



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE INGENIERÍA

CAMPUS SAN JUAN DEL RÍO

TESIS

**“ESTUDIO EXPERIMENTAL PARA DETECTAR FALLAS EN
ESTRUCTURAS DEL TIPO TRUSS POR MEDIO DE ANÁLISIS
VIBRACIONAL”**

Que para obtener el título de:
Ingeniero Electromecánico

Presenta:

Amando Aurelio Gallardo Amaya

Asesor:

M. en I. Juan Pablo Amézquita Sánchez

San Juan del Río, Querétaro, octubre de 2012

Agradecimientos institucionales

A la Universidad Autónoma de Querétaro por permitirme realizar mis estudios de Licenciatura en la Facultad de Ingeniería Electromecánica. Por brindarme una formación académica y profesional de la cual siempre estaré orgulloso y agradecido, así como la oportunidad de participar en el 8° Congreso Internacional de Ingeniería, con sede en el estado de Querétaro. Por abrirme las puertas y hacerme sentir parte de esta gran institución de la que es y será mi alma mater.



Al Fondo de Investigación de la Facultad de Ingeniería (FIFI) por la beca otorgada y el apoyo para la realización del artículo presentado en el 8° Congreso Internacional de Ingeniería, con sede en el estado de Querétaro.





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE INGENIERÍA
SECRETARÍA ACADÉMICA

ACUERDO 515/12

C. U. 23 de Agosto de 2012

C. AMANDO AURELIO GALLARDO AMAYA
Alumno de Ingeniería en Electromecánica
(IED08)
Presente

Con relación a su oficio enviado al H. Consejo Académico de la Facultad en el que solicita titularse bajo la opción de tesis individual, me permito informarle que en la sesión ordinaria del 23 de Agosto del año en curso, este cuerpo colegiado acordó aceptar el protocolo de la opción de titulación por lo que deberá trabajar en el tema **"ESTUDIO EXPERIMENTAL PARA DETECTAR FALLAS EN ESTRUCTURAS DEL TIPO TRUSS POR MEDIO DE ANÁLISIS VIBRACIONAL"** bajo la dirección del MI. Juan Pablo Amézquita Sánchez.

El contenido aprobado por el H. Consejo Académico es el siguiente:

Capítulo 1 INTRODUCCIÓN

- 1.1. Antecedentes
- 1.2. Objetivos
 - 1.2.1 Objetivo general
 - 1.2.2 Objetivos particulares
- 1.3. Justificación
- 1.4. Planteamiento General

Capítulo 2 REVISIÓN DE LITERATURA

- 2.1. Estado del arte
- 2.2. Monitoreo de Salud Estructural
- 2.3. Métodos de detección de fallas en estructuras
 - 2.3.1. Métodos visuales de inspección
 - 2.3.2. Método radiográfico con rayos X
 - 2.3.3. Métodos con galgas extensiométricas
 - 2.3.4. Métodos con fibras ópticas
 - 2.3.5. Métodos ultrasónicos
 - 2.3.6. Método de corrientes de Eddy
 - 2.3.7. Métodos basados en vibración
 - 2.3.8. Método de emisión acústica
- 2.4. Procesamiento de datos
 - 2.4.1. Análisis espectral
 - 2.4.2. Frecuencia Natural
 - 2.4.3. Frecuencia de Resonancia
 - 2.4.4. Factor de amortiguamiento
 - 2.4.5. Transformada Rápida de Fourier (FFT)





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE INGENIERÍA

SECRETARÍA ACADÉMICA

2.5. Importancia del análisis de vibraciones

Capítulo 3 METODOLOGÍA

- 3.1. Estructura tridimensional Truss
 - 3.1.1. Descripción de los componentes de la estructura
 - 3.1.2. Aplicación de estructuras Truss
- 3.2. Sistema de instrumentación
 - 3.2.1. Sensor
 - 3.2.2. Convertidor ADC
 - 3.2.3. Receptor/Transmisor (Transceiver)
 - 3.2.4. Sistema de adquisición.
 - 3.2.5. Ubicación de los sensores
- 3.3. Metodología de análisis de la falla.

Capítulo 4 PRUEBAS Y RESULTADOS

- 4.1. Puesta de Experimento
- 4.2. Casos de estudio
- 4.3. Resultados
 - 4.3.1. Caso de estudio 1: Falla en la unión
 - 4.3.2. Caso de estudio 2: Reducción de rigidez
 - 4.3.3. Caso de estudio 3: Falta de elementos
 - 4.3.4. Discusión de resultados

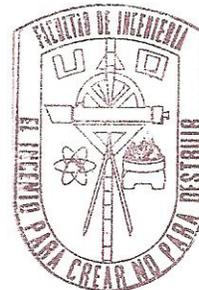
CONCLUSIONES

REFERENCIAS

También hago de su conocimiento las disposiciones de nuestra Facultad, en el sentido que antes del examen profesional deberá cumplir con los requisitos de nuestra legislación y deberá imprimir el presente oficio en todos los ejemplares de su tesis.

Atentamente
"EL INGENIO PARA CREAR NO PARA DESTRUIR"

DR. AURELIO DOMÍNGUEZ GONZÁLEZ
Director



SECRETARÍA ACADÉMICA



c.c.p. Archivo
*ADG/CSG

Agradecimientos

A Dios por darme la vida y la oportunidad de realizar mis estudios de licenciatura y de conocer a todas aquellas personas que han formado parte de mí.

A mis padres y hermanas que siempre me apoyaron sin importar los sacrificios que esto implicara, por que sin ellos nada hubiera sido posible, por todo esto y más los amo.

A todos los amigos que encontré en esta etapa de mi vida; a aquellos que tomaron diferentes caminos pero que me llevo en el corazón y a los que siguieron hasta el final, acompañándome en las buenas y malas, en especial a Ely, Isaías, Susy, Lázaro y Braulio por regalarme todos esos momentos invaluable que nunca se repetirán pero que guardaré siempre con cariño.

A mi novia Patricia por estar siempre a mi lado, alentándome y apoyándome aun en los momentos más difíciles.

A los docentes de la Universidad Autónoma de Querétaro por compartir sus conocimientos conmigo, así como sus valiosos y atinados comentarios, en particular al M. en I. Juan Pablo Amézquita Sánchez, por su amistad, apoyo desinteresado y la ayuda brindada en todo momento.

Dedicatorias

A mis padres y hermanas, por que son lo más importante de mi vida.

A mi novia Patricia por que nunca dejó que bajara los brazos.

