Santamaria, F. A., 2015. *Evaluación estructural de puentes por medio de vibraciones aplicadas a modelos escalas*.. Veracruz: s.n.
- Carrión Viramontes, F. J. & Lozano Guzmán, A., 2001. *Evaluación y detección de daño en estructuras utilizando un método inverso por sub-dominios*.. Sanfandila: s.n.
- Carrión Viramontes, F. J., 1999. *Evaluación de puentes mediante el análisis de vibraciones*. Sanfandila: s.n.
- Castellanos Trocones., M., 2017. *Métodos para la detección, localización y evaluación de daños en estructuras de puentes a partir de parámetros modales*.. Santa Clara: s.n.
- Cavalieri, F., Imbimbo, M. & Betti, R., 2012. *An Application of Damage Detection Methods to A Real World Structure*. s.l.:s.n.
- Chapra, S. C. & Canale, R. . P., 2007. *Metodos numéricos para ingenieros*. Quinta Edición ed. s.l.:s.n.
- Cremona, C., 2012. *Damage evaluation of structures using dynamic measurements*. Paris: s.n.
- Cuartas Ospina, J. L. & Riveros Jerez, C. A., 2013. *Detección de daños en puentes de concreto reforzado utilizando algoritmos de reconocimientos de patrones estadísticos autorregresivos*.. Medellín: s.n.
- Doebling, S., Farrar, C., Prime, M. & Shevitz, D., 1996. *Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics*. Los Álamos: s.n.
- Ewins, D. J., 2000. *Modal testing: theory, practice and application*. (v12) ed. s.l.:s.n.
- Fan , W. & Qiao, P., 2011. *Vibration-based Damage Identification Methods: A Review and Comparative Study*. s.l.:s.n.

- García O'Reilly, I. . B., 2016. *Métodos para la detección, localización y evaluación de daños en estructuras de puentes a partir de parámetros modales*. Santa Clara: s.n.
- Garita, C., 2016. Enfoques de integración de información para sistemas de monitoreo de salud estructural de puentes. *Tecnología en Marcha*, 29(1), pp. 96-107.
- Herrera Ruíz, 2015. *Evaluación de daños estructurales de H.A. a partir de la evaluación del comportamiento dinámico mediante simulación de pruebas de carga*. Instituto Superior politécnico José Antonio Echeverría.: s.n.
- Janeliukstis, R., 2015. *Damage Identification in Beam Structure using Spatial Continuous Wavelet Transform..* Poland: s.n.
- Kiseliov, V. A., 1983. *Mecánica de la construcción. Dinámica y estabilidad de las estructuras*. Moscow, MIR: s.n.
- Liu Kuan, 2013. *Monitoreo y evaluación estructural de puentes utilizando un sistema de instrumentación inalámbrica*. Costa Rica: s.n.
- Losa Miranda, G., 2015. *Tecnologías de sensorización e identificación modal. Aplicación a la determinación del amortiguamiento estructural..* Valladolid: s.n.
- Maeck, J., 2003. *Damage Assessment of Civil Engineering*. Leuven: KU Leuven.
- Maeck, J. & De Roeck, G., 1999. *Damage Assessment of Civil Engineering Structures by Vibration Monitoring*. Leuven: s.n.
- Maeck, J., Teughels, A. & De Roeck , G., 2002. *Development and implementation of a 2D-plane element to model the dynamic behaviour of cracked reinforced concrete*. Madeira Island: s.n.
- Montanari, L., 2014. *Vibration-Based Damage Identification in beam structures through wavelet analysis*. Parma: s.n.
- Morales Fernández, F. D., 2014. *Análisis de daños en estructuras mediante entropía expectral..* s.l.:s.n.
- Morán Córdoba, C., 2011. *Detección, localización y cuantificación de daño en material compuesto*. s.l.:s.n.

Peeters B, D. R. G., 2000. Reference based stochastic subspace identification in civil.. *Inverse Problems in Engineering*, Volumen 8, pp. 47-74.

Peeters , B., Maeck , J. & De Roeck , G., 2001. Vibration-based damage detection in civil. *Smart Materials and Structures*, Volumen 10, pp. 518-527.

Peeters, B., 2000. *System identification and damage detection in civil engineering*. Belgium, K.U.Leuven.

