

Metodología basada en las técnicas de análisis modal y el método de descomposición modal de energía de tensión para la detección de fallos estructurales en una torre de transmisión de energía eléctrica de alta tensión

Germán Humberto Rodríguez Cubides

Roberto Carlos Orduz Pérez

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director

Heller Guillermo Sánchez Acevedo

Doctor en Ingeniería Mecánica aplicada y Computacional

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Mecánica

Bucaramanga

2019

Dedicatoria

A Dios, por la vida

A mis padres, por el amor brindado, su apoyo constante, su guía en cada paso y su esfuerzo incondicional en facilitarme la ruta para cumplir mis sueños.

A la individua, mi segunda mamá, con quién compartimos metas e ideales.

A Malina, quién forjo mi carácter desde temprana edad.

A mis compañeros y amigos, quienes alegraron el camino.

Roberto Carlos Orduz Pérez

Dedicatoria

A mi familia, quienes fueron mi mayor apoyo en este proceso, gracias por sus consejos, comprensión y ayuda en todos los momentos vividos, han sido mi más grande motivación durante toda la carrera universitaria y a lo largo de mi vida, gracias por aportar tanto a mi formación profesional como personal.

A mi Camila Camacho, por su amor, compañía y ayuda en la culminación de este documento.

Germán Humberto Rodríguez Cubides

Agradecimientos

A mi familia y amigos por el apoyo brindado, Al profesor Jorge Meneses por la formación y consejos fuera del aula de clase.

A Sebastian Vega (Pato) quién en la culminación del proyecto aportó la herramienta necesaria para cumplir el costo computacional requerido.

A Fabián, quién aportó su conocimiento ingenieril y práctico para la construcción del modelo a escala propuesto.

Roberto Carlos Orduz Pérez

Agradecimientos

Agradezco principalmente a mis padres, Graciela y Germán, quienes a lo largo de mi vida han inculcado en mí el amor por la ciencia, la ingeniería y la matemática, ellos fueron mi motor en el desarrollo de este sueño, gracias por la confianza que depositaron en mí, por cada día ser mi apoyo incondicional y mi fuente de inspiración. Es un orgullo ser su hijo, son los mejores padres.

También agradezco a mis hermanas Erika y Yuliana porque, aunque estemos distanciados físicamente, me sentí acompañado por sus consejos y ayuda en los momentos difíciles, gracias por siempre creer en mí y demostrarlo con el apoyo que me brindaron a lo largo de esta etapa.

Gracias a cada persona que de alguna manera me apoyó en la realización de esta meta cumplida, a Dayal, Omar, Yuliana, Diana, Sanmiguel, Jacobo por brindarme su sincera amistad durante mi carrera universitaria.

Asimismo, quiero agradecer a mi novia Camila, por el acompañamiento y ayuda durante la escritura de este libro.

Gracias a la Universidad Industrial de Santander, por abrirme las puertas y permitirme desarrollar todo el proceso investigativo dentro de este establecimiento educativo.

Finalmente quiero expresar mi agradecimiento al Dr. Heller Guillermo Sánchez Acevedo principal guía durante todo este proceso, quien con su dirección, conocimiento, enseñanza y orientación permitió el desarrollo de este trabajo.

Germán Humberto Rodríguez Cubides

Tabla de Contenido

Introducción	18
1. OBJETIVOS	21
2. ANTECEDENTES.	22
3. MARCO TEÓRICO.	26
3.1. Caracterización dinámica	26
3.2. Análisis modal	26
3.2.1. Parámetros modales	27
3.2.1.1. Frecuencia Natural y Forma Modal.	27
3.2.2. Propiedades elásticas	29
3.3. Análisis Modal Teórico	30
3.3.1. Método de elementos finitos	31
3.4. Análisis modal experimental	32
3.4.1. Etapas del análisis modal experimental	33
3.4.2. Tipos de excitadores	34
3.5. Análisis de señales	37
3.5.1. Frecuencia de muestreo	38

METODOLOGÍA MSED DE UNA TORRE DE ENERGÍA ELÉCTRICA	10
4. METODOLOGÍA PARA LA DETECCIÓN DE FALLOS.	40
4.1. Modelo Teórico	40
4.1.1. Matriz de Rigidez	44
4.1.2. Matriz de Masa	46
4.1.3. Transformación de coordenadas	48
4.1.4. Obtención de los modos de vibración	50
4.2. Metodología de descomposición modal de energía de tensión (MSED)	52
4.3. Modelo Físico	57
4.3.1. Caracterización torre de transmisión de energía eléctrica de alta tensión de suspen- sión a 230 KV de doble circuito	59
4.4. Aplicación Análisis Modal Experimental.	63
4.4.1. Configuración del ensayo	64
4.4.2. Sistema de adquisición de datos	65
4.4.3. Hardware	67
4.4.4. Planeación y montaje del EMA	70
4.4.5. Caracterización dinámica de la estructura	73
4.5. Validación	74
4.5.1. Modal Assurance Criterion (MAC)	74
4.5.2. Expansión modal de Guyan	75
5. Resultados de la investigación	77

METODOLOGÍA MSED DE UNA TORRE DE ENERGÍA ELÉCTRICA	11
5.1. Construcción estructura a escala	77
5.2. Modelo teórico	82
5.2.1. Caracterización teórica de falla	84
5.3. Análisis modal experimental	85
5.3.1. Complex Modal Identifier function (CMIF)	90
5.3.2. Diagrama de estabilidad	90
5.4. Validación	90
5.4.1. Expansión modal	90
5.5. Casos de detección de fallos	94
6. Trabajos futuros	101
7. Conclusiones	102
Referencias Bibliográficas	103

Lista de Figuras

Figura 1.	Esquema forma modal en una barra empotrada.	28
Figura 2.	Formas Modales Puente Donghai-Shangai	29
Figura 3.	Diagrama de bloques FRF en sistema linealizado	33
Figura 4.	Tipos de Martillo Excitador.	36
Figura 5.	Montaje Excitador Electrodinámico.	37
Figura 6.	Diagrama de flujo metodología.	41
Figura 7.	Solicitaciones de un elemento tipo pórtico espacial.	45
Figura 8.	Deducción términos de matriz de rigidez de un pórtico espacial en coordenadas generales. Adaptado de: (Uribe Escamilla, 2002)	51
Figura 9.	Esquema factores de diseño de experimentos.	58
Figura 10.	Torre 230 Kva Magalena Medio Colombiano	60
Figura 11.	Vista Superior Esquema Línea de Transmisión, Diseño de Torres de Transmisión eléctrica. Adaptado de: Hernández y Morales (2005)	61
Figura 12.	Esquema Partes Torre 230 kV de doble circuito tipo suspensión.	62
Figura 13.	Esquema sistema de adquisición de datos	66
Figura 14.	Tarjeta de adquisición de datos OROS OR35	68
Figura 15.	Acelerómetro DYTRAN 3056D	68
Figura 16.	Martillo para pruebas de Impacto DYTRAN 5850B	69

METODOLOGÍA MSED DE UNA TORRE DE ENERGÍA ELÉCTRICA	13
Figura 17. Planificación test	71
Figura 18. Modelo elementos finitos	72
Figura 19. Perfil estructural L 150X150X18. Adapatado de:(Villanueva, 2014)	79
Figura 20. Torre a escala 1:30 unida a malla resoldada	81
Figura 21. Fraguado loza de concreto estructural	82
Figura 22. Forma modal obtenida por el método de elementos finitos para el primer modo de vibración	83
Figura 23. Forma modal obtenida por el método de elementos finitos para el segundo modo de vibración	83
Figura 24. Representación modelo a escala en MATLAB.	85
Figura 25. Indicadores energía de tensión modal axial barra horizontal.	86
Figura 26. Modelo Simplificado torre a escala	87
Figura 27. Coherencia- FRF primera forma modal	88
Figura 28. Coherencia- FRF segunda forma modal	88
Figura 29. Fase-FRF primera forma modal	89
Figura 30. Fase-FRF segunda forma modal	89
Figura 31. CMIF primera forma modal	91
Figura 32. CMIF segunda forma modal	91
Figura 33. Diagrama de estabilidad primera forma modal	92
Figura 34. Diagrama de estabilidad segunda forma modal	92

Figura 35.	Elementos dañados para el caso E	93
Figura 36.	Elementos dañados para los casos A, B, C y D.	95
Figura 37.	Elementos dañados para el caso E	95
Figura 38.	Indicadores energía de tensión modal axial caso A.	96
Figura 39.	Indicadores energía de tensión modal transversal caso A.	96
Figura 40.	Indicadores energía de tensión modal axial caso B.	97
Figura 41.	Indicadores energía de tensión modal transversal caso B.	97
Figura 42.	Indicadores energía de tensión modal axial caso C.	98
Figura 43.	Indicadores energía de tensión modal transversal caso C	98
Figura 44.	Indicadores energía de tensión modal axial caso D.	99
Figura 45.	Indicadores energía de tensión modal transversal caso D.	99
Figura 46.	Indicadores energía de tensión modal axial caso E.	100
Figura 47.	Indicadores energía de tensión modal transversal caso E.	100

Lista de Tablas

Tabla 1.	Especificaciones técnicas de la tarjeta de adquisición de datos OROS OR35	69
Tabla 2.	Especificaciones acelerómetros uniaxiales	70
Tabla 3.	Especificaciones técnicas de martillo de impacto DYTRAN 5850B	70
Tabla 4.	Composición perfiles estructurales torre de 230 kV	78
Tabla 5.	Especificaciones técnicas acero al carbono aplicado	80
Tabla 6.	Configuración control Software modal	86
Tabla 7.	Daños inducidos en la torre de energía eléctrica	94

Resumen

Título: Metodología basada en las técnicas de análisis modal y el método de descomposición modal de energía de tensión para la detección de fallos estructurales en una torre de transmisión de energía eléctrica de alta tensión. *

Autor: Germán Humberto Rodríguez Cubides, Roberto Carlos Orduz Pérez **

Palabras Clave: Daño, localización, análisis modal, energía de deformación, rigidez, expansión modal.

Descripción: Las estructuras civiles metálicas son sistemas expuestos a diferentes condiciones ambientales, esto hace necesario el seguimiento continuo de su estado a través de un sistema de detección de fallas. (Barrera, Gómez y Quiroga, 2014). En el presente trabajo, el análisis modal experimental y el método de descomposición modal de energía de tensión (MSED), se utilizan para formular el diseño conceptual de una metodología para la detección y localización de fallas que generan pérdida de rigidez en los elementos de una torre de transmisión de energía eléctrica de alta tensión de 230 kV. El desarrollo se estableció en tres etapas principales: descripción, modelización y verificación. Los principales resultados, reflejan la validación teórico-experimental del modelo numérico desarrollado, a partir de la construcción de un modelo a escala de una torre de energía eléctrica de alta tensión. Asimismo, se utilizó la geometría y las propiedades mecánicas de la estructura para obtener una aproximación del comportamiento de la torre usando el método de elementos finitos. De otra parte, se ejecutó el análisis modal experimental, logrando extraer las primeras formas de modo junto a las correspondientes frecuencias naturales en el modelo a escala sano, validando así el modelo numérico teórico propuesto.

A partir del trabajo realizado, se concluye que la metodología establecida permite detectar y localizar el daño para diferentes tipos de barra, en casos de única y múltiple falla desde un 5 % de pérdida de rigidez.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Heller Guillermo Sánchez Acevedo, Doctor en Ingeniería Mecánica aplicada y Computacional.

Abstract

Title: Methodology based on modal analysis techniques and the modal strain energy decomposition method for the detection of structural failures in a high voltage electrical power transmission tower *

Author: Germán Humberto Rodríguez Cubides, Roberto Carlos Orduz Pérez **

Keywords: Damage, localization, modal analysis, strain energy, stiffness, modal expansion.

Description: The metallic civil structures are systems exposed to different environmental conditions, this makes it necessary to continuously monitor their status through a fault detection system. (Barrera, Gómez and Quiroga, 2014). In this document, the experimental modal analysis and the method of modal tension energy decomposition (MSED), are used to formulate the conceptual design of a methodology for the detection and location of faults which generate loss of stiffness in the elements of a 230 kV high voltage electric power transmission tower. The development was established in three main stages: description, modeling and verification. The main results reflect the theoretical-experimental validation of the model numerical developed, from the construction of a scale model of a high voltage electric power tower. Likewise, the geometry and mechanical properties of the structure were used to obtain an approximation of the tower's behavior using the finite element method. On the other hand, the experimental modal analysis was executed, managing to extract the first modes shapes along with the corresponding natural frequencies in the healthy scale model, thus validating the proposed theoretical numerical model.

From the work done, it is concluded that the established methodology allows to detect and locate the damage to different types of elements, in cases of single and multiple failure from a 5 % loss of stiffness.

* Bachelor Thesis

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering, Mechanical Engineering School. Director: Heller Guillermo Sánchez Acevedo, PhD. Applied and Computational Mechanical Engineering.

Introducción

La detección temprana de fallos es una de las tareas a cumplir en los análisis de vibraciones, en la actualidad se han implementado diferentes técnicas de ensayos no destructivos (END) para estructuras metálicas tales como inspección visual, líquidos penetrantes (Harding y Hugo, 2011), termografía (Kylili et al., 2014), ultrasonido (Lindgren et al., 2007), corrientes de Eddy (Yashan et al., 2006) entre otras, impulsadas en sus inicios por la industria aeroespacial.

Estas técnicas están basadas en la revisión de cada uno de los subelementos que componen la estructura. Como consecuencia se requiere el uso de equipos y montajes complejos, afectando el costo y tiempo de operación del proceso. Surge así la necesidad del desarrollo de técnicas que permitan realizar un diagnóstico específico de la totalidad de la estructura que analice los cambios de vibración.

El modelo de detección de falla que se emplea está fundamentado en la variación de las propiedades dinámicas en función de las propiedades físicas de la estructura. Por tal razón, el análisis planteado se enfoca en la detección de la variación de parámetros vibracionales, con esto se detecta y localiza el fallo de una torre de transmisión de energía eléctrica de alta tensión a escala.

Las torres de alta tensión son elementos primarios dentro de la cadena del sector eléctrico, existen aproximadamente 25,980.08 Km de líneas de transmisión en el territorio Colombiano,

siendo las líneas de 230 Kv las de mayor aportación con un 39.8 % del total (Paramatec, 2019).

Para garantizar la integridad de las estructuras es preciso implementar técnicas novedosas que permitan la detección de fallas habida cuenta de la importancia que tienen en la red. Estas se pueden basar en el método de descomposición modal de energía de tensión (MSED)(Osorio y Tarazona, 2016) basada en vibraciones mecánicas, teniendo así una alternativa diferente para realizar dichos análisis.

El método de descomposición modal de energía de tensión (MSED) realiza la comparación de dos estados de la estructura, sana y con daño inducido, teniendo como resultado dos indicadores de daño: Transversal y axial. Estos indicadores se relacionan directamente con la variación energética inducida por el daño de cada elemento respecto a la estructura en general usando las formas de modo(Li et al., 2006).

En síntesis, en la presente investigación se aplica la técnica de análisis modal experimental junto al método de descomposición modal de energía, usando un modelo por el método de elementos finitos (MEF) de una torre de alta tensión de 230 KV. En búsqueda del desarrollo de la base metodológica para su implementación a futuro, aportando un nuevo elemento para el mantenimiento de la red eléctrica nacional.

En este orden de ideas, el documento desarrollado en el capítulo 2 contextualiza la meto-

dología implementada en la torre eléctrica de alta tensión con una serie de antecedentes al trabajo presentado ; los capítulos continuos enmarcan la teoría necesaria para la extracción de propiedades dinámicas y la ejecución de la metodología para la detección de fallos; finalmente el capítulo 5 muestra de forma concisa los resultados obtenidos fruto de la implementación del método de descomposición modal de energía de tensión(MSED) , el algoritmo de expansión de Guyan y el análisis modal experimental.

1. OBJETIVOS

Objetivo General

Establecer una metodología basada en las técnicas de análisis modal experimental y el método de descomposición modal de energía de tensión (MSED), para la detección y localización de fallas que generan pérdida de rigidez en los elementos de una torre, a escala, de transmisión de energía eléctrica de alta tensión de suspensión a 230 KV de doble circuito para objeto de estudio.

Objetivos Específicos

- Desarrollar un modelo numérico de la torre de transmisión de energía eléctrica que permita realizar la simulación de la respuesta dinámica de la estructura basado en el método de elementos finitos.
- Implementar el algoritmo mediante el método de descomposición modal de energía de tensión (MSED) para la detección de fallos una torre de transmisión de energía eléctrica de alta tensión.
- Validar la metodología desarrollada a través de la contrastación teórico- experimental en un modelo de la torre fabricado a escala.

2. ANTECEDENTES.

En el marco del desarrollo tecnológico dado en las últimas décadas y el avance en la computación y sensórica, según (He, M Y; Hutchinson, 1989) surgió un nuevo elemento en la mantenibilidad de equipos y estructuras, denominado sistema de monitoreo en salud estructural (**SHM**), el cual se basa en el estudio de vibraciones mecánicas . Este método fue aplicado inicialmente en la industria aeroespacial y en estructuras civiles críticas (Doherty, 1987), proporcionando las primeras validaciones técnicas a este tipo de metodología.

Como consecuencia, surgieron estudios científicos en salud estructural, encaminados a la validación y manejo de los datos obtenidos . Inicialmente (Adams et al., 1965) , realizaron el estudio del cambio en frecuencias naturales para la detección de fallo a nivel general asociadas con el efecto de la reducción en rigidez.

Pandey y Biswas (1994) compararon resultados teóricos y experimentales en tres diferentes condiciones de frontera, siendo el cambio en la matriz de flexibilidad la base del análisis. Se obtuvo como beneficio una convergencia en menores iteraciones que permitieron la detección y localización en una estructura geoméricamente simple, aportando la localización de daño usando los parámetros modales.

Dentro de los enfoques dados al estudio estructural en los diferentes grupos de investiga-

ción se desarrolla en 1995 un método basado en la energía de deformación modal, en un análisis unidimensional propuesto por (Stubbs et al., 1995). De allí se obtienen resultados satisfactorios en la localización de daño usando los primeros 3 modos de vibración. Esta metodología sienta la base del desarrollo del método de descomposición modal de energía de tensión por (Shi et al., 1998), quienes analizan el comportamiento de la estructura antes y después del daño en función de la forma de modo.

Li et al. (2006) implementan la metodología desarrollada por (Stubbs et al., 1995), usando indicadores de daño, enfocando el estudio en una estructura tipo marco en 3D fixed offshore. Se deja así el camino abierto para abordar con el método de descomposición modal de energía de tensión (**MSED**) en diferentes estructuras metálicas.

Al tener un sin número de investigaciones sobre la temática, se hizo necesaria la clasificación de detección de daño, por lo que (Fan y Qiao, 2011) proponen 4 categorías: frecuencia natural, forma de modo, forma curvatura de modo, forma de modo y frecuencia.

Cada tipo de detección puede dar ventajas y desventajas distintivas, por tanto, su aplicación depende directamente del propósito de la metodología, vigilando que se cumpla con el nivel de detección requerido.

Rytter (1993) presenta un sistema de clasificación de daño, proponiendo cuatro niveles de

detección:

- I Determinación de daño presente en la estructura.
- II Determinación de daño presente en la estructura + Identificación de la geometría de la localización de daño.
- III Determinación de daño presente en la estructura + Identificación de la geometría de la localización de daño + Severidad de daño.
- IV Determinación de daño presente en la estructura + Identificación de la geometría de la localización de daño + Severidad de daño + Predicción del servicio in-situ de la estructura.

Dentro de la clasificación de daño, el tratamiento de señales vibracionales en modelos a escala, en ambientes controlados, permite la obtención del nivel 3 de detección.

En la actualidad, la investigación de detección de fallo en estructuras usando el método energético continúa. Dentro de los trabajos recientes más destacados (Zhang y Yan, 2017) avanzan en la identificación de múltiple daño en una viga con un comportamiento dinámico no lineal, debido al fenómeno de respiración de grieta.

Metodologías recientes como la desarrollada por (Nguyen et al., 2017) usan el análisis modal experimental como herramienta para el desarrollo metodológico en laboratorio, aportando la identificación de daño en función de la relación geométrica de la energía de tensión modal al valor

propio, ratio of geometric modal strain energy to eigenvalue, (GMSEE), usando un modelo a escala.

En el marco de las diferentes investigaciones mencionadas, implementaremos la metodología basada en la energía de deformación modal y forma de modo propuesta por Stubbs et al. (1995) y Li et al. (2006) a una torre de energía eléctrica de alta tensión de 230 kV, a escala; en búsqueda de la detección y localización de fallo en sus elementos. Para tal fin, junto al método de descomposición modal de energía de tensión (**MSED**) se ejecutará una validación, con base en información modal incompleta obtenida de un análisis modal experimental, abordando la técnica de expansión matricial de propuesta por Guyan (1965) para la obtención de la totalidad de formas de modo, teniendo como objetivo la validación teórico-experimental de lo propuesto.

3. MARCO TEÓRICO.

3.1. Caracterización dinámica

La caracterización dinámica busca modelar matemáticamente cada elemento de un sistema dinámico, para su posterior combinación, teniendo en cuenta su respuesta en función del tiempo junto a las diferentes propiedades intrínsecas del mismo (Ogata, 1987). Dentro de este contexto el estudio de vibraciones mecánicas se introduce cómo una herramienta para la obtención de parámetros modales, resaltando la frecuencia natural del sistema como un importante elemento de comparación respecto al punto de operación. Esto se debe al fenómeno de resonancia y la generación de fallos cuándo este se presenta.

3.2. Análisis modal

El análisis modal es un procedimiento que busca hallar los parámetros modales de un sistema: frecuencia natural, modo de vibración y relación de amortiguamiento. La búsqueda de estos parámetros tiene como fin la formulación de un modelo numérico, conocido como modelo modal del sistema, que se aproxime satisfactoriamente al comportamiento dinámico real, permitiendo describir, comprender y modelar el comportamiento de las estructuras (Rodríguez Súnico, 2005).

Para la aplicación de este tipo de análisis se usan 3 métodos principales. El primero de estos, el *análisis modal teórico* tiene como propósito enfocar la resolución del problema planteado de forma analítica usando la teoría disponible, actualmente se desarrollan simulaciones numéricas con

el software disponible para tal fin. Otro de los métodos es el *análisis modal experimental (EMA)* en el que se excita de manera controlada la estructura, midiendo los resultados obtenidos para su posterior tratamiento y análisis de señal, esta técnica es usada en laboratorios y en estructuras que bajo condiciones de operación puedan ser excitadas sin daño. Finalmente, el *Análisis modal operacional (OMA)* aparece como necesidad al monitoreo sin excitación controlada bajo condiciones de operación, realizando el tratamiento y análisis de señal a la salida.