Índice general

Agradecimientos institucionales.....	i
Agradecimientos.....	iii
Dedicatorias	iv
Índice general	v
Índice de figuras	viii
Índice de tablas.....	ix
Capítulo 1 Introducción.....	1
1.1. Antecedentes	4
1.2. Objetivos	5
1.2.1 Objetivo general.....	5
1.2.2 Objetivos particulares.	6
1.3. Justificación	6
1.4. Planteamiento General.....	8
Capítulo 2 Revisión de Literatura	10
2.1. Estado del arte.....	11
2.2. Monitoreo de Salud Estructural	12
2.3. Métodos de detección de fallas en estructuras.....	12
2.3.1. Métodos visuales de inspección.....	13
2.3.2. Método radiográfico con rayos X	13
2.3.3. Métodos con galgas extensiométricas.....	13
2.3.4. Métodos con fibras ópticas	13
2.3.5. Métodos ultrasónicos	14

2.3.6.	Método de corrientes de Eddy	14
2.3.7.	Métodos basados en vibración	14
2.3.8.	Método de emisión acústica.....	15
2.4.	Procesamiento de datos.....	15
2.4.1.	Análisis espectral	15
2.4.2.	Frecuencia Natural	16
2.4.3.	Frecuencia de Resonancia.....	17
2.4.4.	Factor de amortiguamiento	17
2.4.5.	Transformada Rápida de Fourier (FFT).....	18
2.5.	Importancia del análisis de vibraciones	18
Capítulo 3 Metodología.....		20
3.1.	Estructura tridimensional Truss	22
3.1.1.	Descripción de los componentes de la estructura.....	22
3.1.2.	Aplicación de estructuras Truss.....	24
3.2.	Sistema de instrumentación	26
3.2.1.	Sensor	27
3.2.2.	Convertidor ADC	28
3.2.3.	Receptor/Transmisor (Transceiver).....	29
3.2.4.	Sistema de adquisición.	29
3.2.5.	Ubicación de los sensores.....	30
3.3.	Metodología de análisis de la falla.....	31
Capítulo 4 Pruebas y Resultados		33
4.1.	Puesta de Experimento.....	34
4.2.	Casos de estudio.....	35
4.3.	Resultados	37

4.3.1. Caso de estudio 1: Falla en la unión.....	38
4.3.2. Caso de estudio 2: Reducción de rigidez.....	39
4.3.3. Caso de estudio 3: Falta de elementos.....	40
4.3.4. Discusión de resultados	42
CONCLUSIONES	46
ANEXO A	48
REFERENCIAS	57



Capítulo 1

INTRODUCCIÓN



1. INTRODUCCIÓN

Diversas construcciones en el mundo; desde las primeras edificaciones, hasta modernos edificios de alta ingeniería, guardan una relación íntima entre su diseño y dinámica. Naturalmente, no sólo las edificaciones han ido evolucionando, los avances en tecnología estructural y de materiales han permitido la construcción de estructuras civiles a gran y pequeña escala, lo cual se traduce en el desarrollo de la sociedad.

Las estructuras civiles juegan un papel importante en diferentes áreas de la ingeniería, donde éstas tienen como función principal soportar elementos y adaptarse a cambios repentinos de excitación, los cuales llegan a producir daños en la estructura o bien, el colapso de la misma.

Una armadura tipo Truss es una estructura que se compone de elementos rectos conectados entre si mediante nodos. Estas armaduras están compuestas por triángulos, debido a la estabilidad estructural y el diseño de esta forma, pues es sabido que un triángulo es la forma geométrica más simple y resistente que no cambiará de forma cuando las longitudes de sus lados sean fijas.

El uso de estructuras del tipo Truss ha ido en incremento, así como métodos de análisis, con el fin de monitorear el comportamiento de las mismas. Comparadas con otras estructuras, las del tipo Truss, tienen la ventaja de requerir menos material para su construcción lo cual refleja un ahorro importante de recursos. Además son capaces de abarcar largas distancias sin presentar una deflexión considerable, su instalación es rápida y proveen espacio accesible para su mantenimiento.

Este tipo de estructura es muy empleada, debido a su fácil ensamblaje y gran versatilidad, pues es una solución viable a situaciones de construcción que requieran un balance entre resistencia, costo, estética, peso y otras cualidades que hacen atractiva a este tipo de armaduras. Zonas como aeropuertos, centros comerciales, complejos deportivos, teatros, torres de comunicación, etc. son algunos ejemplos actuales del uso de esta armadura.



Como se mencionó al principio, el monitoreo estructural proporciona datos objetivos útiles, según sean las necesidades. Por ejemplo, y a fin de entrar en materia, el monitoreo estructural basado en vibraciones es una herramienta sumamente útil en cuestión de armaduras espaciales, puesto que empleando herramientas de análisis tales como la transformada de Fourier se pueden obtener los modos paramétricos de una estructura tales como: frecuencias naturales, factor de amortiguamiento, etc., y en base a dichos datos determinar si la estructura presenta un daño o no.

El monitoreo estructural permite realizar un mantenimiento preventivo (evitar fallas antes de que éstas ocurran) y predictivo (pronosticar cuándo ocurrirá la falla) en estructuras, con la finalidad de impedir el colapso de la estructura. Con ayuda de esto, ha sido posible diagnosticar fallas debido a corrosión, acumulación de fisuras, degradación de las columnas, fallas en las uniones y el impacto de objetos extraños, etc., siendo éstas las más comunes y un peligro latente que puede detonarse ante la presencia de un siniestro. Ejemplo de ello: un sismo.

En el presente trabajo se realiza un monitoreo basado en vibraciones a una estructura del tipo Truss reconfigurable de aluminio, pues esta característica nos permitirá sustituir elementos, con la finalidad de introducir elementos con daños y observar su comportamiento empleando la Transformada Rápida de Fourier (FFT) para el análisis de las señales obtenidas. Tres específicas condiciones de daño son analizadas: fallas en las uniones, reducción en la rigidez del elemento y pérdida de elementos.



1.1. Antecedentes

Hoy día, el tema de monitoreo y análisis estructural no sólo es de suma importancia para el gobierno y empresas civiles, si no también, para institutos, universidades y centros de investigación interesados en el comportamiento de las estructuras ante una falla. A continuación se presentan los trabajos relacionados con el presente trabajo.

Como ejemplo de los estudios realizados localmente con respecto al análisis de vibraciones en sistemas mecánicos podemos encontrar que en la Universidad Autónoma de Querétaro, Rangel (2008) realizó un análisis de vibraciones en tiempo real para maquinaria CNC. Posteriormente, Doñate (2009) realizó un procesamiento digital de señales en FPGA para analizarlas vibraciones en robots.

Una nueva línea de investigación en la Universidad Autónoma de Querétaro es el análisis de vibraciones en estructuras. Hernández y López (2007) realizaron el diseño y construcción de un auto mini baja, el diseño fue analizado mediante el método de los elementos finitos con el desarrollo de un programa en MATLAB, con la finalidad de observar en donde se presentaban los mayores esfuerzos. Por otro lado, Paz (2009), diseñó y creó la estructura tridimensional Truss de aluminio, compuesta de tres cubos inicialmente. Analizó el comportamiento vibratorio de la estructura, para ello empleó el método de elemento finito y la teoría del amortiguamiento proporcional. En contraste, Chávez (2010), realizó estudios de daños en estructura Truss tridimensional cuando era sometida a cargas dinámicas, esta vez, ampliándola a cinco cubos. Instrumentó con sensores de aceleración y analizó el comportamiento de toda la estructura sometida a excitación en condiciones óptimas, y luego reemplazando elementos de la misma por otros dañados, simulando fallas por corrosión y fatiga.