Peralta, M. H. & Ercoli, N. L., 2012;2013. *Medición y análisis de vibraciones como técnica de inspección en puentes..* Buenos Aires: s.n.

Ratcliffe , C. P., 1997. *Damage detection using a modified Laplacian operator on mode shape*. s.l.:s.n.

Reynders, E. & De Roeck, G., 2010. A local flexibility method for vibration-based damage localization. *Journal of Sound and Vibration*, Volumen 329, p. 2367–2383.

Rojas Díaz, R., 2006. *Detección de fallos en estructuras mediante la medida de la variación de sus propiedades dinámicas..* Sevilla: s.n.

Tejada, A. d. M., 2011. *Análisis dinámico de estructuras en el dominio de la frecuencia..* Madrid: s.n.

Vázquez Torres, D. E., Suárez, L. E. & López, R. R., s.f. *Identificación dedaños en vigas de hormigón experimentales y analíticas utilizando metodologías modales..* s.l.:s.n.

Worden, K., Farrar, C., Manson, G. & Gyuhae, P., 2007. *The fundamental axioms of structural healt monitoring*. Sheffield: s.n.

## ANEXOS

### Anexo I. Función mshape que obtiene las formas modales y las frecuencias naturales del modelo por elementos finitos

```

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
27 ret = SapModel.Analyze.CreateAnalysisModel;
28
29 %% UNITS SELECTION
30 ret = SapModel.SetPresentUnits(6);
31
32 %% Set solver analysis options
33 ret=SapModel.Analyze.SetSolverOption(1,false,'MODAL');
34
35 %% Correr Análisis
36 ret = SapObject.SapModel.Analyze.RunAnalysis();
37
38 %% Deseleccionando todos los casos y combinaciones de salida
39 ret = SapModel.Results.Setup.DeselectAllCasesAndCombosForOutput;
40
41 %% Seleccionando el caso y combinación de salida
42 ret = SapModel.Results.Setup.SetCaseSelectedForOutput('MODAL');
43
44 %% Obtención del periodo modal
45 NumberResults = 0;
46 Obj = cellstr(' ');
47 Elm = cellstr(' ');
48 LoadCase = cellstr('MODAL');
49 StepType = cellstr('Mode');

```

```

47 - StepNum = zeros(1,1,'double');
48 - Period = zeros(1,1,'double');
49 - Frequency = zeros(1,1,'double');
50 - CircFreq = zeros(1,1,'double');
51 - EigenValue = zeros(1,1,'double');
52
53 - [~, ~, ~, ~, ~, ~, Frequency, CircFreq, ~] = ...
54 SapModel.Results.ModalPeriod(NumberResults, LoadCase, StepType, StepNum, Period, Frequency, CircFreq, EigenValue);
55
56 - omega = CircFreq.'; % Natural frequency [rad/s]
57 %% Obtención de las formas modales (coordenadas modales)
58
59 - NumberResults = 0;
60 - Obj = cellstr(' ');
61 - Elm = cellstr(' ');
62 - 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\Dairol-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\Dairol-5\Casos de Estudio\',fileName]);
138 save modal_shapes ShapeMatrix omega ;
139 cd('D:\UNIVERSIDAD\MI TESIS\DETECCIÓN DE DAÑOS\MIS COSAS\Dairol-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,'.txt'],['D:\UNIVERSIDAD\MI TESIS\DETECCIÓN DE DAÑOS\MIS COSAS\Dairol-5\Casos de Estudio\',fileName]);
148 [status,message] = copyfile([filepath,fileName,'.xml'],['D:\UNIVERSIDAD\MI TESIS\DETECCIÓN DE DAÑOS\MIS COSAS\Dairol-5\Casos de Estudio\',fileName]);
149
150 status
151 message
152 - end

```

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

## Anexo II. Función Laplacian que contiene el desarrollo del método del Operador Laplaciano.

```

1 %
2 %
3 function[]=Laplacian(~)
4 % mshape;
5 fileName='V_SANA.48dv';%nombre del caso de estudio.
6
7 filePath=['E:\Escuela\Tesis\Programacion en Matlab\Laplaciano\Variables casos de estudio 1-5\',fileName,'\'];%Dire
8
9 load([filePath,'modal_shapes'])
10
11 [a,n_node]=size(ShapeMatrix);
12 n_m=a-1;
13
14 nvalues=13;%Número de valores interpolados.
15
16 ShapeMatrix1=ShapeMatrix(2:end,:);