3.2.1. Parámetros modales. Modo de Vibración Es un patrón distintivo con el que vibra un sistema cuando se acerca a sus frecuencias naturales, esta característica inherente es determinada por aspectos como geometría, condiciones de frontera y propiedades del material (masa, rigidez y amortiguamiento) (White, 2010). A su vez cada modo de vibración es definido por la frecuencia natural, el amortiguamiento modal y la forma de modo, variando en función de la excitación del sistema (Schwarz y Richardson, 1999).

En estructuras los primeros modos de vibración son una mezcla de modos, sin una excitación uniforme de cada elemento (White, 2010). Por cada modo de vibración, físicamente se observa una forma de onda bien definida y predominante denominada forma modal como se observa en la figura 1.

3.2.1.1. Frecuencia Natural y Forma Modal.. Cuando a un sistema se le permite vibrar con libertad, sin ningún tipo de excitación externa, surgen las frecuencias naturales (Chopra,

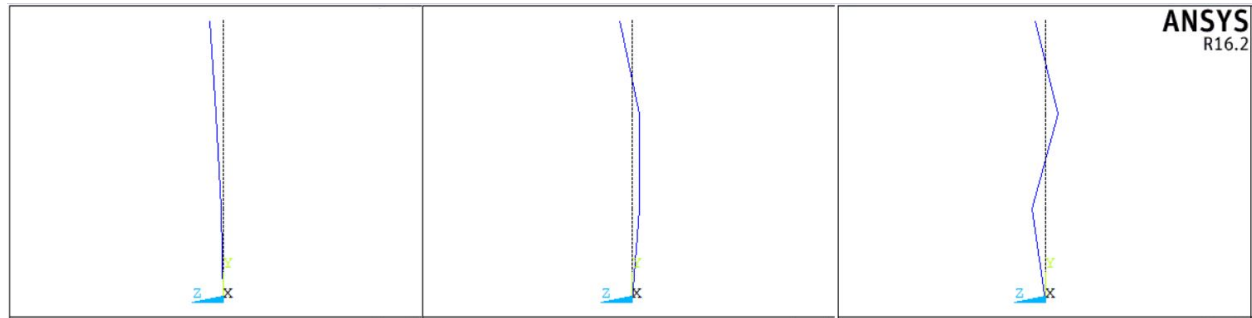


Figura 1. Esquema forma modal en una barra empotrada.

2014) las cuales se relacionan directamente con los grados de libertad en un sistema vibratorio, en donde a un sistema con n grados de libertad le corresponderán n frecuencias naturales de vibración distintas (Rao, 2012).

La *forma modal* es un patrón de vibración ejecutado por un sistema mecánico, en el cual se observan las formas geométricas que adoptan los diferentes sistemas a una frecuencia específica (Rainieri y Fabbrocino, 2014), este patrón formado es de crítica importancia al diseñar una estructura ó resolver un problema de respuesta dinámica, sin embargo, el patrón real de deformación no se identifica; estos valores usualmente se grafican normalizados en función de la matriz de masa o la unidad (Avitable, 2018). Ver figura 2.

Relación de amortiguamiento.

La relación de amortiguamiento ξ es la medida que describe cuán rápido decaen las oscilaciones de un sistema después de una perturbación, aportando los medios matemáticos que expresan el nivel de amortiguamiento del sistema, en dónde ξ se define como el cociente entre el amortiguamiento

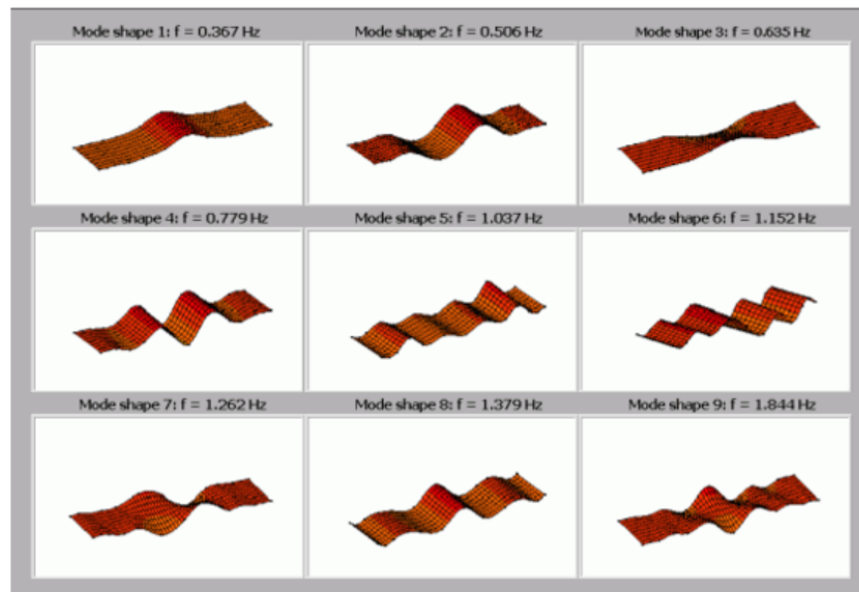


Figura 2. Formas Modales Puente Donghai-Shangai

Recuperado en: [http : //www.ni.com/white – paper/6624/en/](http://www.ni.com/white-paper/6624/en/) [2018]

del sistema y su valor crítico (Alciatore y Histand, 2017).

3.2.2. Propiedades elásticas. A partir de ensayos mecánicos realizados en laboratorio se obtienen dos propiedades que miden el comportamiento elástico de los materiales, los módulos de Young y Poisson. Estas propiedades hacen parte de las variables de entrada para el modelado dinámico estructural.

Módulo de Young.

El módulo de Young o módulo de elasticidad longitudinal para un material elástico lineal, es la pendiente de la región elástica en la curva esfuerzo deformación. Siendo el módulo la medida de rigidez del material, manifestándose como la deformación durante la utilización normal del

material por debajo de su límite elástico (Shackelford, 2007).

Módulo de Poisson.

El módulo de Poisson μ relaciona la deformación lateral y longitudinal en la región elástica, producida por esfuerzos simples a tracción y compresión. Definiéndose como el cociente entre ϵ lateral y ϵ longitudinal (Askeland, 1998).

3.3. Análisis Modal Teórico

El análisis modal teórico busca discretizar un sistema dinámico, planteando la construcción de un modelo numérico que describa el movimiento del mismo. Para esto, usualmente se utiliza el modelo espacial, el cual está dado en términos de masa, amortiguamiento y rigidez (Ewins, 1995). Una vez planteada la ecuación se destina el modelo propuesto para predecir el comportamiento en términos de los parámetros modales.

Uno de los procedimientos más usados para la representación del sistema teórico se basa en el método de elementos finitos. La correcta representación del modelo depende de la selección de parámetros de ajuste, manteniendo su sentido físico (Ceballos, 2004). En este orden de ideas el software de elementos finitos disponible en la actualidad da una retroalimentación paramétrica en dichos modelos.

3.3.1. Método de elementos finitos. Los problemas prácticos de diseño en ingeniería comúnmente pueden presentar complejidad a nivel de material, geometría y discontinuidad de carga (Tornabene et al., 2015). Como consecuencia de esto, el método de elementos finitos surge como una aproximación numérica desarrollada en sus inicios para el análisis de problemas en mecánica estructural (Bathe, 2016).

La metodología consiste en dividir el total del dominio (elemento) en un conjunto de subdominios (elementos finitos) que se interconectan entre sí por puntos finitos (nodos), para finalmente agrupar los nodos en geometrías específicas y así obtener el mallado que discretiza el elemento analizado. Cada nodo se compone de un número finito de ecuaciones, siendo el conjunto de relaciones entre nodos los que conforman un sistema matricial de ecuaciones que busca una descripción aproximada del elemento en su totalidad. La generalización linealizada de la relación matricial final para el análisis estructural se compone por masa $[M]$, amortiguamiento $[C]$, rigidez $[K]$ y fuerza de excitación $[F]$ como se muestra en la ecuación.

$$[M]\ddot{x} + [C]\dot{x} + [K]x = F(x) \quad (1)$$

En este orden de ideas, el método de elementos finitos se define como una técnica numérica que transforma un cuerpo de naturaleza continua en un modelo discreto aproximado, describiendo la mayoría de estos procesos por medio de ecuaciones diferenciales parciales asociadas al problema abordado (Portabella Castany, 2014).

3.4. Análisis modal experimental

Es una técnica experimental también denominada ensayo modal usada para determinar los parámetros modales o propiedades dinámicas de un sistema mecánico, asumiendo que el comportamiento del mismo es lineal e invariante en el tiempo Fu y He (2001).

La base teórica usada proviene de la relación entre la excitación controlada del sistema (señal de entrada) y la respuesta de la vibración producida ya sea en desplazamiento, velocidad o aceleración (señal de salida), en ubicaciones predeterminadas del sistema analizado (Cacho-Pérez et al., 2017). Se obtiene como resultado una relación función de la frecuencia de excitación, matemáticamente conocida como función de *respuesta en frecuencia (FRF)*.

La generalización de la función de transferencia obtenida $H(\omega)$ se expresa en función del amortiguamiento $[K]$, rigidez $[C]$ y masa $[M]$ (Ewins, 1995), como lo muestra la siguiente ecuación.

$$H(\omega) = \frac{X(\omega)}{F(\omega)} = \frac{1}{[K] - \omega^2[M] + i\omega[C]} \quad (2)$$

Siendo $X(\omega)$ señal de salida y $F(\omega)$ señal de entrada como se observa en la figura 3. El análisis modal experimental conocido por sus siglas en inglés (EMA) *experimental modal analysis* proceduralmente se puede dividir en cuatro pasos generales consecutivos: preparación del ensayo, medición, procesamiento de señales e identificación de parámetros modales.

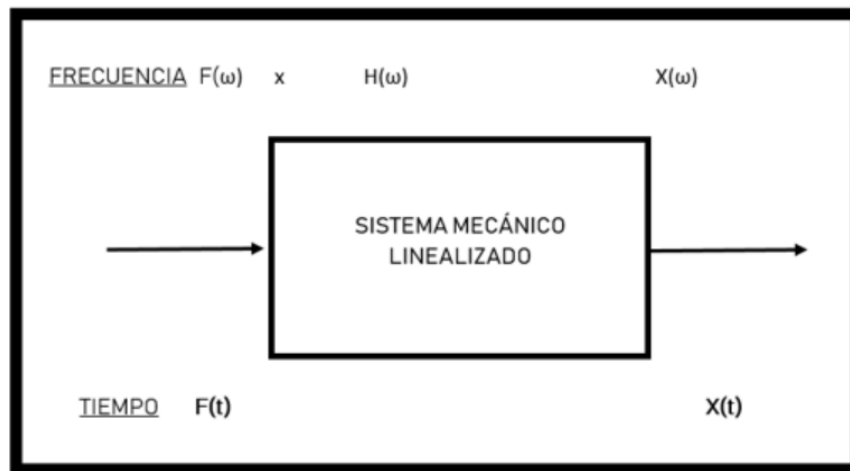


Figura 3. Diagrama de bloques FRF en sistema linealizado

3.4.1. Etapas del análisis modal experimental. Formalmente (Ewins, 1995) propone en su libro una serie de etapas ampliamente aceptadas por la comunidad científica, años más tarde estas son resumidas por (Ceballos, 2004) como se muestra a continuación.

Aplicación del ensayo.

Etapa inicial del EMA, comprende la planificación del ensayo en dónde se tienen en cuenta parámetros tales como: Selección y ubicación de sensórica, tipo de excitador dinámico, grados de libertad del sistema, condiciones ambientales entre otros. En concordancia con lo planeado se realiza el ensayo, en procura de los objetivos específicos planteados inicialmente (Harris y Piersol, 2002).

Procesamiento de señales.

El objetivo general del procesamiento de señales es generar una reducción de la incertidum-

bre a priori, permitiendo una interpretación consistente de las señales obtenidas (Hammond, 2012). En este orden de ideas, en esta etapa se busca convertir las señales análogas a digitales y aplicar la totalidad del filtrado correspondiente al muestreo de señal, obteniendo una respuesta discreta característica del sistema.

Identificación de parámetros modales.

En esta etapa se busca hallar los parámetros que rigen el modelo matemático general del sistema (modelo modal) a partir de los datos experimentales procesados. Para tal fin se suelen usar técnicas derivadas del análisis en el dominio del tiempo o la frecuencia (Cacho-Pérez et al., 2017). Dentro de las principales aplicaciones de la identificación de parámetros modales se encuentran la calibración de modelos, el acoplamiento y la modificación estructural de sistemas (Ceballos, 2004).

Estas aplicaciones poseen una versatilidad e interdisciplinariedad en diferentes ingenierías como mecánica, automotriz, aeronáutica, aeroespacial, civil, biomecánica entre otras (Fu y He, 2001). Por tal razón, existen diferentes aplicaciones técnicas que se pueden emplear como herramienta en función del objetivo propuesto al iniciar el ensayo.

3.4.2. Tipos de excitadores. Uno de los factores críticos en el análisis modal experimental es la calidad de la fuerza de entrada, acentuando en una forma de onda que posea la energía distribuida en el rango de frecuencias que se requiere. Esto se observa proporcionalmente en las funciones de respuesta en frecuencia (FRF) afectando el resultado del análisis.

Los tres tipos principales de excitación de onda son: impacto, sinusoidal , aleatorio (Mendoza Brochero y Silva Pereira, 2018). Se cuentan con dos opciones específicas para la producción estas señales.

Martillo Excitador *Hammer*

Esta forma de excitación se implementó en la década de los 70's paralelo al desarrollo en la computación, usando la Transformada Rápida de Fourier (FFT) y la Función de Respuesta en Frecuencia (FRF). Esto permitió una disminución de costo y tiempo para la obtención de propiedades dinámicas, sacrificando precisión.

Este dispositivo excita con un impacto el sistema dinámico analizado, variando el tamaño en función de su aplicación *Ver figura 4*. Consta de punta, transductor de fuerza y mango. La variable de control para el rango de frecuencia de excitación es la variación de la dureza en la punta de martillo (material), entre los materiales más usados están la Goma, el nylon y el acero.

Excitador Electrodinámico *Shaker*

Este tipo de excitador es el más ampliamente usado en la búsqueda experimental de propiedades dinámicas, esto se debe al rango de frecuencias de trabajo y a la versatilidad en el tipo de excitación producida (función de señales y aleatoria).

El funcionamiento del mismo se da por principio electromagnético, ubicando una bobi-



Figura 4. Tipos de Martillo Excitador.

Recuperado en: <https://www.onosokki.co.jp/hpe/products/keisoku/sv/gkseries> [2019]

na dentro de un campo magnético estático producido. El campo se puede producir por un imán permanente o un electroimán. Teniendo como fin último la transformación de energía eléctrica a mecánica de forma controlada, siendo la fuerza del excitador directamente proporcional a la corriente inducida en el campo (Quiroz, 2013).

En el excitador electrodinámico los principales parámetros de clasificación son la frecuencia disponible (rango de operación) y la fuerza máxima de excitación, en función de los parámetros mencionados es el tamaño del mismo. En casos específicos el excitador contará con controlador propio debido a su tamaño. Ver figura 5.



Figura 5. Montaje Excitador Electrodinámico.

3.5. Análisis de señales

Una señal se genera por la variación de un parámetro físico en función del tiempo, para el análisis de vibraciones mecánicas esta señal sigue la ruta desde un emisor (sistema dinámico) pasando por un medio hasta un receptor (transductor de señal). (Penkova Vassileva, 2008).

El fin del análisis de señales es extraer el máximo de información posible de la señal obtenida, para tal fin se aplica la transformada rápida de Fourier (FFT) debido a la facilidad de obtención de propiedades en la frecuencia, sin embargo, se tienen en cuenta parámetros adicionales tales como la frecuencia de muestreo.

3.5.1. Frecuencia de muestreo. La obtención de muestras a partir de determinada señal analógica a una frecuencia específica es denominada frecuencia de muestreo (Lathi, 2003). El valor de esta frecuencia con una óptima calidad de señal fue uno de los problemas a resolver a principio del siglo XX en el área de las comunicaciones, el teorema enunciado por Nyquist-Shannon: “*La frecuencia de muestreo mínima requerida para realizar una grabación digital de calidad, debe ser igual al doble de la frecuencia de audio de la señal analógica que se pretenda digitalizar y grabar*” $fs=2f_{Max}$ dio respuesta a este interrogante.

Como es de esperarse en respuesta a la discretización en ocasiones pueden surgir factores que llegan a incidir en el resultado final, entre estos se encuentran:

Aliasing

Al no respetar el teorema de Nyquist-Shannon usando frecuencias de muestra menores a las requeridas se presenta Aliasing (solapamiento), esto genera réplicas de la señal original “*alias*” que imposibilitan la recuperación total de la misma.

En la mayoría de estos casos aumentar la frecuencia de muestreo no se considera por la inversión económica que conlleva, no obstante, el problema se aborda usando un filtro pasa-baja “*antialiasing*” eliminando las frecuencias erróneas.

Leakage

También denominado fuga o manchado espectral, se produce al discretizar una señal usando la transformada discreta de Fourier (TDF). Producto de esta discretización en un número de periodos no enteros aparecen dos efectos principales: Distorsión de frecuencias y limitación de resolución de frecuencia que se pueda obtener. El error se corrige aplicando una ventana a la señal asegurando valores de frontera cero en el muestreo de señal.

Window

En análisis de señales Window (ventana) es una función matemática que divide la señal en segmentos para la posterior extracción de sus características pertinentes. El tipo de ventana aplicado depende de las características de la señal, siendo la tipo handding una de las predilectas al ser usada en el 95 % de los casos.

4. METODOLOGÍA PARA LA DETECCIÓN DE FALLOS.

Los procesos de validación en dinámica estructural están regidos por metodologías que buscan cuantificar la adaptación y aproximación a la realidad de nuevos modelos desarrollados (San Isidro, 1998); la metodología propuesta consta de tres etapas: descripción, modelización y verificación, sentando las bases para una futura implementación de una cuarta (predicción). El diagrama de flujo de la metodología muestra un resumen general del desarrollo de la misma. *Ver Figura 6.*

4.1. Modelo Teórico

El propósito del modelo teórico es la obtención inicial de parámetros modales, con base en el modelo espacial (real) propuesto para el análisis. De esta manera se fundamenta la caracterización dinámica del sistema usando las herramientas matemáticas disponibles, sin la realización de ensayos al modelo real.

Al abordar el sistema de ecuaciones resultante del modelo teórico se debe tener en cuenta el nivel de complejidad y que en ocasiones no se llega a una solución analítica del mismo, por tal razón, se acude a diferentes métodos numéricos que logran dar una respuesta considerablemente aproximada (Oñate y Eugenio, 2000), siendo criterio del diseñador la modificación de parámetros en función de la reducción de error (Garcés et al., 2008).

Cuando se enfrentan diferentes problemas en el ámbito ingenieril, la naturaleza física en cada caso ocupa un papel crucial al aplicar soluciones, es por esta razón que no existe un úni-

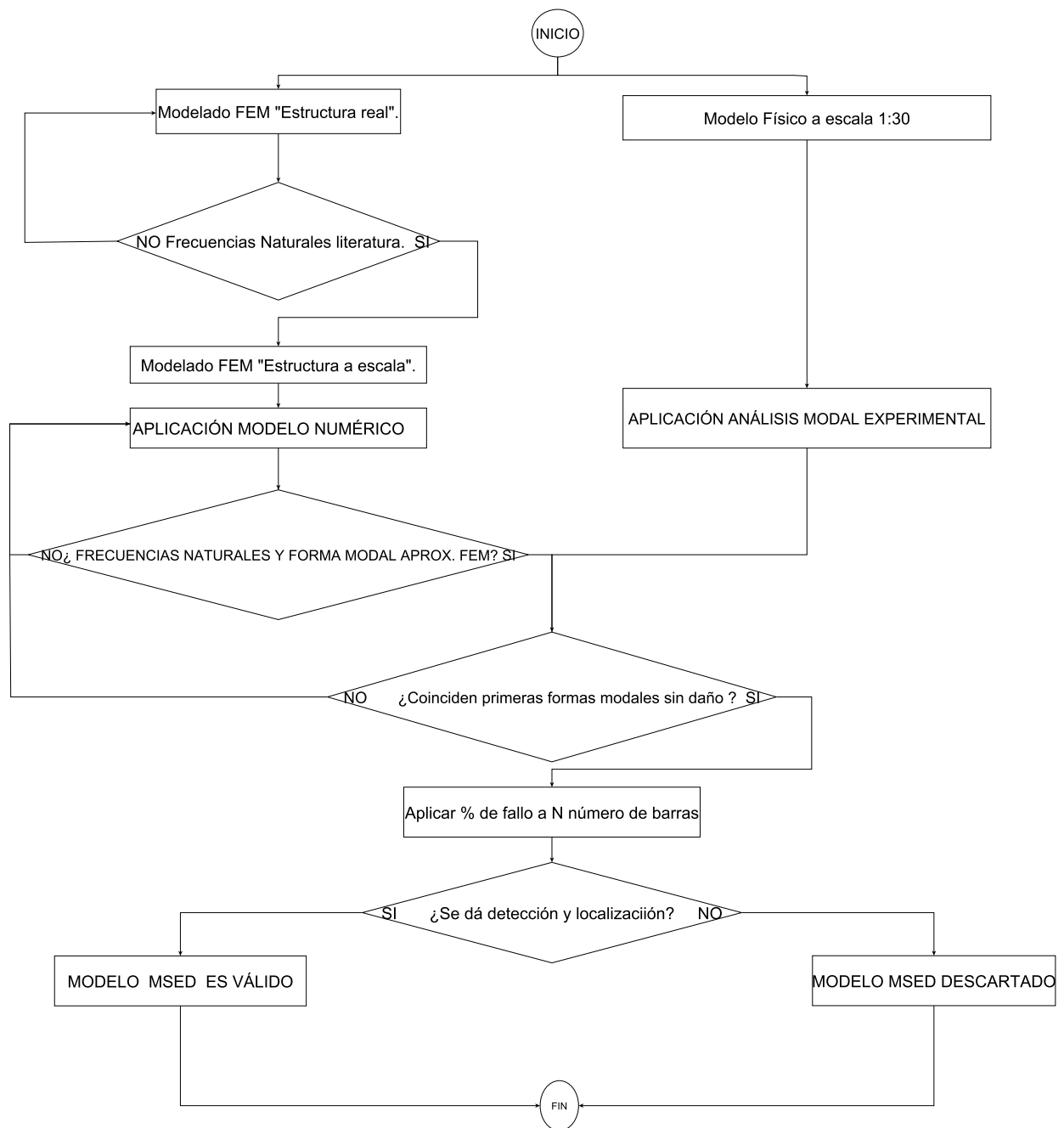


Figura 6. Diagrama de flujo metodología.

co método numérico para la solución de problemas; cada método posee fortalezas y debilidades en función de la complejidad geométrica del dominio. Entre los más destacados se encuentran elementos finitos (Valizadeh et al., 2019) , diferencias finitas (Martínez-Conesa et al., 2010), volúmenes finitos (Betancourt Schwarz et al., 2019), elementos de contorno (Balderrama et al., 2007) ,entre otros.