A nivel nacional, otras universidades como la Universidad de Guanajuato, mediante el grupo de investigación de HSP-Digital se han realizado trabajos de monitoreo de vibraciones en sistemas mecánicos. Amézquita (2009) realizó el monitoreo de un motor de inducción, con la finalidad de calcular sus frecuencias naturales. Para ello las señales



monitoreadas fueron analizadas empleando la combinación de dos técnicas: la transformada Wavelet y FFT.

Como parte de trabajos publicados internacionalmente referentes al análisis de fallas en estructuras del tipo Truss, Chen et al. (2005) realizó una investigación de cómo la corrosión atmosférica afecta las frecuencias naturales de una estructura Truss. Jian et al. (2005) presentaron un estudio basado en la transformada wavelet y redes neuronales para detectar fisuras en un esqueleto de un edificio (estructura basada en tipo *Truss*). Gao et al. (2006) presentaron un análisis numérico basado en “*damage locating vector*” para detectar la reducción de rigidez en un elemento de una estructura Truss 2D, la cual es diseñada con 53 barras. Mehrjoo et al. (2008) propusieron un método basado en redes neuronales para poder detectar fallas en las uniones de un puente del tipo Truss. Taha (2010) realizó un estudio de cómo la falta de elementos puede afectar la dinámica de un esqueleto de un edificio. Para ello la transformada wavelet y redes neuronales fueron empleadas.

Como se puede observar, el monitoreo estructural es un tema actual y de suma importancia, por lo tanto, un estudio que permita poder predecir cuando la estructura presenta una falla y de qué tipo es indispensable.

1.2. Objetivos

1.2.1 Objetivo general

- Realizar el análisis de una estructura tridimensional del tipo Truss, mediante la adquisición y procesamiento de las señales de vibración utilizando técnicas de procesamiento de señales, que permitan conocer si la estructura está en buen estado o presenta alteraciones en los parámetros modales debido a una falla.



1.2.2 Objetivos particulares.

- Desarrollar las condiciones experimentales, creando elementos con características propias de daño, que permitan analizar el comportamiento de la estructura bajo diferentes condiciones de falla.
- Realizar pruebas y la adquisición de datos de las señales de vibración de la estructura tridimensional Truss, por medio del sistema de adquisición y los distintos elementos generados para los diferentes casos de estudio.
- Obtener los parámetros modales de la estructura a partir del análisis realizado por medio de la transformada FFT, que permitan conocer las condiciones de la estructura.

1.3. Justificación

En Enero de 1986, después de observar la devastación que sufrió la Ciudad de México en Septiembre de 1985, el Centro de Instrumentación y Registro Sísmico (CIRES A. C.), con el apoyo del Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología (CONACyT), inició el diseño y la construcción de la **RACM** y durante 1987 la Fundación de Ingenieros Civiles Asociados (FICA) complementó este esfuerzo. (Centro de Instrumentación y Registro Sísmico A.C. Red Acelerográfica de la Ciudad de México)

Actualmente, se sabe que en México existen pocos edificios instrumentados para su monitoreo. Esto se debe, principalmente, a que todo el proceso de instrumentación es costoso en demasía, pues engloba trabajo de instalación de sensores, mantenimiento, procesamiento de señales, adquisición y análisis de los datos obtenidos. A pesar de ello y debido a que las estructuras civiles sufren frecuentemente daños durante su vida útil principalmente por movimientos excesivos, corrosión, degradación de columnas, uniones y vigas, alta temperatura, acumulación de *cracks* (fisuras) y el impacto de objetos extraños, se manifiesta la necesidad de disponer de datos que brinden información sobre el comportamiento y estado de las mismas. Ante esta situación es de gran importancia realizar estudios de monitoreo estructural que permitan conocer el estado de la estructura para



evaluar su condición, con la finalidad de detectar daños en su estado inicial, de forma que se apliquen medidas correspondientes para prevenir la falla o el colapso de la estructura, evitando pérdidas humanas y económicas.

De aquí surge la necesidad de estudiar el comportamiento de estructuras y es donde radica la esencia de este trabajo. El hecho de conocer los parámetros modales que influyen en el diseño estructural de edificios es crucial: frecuencias naturales, frecuencias de resonancia y factor de amortiguamiento, constituyen la columna vertebral de esta tesis.

Así mismo se requiere la corroboración de modelos matemáticos que no es más que el proceso de contrastar las predicciones propuestas por el modelo con los datos experimentales. Es evidente que si existen grandes diferencias entre estos valores obtenidos experimentalmente se debe de ajustar el modelo propuesto.

Además, no sólo la estructura se ve afectada por las vibraciones, también las personas que están dentro del edificio resultan verse perturbadas, pues generan un efecto fisiológico perjudicial en ellas, haciendo que el cansancio y el estrés aumenten, disminuyendo así su rendimiento productivo. Por ejemplo, en algunos conciertos con niveles de frecuencias graves muy altos se han registrado casos de colapso pulmonar en personas que estaban cerca del subwoofer, sobre todo en fumadores de talla alta y complexión delgada. (*Music Fans, Beware the Big Bass*). En 2005 el programa *MythBusters* intentó reproducir este mito. Después de probar una amplia gama de infrasonidos, el protagonista no presentó ningún síntoma. No obstante, algunos miembros del equipo sufrieron cierto malestar, especialmente presión en el pecho.

La finalidad de este trabajo, además de complementar los trabajos realizados anteriormente, es hacer ver que el hecho de que ocurra una catástrofe (como la descrita al inicio de este apartado), aunque es inevitable, los daños se pueden minimizar si se identifican las fallas oportunamente, evitando así grandes pérdidas monetarias y sobre todo humanas.

Trabajar con este tópico es ya de por sí algo innovador y se convierte en una necesidad, que a perspectiva tanto del autor de este trabajo como de todos los involucrados en el mismo, en base a la investigación puede subsanarse. A nivel tecnológico, se cuenta



con sensores y software desarrollado por la misma Universidad para adquisición de datos en el proyecto, esto implica tener ventaja, pues no es necesario invertir en equipo provisto por alguna compañía. Así pues, en el presente trabajo, se desarrollará el monitoreo de una estructura del tipo Truss, lo cual permitirá conocer el estado de la misma bajo diferentes condiciones de falla.

1.4. Planteamiento General

En el siguiente diagrama a bloques, se describe de manera general la metodología empleada para el análisis vibracional de la estructura del tipo Truss.

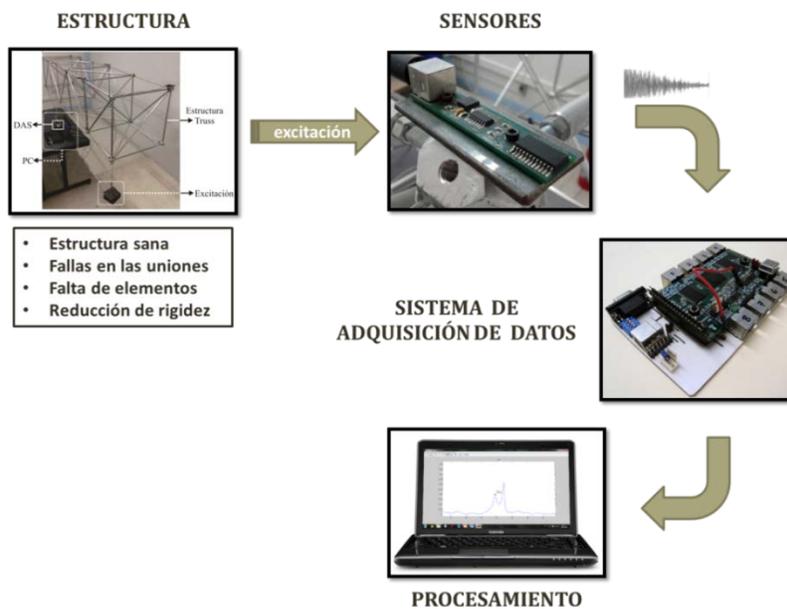


Figura 1.1. Diagrama de la metodología.