```

```

18 - xs=ShapeMatrix(1,:);%Valores de las abscisas que corresponden con el modelo en SAP.
19
20 - L=xs(end)-xs(1);%Longitud de la viga.
21
22 - x=linspace(0,L,nvalues);%Valores de las abscisas que van de cero a L.
23
24 - step=x(2)-x(1);%Paso final.
25
26 - step1=xs(end)-xs(end-1);%Longitud del elemento del modelo SAP.
27
28 - x_0=(0:-step:-2);
29
30 - x_0=fliplr(x_0);x_0=x_0(1:end-1);
31
32 - x_f=(L:step:L+2);x_f=x_f(2:end);

```

```

34 - xref=linspace(0,L,n_node);
35 - x_c=[x_0 x_f];%Vector que contiene las abscisas
36 - w=length(x_c);%cantidad de valores de la señal incrementada.
37 - r=length(x_0);
38 - mode=zeros(n_m,w);
39 - for i=1:n_m
40 -     yy=ShapeMatrix1(i,:);
41 -     mode(i,:)=interp1(xref,yy,x_c,'pchip');
42 - end
43
44 - Laplacian=zeros(n_m,w);
45 - for i=2:w-1
46 -     Laplacian(:,i)=mode(:,i+1)+mode(:,i-1)-2*mode(:,i);
47 - end
48

```

```

49 - y=Laplacian;
50 - Fun_Laplacian=zeros(n_m,w);
51 - for i=1:n_m
52 -     for j=1:w
53 -         if j==1||j==w
54 -             Fun_Laplacian(i,j)=0;
55 -         elseif j==2
56 -             a=[x_c(j-1),x_c(j+1),x_c(j+2),x_c(j+3)];
57 -             b=[y(i,j-1),y(i,j+1),y(i,j+2),y(i,j+3)];
58 -             Fun_Laplacian(i,j)=interp1(a,b,x_c(j),'pchip');
59 -         elseif j==w-1
60 -             a=[x_c(j-3),x_c(j-2),x_c(j-1),x_c(j+1)];
61 -             b=[y(i,j-3),y(i,j-2),y(i,j-1),y(i,j+1)];
62 -             Fun_Laplacian(i,j)=interp1(a,b,x_c(j),'pchip');
63 -         else
64 -             a=[x_c(j-2),x_c(j-1),x_c(j+1),x_c(j+2)];

```

```

64 -             a=[x_c(j-2),x_c(j-1),x_c(j+1),x_c(j+2)];
65 -             b=[y(i,j-2),y(i,j-1),y(i,j+1),y(i,j+2)];
66 -             Fun_Laplacian(i,j)=interp1(a,b,x_c(j),'pchip');
67 -         end
68 -     end
69 - end
70
71 - figure;
72 - % subplot(3,1,1);
73 - % plot(x,y(3:5,r+1:r+nvalues));
74 - % title('Laplacian')
75 - % subplot(3,1,2);
76 - % plot(x,Fun_Laplacian(:,r+1:r+nvalues));
77 - Dif_Function=Fun_Laplacian-Laplacian;
78 - %

```

```
78 %  
79 %  
80 % title('Interpolated Laplacian')  
81 subplot(2,1,1);  
82 plot(x,Dif_Function(:,r+1:r+nvalues));  
83 title('Difference Function')  
84  
85 %% Indice comun de danos  
86  
87 DI_norm=Dif_Function;  
88 for i=1:n_m  
89     DI_norm(i,:)=Dif_Function(i,:)/max(abs(Dif_Function(i,:)));  
90 end  
91  
92 DI=sum(abs(DI_norm))/n_m;  
93 SDI=(DI-mean(DI))/(std(DI));  
94 subplot(2,1,2);  
95 bar(x,SDI(r+1:nvalues+r));%, 'color',[12 45 85]./255);  
96 title('Standarized')  
97 xlim([0 L]);  
98  
99 end
```

**Fig.I.1.2. Programación en MATLAB para la función Laplacian de desarrollo del método.**