El método de elementos finitos (FEM), por sus siglas en inglés, ha estado ligado desde sus orígenes a la mecánica estructural (Bathe, 2016), es considerado uno de los más acordes al abordar esta temática por el buen comportamiento que posee en análisis de dominios geométricos complejos de dos y tres dimensiones; teniendo un conjunto de investigaciones precedentes que acreditan el uso de FEM para la metodología propuesta.

(Khatir et al., 2019) aplica a una viga (libre-libre) análisis de elementos finitos (FEM) junto a un análisis isogeométrico (IGA) como comparación metodológica del modelo, combinando esto con el uso de algoritmos adaptativos al indicador de energía de deformación modal normalizado (nMSEDi); S.Khitir et al. Concluye con una validación experimental exitosa de su modelo propuesto en laboratorio.

(Lee y Lee, 2012) en su investigación sobre nanotubos y nanoconos de carbono usan el FEM en Ansys como herramienta para la estimación de propiedades mecánicas obtenidas en función de la variación geométrica macroscópica aplicada, entre los parámetros seleccionados que

mayor aporte generan se encuentran: Grados de libertad (X,Y,Z rotacionales y X,Y,Z traslacionales) , tipo de elemento en Ansys (Beam188) y tipo de elemento de masa (Mass21) . Fruto de la investigación se halla un aumento en el valor de las frecuencias naturales en función del ángulo de dislocación del material.

(Shukla y Harsha, 2015) aborda la aparición de grietas en el álabe de una turbina de vapor, en función de las condiciones dinámicas severas de carga, comparando el análisis modal experimental (EMA) y el método de elementos finitos (FEM) en dicho fenómeno; derivando como conclusión la complementariedad de las metodologías y su uso satisfactorio en el mantenimiento de una turbina de vapor.

Uno de los trabajos recientes en la línea de estructuras metálicas fue realizado por (Liu et al., 2017), quienes usaron como indicador la energía de tensión modal "*Modal Strain Energy*" axial y de flexión en una plataforma Offshore;proponiendo una validación numérica en FEM a través de Ansys. Como criterio de validación se usa el **MAC** y **COMAC**, concluyendo con base en los resultados obtenidos que la posición de daño puede identificarse con precisión mediante un análisis exhaustivo de la distribución de energía de deformación axial y de tensión en este tipo de plataformas metálicas.

La dificultad de la construcción del modelo teórico puede aumentar en función de la complejidad geométrica, por tanto, la construcción del modelo CAD debe procurar estar lo más cercano

a la realidad, manteniendo una correlación directa con las dimensiones originales. De la misma manera se debe prestar especial atención al ensamble estructural, como principal fuente de error, esto se debe a la cantidad de variables que influyen en el acoplamiento. (Bermúdez y Carlos, 2005).

Adicionalmente, la selección del elemento estructural utilizado ya sea tipo : cercha ó pórtico, incidirá directamente en la relación de aportes de rigidez en los elementos y la capacidad computacional necesaria para realizar el ensamble estructural. La metodología desarrollada usa el *elemento espacial tipo pórtico*, abordando así numéricamente la mayoría de casos arbitrarios posibles, en cada elemento, sacrificando rendimiento computacional.

4.1.1. Matriz de Rigidez. En el método de análisis matricial de estructuras, los desplazamientos en los nodos se determinan resolviendo ecuaciones simultáneas de la forma:

$$[\mathbf{P}] = [\overline{\mathbf{K}}][\mathbf{D}] \quad (3)$$

Siendo $[\mathbf{P}]$ la representación de las cargas externas sobre los nodos, $[\mathbf{D}]$ el vector de desplazamiento de los nodos y $[\overline{\mathbf{K}}]$ la rigidez de la estructura.

La matriz de rigidez general $[\overline{\mathbf{K}}]$ está compuesta por los denominados coeficientes de rigidez K_{ij} , en donde cada término equivale a la fuerza que se debe aplicar en el grado de libertad i cuando el grado de libertad j es objeto de un desplazamiento unitario, mientras los demás grados

de libertad permanecen restringidos (Eduardo, 2000).

Se debe ir de lo particular a lo general, hallando el aporte de la rigidez local dado por cada elemento en **coordenadas locales**; posteriormente se aplica en dichos elementos la *matriz de transformación*, acoplando de esta manera el sistema completo a un sistema único de **coordenadas globales**.

Elemento Estructural Tipo Pórtico Espacial.

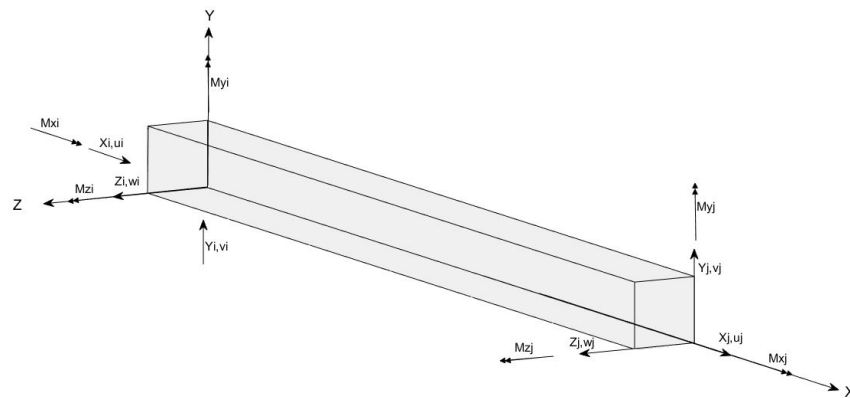


Figura 7. Solicitaciones de un elemento tipo pórtico espacial.

Conocido por ser el elemento que aborda el caso más general en el espacio, posee seis grados de libertad, correspondientes a tres rotacionales (X,Y,Z) y tres desplazamientos (X,Y,Z). Ver figura 7. Resultando seis solicitaciones: Fuerza biaxial, corte en dos direcciones, flexión biaxial y torsión. (Uribe Escamilla, 2002). La matriz de rigidez que corresponde al elemento se observa a continuación en la ecuación 4; en donde : J , G , I_z , I_y representan respectivamente el momento polar de

inercia, módulo de elasticidad a torsión e inercia en la sección transversal en dirección **Z** y **Y**.

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ M_{xi} \\ M_{yi} \\ M_{zi} \\ X_j \\ Y_j \\ Z_j \\ M_{xj} \\ M_{yj} \\ M_{zj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_i^T \\ Y_i^T \\ Z_i^T \\ M_{xi}^T \\ M_{yi}^T \\ M_{zi}^T \\ X_j^T \\ Y_j^T \\ Z_j^T \\ M_{xj}^T \\ M_{yj}^T \\ M_{zj}^T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{AE}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{AE}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{L^2} & 0 & -\frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{L^2} \\ 0 & 0 & \frac{12EI_y}{L^3} & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 & 0 & 0 & -\frac{12EI_y}{L^3} & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{GJ}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{4EI_y}{L} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{2EI_y}{L} & 0 \\ 0 & \frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_z}{L} & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_z}{L} \\ -\frac{AE}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{AE}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} & 0 & \frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} \\ 0 & 0 & -\frac{12EI_y}{L^3} & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{12EI_y}{L^3} & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{GJ}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{2EI_y}{L} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{4EI_y}{L} & 0 \\ 0 & \frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_z}{L} & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_z}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \\ \theta_{xi} \\ \theta_{yi} \\ \theta_{zi} \\ u_j \\ v_j \\ w_j \\ \theta_{xj} \\ \theta_{yj} \\ \theta_{zj} \end{bmatrix} \quad (4)$$

4.1.2. Matriz de Masa. La matriz general de masa **M** es regida bajo el mismo principio de la matriz general de rigidez $\overline{[K]}$. Se procede obteniendo a partir de cada elemento una matriz masa elemental, este conjunto de matrices posteriormente es ensamblado usando la *matriz*

de transformación convirtiendo de coordenadas locales a coordenadas del sistema global.

(Léon Torres y Quinde Martínez, 2010) mencionan principalmente tres parámetros a tener en cuenta en la matriz de masa **M**:

1. El valor de la matriz de masa debe ser positivo.
2. Debe existir simetría en la estructura analizada y en la matriz de masa que la describe.
3. Se debe conservar la masa junto a sus propiedades inerciales, de forma invariable en el tiempo.

La matriz de masa **M** se suele describir principalmente con base en dos modelos específicos: Modelo de masa concentrada y modelo de masa consistente, como se muestra a continuación.

Matriz de masa consistente.

Es obtenida al combinar diferentes efectos en la matriz de masa concentrada tales como: carga axial, flexión y torsión considerando los principios de trabajo virtual (Osorio y Tarazona, 2016). Formada por masas definidas provenientes de los elementos finitos que constituyen el elemento, prácticamente no desprecia ninguna parte del elemento analizado sacrificando costo computacional en contraprestación a la precisión. (García Fluxá, 2013).

La matriz de masa consistente para el elemento tipo pórtico espacial en coordenadas locales *ecuación 4.1.2*, se selecciona en la metodología propuesta por la cantidad de datos proporcionados

para la solución del problema de valores y vectores propios (Cacho-Pérez et al., 2017).

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \\ P_6 \\ P_7 \\ P_8 \\ P_9 \\ P_{10} \\ P_{11} \\ P_{12} \end{bmatrix} = \frac{\bar{m}L}{420} \begin{bmatrix} 140 & & & & & & & & & & & \\ 0 & 156 & & & & & & & & & & \\ 0 & 0 & 156 & & & & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & \frac{140I_0}{A} & & & & & & & & \\ 0 & 0 & -22L & 0 & 4L^2 & & & & & & & \\ 0 & 22L & 0 & 0 & 0 & 4L^2 & & & & & & \\ 70 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 140 & & & & & \\ 0 & 54 & 0 & 0 & 0 & 13L & 0 & 156 & & & & \\ 0 & 0 & 54 & 0 & -13L & 0 & 0 & 0 & 156 & & & \\ 0 & 0 & 0 & \frac{70I_0}{A} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{140I_0}{A} & & \\ 0 & 0 & 13L & 0 & -3L^2 & 0 & 0 & 0 & 22L & 0 & 4L^2 & \\ 0 & -13L & 0 & 0 & 0 & -3L^2 & 0 & -22L & 0 & 0 & 0 & 4L^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \\ \delta_4 \\ \delta_5 \\ \delta_6 \\ \delta_7 \\ \delta_8 \\ \delta_9 \\ \delta_{10} \\ \delta_{11} \\ \delta_{12} \end{bmatrix} \quad (5)$$

4.1.3. Transformación de coordenadas. Como se mencionó anteriormente en las matrices de rigidez y masa, la transformación de coordenadas se da usando la denominada *matriz de transformación*. Ver ecuación 28 ; dicha matriz se aplica a cada elemento de la estructura, unificando el criterio de referencia de los elementos, teniendo en cuenta el propósito final "ha-

llar los modos de vibración de la estructura".

El cálculo usado es relativamente sencillo ;se aplican cosenos directores, descomponiendo geométricamente en tres nuevas componentes las coordenadas locales,permitiendo así el acople de todos los elementos con su respectiva rigidez y masa.*Ver ecuación 7* .De esta manera se transforma del sistema de referencia local a global cada grado de libertad.

$$T = \begin{bmatrix} r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$r = \begin{bmatrix} \cos_{Xx} & \cos_{Yx} & \cos_{Zx} \\ \cos_{Xy} & \cos_{Yy} & \cos_{Zy} \\ \cos_{Xz} & \cos_{Yz} & \cos_{Zz} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Como se observa de las ecuaciones 28 y 7 la matriz de transformación **[T]** posee el mismo tamaño que la matriz de rigidez y masa,siendo esto de obligatoriedad para la realización de operaciones pertinentes entre las matrices.

Los valores de rigidez **K** y masa **M** se obtienen finalmente a partir de los cálculos mostrados en la

ecuación 8 y 9 .

$$K_n = T^T K_L T \quad (8)$$

$$M = T^T M_L T \quad (9)$$

En dónde T^T corresponde a la transpuesta de la matriz de transformación , K_L y M_L a la matriz rigidez y masa local y T a la matriz de transformación.

El análisis para estructuras metálicas planteado en la metodología desarrollada, en cuanto a los movimientos relativos en la tres dimensiones, considera:

- Rotación en ejes X,Y,Z.
- Traslación en ejes X,Y,Z.

En la figura 8 se observan las posibles deformaciones en un elemento prismático tipo pórtico espacial; teniendo en cuenta lo anterior cada elemento estructural considerado en la metodología analizado en coordenadas locales tendrá *6 grados de libertad*, adjudicándole a cada elemento 2 *nodos*, en los que se distribuirán los grados de libertad equitativamente según los movimientos relativos ya mencionados.

4.1.4. Obtención de los modos de vibración. Hallar de forma acertada los modos de vibración en una estructura cobra importancia en la determinación de la magnitud de fuerzas inerciales que afectan a la misma (Domínguez Caicedo, 2014). Habida cuenta su importancia y

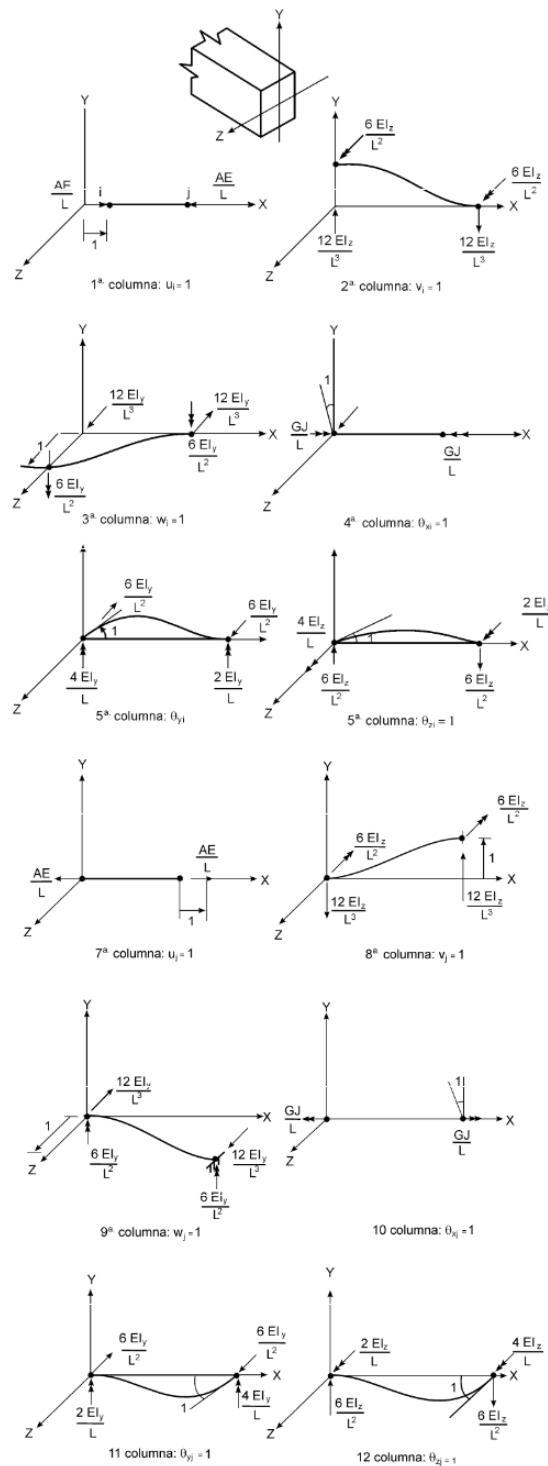


Figura 8. Deducción términos de matriz de rigidez de un pórtico espacial en coordenadas generales. Adaptado de: (Uribe Escamilla, 2002)

correlación directa con la detección de daño en la metodología planteada, se tienen en cuenta dos principales aspectos para hallar estos valores teóricamente.

1. Definir la condición en los apoyos, para el caso en particular, su empotramiento; anulando el movimiento en sus 6 grados de libertad. Consecuentemente el valor para la matriz de rigidez y masa, en los nodos empotrados, será cero.
2. Resolver el problema de valores y vectores propios, para las matrices de masa y rigidez, en los nodos restantes. Se usa como herramienta para tal fin el comando *eig* propio de Matlab®; como resultado se logra obtener los valores de las frecuencias naturales y modos de vibración característicos de la estructura.

4.2. Metodología de descomposición modal de energía de tensión (MSED)

El concepto utilizado para establecer la metodología de detección de daño es la separación de la energía de descomposición modal en dos grupos de acuerdo a sus coordenadas de elementos locales. Para explicar este método se utiliza un elemento estructural tipo pórtico espacial mostrado en la figura 7 que tiene una matriz de rigidez local plasmada en la ecuación 4 donde las columnas y filas 1 y 7 corresponden a las coordenadas axiales y las columnas 2 y 8 a las coordenadas transversales Li et al. (2006).

Para la obtención de la matriz de rigidez axial se tiene en cuenta únicamente el término $\frac{AE}{L}$ y los demás valores se igualan a cero; en el caso de la matriz de rigidez transversal, el término que no varía es $\frac{12EI_z}{L^3}$.

Inicialmente, para la localización del daño se hace necesario el cálculo de la energía de tensión modal axial para la estructura con daño y sin daño, por medio de la ecuación (11) y la ecuación (10), respectivamente, donde n es el n -ésimo elemento, i el i -ésimo modo Φ , d está relacionado con la estructura dañada y K_n es la matriz de rigidez del elemento sin daño transformada de coordenadas locales a globales aplicando la ecuación 8.

$$MSE_{ni}^{ad} = (\Phi_i)^T K_n \Phi_{di} \quad (10)$$

$$MSE_{ni}^a = (\Phi_i)^T K_n^a \Phi_i \quad (11)$$

Asimismo, la energía axial de tensión modal total se obtiene según la ecuación 12, donde K^a representa la matriz de rigidez total axial hallada ensamblando todas las matrices de rigidez axial K_n para $n = 1, \dots, N_e$, donde N_e es el número de elementos

$$MSE_i = (\Phi_i)^T K^a \Phi_i \quad (12)$$

Seguidamente, el aporte fraccional a la energía de tensión modal axial total para el n -ésimo

elemento sin daño y con daño están dados por las ecuaciones 13 y 14, respectivamente.

$$F_{ij}^a = \frac{MSE_{ni}^a}{MSE_i} \quad (13)$$

$$F_{ij}^{ad} = \frac{MSE_{ni}^{ad}}{MSE_i^d} \quad (14)$$

Teniendo en cuenta que el daño en los elementos es asumido como una pérdida de resistencia en el material, las matrices de rigidez para el n -ésimo elemento con daño y sin daño pueden ser expresadas como se muestra en las ecuaciones 15 y 16.

$$K_n^a = E_n K_{n0}^a \quad (15)$$

$$K_{nd}^a = E_{nd} K_{n0}^a \quad (16)$$

Donde los términos E_n y E_{nd} son los valores de los módulos de Young que representan la resistencia del material de los elementos no dañados y dañados, respectivamente, y la matriz K_{n0}^a representa la rigidez teniendo en cuenta únicamente cantidades geométricas.

Dado que F_{ij}^a y F_{ij}^{ad} son fracciones de la energía de tensión modal axial total se cumple la

siguiente propiedad:

$$\sum_{j=1}^{N_e} F_{in}^a = F_{in}^{ad} = 1 \quad (17)$$

Como el número de elementos es muy grande, F_{ij}^a y F_{ij}^{ad} tienden a ser mucho menor que la unidad, por lo tanto se puede obtener la siguiente expresión hallada por Stubbs et al. (1995).

$$\frac{1 + F_{in}^{ad}}{1 + F_{in}^a} = 1 \quad (18)$$

Sustituyendo las ecuaciones 13 y 14 en la ecuación 18 se obtiene:

$$\frac{(MSE_{ni}^{ad} + MSE_i^{ad})MSE_i^a}{(MSE_{ni}^a + MSE_i^a)MSE_i^{ad}} = 1 \quad (19)$$

Definiendo como β_{ni}^a a la relación E_n/E_n^d basada en la energía de tensión modal asociado con el i -ésimo modo. Sustituyendo las ecuaciones 10, 11 y 12 en la ecuación 19 y haciendo las siguientes aproximaciones $MSE_i^a = E_j(\Phi_i)^T K_0^a \Phi_i$ y $MSE_i^{ad} = E_j(\Phi_i^d)^T K_0^a \Phi_i^d$ donde K_0^a es la matriz de rigidez ensamblada a partir de las matrices de rigidez de cada elemento considerando únicamente las cantidades geométricas, se obtiene.

$$\beta_{ni}^a = E_n/E_n^d = \frac{((\Phi_i^d)^T K_{n0}^a \Phi_i^d + (\Phi_i^d)^T K_0^a \Phi_i^d)((\Phi_i)^T K_0^a \Phi_i)}{((\Phi_i)^T K_{n0}^a \Phi_i + (\Phi_i)^T K_0^a \Phi_i)((\Phi_i^d)^T K_0^a \Phi_i^d)} \quad (20)$$

Cuando se toman N_m modos en consideración, se puede tomar el promedio de β_{ni}^a para

$i = 1, \dots, Nm$ como se muestra a continuación.

$$\beta_n^a = \frac{1}{N_m} \sum_{i=1}^{N_m} \frac{((\Phi_i^d)^T K_{n0}^a \Phi_i^d + (\Phi_i^d)^T K_0^a \Phi_i^d)((\Phi_i)^T K_0^a \Phi_i)}{((\Phi_i)^T K_{n0}^a \Phi_i + (\Phi_i)^T K_0^a \Phi_i)((\Phi_i^d)^T K_0^a \Phi_i^d)} \quad (21)$$

Este valor puede ser interpretado como el índice de daño asociado para el n -ésimo elemento basado en la variación de la energía de tensión modal, la expresión anterior también puede expresarse como.

$$\beta_n^a = \frac{\sum_{i=1}^{N_m} ((\Phi_i^d)^T K_{n0}^a \Phi_i^d + (\Phi_i^d)^T K_0^a \Phi_i^d)((\Phi_i)^T K_0^a \Phi_i)}{\sum_{i=1}^{N_m} ((\Phi_i)^T K_{n0}^a \Phi_i + (\Phi_i)^T K_0^a \Phi_i)((\Phi_i^d)^T K_0^a \Phi_i^d)} \quad (22)$$

De igual forma, se puede calcular el índice asociado a la energía de deformación modal transversal, obteniendo la siguiente expresión.

$$\beta_n^t = \frac{1}{N_m} \sum_{i=1}^{N_m} \frac{((\Phi_i^d)^T K_{n0}^t \Phi_i^d + (\Phi_i^d)^T K_0^t \Phi_i^d)((\Phi_i)^T K_0^t \Phi_i)}{((\Phi_i)^T K_{n0}^t \Phi_i + (\Phi_i)^T K_0^t \Phi_i)((\Phi_i^d)^T K_0^t \Phi_i^d)} \quad (23)$$

Finalmente, se definen los indicadores de daño axial y transversal como:

$$Z_j^a = \frac{\beta_j^a - \overline{\beta^a}}{\sigma_{\beta^a}} \quad (24)$$

$$Z_j^t = \frac{\beta_j^t - \overline{\beta^t}}{\sigma_{\beta^t}} \quad (25)$$

Donde $\overline{\beta^a}$ y $\overline{\beta^t}$ son los valores medios de β_n^a y β_n^t , respectivamente, para todos los n elementos, σ_{β^a} y σ_{β^t} son sus correspondientes valores de desviación estándar.