En este trabajo se presenta la estimación de los parámetros modales tales como frecuencias naturales y factores de amortiguamiento en estructuras tridimensionales del tipo Truss reconfigurable, por medio del análisis de sus vibraciones, con el objetivo de determinar si la estructura presenta o no un daño. El sistema mostrado en la **Figura 1.1** cuenta con sensores acelerómetros del tipo MEMS, los cuales tienen un sistema de instrumentación de 12 bits, el cual se encarga de adquirirla señal de vibración, acondicionarla y digitalizarla, para su posterior envío al sistema de adquisición de datos



(SAD). Los datos adquiridos por el SAD serán almacenados en la memoria RAM del FPGA para su posterior envío a la PC mediante el protocolo estándar USB. Finalmente la PC es la encargada por medio del software MATLAB, de estimar las frecuencias naturales y los factores de amortiguamiento de la estructura. Para ello es empleado un análisis de Fourier (FFT), para obtener una identificación clara y precisa de las frecuencias naturales y su correspondiente factor de amortiguamiento de la estructura. Y así poder estimar su estado.



Capítulo 2

REVISIÓN DE LITERATURA



2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Estado del arte

El análisis de vibraciones para la detección de fallas ha existido desde hace mucho tiempo, aun cuando ni si quiera se conocía dicho concepto, pues numerosos métodos han sido utilizados para evaluar el estado de las estructuras y determinar si son útiles para su propósito. Desde el comienzo del siglo XIX, los inspectores de ruedas de los ferrocarriles utilizaron el sonido de un martillo golpeando la rueda del tren para evaluar si el daño estaba presente. En las máquinas rotativas, el monitoreo de vibración ha sido utilizado durante décadas como una técnica de evaluación de su desempeño. En los últimos diez o quince años, las tecnologías del *Monitoreo de Salud Estructural* (MSE) han surgido creando un nuevo campo interesante y apasionante dentro de las diversas ramas de la ingeniería. Conferencias académicas y publicaciones científicas se han enfocado durante este tiempo en el MSE, haciendo que éstas tecnologías sean cada vez más comunes.

Cuando se habla de identificar fallas en estructuras hay varias dificultades inherentes, pues una razón es que los materiales empleados no siempre son homogéneos, es decir, una estructura puede estar conformada por más de un tipo de material. Otro problema (y muy común) es que el daño en los elementos se presenta por debajo de su superficie (adelgazamiento de paredes) o en las uniones y es difícil localizarlo por mera inspección visual, cuando aplicando algún método de detección ya es de por si insuficiente.

Existen diversos tipos de materiales con los que se pueden construir estructuras, incluso gracias al avance en el área de ciencia de materiales, hoy es posible contemplar el uso de nuevos y mejores materiales, tal es el caso de los nanotubos de carbono. Sin embargo, el metal sigue siendo la opción más viable pues sus propiedades son bien conocidas y es fácil de modelar, es por eso que las armaduras construidas son diseñadas a partir de teorías tolerantes al daño, mejor conocidas como *teorías de falla: teoría del esfuerzo normal, teoría de la energía de distorsión máxima o la teoría del esfuerzo cortante*, siendo esta última la más conservadora de todas, Juvinal (2005).



2.2 Monitoreo de Salud Estructural

El proceso de implementación de una estrategia de identificación de los daños para el sector aeroespacial, ingeniería civil, ingeniería mecánica, entre otras, se conoce como Monitoreo de Salud Estructural (MSE) (Farrar et al., 2006). Así mismo, el daño se define como cambios en el material y/o propiedades geométricas de estos sistemas, incluyendo cambios en las condiciones de contorno y la conectividad del sistema que afectan negativamente el rendimiento del sistema, Hall (1999).

Los datos a analizar se consiguen desde una red de sensores, los cuales, una vez procesados, permiten detectar las distintas anomalías (fallas) en la estructura. Esta información puede ser periódica o en tiempo real y continuo, y estar asociada a cambios diversos en la estructura como corrosión, fatiga, humedad, esfuerzos, desplazamientos, deformaciones, aceleraciones, agrietamiento, vibraciones, dislocaciones y otros que sean necesarios para la evaluación operacional de la estructura.

Dicha evaluación demanda contrastar la situación de la estructura dañada con un perfil saludable de la misma. Así pues, el análisis que debe hacerse a la estructura es a partir de la información capturada por sensores.

2.3 Métodos de detección de fallas en estructuras

Una amplia variedad de pruebas altamente eficaces no destructivas y herramientas de evaluación están disponibles para este seguimiento. Sin embargo, la mayoría de las investigaciones se han realizado durante los últimos 30 años durante los cuales, básicamente, se han intentado identificar los daños en las estructuras. En los últimos 10 años se ha visto un creciente interés sobre el tema y por lo tanto, un rápido aumento en la cantidad de investigaciones relacionadas con el MSE, que reflejan un potencial de importantes beneficios para la seguridad y la economía sociales, factores que han motivado el desarrollo de este tópico.

Stovak (2002) describe algunos métodos que han sido desarrollados para la detección de fallas en estructuras, los cuales se mencionan a continuación.



2.3.1. Métodos visuales de inspección

Este tipo de métodos incluyen algunas variantes de niveles de especialización que van desde una evaluación óptica a simple vista hasta el uso de un microscopio de barrido electrónico para obtener información detallada de las micro-fracturas. La evaluación óptica aunque es la más simple y barata tiene sus limitaciones en materiales compuestos donde las fallas muchas veces ocurren en capas interiores. Para estructuras a gran escala este tipo de métodos resultan ineficientes y poco efectivos.

2.3.2. Método radiográfico con rayos X

Este método basa su principio de funcionalidad en la variación de absorción de rayos X a través de una superficie. Para acentuar los daños en materiales compuestos esta técnica puede ser mejorada si se combina con la técnica de líquidos penetrantes. Sin embargo, es de un alto costo y presenta la necesidad de tener acceso a ambos lados de la superficie con el fin de emitir y coleccionar los rayos X.

2.3.3. Métodos con galgas extensométricas

Estos métodos son de los más usados para monitorear daños en materiales compuestos o vehículos en servicio. Su principio de funcionamiento se basa en el cambio de resistencia eléctrica debido a la deformación. Estos sensores son baratos, pequeños, ligeros y sus resultados pueden ser fácilmente interpretados. Su desventaja es que los resultados de un solo sensor únicamente cubren una reducida área de la estructura por lo que es requerida una gran cantidad de sensores para poder monitorear estructuras de gran tamaño como pudieran ser un puente o un vehículo, haciendo de éste un sistema muy complejo.

2.3.4. Métodos con fibras ópticas

Este método permite tener mediciones sobre amplias regiones ya que pulsos polarizados de un rayo láser son transmitidos a lo largo de una fibra óptica y reflectados por objetos ubicados a considerable distancia. Midiendo el tiempo empleado para que el rayo



laser recorra la viga, la longitud del segmento de fibra óptica puede ser fácilmente deducido. Cuando una deformación se hace presente en la viga este tiempo cambia. Sin embargo, los problemas relacionados con su instalación han limitado su uso.

2.3.5. Métodos ultrasónicos

Este método consiste de dos cabezales hidrodinámicos acoplados en tándem que al pasar por la superficie del elemento envían ondas ultrasónicas por medio del chorro de agua en un lado del espécimen, mientras que del otro lado se reciben las ondas acústicas transmitidas. El inconveniente de este método además del tamaño y del costo del equipo es la necesidad de tener acceso a ambos lados de la superficie o incluso el tener que desmontar los elementos de la estructura.

2.3.6. Método de corrientes de Eddy

El principio de funcionamiento se basa en los cambios de impedancia electromagnética debido a deformaciones en el material. El método es simple y no requiere gran equipamiento; sin embargo, no es una tecnología madura para materiales compuestos además de que requiere considerable potencia y sus resultados son de los más complicados de interpretar.

2.3.7. Métodos basados en vibración

Para estos métodos, las estructuras son excitadas por la energía del ambiente, por un *shaker* o vibrador externo o por actuadores embebidos y entonces la respuesta dinámica es almacenada y procesada. Galgas extensométricas (*strain gauges*) o acelerómetros pueden ser usados para medir las frecuencias de resonancia. Los cambios en modos de vibración normales pueden ser correlacionados con la pérdida de rigidez en una estructura. Estos métodos pueden ser fácilmente implementados dentro de la infraestructura de un vehículo a bajo costo; sin embargo, la información recolectada puede ser difícil de interpretar.



2.3.8. Método de emisión acústica

Otro método basado en vibración. En éste, los cambios en las propiedades del material pueden ser deducidos usando vigas resonantes, acelerómetros o micrófonos piezoeléctricos para grabar la energía liberada por la matriz de la fractura. Este método tiene la desventaja de requerir un arreglo de sensores para localizar el daño por medio del tiempo de retardo. Recientes avances incluyen el desarrollo de MEMS para fabricar sensores extremadamente pequeños y baratos que pudieran ser integrados en estructuras pequeñas y a gran escala.

2.4 Procesamiento de datos

El procesamiento de señales es una disciplina de las ciencias de la Ingeniería que desarrolla las técnicas de procesamiento, análisis e interpretación de señales. Entre las operaciones posibles con las señales tenemos control, filtrado, compresión de datos, etc.

Se pueden procesar señales analógicas (representadas por funciones continuas) o señales digitales (dadas por funciones discretas). En el procesamiento de señales existen diferentes ramas dependiendo de la naturaleza de las señales consideradas (audio, voz, imagen, video, vibraciones). El procesamiento de señales puede tener diferentes objetivos: detección de una señal, estimación de los valores de una señal, codificación, compresión para su almacenamiento y transmisión.

2.4.1 Análisis espectral

Las series de Fourier permiten describir una señal, función del tiempo, como superposición de señales más simples (sinusoides) de varias frecuencias múltiplos de la *frecuencia natural*. El espectro de frecuencia es una medida de la distribución de amplitudes o de las fases de cada frecuencia. El proceso que cuantifica las diversas intensidades de cada frecuencia se conoce como *análisis espectral*.



2.4.2 Frecuencia Natural

La frecuencia natural se conoce como la frecuencia a que un sistema mecánico seguirá vibrando después de quitar la fuente de excitación (Amézquita-Sánchez et al. 2009). Cualquier sistema mecánico puede ser modelado por medio de resortes, masas y amortiguadores como se muestra en la **Figura 2.1**, donde los amortiguadores absorben la energía pero los resortes y masas no lo hacen. Al aplicar una energía a un sistema masa-resorte el sistema vibrará a su frecuencia natural y el nivel de vibraciones dependerá de la fuente de energía y de la absorción inherente al sistema.

Una estructura está representada por la ecuación general de movimiento (Inman, 2006), que regula el equilibrio dinámico entre las fuerzas externas, elástica, la inercia y el amortiguamiento que actúan sobre la estructura descrita por la **Ecuación 1**.

$$M \ddot{x}(t) + C \dot{x}(t) + K(x)t = F(t) \tag{1}$$

Donde M , C y K son las matrices de masa, amortiguamiento y de rigidez, respectivamente, mientras que: \ddot{x} , \dot{x} , x y F son la *aceleración*, la *velocidad*, la *posición* y el *vector de fuerzas* físicas aplicadas en varios grados de libertad, respectivamente. Las frecuencias naturales de una estructura se calculan por medio de la raíz cuadrada de los eigenvalores, lo cual es descrito por la **Ecuación 2**.

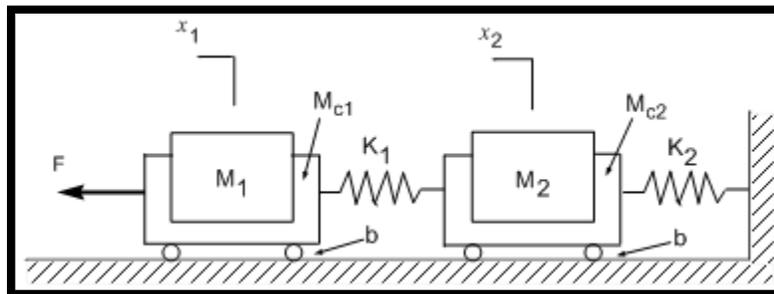


Figura 2.1. Esquema Masa-Resorte-Amortiguador.

$$\omega_n = \sqrt{[K][M]^{-1}} \tag{2}$$

Donde $[M]$ es la matriz de masa y $[K]$ es la matriz de rigidez del sistema. Por ello si la masa o la rigidez cambian, la frecuencia natural del sistema cambiará.

2.4.3 Frecuencia de Resonancia.

La frecuencia de resonancia se presenta cuando la frecuencia de excitación es igual o muy cercana a la frecuencia natural del sistema $\omega_r = \omega_n$ (Amézquita-Sánchez et al. 2009). La frecuencia de resonancia esta denotada por la **Ecuación 3**.

$$\omega_r = \sqrt{1 - 2\zeta^2} \omega_n \quad (3)$$

Donde ω_n es la frecuencia natural del sistema y ζ es el coeficiente de amortiguamiento.