Estos indicadores son utilizados para la detección y localización de los elementos que presentan falla.

4.3. Modelo Físico

En estructuras civiles la comprobación experimental, para el desarrollo de nuevas metodologías en la detección de fallo, es un factor clave a tener en cuenta ; por ello se suele utilizar un **modelo físico ó real** en los procesos de validación. En este orden de ideas, un modelo físico estructural se define como: *La representación de una estructura o de una porción de la misma, comúnmente construida a escala reducida*(Sabnis et al., 1999);para su desarrollo se debe aplicar las correspondientes leyes de semejanza que permiten realizar un posterior testeo y análisis fiable de resultados.

Las condiciones ambientales a la que se somete una estructura y su configuración geométrica fijan los parámetros sobre el tipo de análisis modal a aplicar en cada caso específico (Osorio y Tarazona, 2016). A nivel general las estructuras civiles son diseñadas bajo cargas estáticas (propias de la aplicación) y cargas dinámicas variables en tiempo tales como: Viento, nieve, flujo vehicular, flujo peatonal, movimientos telúricos, entre otras (Moreno y Thomson, 2010).

Teniendo en cuenta lo anterior, el modelo físico planteado es analizado bajo condiciones de laboratorio,logrando controlar las diferentes variables ambientales a las que se vería sometido el modelo en operación; no obstante, la validación experimental es realizada extrayendo datos deriva-

dos de las propiedades dinámicas intrínsecas del sistema (*formas de modo y frecuencias naturales*) como lo hicieron Chen y Büyüköztürk (2017) y Sha et al. (2019) en sus respectivas investigaciones.

Una de las herramientas disponibles es la metodología de diseño de experimentos, útil en el mé-

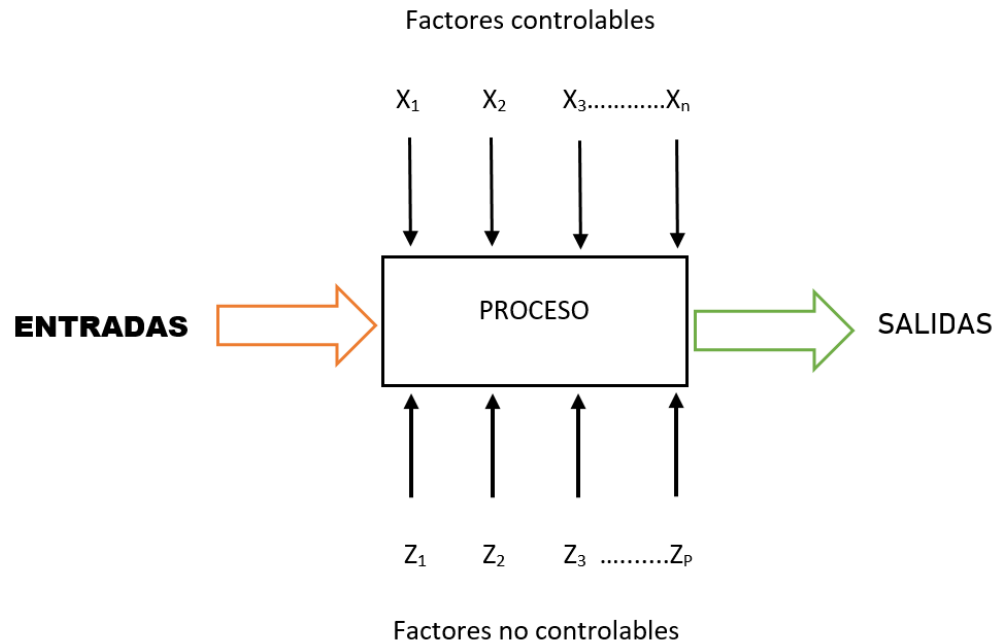


Figura 9. Esquema factores de diseño de experimentos.

todo propuesto, respalda la validez de la configuración geométrica del modelo a proponer. La literatura define el diseño de experimentos como: *El estudio del efecto que distintas situaciones experimentales tienen sobre ciertas respuestas cuantitativas de unidades de observación* (Budyas y Nisbett, 2011). Consecuentemente el modelo físico pasa por las cuatro fases principales de un experimento: planificación, ejecución, control y análisis. En la figura 9 se observa el esquema general que sugerido por el diseño de experimentos.

Según Sabnis et al. (1983) la semejanza estructural se rige por tres principales leyes: Geometría, cinemática y dinámica; además de cumplir el criterio de independencia al usar unidades físicas fundamentales. Por tanto, junto al factor de escala seleccionado en la metodología propuesta se realiza un análisis dimensional que autorice la configuración geométrica a seleccionar.

4.3.1. Caracterización torre de transmisión de energía eléctrica de alta tensión de suspensión a 230 KV de doble circuito. La infraestructura de transmisión de energía es fundamental para el mercado eléctrico (Isa InterColombia, 2019) y el desarrollo industrial de cualquier país.

Históricamente la instalación de la primera red de corriente alterna data de 1891 ubicada entre Lauffen y Frankfurt (Alemania), basado en estas primeras instalaciones, más tarde Lord Kelvin propuso su implementación en el proyecto *Niagara Falls* siendo parte en la victoria de la corriente alterna (AC) en la denominada guerra de las corrientes, para finalmente expandir la transmisión de energía eléctrica alrededor del mundo.

En la actualidad, a nivel local, la red eléctrica Colombiana se encuentra en constante expansión. Esta posee en su totalidad 26.412.99 [Km] instalados de los cuales 10,329.81 [Km] corresponden a redes de transmisión de 230 kV (Paramatec, 2019) como se observa en la figura 10, siendo la red de 230 kV la de mayor aportación. En este orden de ideas, el tipo de estructura usada en estas redes de transmisión cobra relevancia.



Figura 10. Torre 230 Kva Magalena Medio Colombiano

Las torres de transmisión de energía eléctrica, son sistemas estructurales idealizados como un conjunto de barras o elementos finitos unidos por nodos, de sección constante cuyo material es elástico, homogéneo e isótropo (Hernández y Morales , 2005), cuya función básica es soportar los cables conductores junto al hilo de guarda que los protege de cargas atmosféricas.

De acuerdo a su función, estas se clasifican en 3 tipos, las primeras de estas de suspensión, las cuales se diseñan para soportar el peso de cables, aisladores, cadenas y herrajes junto al comportamiento ambiental variable , no obstante, la carga longitudinal sobre la misma es nula; las

segundas, denominadas torres de deflexión, son ubicadas en puntos de inflexión y deflexión a lo largo de la línea de transmisión eléctrica, soportando carga longitudinal y transversal a diferencia de la tipo suspensión; para finalizar; las torres de remate, son instaladas en tres condiciones específicas, al inicio y al final de la línea de transmisión próxima a la subestación eléctrica y al presentarse una línea con una distancia mayor a 5 [Km] entre torres. La ubicación espacial en la línea de transmisión, según su función es plasmada en la figura 11.

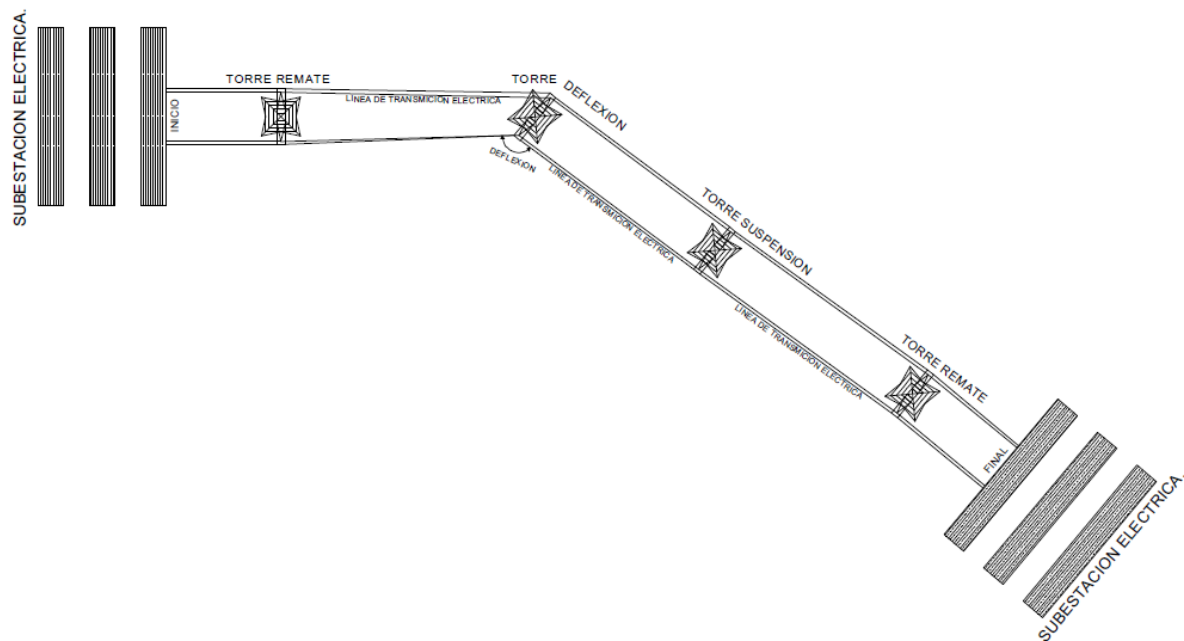


Figura 11. Vista Superior Esquema Línea de Transmisión, Diseño de Torres de Transmisión eléctrica. Adaptado de: Hernández y Morales (2005)

A sus vez, este tipo de estructuras se dividen en subsistemas o partes características, como se observa en la figura 12. En este contexto las diferentes normativas alrededor del mundo, basadas en

estudios de optimización topológica (Alzate Acevedo, 2016), sugieren un tipo de sección transversal para cada parte de la torre en función de la carga soportada; procurando una óptima relación entre su radio de giro y su área transversal.

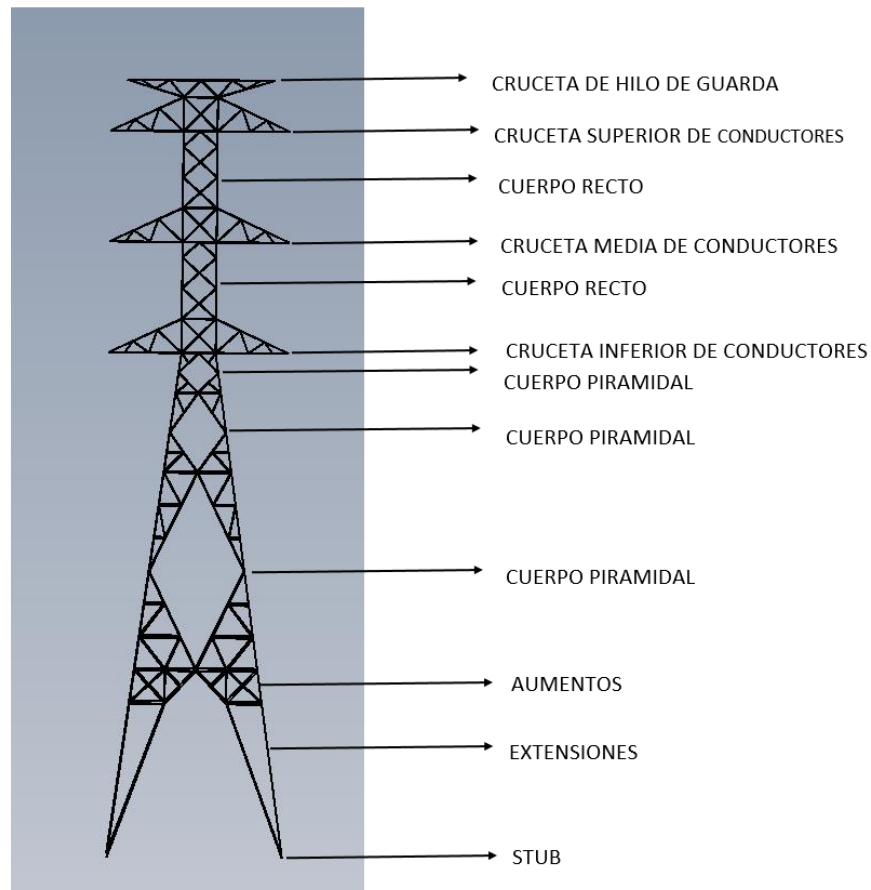


Figura 12. Esquema Partes Torre 230 kV de doble circuito tipo suspensión.

Un reciente estudio realizado por Zhang y Yan toma datos experimentales a torres de alta tensión ubicadas en el este Chino, arroja como resultado experimental frecuencias naturales entre 1.8 [Hz] y 5 [Hz]; Coincidiendo con el libro guía Overhead Lines (Council et al., 2014) que sugiere diseños con frecuencias naturales mayores a 8 [Hz]; con este parámetro de diseño se abarca la

incidencia del viento como principal factor ambiental.

Considerando todos los factores mencionados, se continúa con el desarrollo de una alternativa para el análisis de estructuras metálicas; aumentando el nivel de complejidad respecto a trabajos anteriores en la misma línea como los desarrollados por Osorio y Tarazona (2016) Anaya y Barajas (2011).

4.4. Aplicación Análisis Modal Experimental.

El análisis modal experimental, como la mayoría de prácticas experimentales, posee limitaciones características así como también una planeación, configuración y montaje específico para su correcta aplicación. En este orden de ideas, se procede a detallar el desarrollo del EMA en la metodología propuesta.

Como primera medida, hay que tener cuenta las limitaciones propias del análisis modal experimental, entre las mas relevantes se encuentran:

- La afectación por excitación forzada a la que se somete el sistema, haciendo hincapié en el tiempo de paso por las frecuencias de resonancia. Generalmente no se presenta, sin embargo, es relevante a la hora de aplicar el EMA en estructuras reales por las consecuencias que acarrea.
- La cantidad de mediciones requeridas, con el fin de aumentar la precisión y validez del mismo, conllevando una cantidad de tiempo considerable en la aplicación del mismo para el analista.

- El diseño del ensayo bajo condiciones ideales, teniendo en cuenta que el factor de error humano y las condiciones ambientales pueden llegar a alterar esta condición.

4.4.1. Configuración del ensayo. Es apropiado considerar los métodos de medición de vibraciones en general para contextualizar el enfoque que se plantea. Básicamente se tienen dos tipos de medición; aquellas que sólo miden un parámetro (generalmente la respuesta) y las que miden tanto la entrada como la salida, siendo esta última la usada en la metodología.

Según la relación básica propuesta por la literatura (Ewins, 1995), se extraen las propiedades dinámicas conociendo los valores restantes de la ecuación 26 ; como ya ha sido mencionado en este documento.

$$[RESPUESTA] = [PROPIEDADES]X[ENTRADAS] \quad (26)$$

En este orden de ideas la planeación del ensayo debe asegurar el máximo control posible sobre las diferentes condiciones ambientales, entre estas se encuentran: viento, humedad, temperatura, entre otras; con el fin de garantizar una cantidad mínima posible de ruido en la señal (Van Der Auweraer, 2001). Para el caso en particular se desarrollará el EMA en laboratorio, cumpliendo con los condicionamientos mencionados.

De la misma manera, el conocimiento previo de las formas modales del sistema dinámico abordado es útil como herramienta de comparación; teniendo un criterio de referencia para el EMA y el modelo teórico propuesto respectivamente, asegurando la obtención de datos coherentes. Por tanto, se propone el método de elementos finitos, ampliamente usado en análisis modal y validado por

investigaciones que anteceden lo propuesto como las de Sanchez et al. (2019) y Yang et al. (2019).

Existen casos específicos en dónde se aplica el EMA de manera subestructurada en función de los objetivos del ensayo, siendo una alternativa al analizar sistemas de complejidad considerable (Harvey et al., 2012); de la misma manera la elección del ensayo en condición libre-libre ó libre-empotrado acarrea consecuencias experimentales (Ewins, 1995). Por tal motivo, se debe tener claridad sobre los objetivos específicos del ensayo y lo que se busca abarcar (Harris y Piersol, 2002).

4.4.2. Sistema de adquisición de datos. Los sistemas de adquisición de datos en general tienen como propósito la conversión del muestreo de señales reales (analógicas) a digitales, para su posterior análisis (Pallàs-Areny, 1993).

En vibraciones mecánicas se cuenta con transductores que miden: desplazamiento, velocidad y aceleración, siendo este último tipo de transductor (acelerómetro) el usado en la metodología seleccionada. El acelerómetro funciona con un sistema masa resorte que al activa un piezoeléctrico, generando un pulso de señal que será posteriormente tratado por una tarjeta de adquisición.

Como se muestra en la figura 13 el esquema de adquisición sugerido se compone de: Ordenador, tarjeta de adquisición, acelerómetros y excitador de señal. Después de realizar el montaje y teniendo en puesta punto transductores, tarjeta de adquisición y ordenador; se procede a generar la excitación forzada con el hammer sobre el sistema, cerrando el lazo con los acelerómetros quienes miden valores y envían pulsos de señal a la tarjeta de adquisición.

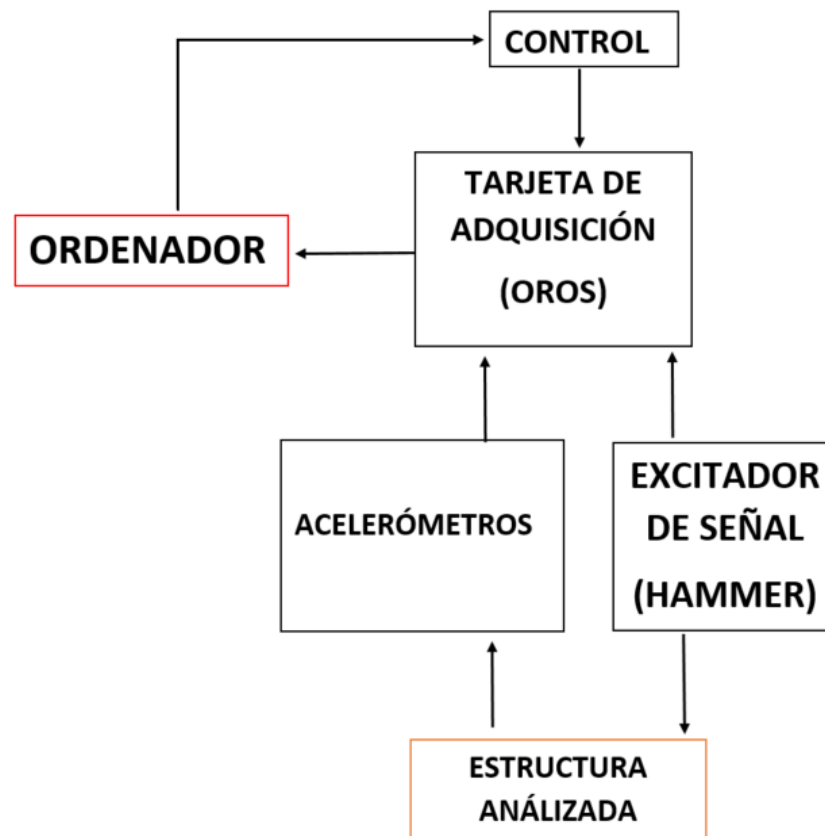


Figura 13. Esquema sistema de adquisición de datos

La tarjeta de adquisición de datos se encarga del acondicionamiento y amplificación de pulso de señal, para su posterior envío como señal digital al ordenador. Finalmente el control, procesamiento y visualización de datos obtenidos se realiza en el ordenador por el analista encargado (Ewins, 1995).

Matemáticamente se aplica el concepto de la transformada rápida de Fourier (FFT), comúnmente por medio de software comercial usado en el análisis de vibraciones, siendo la FFT una

herramienta eficiente para el cálculo de la transformada discreta de fourier (FDT).

Como ya se mencionó en el documento, se debe aplicar el teorema de frecuencia de muestreo de Nysquist-Shanon, respetando el valor de frecuencia de muestreo sugerida donde $f_s = 2f_{max}$; al incumplir lo anteriormente mencionado se puede llegar a presentar: Solapamiento(alising) y manchado espectral(leakage).

Finalmente, la selección del tipo de ventana(window) aplicada se da en función de la forma de excitación, abordando así los problemas correspondientes a la frecuencia de muestreo.

4.4.3. Hardware. Se cuenta a nivel de laboratorio con un modulo de adquisición de datos especializado, acelerómetros de precisión y un martillo excitador para la obtención experimental de los parámetro modales.

Modulo de adquisición de datos La tarjeta de adquisición de datos de referencia: OR-35-FREQ-8, posee 8 canales de entrada, 4 de salida y demás características mencionadas en la tabla 1.

Acelerómetros Se cuenta con 4 acelerómetros DYTRAN uniaxiales, modelo 3056D2 de sensibilidad 100 mv/g, ver figura 15, las especificaciones de estos se muestran en la tabla 2.

Martillo excitador Compuesto por indentador y masa de balanceo como se observa en la figura 16, se cuenta con el modelo DYTRAN 5850B con sensibilidades de 1.0 mv/Lbf, 10,8 mv/Lbf, y 100.02 mv/Lbf; complementario a ello, variadas puntas para la aplicación del ensayo en función



Figura 14. Tarjeta de adquisición de datos OROS OR35



Figura 15. Acelerómetro DYTRAN 3056D



Figura 16. Martillo para pruebas de Impacto DYTRAN 5850B

de su rango de muestreo. Los materiales de estas puntas: nylon, goma y aluminio. Sus características específicas se observan en la tabla 3.

Tabla 1

Especificaciones técnicas de la tarjeta de adquisición de datos OROS OR35

Tarjeta de adquisición de datos OROS OR35	
Número de canales	8
Resolución	24bits
Rango dinámico	102dB
Rango de entrada	± 40 V
Modo de muestreo	Simultáneo
Velocidad de muestreo	40 kHz

Tabla 2

Especificaciones acelerómetros uniaxiales

Acelerómetros DYTRAN 3052D2	
Sensibilidad Acelerómetro 1	98.68 mV/g
Sensibilidad Acelerómetro 2	99.71 mV/g
Sensibilidad Acelerómetro 3	100.44 mV/g
Sensibilidad Acelerómetro 4	97.59 mV/g
Frecuencia de resonancia	> 36kHz
Rango de frecuencias	1 a 10.000 Hz
Resolución del ancho de banda	0.004 m/s ² rms
Peso	10g

Tabla 3

Especificaciones técnicas de martillo de impacto DYTRAN 5850B

Martillo de impacto DYTRAN 5850B				
Posición selector de sensibilidad	100	10	1	Unidades
Rango(para $\pm 5V$ salida)	50	500	5000	LbsF
Sensibilidad ($\pm 10\%$)	100	10	1	mV/Lb
Fuerza Máxima de impacto	1000	6000	8000	LbsF
Tiempo constante de descarga	15	150	1500	Segundos
Rigidez del Sensor		11.4		LbF/ μ in
Frecuencia de Resonancia		>75		kHz
Máxima salida de Impedancia		100		Ohms
Peso del maso		150/5.3		Gramos/Onzas
Peso total		275/9.7		Gramos/onzas

4.4.4. Planeación y montaje del EMA. El proceso de muestreo y procesamiento de datos se ejecuta usando la tarjeta de adquisición ya mencionada (OROS OR35), junta a esta, se aplica el módulo específico Structural dynamics; desarrollado por el mismo fabricante. Permitiendo así, a través de la interfaz del software, la configuración de la totalidad del proceso: Geometría, planeación de adquisición de datos, ejecución del ensayo y post-procesamiento.