2.4.4 Factor de amortiguamiento

Irwin et al., (1979) mencionó que el factor de amortiguamiento es un parámetro fundamental en el desarrollo de modelos matemáticos que permiten el estudio y análisis de sistemas vibratorios, como lo son: estructuras metálicas, motores, maquinaria rotativa, turbinas, automóviles, etc. Esto va encaminado a la teoría de que todo sistema vibratorio (regularmente sistemas mecánicos) tiene la capacidad de disipar energía. Para el control de vibraciones e impactos en maquinaria, se utiliza el concepto de amortiguamiento como una técnica para disipar energía del sistema, manipulando así la amplitud de vibración en el sistema y otros parámetros de estudio.

Así, a partir de la **Figura 2.2**, el factor de amortiguamiento se ve representado por la **Ecuación (4)**.

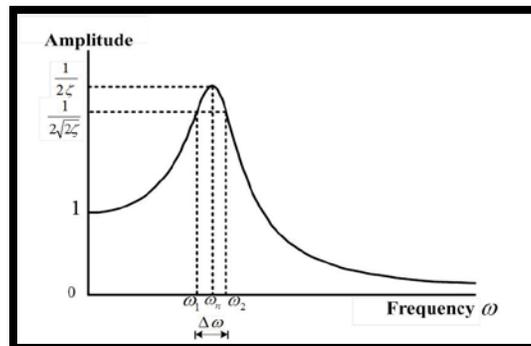


Figura 1.2. Método gráfico para la medición del amortiguamiento.



$$\zeta = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_2 + \omega_1} \quad (4)$$

Cuando se presenta un coeficiente de amortiguamiento pequeño la frecuencia de resonancia es mucho mayor y más aguda, que cuando el factor de amortiguamiento es grande presentándose una amplitud muy pequeña en la frecuencia de resonancia, pero si la amortiguación es $\xi = 0$, el sistema incrementa su amplitud infinitamente debido a que la frecuencia de resonancia y la frecuencia natural son iguales $\omega_r = \omega_n$.

2.4.5 Transformada Rápida de Fourier (FFT)

La Transformada Rápida de Fourier es un algoritmo optimizado para realizar la transformada discreta de Fourier (DFT), la cual es considerada una técnica eficiente para analizar señales estacionarias. La DFT es definida por la **Ecuación (5)** (Proakis, 2006), donde $x(n)$ es la señal en tiempo discreto, N es periodo de muestreo, n y k son el tiempo discreto y los índices de frecuencia, respectivamente, y el kernel de transformación W_N^{nk} está dado por la **Ecuación (6)**. Este análisis es relativamente sencillo y permite transformar una señal al dominio de la frecuencia.

$$X(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W_N^{nk} \quad \text{for } 0 \leq k \leq N \text{ and } 0 \leq n < N \quad (5)$$

$$W_N^{nk} = \cos\left(\frac{2nk\pi}{N}\right) + j \sin\left(\frac{2nk\pi}{N}\right) \quad (6)$$

2.5 Importancia del análisis de vibraciones

En la **Figura 2.3** se observan tres señales graficadas tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de frecuencia, respectivamente. Utilizando la FFT es posible pasar del primer dominio al segundo. Un análisis de frecuencias puede revelar información sumamente útil, a diferencia del dominio del tiempo donde no es tan evidente para extraer información que sea útil para el monitoreo de estructuras.

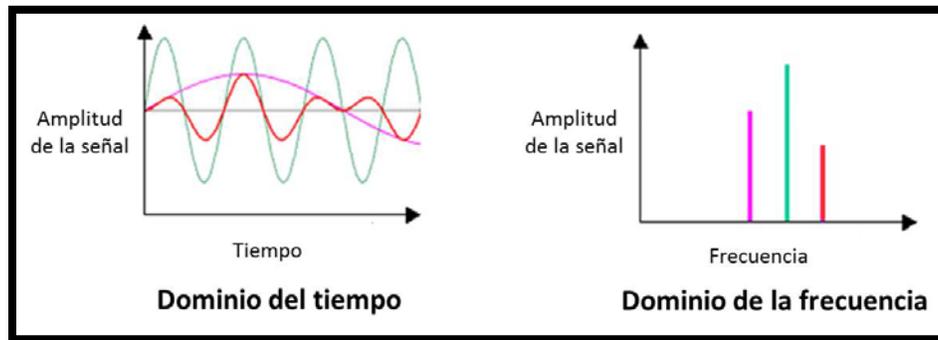


Figura 2.3. Dominio del tiempo contra dominio de la frecuencia.

Realizar un análisis de este tipo es fundamental en el monitoreo del estado de una estructura. Desarrollarlo requiere conocimiento de los conceptos descritos en este capítulo y se puede resumir en los siguientes puntos.

Detección y evaluación de daño estructural. Diagnóstico del estado asociado con la degradación de los componentes estructurales que forman la estructura y proposición y supervisión de medidas costo-efectivas de solución

Instrumentación temporal o permanente de estructuras. Diseño y realización del monitoreo de estructuras mediante la instalación de sensores de aceleración, desplazamiento, deformación, velocidad, ambientales e inclinación para dar seguimiento del comportamiento dinámico de la estructura o componente estructural en tiempo real.

Monitoreo local y remoto de variables de control. Esfuerzos máximos de diseño, frecuencias naturales, deflexiones máximas, modos de vibrar, desplazamientos máximos

Prognosis. Predicción de vida útil de los materiales empleados.



Capítulo 3

METODOLOGÍA



3. METODOLOGÍA

La metodología propuesta en este trabajo consiste en el análisis de vibraciones de una estructura del tipo *Truss* para el monitoreo de sus frecuencias naturales y el factor de amortiguamiento. Se divide de acuerdo a la **Figura 3.1**. Lo primero propuesto en la metodología es el sistema de instrumentación, el cual se encarga de adquirir la señal de vibración causada por la excitación y almacenarla para posteriormente enviar los datos adquiridos a una PC por medio del protocolo USB y de esta manera procesarlos. El primer paso del procesamiento de la señal vibración capturada es transformarla al dominio de la frecuencia empleando la técnica FFT. Una vez que se cuenta con la señal en el dominio de la frecuencia, se procede a obtener las frecuencias naturales y el factor de amortiguamiento de la estructura, mediante el uso de un algoritmo en MATLAB.