En la figura 17 se observa la pantalla de control para la planeación del test, esta incluye un orden de golpes propuestos sobre la geometría específica para lo totalidad de nodos usados.

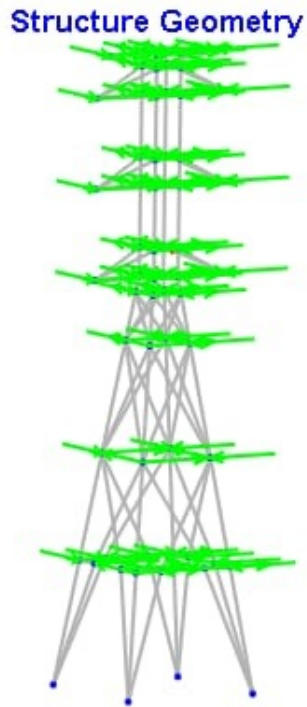


Figura 17. Planificación test

Al ejecutar el EMA en la metodología planteada, se deben tener en cuenta algunos aspectos operacionales adicionales para su correcto desarrollo (Osorio y Tarazona, 2016). Entre estos cabe mencionar:

1. La previa realización de un modelo en elementos finitos, usando el software de simulación Ansys®, permitiendo tener una visualización previa de la formas de modo, Ver figura 18. Su objetivo principal será posicionar estratégicamente los acelerómetros dónde se presenten

los desplazamientos máximos.

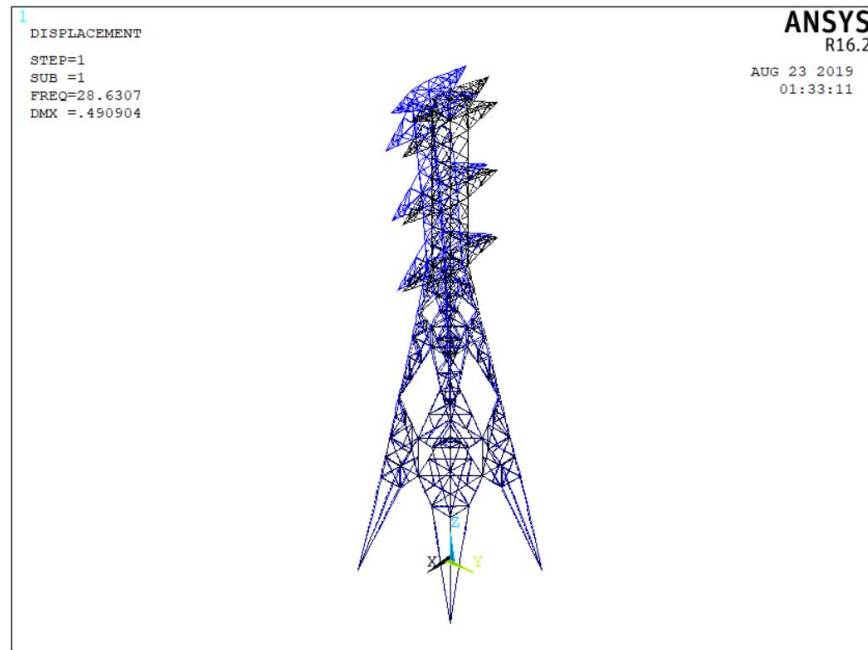


Figura 18. Modelo elementos finitos

2. Conocidos los mayores desplazamientos, se debe evitar acoplar los acelerómetros en los puntos de rigidez. De la misma manera, en la medida de lo posible se debe aprovechar la unión imantada del acople y de ser necesario soldar la arandela base a la estructura; el fin de lo mencionado es garantizar la dirección de medida y reducción de ruido en la señal recopilada.
3. Para determinar la cantidad de ensayos requeridos en el EMA, se usan las FRF (respuesta en función de frecuencia) obtenidas, respecto a ellas se recomienda realizar un proceso de comparación del modelo FEM implementado y datos de FRF de ensayos anteriores; identificando así las frecuencias naturales presentes en el rango de interés. A su vez, la comparación

y retroalimentación de datos es regida por el proceso denominado caracterización dinámica de la estructura.

4.4.5. Caracterización dinámica de la estructura. Como ya ha sido mencionado la caracterización dinámica busca modelar matemáticamente el comportamiento de un sistema (Ogata, 1987), por tanto, el enfoque abordado por la metodología propuesta usa las vibraciones mecánicas como herramienta para la identificación de parámetros modales. En este orden de ideas la correcta determinación de parámetros modales se dará por la similitud entre datos experimentales y los hallados previamente a través del análisis FEM.

Experimentalmente la principal herramienta usada para esta caracterización es la lectura de fases, posterior al filtrado y eliminación de ruido en la señal, el cambio de fase visualizado como un pico en la FRF (Gómez y Herrera, 2011) es quien determina la dirección relativa de deformación que se presenta en una estructura. Relacionado directamente a estas deformaciones aparecerán los modos específicos de interés.

Una vez identificadas las frecuencias naturales y sus correspondientes formas modales experimentalmente, se procede a comparar estos valores respecto a los teóricos; en función de los datos obtenidos. El proceso se debe repetir hasta encontrar una buena correlación entre datos prácticos y teóricos.

La caracterización dinámica estructural puede acarrear algunas dificultades (Osorio y Tazona, 2016), entre estas se pueden encontrar:

- Una diferencia significativa entre frecuencias naturales planteados por el FEM y las halladas experimentalmente, descartando esta relación para la caracterización
- Por simetría estructural, puede presentarse la aparición de modos en frecuencias muy cercanas. Exigiéndole al analista una mayor precisión experimental en este rango de frecuencias.
- El cambio de rigidez por juntas no ideales entre elementos influencia directamente en los valores experimentales hallados, por tanto, de ser requerido se sugiere aplicar factores de corrección.

4.5. Validación

El proceso de validación consta de dos partes fundamentales, la primera de esta es la expansión de la forma modal adquirida a través del análisis modal experimental, aplicando el modelo de expansión de Guyan, la segunda parte es la comparación de las formas modales a través del criterio de aseguramiento modal, MAC.

4.5.1. Modal Assurance Criterion (MAC). El número MAC, criterio de aseguramiento modal, es una función que proporciona una medida de consistencia entre dos vectores modales, también puede generar un método para comparar fácilmente las estimaciones de vectores modales hallados de diferentes fuentes. Los vectores modales calculados a través de un análisis de elementos finitos pueden compararse con los determinados experimentalmente, así como también se pueden contrastar los hallados de diferentes métodos experimentales, tomando un vector modal como referencia y el otro para su respectiva comparación (Allemang, 2003), como se muestra a continuación.

$$MAC(\phi_a, \phi_e)_i = \frac{|\{\phi_a\}_i^T \{\phi_e\}_i|^2}{|\{\phi_a\}_i^T \{\phi_a\}_i| |\{\phi_e\}_i^T \{\phi_e\}_i|} \quad (27)$$

Donde ϕ_a representa la forma de modo analítica, ϕ_e la forma de modo experimental y el subíndice i denota el i -ésimo modo de vibración.

4.5.2. Expansión modal de Guyan. Este método consiste en la división de los vectores y matrices de fuerza, rigidez, masa y desplazamiento, relacionándolos con los grados de libertad maestros, que se mantienen, con los que grados de libertad esclavos, los cuales son eliminados (Leandro et al., 2006), si no se aplica fuerza a ninguno de los nodos esclavos se obtiene:

$$T = \begin{bmatrix} [M_{mm}] & [M_{ms}] \\ [M_{sm}] & [M_{ss}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \vec{\ddot{x}}_m \\ \vec{\ddot{x}}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_{mm}] & [K_{ms}] \\ [K_{sm}] & [K_{ss}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \vec{\ddot{x}}_m \\ \vec{\ddot{x}}_s \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \vec{f}_m \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (28)$$

Donde los subíndices m y s corresponden a las coordenadas maestras y esclavas, despreciando los términos de inercia del segundo bloque de la ecuación anterior se obtiene:

$$K_{sm} \vec{\ddot{x}}_m + K_{ss} \vec{\ddot{x}}_s = 0 \quad (29)$$

La cual se usa para eliminar los grados de libertad esclavos y obtener:

$$T = \begin{bmatrix} \vec{x}_m \\ \vec{x}_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I] \\ -[K_{ss}]^{-1} [K_{sm}] \end{bmatrix} \vec{x}_m = [T_s] \vec{x}_m \quad (30)$$

Donde $[T_s]$ denota la transformación estática entre el vector de estado completo y las coordenadas maestras, se observa que los grados de libertad maestros permanecen sin cambios, por lo que las formas de modo expandidas son:

$$T = \begin{bmatrix} \Phi_m \\ \Phi_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I] \\ -[K_{ss}]^{-1} [K_{sm}] \end{bmatrix} \Phi_m = [T_s] [\Phi_m] \quad (31)$$

Con esto se logra obtener la forma de modo completa cuando se tiene información modal de algunos nodos, este proceso sirve cuando es difícil adquirir esta información debido a factores como la geometría y el acople de los sensores.

5. Resultados de la investigación

En este capítulo se presentan los principales resultados, derivados de la aplicación de la metodología expuesta anteriormente, la cual está compuesta por 5 fases principales, iniciando con la caracterización geométrica y mecánica de la estructura, seguido del análisis de elementos finitos, la construcción a escala de la torre de transmisión de energía eléctrica de alta tensión y el desarrollo y aplicación del algoritmo de detección de fallos (MSED), finalmente se sometió el algoritmo a variados casos de daño realizados en función de la pérdida de rigidez.

5.1. Construcción estructura a escala

Con base en la propuesta de validación teórico-experimental, la construcción del modelo a escala tiene como objetivo la validación del modelo numérico desarrollado de una torre de energía eléctrica de alta tensión. Aumentado el nivel de complejidad en cuanto a: tamaño, geometría y número de elementos de metodologías anteriormente implementadas, entre estas se encuentran las desarrolladas por Anaya y Barajas quienes sientan bases metodológicas en una estructura metálica simple, para su posterior aplicación por Osorio y Tarazona en una estructura petrolera tipo fixed offshore.

La información de la estructura propuesta es originalmente extraída de una torre de alta tensión ya implementada en el sistema de transmisión de energía eléctrica Colombiano Ver anexo -, el plano geométrico base es proveído por SADELEC LTDA Ver anexo -, quien da la información suficiente para el inicio de una propuesta de modelo a escala que permita extraer sus propiedades dinámicas en laboratorio.

La torre de transmisión de energía eléctrica de alta tensión de 230kV, de doble circuito, tipo suspensión, que es abordada usualmente se encuentra en terreno llano dónde la carga combinada sobre la misma es nula. La altura máxima de la estructura es de 45.5 [m] con un ancho máximo en crucetas de 10.6 [m], a su vez está compuesta por celosía metálica estructural de sección transversal tipo L según la norma europea ITC LAT07 (Ministerio de Industria Energía y Turismo, 2013).

Ver tabla 4.

Tabla 4

Composición perfiles estructurales torre de 230 kV

Perfil estructural según ubicación	
Perfil montantes	L200X200X26
Perfil travesaños	L150X150X18
Perfil crucetas	L130X130X16
Perfil vértices superiores	L130X130X16

Según los requerimientos de propiedades mecánicas en los perfiles mencionados, el material estructural idealmente usado para este tipo de estructura es el acero estructural ASTM A36 (Hernández y Morales , 2005), (American Institute of steel construction, 2016) .

Con todos los datos técnicos recopilados se procede aplicar las leyes de similitud estructural para el escalamiento de la estructura (Sabnis et al., 1999) . Según el criterio económico así como también en función de los recursos disponibles a nivel de talleres y laboratorios; se propone la construcción de un modelo a escala 1:30.

En primer lugar se aplica un criterio de uniformidad en torno al tipo de perfil estructural que compone la torre, teniendo en cuenta que el desarrollo del modelo a escala propuesto se enfoca

inicialmente al ámbito académico, se unifica la composición de perfiles con el objetivo de disminuir costos y complejidad constructiva al modelo. Se usa por tanto el valor promedio de perfil con base en los datos mostrados en la tabla 4. Fruto de esta unificación de criterio se usará para los cálculos pertinentes el perfil L150X150X18, descrito en la figura 19.

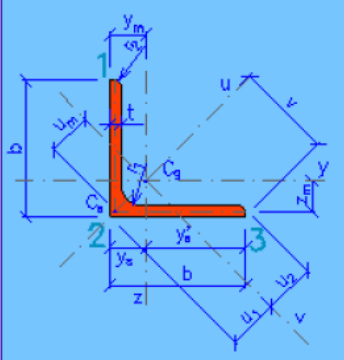
L 150x150x18			
Dimensiones			
		Propiedades del perfil al eje secundario	
		Eje y	Eje z
		$I_y = 1.05E+7 \text{ mm}^4$	$I_z = 1.05E+7 \text{ mm}^4$
		$W_{y1} = 9.87E+4 \text{ mm}^3$	$W_{z3} = 9.87E+4 \text{ mm}^3$
		$W_{y2} = 2.40E+5 \text{ mm}^3$	$W_{z2} = 2.40E+5 \text{ mm}^3$
		$i_y = 45.4 \text{ mm}$	$i_z = 45.4 \text{ mm}$
		Propiedades del perfil al eje principal	
		Eje u	Eje v
		$I_u = 1.67E+7 \text{ mm}^4$	$I_v = 4.34E+6 \text{ mm}^4$
		$W_{u1} = 1.57E+5 \text{ mm}^3$	$W_{v2} = 7.03E+4 \text{ mm}^3$
		$i_u = 57.1 \text{ mm}$	$W_{v3} = 8.07E+4 \text{ mm}^3$
		$u_m = 49 \text{ mm}$	$i_v = 29.2 \text{ mm}$
		Torsión y pandeo local	
		$I_t = 5.54E+5 \text{ mm}^4$	$i_{pc} = 64.1 \text{ mm}$
		$I_{yz} = 6.16E+6 \text{ mm}^4$	$i_{pa} = 80.7 \text{ mm}$
$b = 150 \text{ mm}$	$A = 5103 \text{ mm}^2$		
$t = 18 \text{ mm}$	$G = 40.06 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$		
$r_1 = 16 \text{ mm}$	$A_L = 0.5863 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-1}$		
$r_2 = 8 \text{ mm}$	$v = 106.1 \text{ mm}$		
$y_s = 43.7 \text{ mm}$	$u_1 = 61.7 \text{ mm}$		
$y'_s = 106.3 \text{ mm}$	$u_2 = 53.7 \text{ mm}$		

Figura 19. Perfil estructural L 150X150X18. Adaptado de:(Villanueva, 2014)

Según el AISC(American Institute of steel construction), con el objetivo de garantizar una buena relación de radio de giro respecto al área transversal se usa el perfil de tipo L en celosía estructural(Hernández y Morales , 2005).No obstante, otra solución que cumple las condición re-

querida es la sección transversal circular; descartada en la aplicación real por costo elevado que acarrea.

Por los aspectos ya mencionados y teniendo en cuenta que el colapso por pandeo estructural es el mayormente presentado según Fu et al. , se desarrolla un modelo a escala con sección transversal circular con un factor de escala 1:30. Se procede a desarrollar el siguiente cálculo:

Se tiene una inercia $I_t = 5.54 \times 10^5 [mm^4]$, igualando respecto a una área transversal circular $I_{areacircular} = 1/4 \pi r^4$, se obtiene $r = 28.38 [mm]$, teniendo en cuenta el factor de semejanza geométrica adimensional $(30/1) = (R_{original}^2 / R_{escala}^2)$ obtenemos $R_{escala} = 3.74 [mm]$.

Tabla 5

Especificaciones técnicas acero al carbono aplicado

Características del Acero AISI 1018	
Diámetro	9 mm
Densidad	7800 Kg/m ³
Módulo de elasticidad	1.9x10 ¹¹ MPA
Módulo de Poisson	0.29

Fruto del cálculo realizado, se contrasta con lo disponible en el mercado y se selecciona un acero AISI 1018, suministrado por la compañía nacional de aceros S.A, Ver tabla 5; las propiedades mecánicas dadas por el proveedor son especificadas en el anexo e. La construcción del modelo a escala es desarrollada en el taller de soldadura adscrito a la escuela de ingeniería mecánica de la Universidad Industrial de Santander, siguiendo la normativa pertinente, obteniendo como resultado el modelo plasmado en la figura 20.



Figura 20. Torre a escala 1:30 unida a malla resoldada

Para garantizar las condiciones de contorno teóricamente planteadas, en dónde los nodos pertenecientes a la base un desplazamiento nulo en los 6 grados de libertad, se aplica concreto estructural, previa unión de una malla resoldada a los stubs posteriormente empotrados, garantizando la integridad de la loza fundida. Ver figura 21.

De esta fase se concluye que además del diseño teórico se debe tener en cuenta la gestión de proyectos en distintos factores tales como: presupuesto, tiempo de ejecución, mano de obra experta e imprevistos que surgen en el camino. No obstante, dentro de los parámetros requeridos para la validación se logra obtener un modelo final viable del que se busca extraer las propiedades dinámicas para la validación teórico experimental.



Figura 21. Fraguado loza de concreto estructural

5.2. Modelo teórico

Recordando que un modelo teórico se refiere a la descripción ideal, que permite reproducir una serie de datos experimentales con el fin de adelantar el comportamiento de un fenómeno (Calvo Vélez, 2006). Se utiliza la geometría y propiedades mecánicas de la estructura para una primera aproximación del comportamiento de la torre usando el método de elementos finitos; obteniendo así las respectivas frecuencias naturales y formas modales de referencia observadas en las figuras 22 y 23.

Los modos obtenidos muestran valores cercanos en sus frecuencias naturales, 28.6307 [Hz]

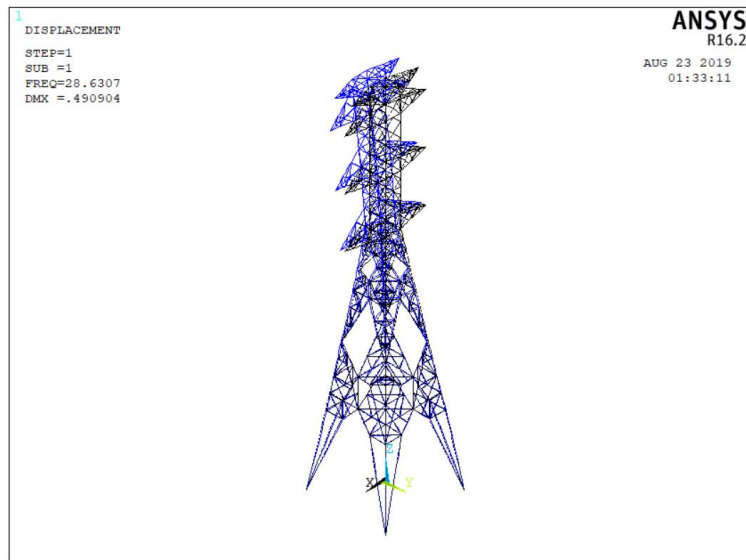


Figura 22. Forma modal obtenida por el método de elementos finitos para el primer modo de vibración

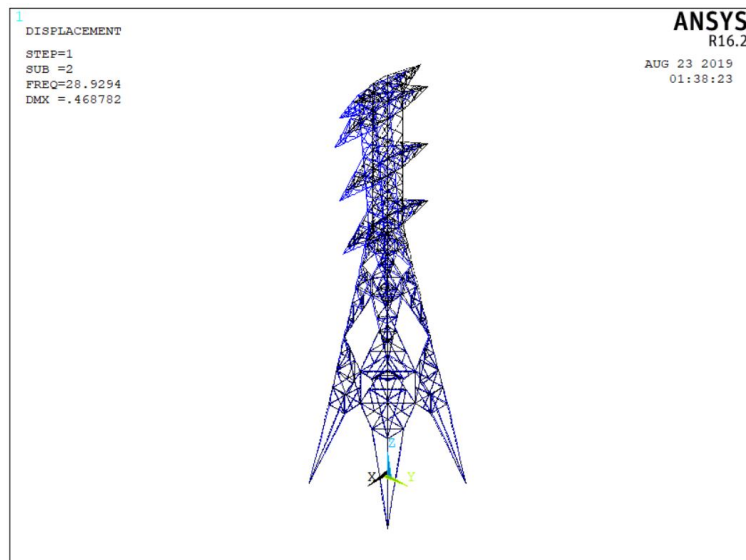


Figura 23. Forma modal obtenida por el método de elementos finitos para el segundo modo de vibración

y 28.9294 [Hz] respectivamente, esto hace sentido por el alto grado de simetría que posee la estructura. Por consiguiente, el análisis modal experimental se enfocará al rango hallado, prestando atención especial a los picos cercanos que se presenten en el dominio de la frecuencia.

Adyacente a esto, el modelo teórico desarrollado en el Matlab® cuenta con 356 nodos (uniones) y 866 elementos (barras), Ver figura 24. De aquí se extrae la información pertinente que alimenta el algoritmo de detección y localización de fallo, para el método de descomposición modal de energía de tensión aplicado.

Teóricamente el estado general de la estructura a groso modo se plantea en dos estados, el primero totalmente sano reflejando un estado ideal, el segundo recoge un variado número de casos en dónde se induce falla a n número de barras en función de la variación de rigidez.

5.2.1. Caracterización teórica de falla. Investigaciones precedentes enfocadas a la interacción fluido estructura en redes de alta tensión, como la desarrollada por (Zhang et al., 2013), validan la aplicabilidad del análisis teórico en función de la variación en las propiedades mecánicas para la predicción del colapso progresivo y el análisis que estos efectos tiene en este tipo de estructuras; con este propósito, la ejecución del algoritmo implementado permite introducir un daño teórico con el fin de observar la respuesta que presenta la inducción de daño en la metodología propuesta.