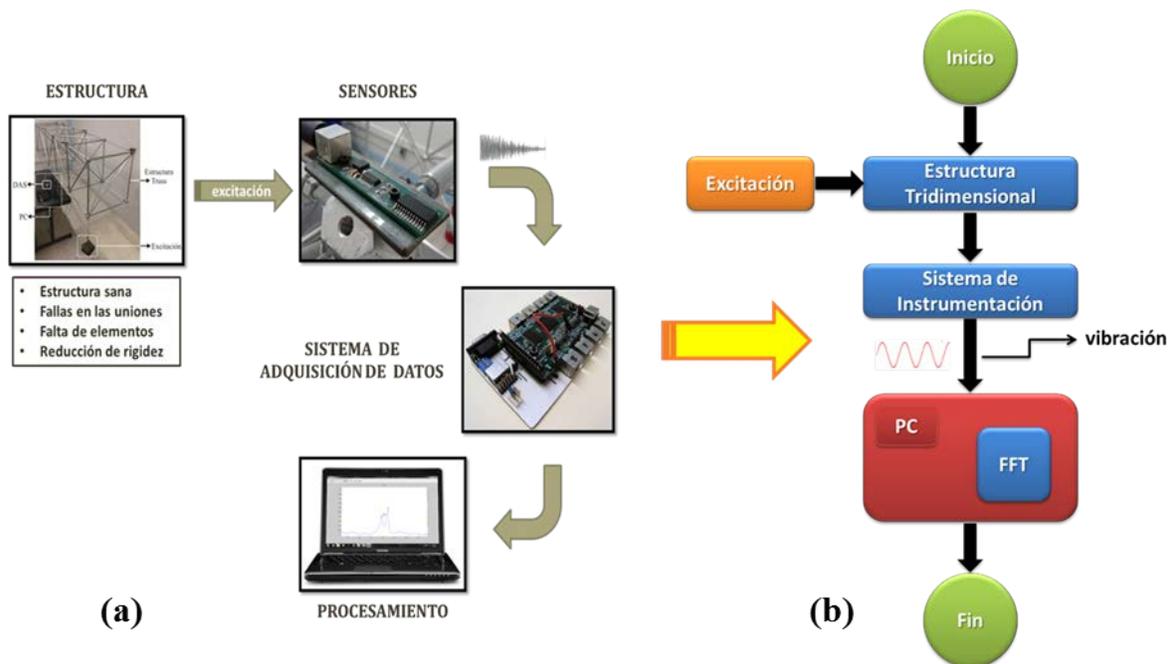


Figura 3.1. Esquemas de la metodología. (a) Diagrama gráfico. (b) Diagrama de bloques.

3.1 Estructura tridimensional Truss

La estructura empleada para las pruebas se ilustra en la **Figura 3.2**.

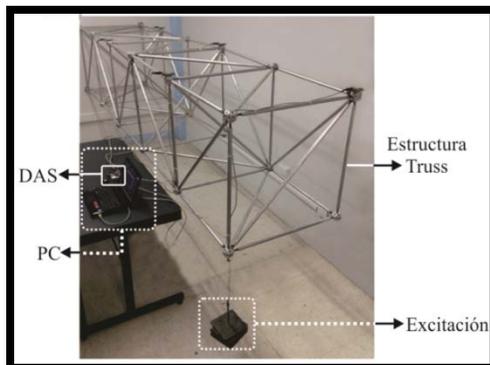


Figura 3.2. Estructura tipo *Truss*.

Fabricada de aluminio, un material altamente comercial, presenta una alta resistencia a la corrosión, facilidad de maquinarse, relación resistencia/peso alta y gran estética. Compuesta por 24 nodos y 70 elementos barra, constituye una estructura de cinco secciones, la cual puede ser reconfigurable según lo requieran las pruebas, o bien, para el mantenimiento de la misma.

Las dimensiones de la armadura son de 0.7071 m para su ancho y alto, de manera que las barras diagonales son de 1 m de longitud. Los elementos que conforman la estructura se diseñan a partir de estas dimensiones y a la geometría.

3.1.1 Descripción de los componentes de la estructura

A continuación se presentan las distintas piezas que componen la armadura, las cuales debido a su forma y dimensiones, permiten el ajuste entre ellas y la remoción de cada elemento de manera independiente, haciendo que la estructura sea reconfigurable y facilitando la puesta de los diferentes casos de estudio a analizar.



Nodo: Pieza de unión entre dos o más elementos (Ver Figura 3.3). Barrenado y machueleado cada 45° en sus planos principales, de manera que permite su conexión a otros nodos en estas direcciones.



Figura 3.3. Nodo.

Barra: Pieza que permite la unión entre dos nodos (Ver Figura 3.4). Es una barra con rosca interior en ambos extremos.

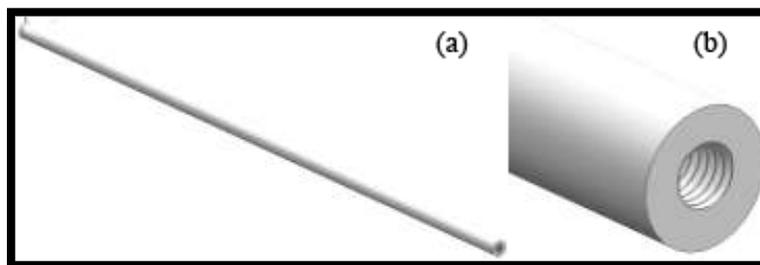


Figura 3.4. a) Barra, b) rosca interna.

Espárrago: Varilla roscada (Ver Figura 3.5). Junto con sus respectivas tuercas permite unir y ajustar la barra al nodo.

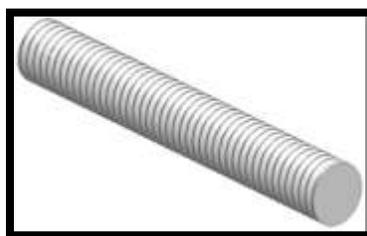


Figura 3.5. Espárrago.



Tuerca: Tuerca tipo estándar (Ver Figura 3.6). Permite el ajuste entre la barra, el nodo y el espárrago.

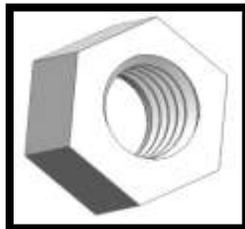


Figura 3.6. Tuerca.

El material empleado para la construcción de la estructura es tabulado en la **Tabla 1**.

Pieza	Material	Cantidad de piezas
Nodo	Aluminio 6061	24
Barras	Aluminio 6061	70
Barras con falla	Aluminio 6061	4
Tuercas	Acero	280
Espárrago	Acero de alta resistencia	140

Tabla 1. Descripción del material utilizado en la estructura.

3.1.2 Aplicación de estructuras Truss

Las estructuras del tipo Truss son empleadas en una gran variedad de aplicaciones donde se requiere una estructura de peso ligero pero resistente, fácil ensamblaje y gran espacio para su mantenimiento. Por lo tanto, este tipo de estructuras son parte importante en la economía, siendo principalmente utilizadas en techos, puentes, torres, soportes de iluminación, plataformas, así como en esqueletos de edificios y estructuras espaciales desplegables. Para la construcción de algunos puentes, una armadura lineal se combina con una viga de arco para abarcar una distancia más grande y presentar menos flexión. La **Figura 3.7** muestra algunas aplicaciones de estructuras tipo Truss.



Figura 3.7. Aplicaciones civiles de estructuras tipo Truss.

El uso de nuevos materiales para la construcción de armaduras ha acrecentado el número de aplicaciones de estructuras Truss, permitiendo crear nuevos conceptos innovadores y modernos, no sólo adaptables a estructuras civiles, también para artículos de uso cotidiano. El uso de nuevas aleaciones o fibra de carbono es un claro ejemplo. Tal que se pueden usar para fabricar piezas como bancos, mesas, templetos y cuadros para bicicletas de montaña, entre otros; como se aprecia en la **Figura 3.8.**



Figura 3.8. Nuevas aplicaciones de estructuras tipo Truss.

Con un peso de sólo 13.5 Kg la estructura Truss de la **Figura 3.9** muestra resistencia y rigidez, características que le confieren los tubos de fibra de carbono y conectores con los cuales está fabricada. La armadura mostrada se soporta una carga de 500 Libras (227 Kg) en voladizo.