Las entradas incluidas, como ya ha sido mencionado, permiten seleccionar un número específico de barras e introducir un porcentaje de pérdida de rigidez en cada una de ellas. En la figura 25 se observan los indicadores de daño axial satisfactorios, posterior a una falla teóricamente inducida sobre la barra horizontal(# 460) con un 5 % en pérdida de rigidez, usando el método de descompo-

DEFINICION DE LA ESTRUCTURA

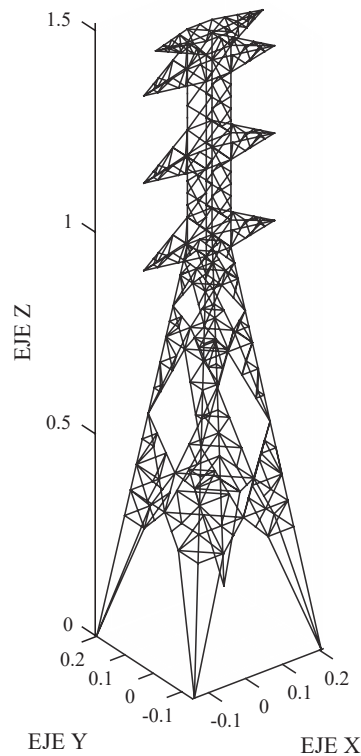


Figura 24. Representación modelo a escala en MATLAB.

sición de energía de tensión (MSED).

Con lo observado en los indicadores axiales, en función del daño teórico inducido, representando un caso arbitrario de colapso progresivo, se concluye la validez de la caracterización de falla aplicada. Posteriormente se plantearán variados casos de fallos teóricos que permitan observar el comportamiento en cuanto a detección y localización en diferentes tipo de elementos del MSED.

5.3. Análisis modal experimental

La toma de datos aplicada se enfoca en extraer las primeras formas de modo junto a las correspondientes frecuencias naturales, en el modelo a escala sano, con el fin de validar el modelo numérico

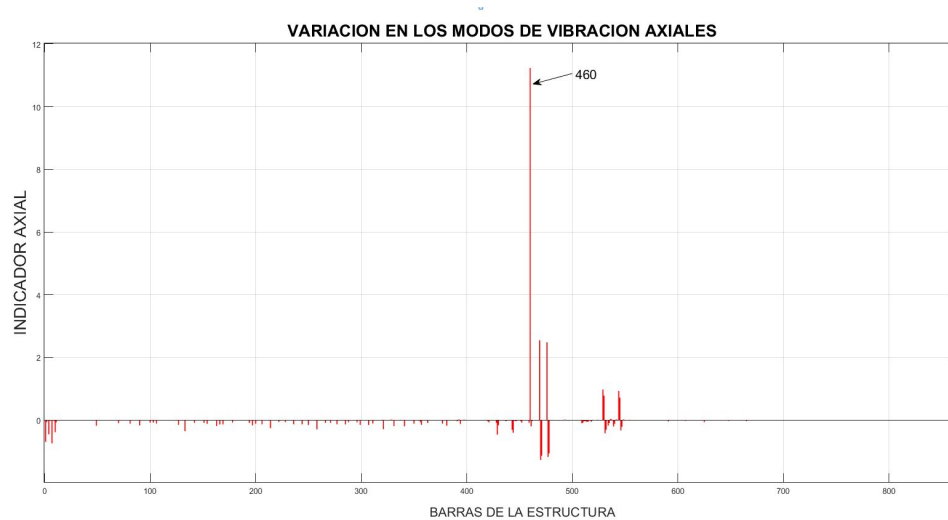


Figura 25. Indicadores energía de tensión modal axial barra horizontal.

teórico propuesto. Se resumen en la tabla 6 los parámetros de control usados para el software modal de la tarjeta de adquisición de datos OROS OR35.

Tabla 6

Configuración control Software modal

Principales parámetros configurados	
Rango de frecuencia	0 - 400 [Hz]
Líneas espectrales	401
Average	3
Window type	Force/exp

Para la ejecución del EMA se desarrolló un modelo simplificado en dónde se usan 64 nodos de los 356 que posee la estructura a escala construida, Ver figura 26; esto se debe a la imposibilidad de realizar una toma de datos correcta en la totalidad de los nodos. No obstante, posterior a la toma de datos se aplicó el método de expansión de Guyan para la correspondiente validación.

Ejecutado el EMA se obtuvieron los valores para las primeras frecuencias naturales , 28.1

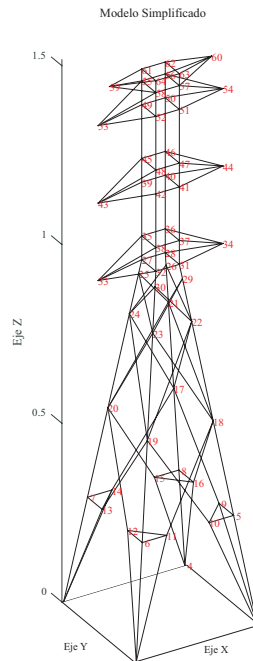


Figura 26. Modelo Simplificado torre a escala

[Hz] y 29.32[Hz] para el primer y segundo modo respectivamente. Consecuentemente, en la ejecución del ensayo como herramienta para la evaluación de calidad en los datos hallados se usó la función de coherencia, plasmada en las figuras 27 y 28 para cada modo.

De la misma manera los cambios en la fase, para el rango de interés, se observan en las figuras 29 y 30 . Concordando los picos hallados en la FRF con los correspondientes cambios de fase.

Adicionalmente, por la complejidad que implica hallar las formas de modo analizando cada FRF hallada, se usan dos herramientas adicionales para la identificación : función de identificación modal compleja (CMIF) y diagrama de estabilidad.

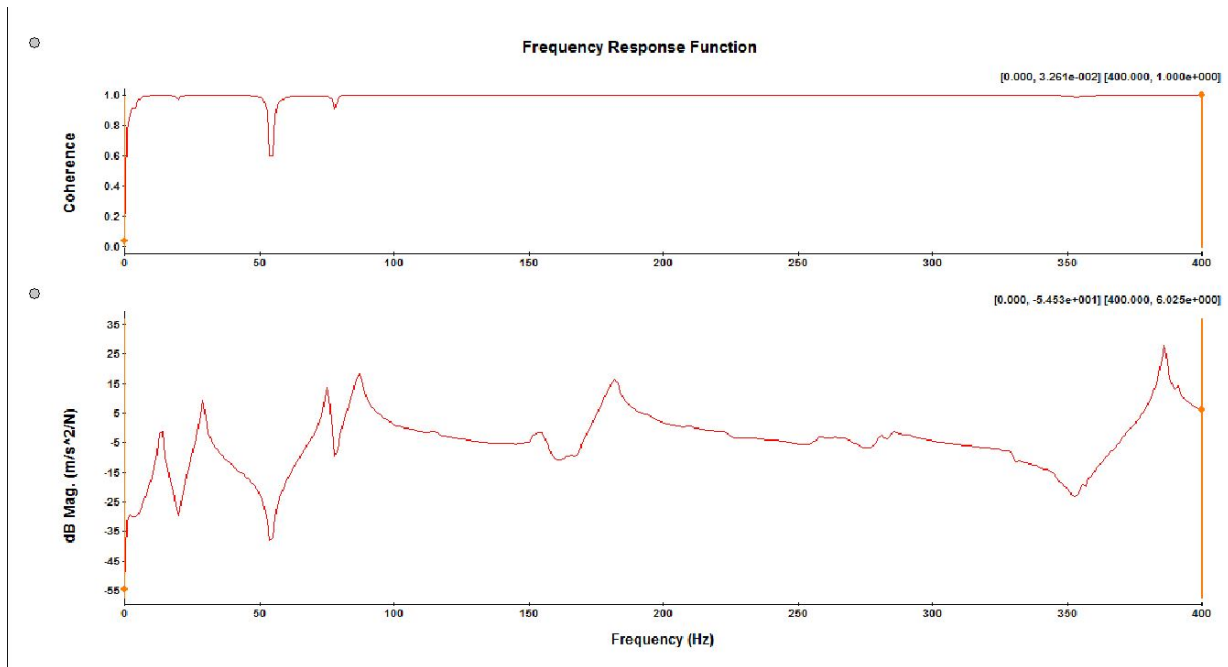


Figura 27. Coherencia- FRF primera forma modal

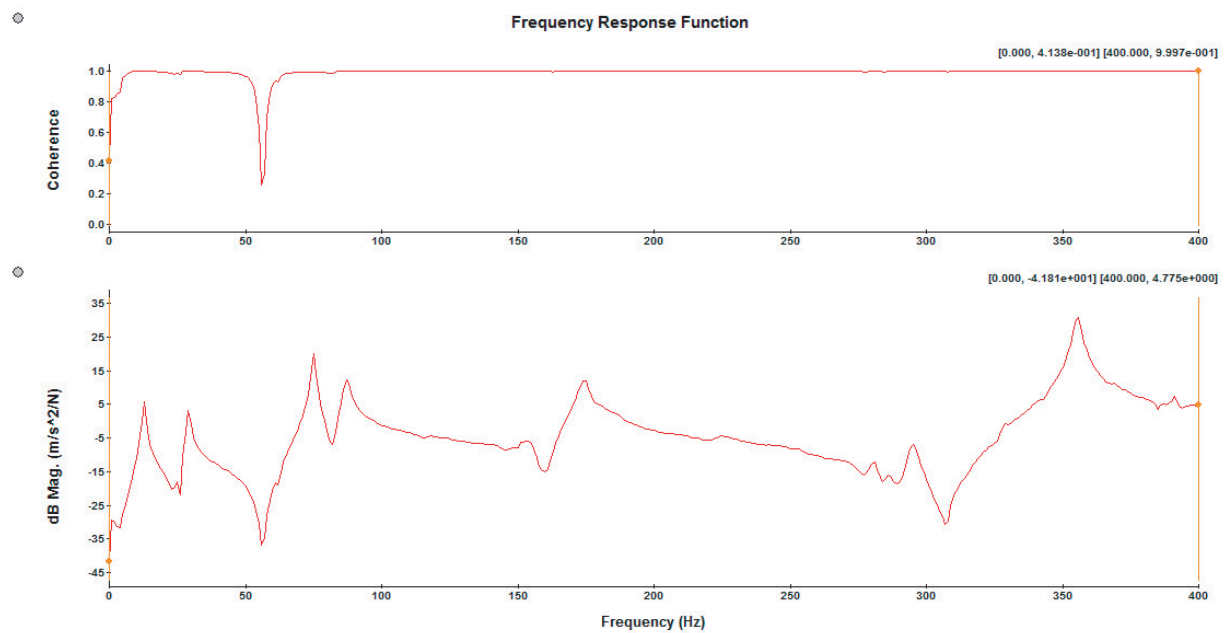


Figura 28. Coherencia- FRF segunda forma modal

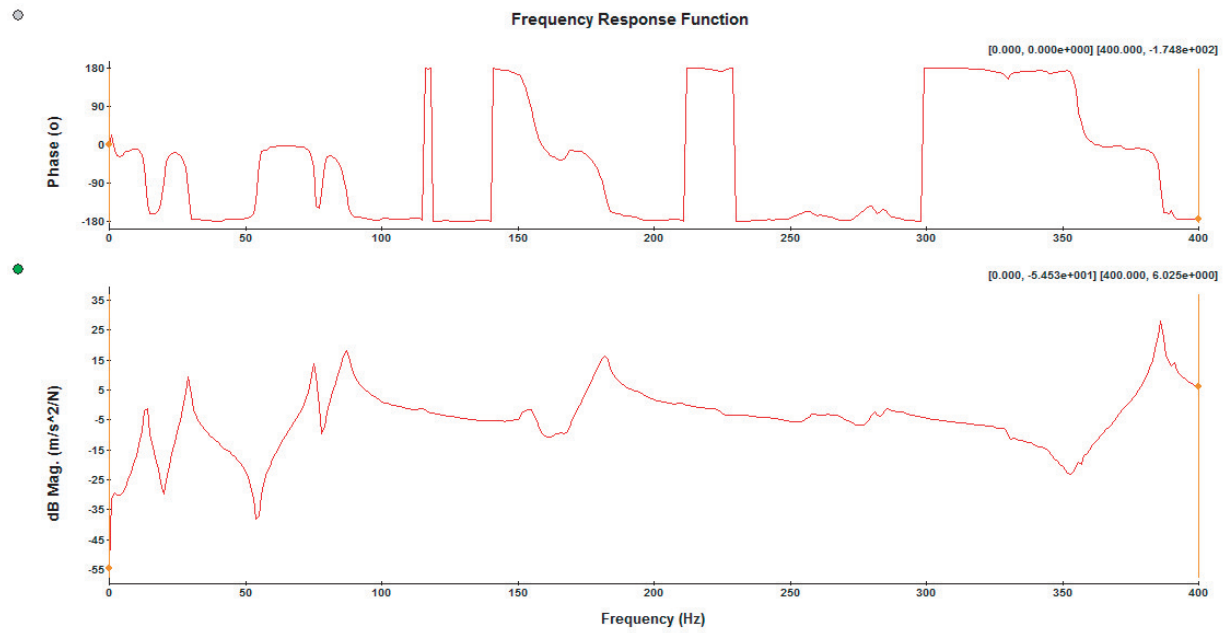


Figura 29. Fase-FRF primera forma modal

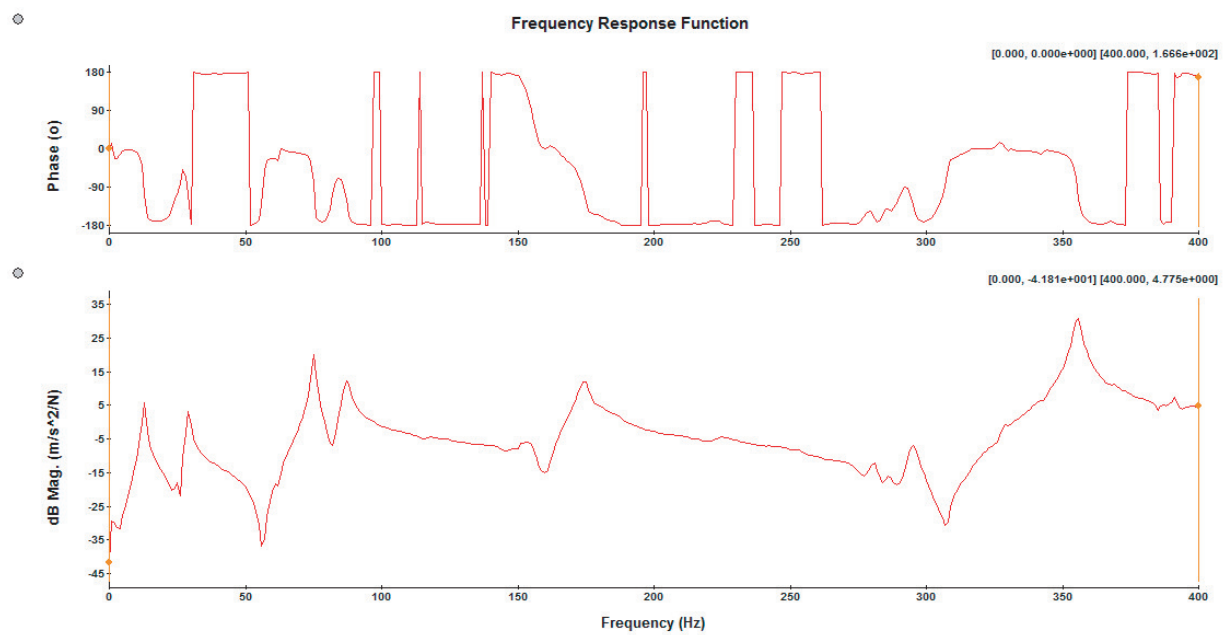


Figura 30. Fase-FRF segunda forma modal

5.3.1. Complex Modal Identifier function (CMIF). Esta herramienta de identificación se basa en la descomposición singular obtenida de la matriz normal en cada línea espectral, para el caso específico se aplica dentro del rango de frecuencias de mediciones de interés. Ver imagen 31,32.

5.3.2. Diagrama de estabilidad. La obtención de esta gráfica tiene como función identificar los cambios en la FFT en el rango de frecuencias seleccionado, esto permitió seleccionar gráficamente el pico correspondiente a la forma modal en cada ensayo. En las figuras 33 y 34 se observan los diagramas de estabilidad obtenidos

5.4. Validación

Según el proceso metodológico expuesto en el capítulo anterior, la validación del modelo a escala se fundamentó en dos fases principales, la expansión modal y el número de aseguramiento modal, las cuales permitieron validar el análisis modal experimental.

5.4.1. Expansión modal. Como resultado de la expansión modal se obtuvieron las formas de modo 1 y 2 de la torre de energía eléctrica mostradas en la figura 35 . Para desarrollar este proceso se realizó un reordenamiento de los primeros 64 nodos dado que estos fueron los utilizados en el análisis modal experimental, como se observa en la figura 26.

Seguidamente se procedió a aplicar la ecuación 31 en la cual ϕ_m corresponde a la forma de modo de los nodos maestros correspondientes a los 64 primeros.

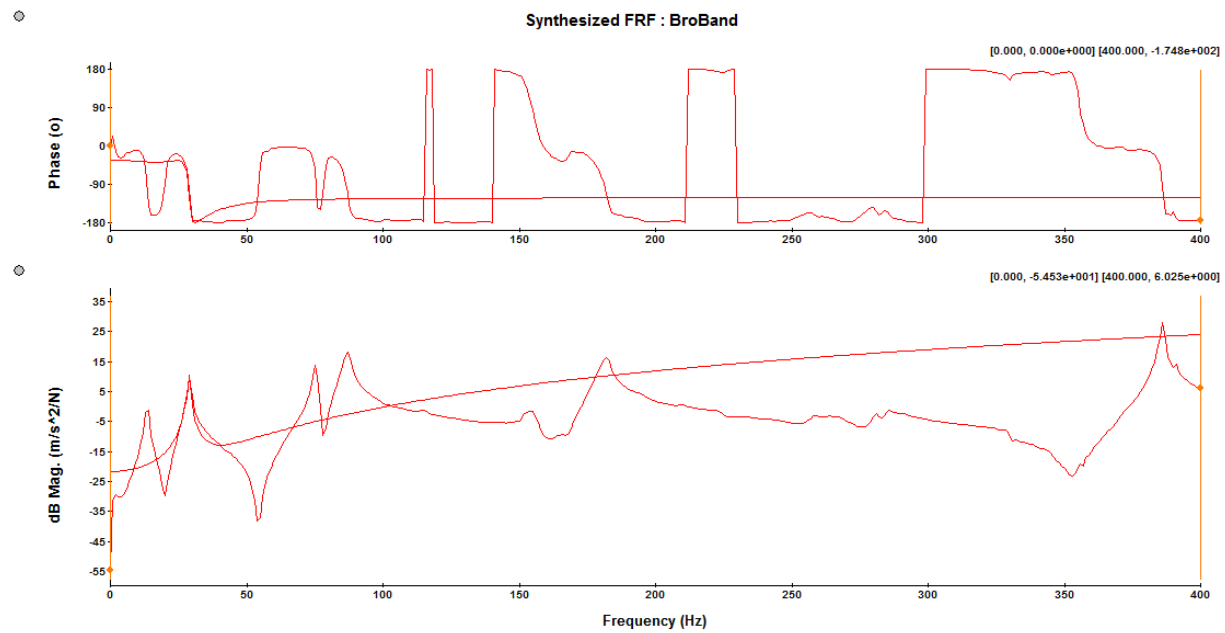


Figura 31. CMIF primera forma modal

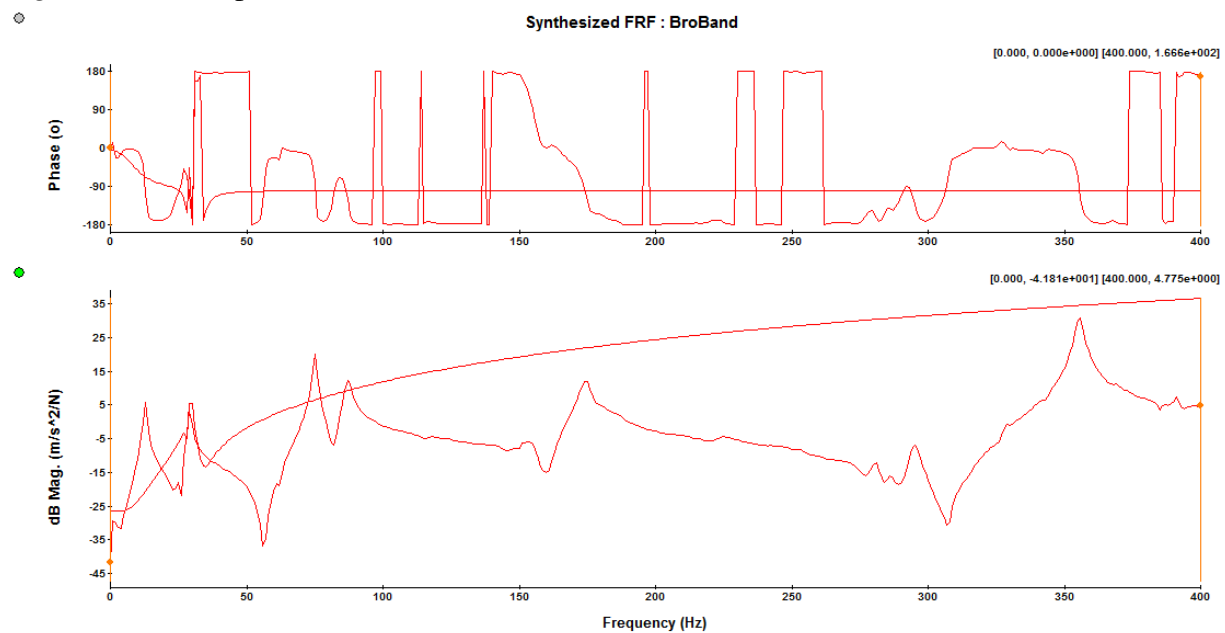


Figura 32. CMIF segunda forma modal

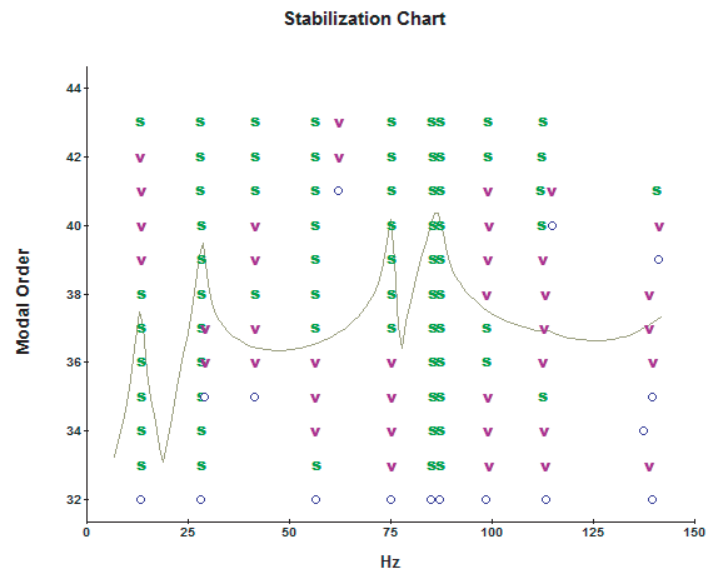


Figura 33. Diagrama de estabilidad primera forma modal

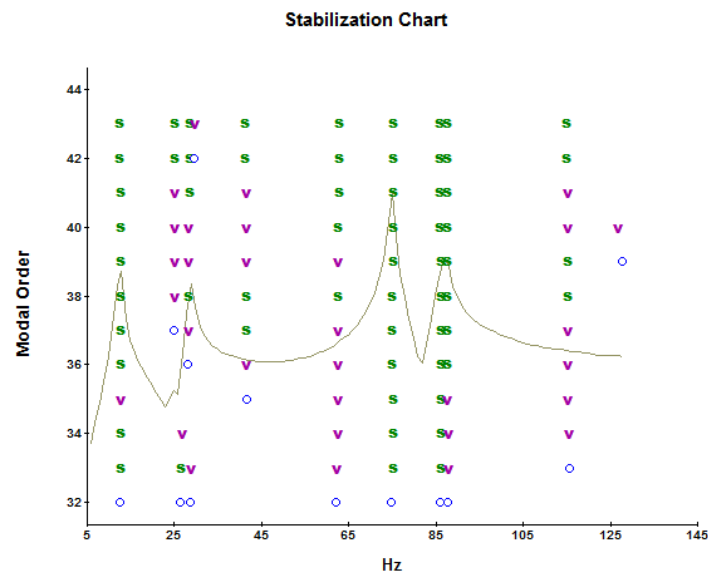


Figura 34. Diagrama de estabilidad segunda forma modal

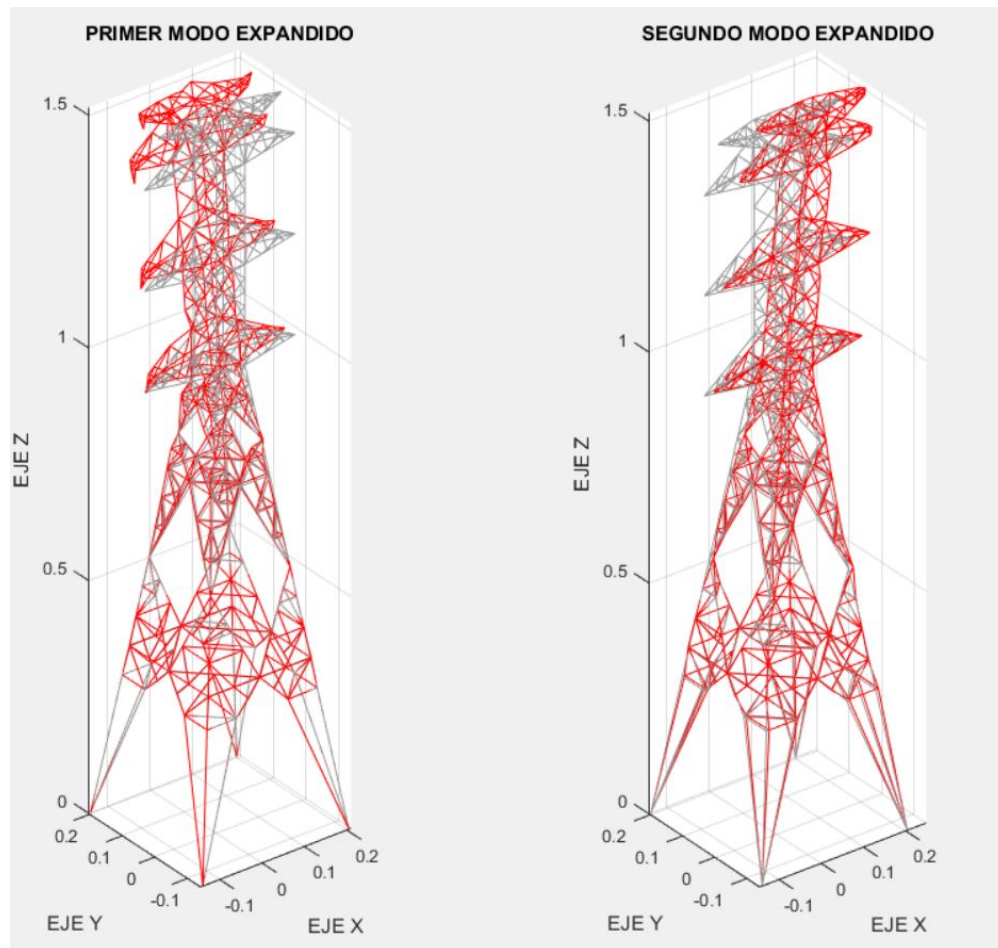


Figura 35. Elementos dañados para el caso E

Posteriormente, se realizó un ajuste de los modos expandidos obtenidos, esto debido a la diferencia entre la normalización realizada en el análisis modal experimental y la desarrollada en el análisis numérico.

Para finalizar, se aplicó el criterio de aseguramiento modal (MAC), expuesto en la ecuación 27, lo cual dió como resultado una similitud del 46.2 % y 66.9 % para el primer y segundo modo respectivamente.

5.5. Casos de detección de fallos

Para la detección de daños utilizando la metodología MSED, se simularon 5 casos de daño, todos representados como una pérdida porcentual en el modulo de elasticidad de elementos afectados, lo cual causó una pérdida proporcional de la rigidez de los elementos. Los casos estudio se muestran en la tabla 7.

Tabla 7

Daños inducidos en la torre de energía eléctrica

Casos de daño	Elementos dañados	Porcentaje de daño	Frecuencias naturales(Hz)	
			Primer modo	Segundo modo
Sin daño	No aplica		28.6248	28.9195
A	460	5 %	28.6230	28.9195
B	429	5 %	28.6230	28.9195
C	509	5 %	28.6194	28.9162
D	428	5 %	28.6246	28.9193
E	200-244-331-341	5 %	28.5880	28.8886

Los primeros 4 casos se simularon con un 5 % daño en un solo elemento, los cuales constaron de barras transversales, horizontales y verticales, tal como se muestra en la figura 36. En el caso E se simuló un escenario con 5 % de daño en cuatro elementos simultáneamente, evidenciado en la figura 37, lo cual se acerca más a un escenario de daño real, al tener múltiples barras afectadas.

Los resultados de los casos A, B, C, D, muestran una satisfactoria localización y detección del daño tanto en su indicador axial como en su indicador transversal, como se puede observar en las figuras 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44 y 45, respectivamente lo que evidencia un desempeño válido del algoritmo de detección (MSED).

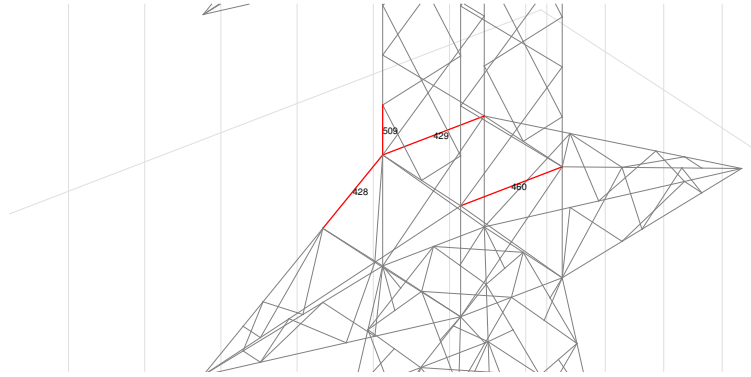


Figura 36. Elementos dañados para los casos A, B, C y D.

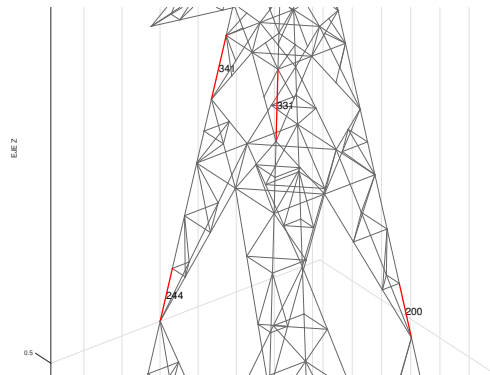


Figura 37. Elementos dañados para el caso E

En cuanto al caso E, al igual que en los primeros 4 casos se observa una detección y localización satisfactoria, sin embargo, se puede concluir que los indicadores del MSED no poseen un comportamiento lineal acorde a la severidad de daño, de acuerdo a lo observado en las figuras 46 y 47 de esta múltiple detección y localización de falla.

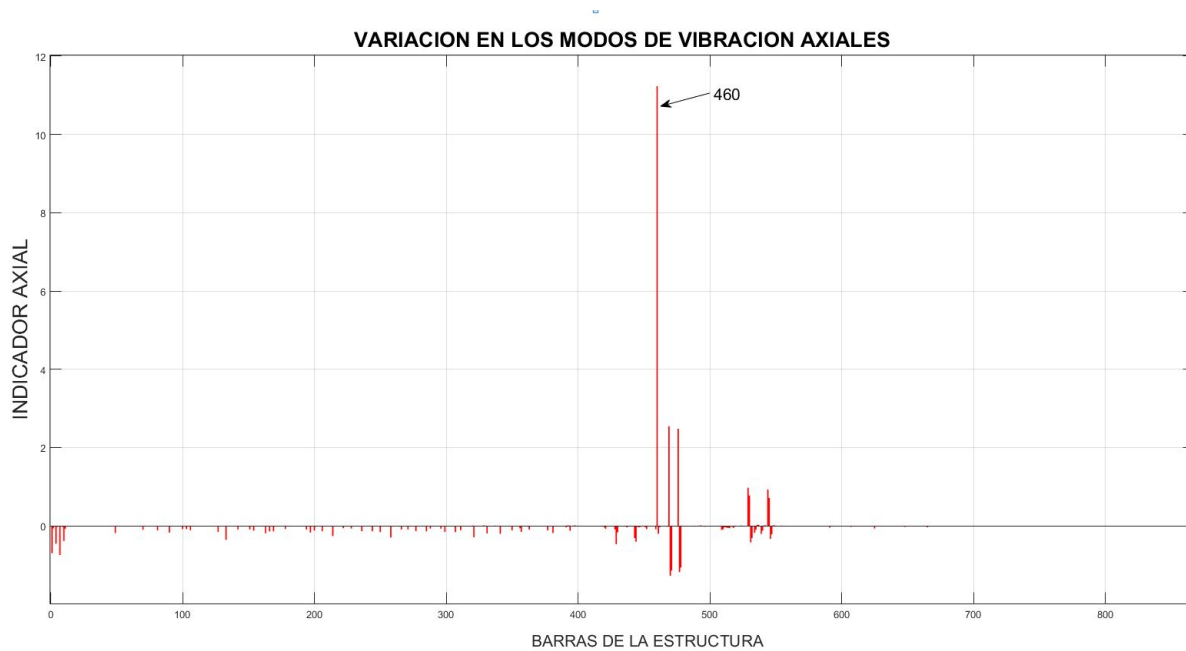


Figura 38. Indicadores energía de tensión modal axial caso A.

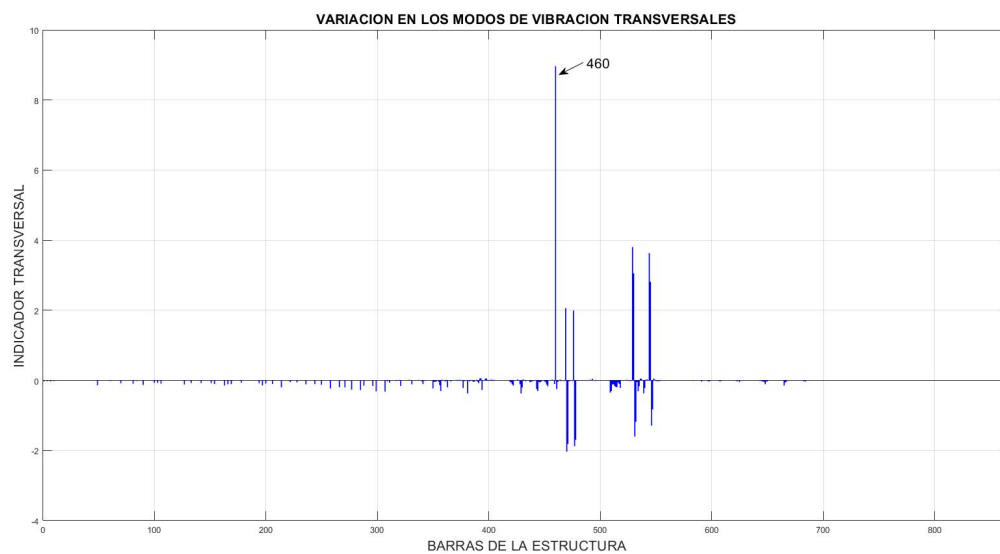


Figura 39. Indicadores energía de tensión modal transversal caso A.

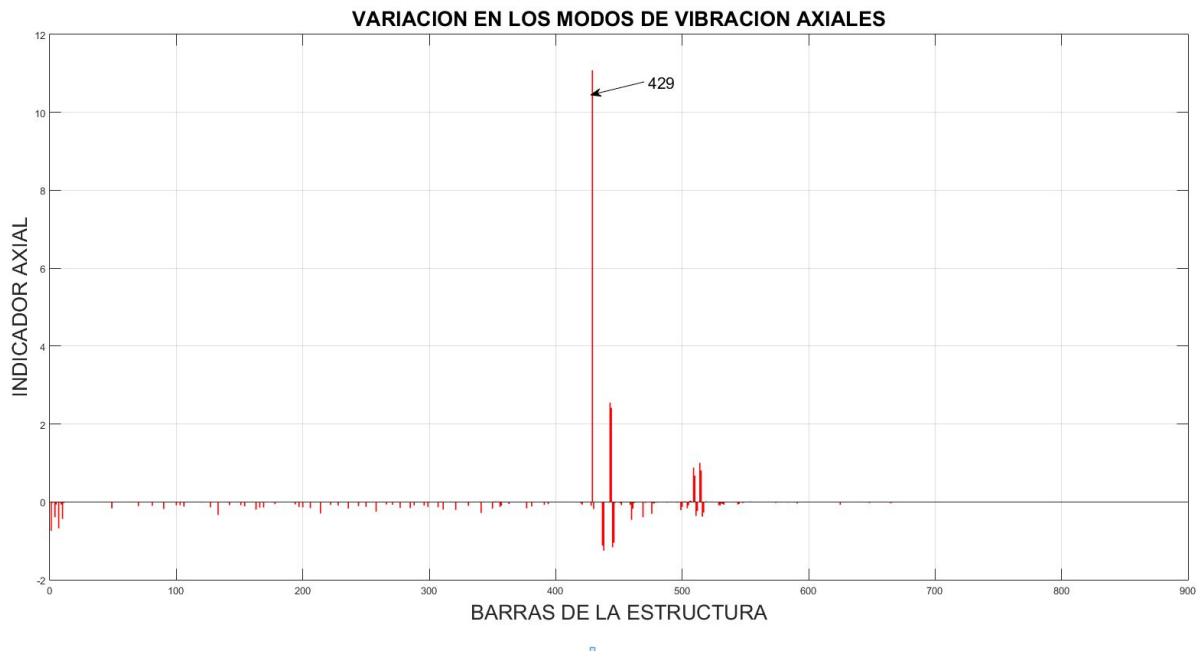


Figura 40. Indicadores energía de tensión modal axial caso B.

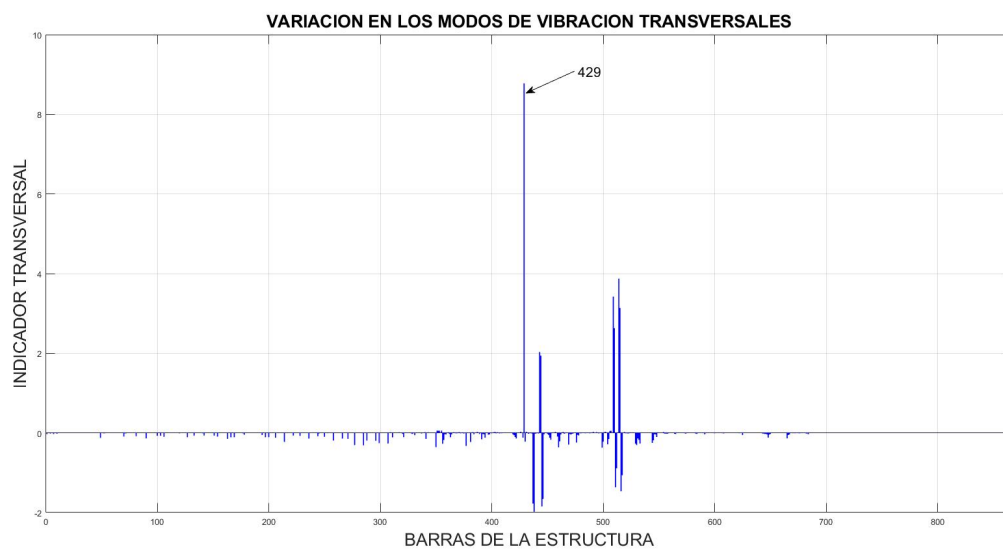


Figura 41. Indicadores energía de tensión modal transversal caso B.

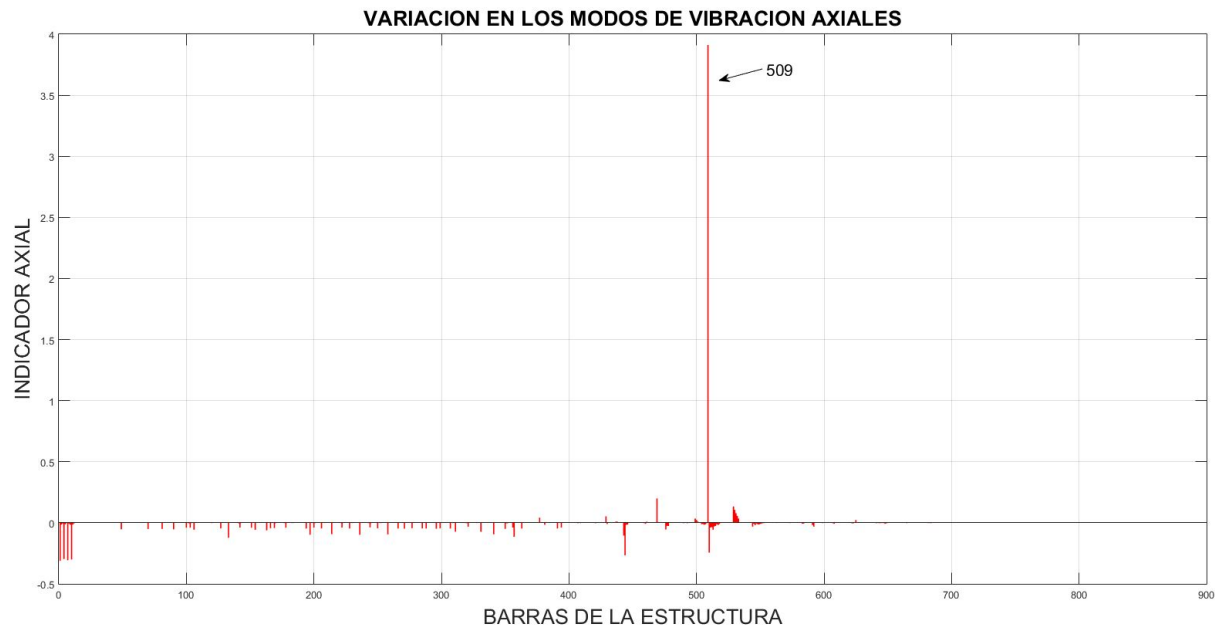


Figura 42. Indicadores energía de tensión modal axial caso C.

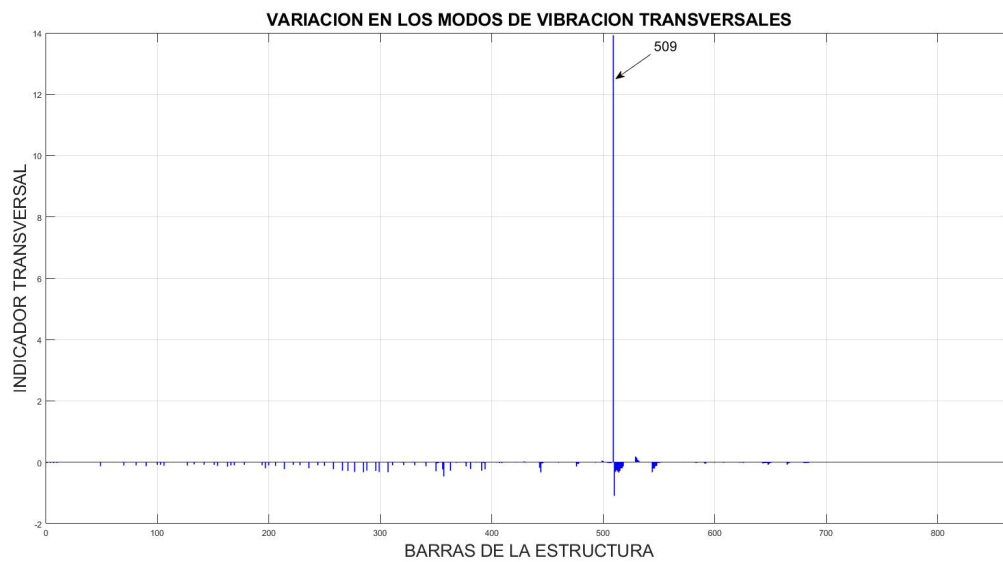


Figura 43. Indicadores energía de tensión modal transversal caso C

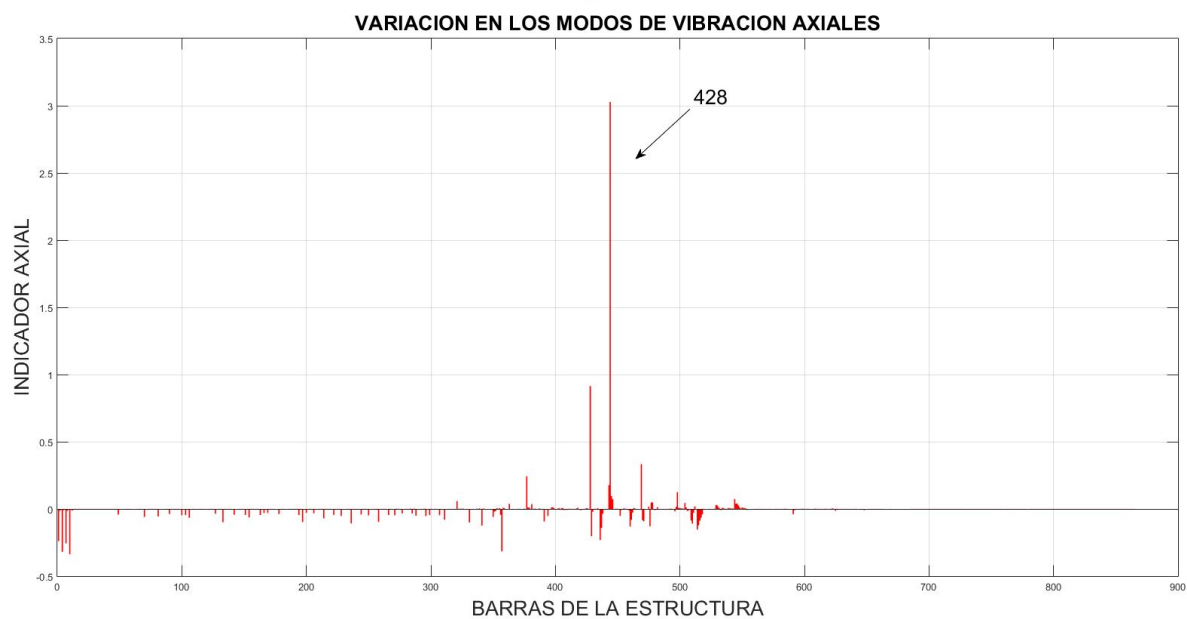


Figura 44. Indicadores energía de tensión modal axial caso D.

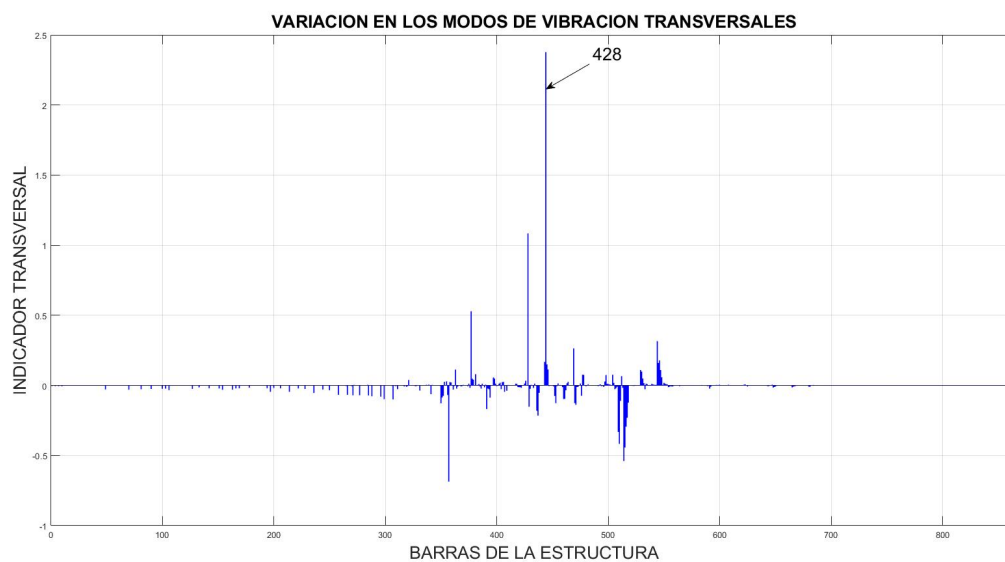


Figura 45. Indicadores energía de tensión modal transversal caso D.

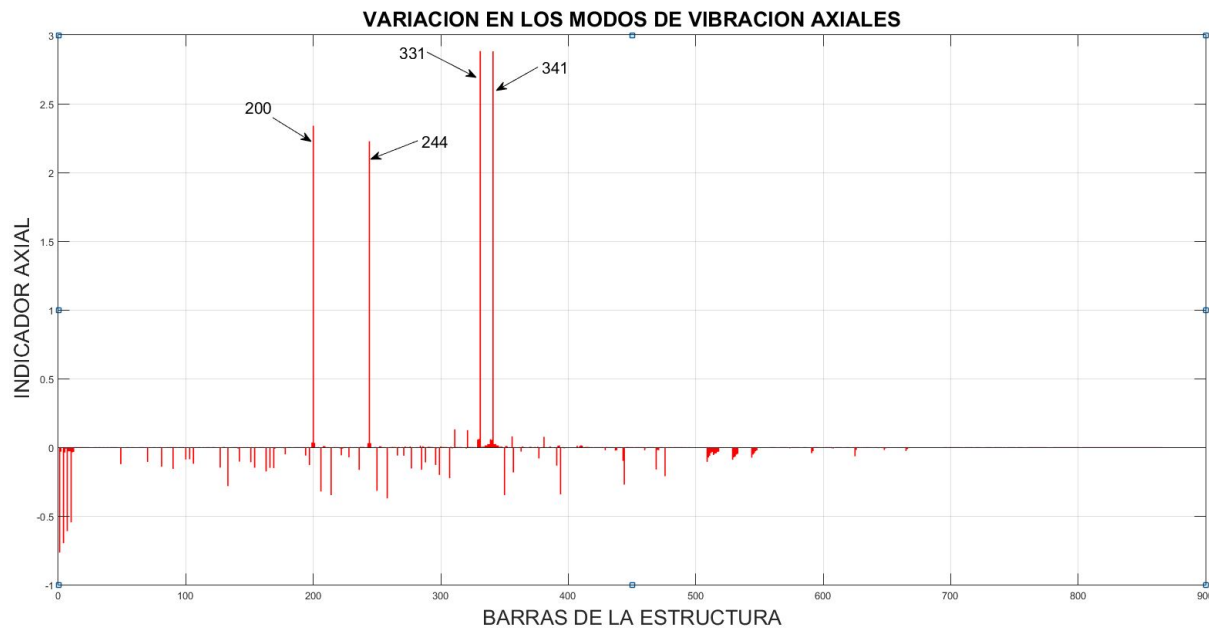


Figura 46. Indicadores energía de tensión modal axial caso E.

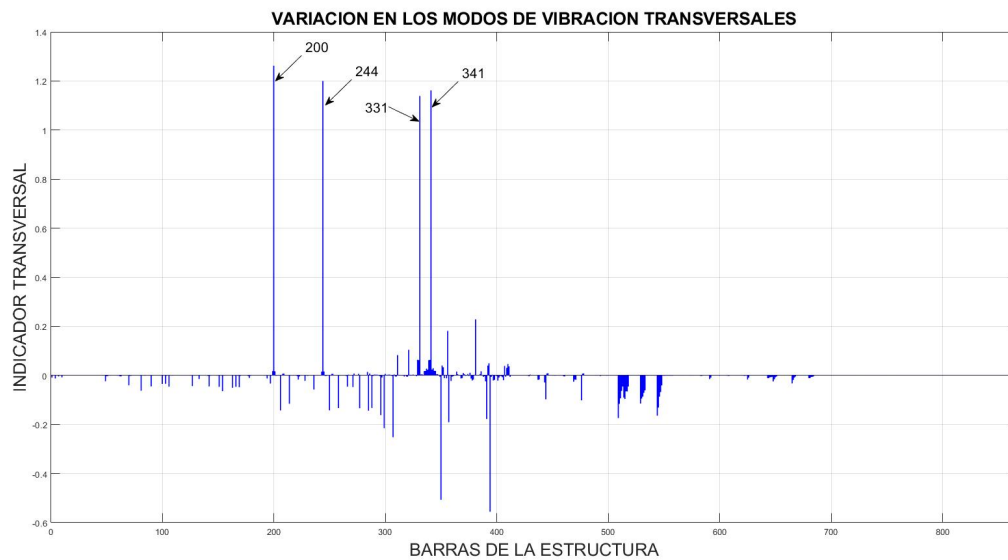


Figura 47. Indicadores energía de tensión modal transversal caso E.

6. Trabajos futuros

Se hace necesario establecer un proceso en el cual las formas modales obtenidas en el EMA, tengan una normalización conocida, de tal forma que la comparación con los modelos teóricos propuestos arrojen un óptimo valor en el número MAC.

Se recomienda para futuras investigaciones replicar las variadas técnicas de expansión modal existentes en la literatura científica, de tal forma que se disminuya el tiempo de ejecución de ensayos modales en sistemas complejos.

Teniendo en cuenta que el algoritmo implementado en esta investigación detecta y localiza los elementos con daño, se hace pertinente cuantificar el daño en dichos elementos, para este propósito se recomienda el uso de algoritmos genéticos e inteligencia artificial.

En cuanto a las diferentes técnicas de análisis modal, es recomendable aplicar el análisis modal operacional (OMA) para la adquisición de datos experimentales en trabajos futuros, y realizar la comparación pertinente con la metodología establecida.

7. Conclusiones

A partir de la metodología establecida se logró localizar y detectar el daño para diferentes orientaciones espaciales, en singulares y múltiples elementos afectados de una torre a escala, acercándose a la viabilidad de implementación del algoritmo en una torre de energía de alta tensión .

El modelo teórico aportado por el método de elementos finitos sirvió como referencia para el desarrollo de un modelo numérico en Matlab® de la torre de transmisión de energía eléctrica de alta tensión, a escala, que simuló la respuesta dinámica de la estructura, sirviendo como base para la implementación del método de descomposición modal de energía de tensión y el análisis modal experimental.

La implementación del método de descomposición modal de energía de tensión generó una alternativa para la localización y detección de daño en la geometría compleja de una torre de alta tensión, a escala; generando los indicadores axial y transversal, para cada elemento, que permiten cuantificar el cambio de su energía modal de tensión. De esta manera se relaciona el nivel de criticidad entre elementos, permitiendo un acercamiento al modelo de mantenimiento preventivo de estructuras metálicas complejas.

De acuerdo con la validación teórico-experimental desarrollada del modelo de la torre fabricado a escala, se obtuvo una concordancia con un porcentaje de error menor al 2 % en la frecuencia

natural. Por otra parte, la validación por forma de modo presentó un comportamiento adecuado, arrojando valores MAC de 0.463 y 0.669 para el primer y segundo modo respectivamente; usando la información modal, adquirida experimentalmente, del 18 % de los nodos de la estructura.

Referencias Bibliográficas

- Adams, R., Cawley, P., Pye, C., y Stone, B. J. (1965). A VIBRATION TECHNIQUE FOR NON-DESTRUCTIVELY ASSESSING THE INTEGRITY OF STRUCTURES. *Journal Mechanical Engineering Science*, 7(1):5.
- Alciatore, D. G. y Hiestand, M. B. (2017). *Introduction to Mechatronics and Measurement Systems*, volume 91.
- Allemang, R. (2003). The modal assurance criterion - twenty years of use and abuse. *Sound and vibration*, 37:14–23.
- Alzate Acevedo, C. (2016). *Diseño Conceptual de torres de transmisión de energía utilizando el método de optimización topológica considerando análisis tridimensional y cargas producidas por cables y viento*.
- American Institute of steel construction (2016). *Asociación Latinoamericana Del Acero*.
- Anaya, C. E. y Barajas, C. A. (2011). *Metodología para la detección de daños en estructuras metálicas empleando la técnica de análisis modal teórico-experimental*.
- Askeland, D. R. (1998). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales - Donald Askeland - 3edición.pdf*.
- Avitable, P. (2018). *Modal Testing A Practitioners Guide*. John Wiley & Sons Ltd.

- Balderrama, R., Cisilino, A., y Martines, M. (2007). Boundary element analysis of three-dimensional mixed-mode thermoelastic crack problems using the interaction and energy domain integrals. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, (1):294–320.
- Bathe, K.-J. (2016). *Finite Elment Procedures*.
- Bermúdez, M. y Carlos, A. (2005). *Estructuras metalicas*.
- Betancourt Schwarz, M., Mabrouk, M. T., Santo Silva, C., Haurant, P., y Lacarrière, B. (2019). Modified finite volumes method for the simulation of dynamic district heating networks. *Energy*, 182:954–964.
- Budynas, R. y Nisbett, K. (2011). *Diseño en ingeniería mecánica Shigley*, volume 8.
- Cacho-Pérez, M., Frechilla, N., y Lorenzana, A. (2017). Estimación de parámetros modales de estructuras civiles a partir de la función de respuesta en frecuencia. *Revista Internacional de Metodos Numericos para Calculo y Diseno en Ingenieria*, 33(3-4):197–203.
- Calvo Vélez, D. (2006). *MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR PRESENTADA POR* Bajo la dirección del doctor: Andrés Rivadulla Rodríguez. PhD thesis, Universidad Complutense de Madrid.
- Ceballos, M. A. (2004). *Análisis Modal Experimental Aplicado a la Calibración de Modelos de Sistemas con Interacción Suelo-Estructura*.

- Chen, J. G. y Büyüköztürk, O. (2017). A symmetry measure for damage detection with mode shapes. *Journal of Sound and Vibration*, 408:123–137.
- Chopra, A. K. (2014). *Dinámica de estructuras*.
- Council, I., Systems, L. E., Committee, S., y Lines, O. (2014). *Overhead Lines*. Springer.
- Doherty, J. (1987). Nondestructive Evaluation, Chapter 12 in Handbook on Experimental Mechanics, AS Kobayashi Edt. *Society for Experimental Mechanics, Inc.*
- Domínguez Caicedo, M. (2014). Períodos de vibración de las edificaciones. *Revista Arquitectura e Ingeniería*, 8(2):1.
- Eduardo, H. G. J. (2000). *Introducción a la Dinámica de Estructuras*. Universidad Nacional de Colombia.
- Ewins, D. J. (1995). *Modal Testing Theory and Practice*.
- Fan, W. y Qiao, P. (2011). Vibration-based damage identification methods: A review and comparative study. *Structural Health Monitoring*, 10(1):83–111.
- Fu, X., Li, H.-n., y Li, G. (2016). Fragility analysis and estimation of collapse status for transmission tower subjected to wind and rain loads. *Structural Safety*, 58:1–10.
- Fu, Z.-F. y He, J. (2001). Overview of modal analysis. In *Modal Analysis*, pages 1–11.
- Garcés, F., Genatios, C., García, P., Lafuente, M., y Mebarki, A. (2008). Identificación del daño en un modelo aporticado usando datos modales. 24:137–145.

- García Fluxá, S. A. (2013). *Modelo Simplificado De Pocos Grados De Libertad Para Simular El Impacto Sobre Una Viga De Hormigón Armado*. Universidad Politécnica de Madrid Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- Gómez, F. y Herrera, G. (2011). *ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE UNA ANÁLISIS MODAL EXPERIEMENTAL (EMA) Y UN ANÁLISIS MODAL EN OPERACIÓN (OMA) REALIZADO SOBRE UN ROTORKIT*.
- Guyan, R. J. (1965). Reduction of stiffness and mass matrices. *AIAA Journal*, 3:380.
- Hammond, J. K. (2012). Fundamentals of Signal Processing. In *Modal Analysis and Testing*.
- Harding, C. y Hugo, G. (2011). Review of Literature on Probability of Detection for Liquid Penetrant Nondestructive Testing. *DSTO Defence Science and Technology Organisation*.
- Harris, C. M. y Piersol, A. G. (2002). *Shock and Vibration Handbook*, volume 5.
- Harvey, E., Avitabile, P., y Niezrecki, C. (2012). *Topics in Experimental Dynamics Substructuring and Wind Turbine Dynamics, Volume 2*, volume 2.
- He, M Y; Hutchinson, J. (1989). An overview of modal-based damage identification methods.
- Hernández , A. y Morales , F. (2005). *Diseño de Torres de Transmisión Eléctrica*. Instituto Politécnico Nacional Mexicano.
- Isa InterColombia (2019). Transmisión de energía eléctrica.

- Khatir, S., Abdel Wahab, M., Boutchicha, D., y Khatir, T. (2019). Structural health monitoring using modal strain energy damage indicator coupled with teaching-learning-based optimization algorithm and isogoemetric analysis. *Journal of Sound and Vibration*, 448:230–246.
- Kylili, A., Fokaides, P. A., Christou, P., y Kalogirou, S. A. (2014). Infrared thermography (IRT) applications for building diagnostics: A review.
- Lathi, B. P. (2003). *INTRODUCCIÓN A LA TEORÍA Y SISTEMAS DE COMUNICACIÓN*. Limusa Noriega Editores.
- Leandro, F., Fadel, M., Ruy, C., Menezesa, D., y Fadel, L. (2006). Mode shape expansion from data-based system identification procedures. *Mecánica Computacional*, 25:1593–1602.
- Lee, J. H. y Lee, B. S. (2012). Modal analysis of carbon nanotubes and nanocones using FEM. *Computational Materials Science*, 51(1):30–42.
- Léon Torres, J. A. y Quinde Martínez, P. D. (2010). *Estudio Comparativo de Diferentes Procedimientos de Aglutinamiento de Matrices de Masas Para Pórticos Bidimensionales*. Universidad de Cuenca.
- Li, H., Yang, H., y Hu, S.-L. J. (2006). Modal Strain Energy Decomposition Method for Damage Localization in 3D Frame Structures. *Journal of Engineering Mechanics*, 132(September):941–951.
- Lindgren, E., Aldrin, J. C., Jata, K., Scholes, B., y Knopp, J. (2007). Ultrasonic plate waves for

fatigue crack detection in multi-layered metallic structures. In *Health Monitoring of Structural and Biological Systems 2007*.

Liu, G., Zhai, Y., Leng, D., Tian, X., y Mu, W. (2017). Research on structural damage detection of offshore platforms based on grouping modal strain energy. *Ocean Engineering*, 140(November 2016):43–49.

Martínez-Conesa, E. J., Estrems, M., y Miguel, V. (2010). Desarrollo de un modelo matemático de diferencias finitas para el análisis del campo de temperaturas en la soldadura por arco de chapas finas de acero inoxidable. *Revista de Metalurgia*, 46(6):511–519.

Mendoza Brochero, C. D. y Silva Pereira, O. I. (2018). *ESTABLECER CRITERIOS DE FIABILIDAD DE LA APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DE ANÁLISIS MODAL EXPERIMENTAL EN PIEZAS DE GEOMETRÍAS DEFINIDAS CARLOS*.

Ministerio de Industria Energía y Turismo (2013). Guía técnica de aplicación en líneas aéreas con conductores desnudos ITC-LAT 07. 1, pages 1–91.

Moreno, C. y Thomson, P. (2010). Incertidumbre paramétrica en modelos dinámicos de estructuras civiles. *Ingeniería y Competitividad*, 12(1):111–125.

Nguyen, K.-d., Chan, T. H. T., y Thambiratnam, D. P. (2017). Structural damage identification based on change in geometric modal strain energy – eigenvalue ratio. *Smart Materials and Structures*, 25(7):1–14.

Ogata, K. (1987). *Dinámica de Sistemas*.

Oñate, E. y Eugenio (2000). Límites de los Métodos Numéricos.

Osorio , E. A. y Tarazona, J. R. (2016). *METODOLOGÍA DE DETECCIÓN DE FALLOS PARA UNA ESTRUCTURA PETROLIFERA TIPO FIXED OFFSHORE USANDO EL METODO DE DESCOMPOSICIÓN MODAL DE ENERGIA DE TENSION CON VIBRACIONES MECÁNICAS*.

Pallàs-Areny, R. (1993). Adquisición y Distribución de Señales.

Pandey, A. y Biswas, M. (1994). Damage detection in structures using changes in flexibility.

Paramatec (2019). Lineas de transmisión.

Penkova Vassileva, M. (2008). ANÁLISIS DE SEÑALES VIBRATORIAS. *Ciencia y Sociedad*, XXXIII(0378-7680):46.

Portabella Castany, M. (2014). Un Procedimiento Para Cálculo de Estructuras por el Método de Elementos Finitos con Error Prefijado Utilizando Refinamiento de Malla Adaptativo. pages 1–98.

Quiroz, J. (2013). *DISEÑO Y CONTRUCCIÓN DE UN GENERADOR DE VIBRACIONES ALEATORIAS PARA LAS PRUEBAS DEL NANOSATÉLITE CHASQUI I*.

Rainieri, C. y Fabbrocino, G. (2014). *Operational Modal Analysis of Civil Engineering Structures*.

Rao, S. S. (2012). *Vibraciones Mecánicas*.

Rodríguez Súnico, M. (2005). Análisis Modal Operacional. Teoría y práctica. pages 51–62.

- Rytter, A. (1993). Vibrational Based Inspection of Civil Engineering Structures. *Department of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University*, R9314(44).
- Sabnis, G. M., Harris, H. G., White, R. N., Mirza, M. S., y Klingner, R. E. (1983). Structural Modeling and Experimental Techniques.
- Sabnis, G. M., Harris, H. G., White, R. N., Mirza, M. S., y Klingner, R. E. (1999). Structural Modeling and Experimental Techniques. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*.
- San Isidro, M. J. (1998). Proceso de Validación de Modelos de Simulación. *Informes técnicos Ciemat*, page 80.
- Sanchez, H. G., Nova, F. R., y Gonzalez-Estrada, O. A. (2019). Implementation of the Operational Modal Analysis technique in a power transmission shaft. *Journal of Physics: Conference Series*, 1247(June):012032.
- Schwarz, B. y Richardson, M. (1999). Experimental modal analysis. *Vibrant Technology*, (10):1–11.
- Sha, G., Radzieński, M., Cao, M., y Ostachowicz, W. (2019). A novel method for single and multiple damage detection in beams using relative natural frequency changes. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 132:335–352.
- Shackelford, J. F. (2007). Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros. *Pearson Prentice Hall*, 6:1–838.

- Shi, Z., Law, S., y Zhang, L. (1998). Structural Damage Localization From Modal Strain Energy Change. *Journal of Sound and Vibration*, 218(5):825–844.
- Shukla, A. y Harsha, S. P. (2015). An Experimental and FEM Modal Analysis of Cracked and Normal Steam Turbine Blade. *Materials Today: Proceedings*, 2(4-5):2056–2063.
- Stubbs, N., Kim, J.-t., y Farrar, C. R. (1995). Fields verification of a nondestructive damage localization and severity estimation algorithm. 182.
- Tornabene, F., Fantuzzi, N., Ubertini, F., y Viola, E. (2015). Strong Formulation Finite Element Method Based on Differential Quadrature: A Survey. *Applied Mechanics Reviews*, 67(2):020801.
- Uribe Escamilla, J. (2002). *Análisis de estructuras*. Number July 2002. Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Valizadeh, N., Natarajan, S., Gonzalez-Estrada, O. A., Rabczuk, T., Bui, T. Q., y Bordas, S. P. A. (2019). NURBS-based finite element analysis of functionally graded plates: Static bending, vibration, buckling and flutter. *Composite Structures*, 99:309–326.
- Van Der Auweraer, H. (2001). Structural dynamics modeling using modal analysis: Applications, trends and challenges. *Conference Record - IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 3:1502–1509.
- Villanueva, E. (2014). *Análisis estructural de una torre de alta tensión*. PhD thesis, Univeridad Carlos III de Madrid.

White, P. G. (2010). *Introducción al Análisis de Vibraciones*.

Yang, Y., Mace, B. R., y Kingan, M. J. (2019). Vibroacoustic analysis of periodic structures using a wave and finite element method. *Journal of Sound and Vibration*, 457:333–353.

Yashan, A., Izfp, F., Bisle, W., Meier, T., y Deutschland, A. (2006). Inspection of Hidden Defects in Metal-Metal Joints of Aircraft Structures Using Eddy Current Technique with GMR Sensor Array. pages 1–8.

Zhang, K. y Yan, X. (2017). Multi-cracks identification method for cantilever beam structure with variable cross-sections based on measured natural frequency changes. *Journal of Sound and Vibration*, 387:53–65.

Zhang, Z., Li, H., Li, G., Wang, W., y Tian, L. (2013). The Numerical Analysis of Transmission Tower. *Mathe*, 2013:12.