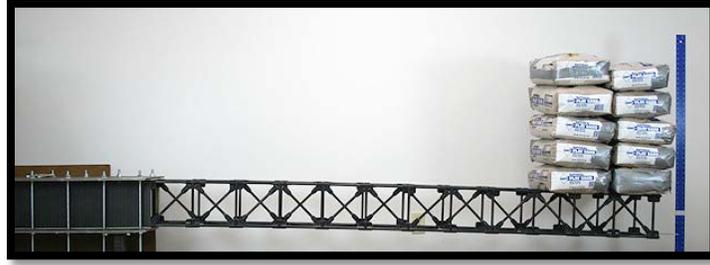


Figura 3.9. Estructura Truss de fibra de carbono.

Los materiales, sistema de fabricación y alternativas de montaje permiten crear cualquier forma deseada, ya sea para generar un espacio o para montar distintos soportes y formatos gráficos en stands, eventos, presentaciones, espectáculos, instalaciones comerciales y cualquier otra que así lo requiera.

3.2 Sistema de instrumentación

La señal de vibración es adquirida utilizando el sistema de instrumentación mostrado en la **Figura 3.10**, el cual consta de un acelerómetro del tipo MEMS tri-axial (LIS3LV02) de la compañía STMicroelectronics. La señal es acondicionada y digitalizada utilizando un convertidor analógico a digital ADS7841 y finalmente la etapa del transceiver (receptor/transmisor) que permite la comunicación con el Sistema de Adquisición de Datos (SAD), una vez que son almacenados todos los datos en el SAD se inicia el envío de los datos a la PC por medio de la interfaz USB para poder iniciar el procesamiento de los mismos.



Figura 3.10. Sistema de instrumentación.



3.2.1 Sensor

El sensor usado es un acelerómetro de tres ejes de STMicroelectronics modelo LIS3LV02, como se muestra en la **Figura 3.11**. Este sensor es un acelerómetro tipo MEMS (Micro Electro Mechanical System) y tiene la capacidad de medir la señal de vibraciones sobre los tres ejes y aunque la señal es entregada respecto a cada eje, en el presente trabajo sólo es de interés uno de ellos: el eje z (vertical), pues es ahí donde se puede visualizar mejor el comportamiento de las señales adquiridas. A continuación se mencionan las principales características del acelerómetro.

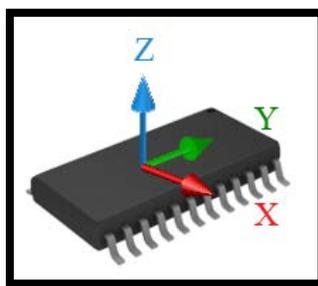


Figura 3.11. Acelerómetro tri-axial.

- Tres ejes de captura (x , y , z).
- Voltaje de operación de 2.4 a 3.6 V.
- Bajo consumo de corriente.
- Escala de trabajo seleccionable por el usuario entre $\pm 2 g$ y $\pm 6 g$.
- Resolución de $5 \times 10^{-4} g$ sobre un ancho de banda de 100 Hz.
- Ancho de banda de 1.5 KHz para cada uno de los ejes.
- Soporte a impactos.

El acelerómetro utilizado es de bajo costo, de contacto superficial y de dimensiones reducidas (15.20 mm x 7.4 mm), lo que permite adaptarlo a una tarjeta de proporciones adecuadas para la sujeción en los nodos de la estructura.



3.2.2 Convertidor ADC

El convertidor analógico digital utilizado es el ADS7841 (**Ver Figura 3.12**). Es un convertidor de contacto superficial que cuenta con cuatro canales analógicos y una salida síncrona de interfaz de serie. Este dispositivo es comandado por una señal de reloj asíncrona, en base a esta señal se mandan tanto los datos de configuración como los datos resultantes de la conversión, estos dos procesos se realizan de forma serial. Entre las principales características de este dispositivo se encuentran las siguientes:

- Única fuente de 2.7 a 5 V.
- 4 canales únicos o 2 canales diferenciales.
- Hasta 2 kmps
- 72dB SINAD
- Disipación de potencia de 2 mW a 200 KHz y una fuente de alimentación de +5 V.
- Incluye el modo ahorro de energía.

El ADS7841 tiene una velocidad de conversión de 200 KHz y entre sus principales usos son en sistemas de adquisición de datos, sistemas de medición de prueba, procesos industriales de control, etc. se eligió este convertidor en correspondencia a la resolución del sensor.

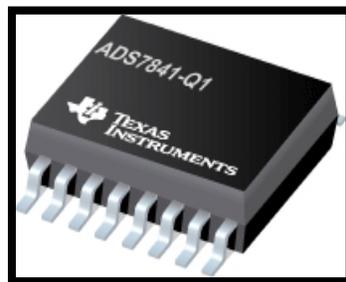


Figura 3.12. Convertidor analógico digital ADS7841.



3.2.3 Receptor/Transmisor (Transceiver).

Para efectuar la transmisión se empleó el circuito MAX3243, el cual trabaja a 250 kbits/s, elevando el voltaje a un nivel de ± 12 V con el fin de eliminar ruido y reducir la pérdida de la señal. Este circuito opera con un rango de voltaje de alimentación entre 3 V y 5.5 V, lo que lo hace compatible con los rangos de voltaje manejado en el sistema. Una vez que se efectúa la transmisión de datos vía USB del FPGA hacia la PC, se prosigue al análisis de vibraciones mediante un algoritmo en MATLAB.

El sistema construido físicamente se muestra en la **Figura 3.13**, donde se presenta montado en un nodo de la estructura.



Figura 3.13. Tarjeta de vibraciones.

3.2.4 Sistema de adquisición.

Mostrado en la **Figura 3.14**, el sistema de adquisición de datos cuenta con ocho canales de entrada. Este sistema permite conectar, capturar, almacenar y enviar la información de hasta ocho sensores de aceleración por medio del protocolo USB. Para el caso de este trabajo solamente cinco sensores de aceleración son empleados, los cuales son distribuidos a lo largo de la estructura.

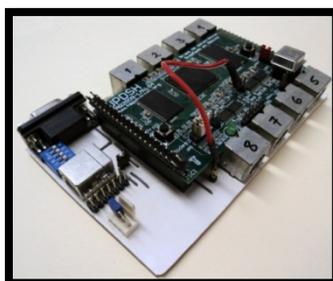


Figura 3.14. Sistema de adquisición de datos (SAD).

3.2.5 Ubicación de los sensores

La mayoría de los estudios sobre el monitoreo de estructuras, la identificación y localización de daños están basados en el análisis de un solo sensor. Sin embargo, para un daño estructural dado, los datos adquiridos de varios sensores que estén localizados en diferentes partes en la estructuras contienen diferente información. Por lo tanto, cada sensor tiene diferente sensibilidad al daño estructural, lo cual se ve reflejado en la amplitud de la señal de vibración. Por otro lado, la ubicación de sensores en la parte de empotramiento de una estructura es innecesaria debido a que en ese punto la vibración es nula.

En este trabajo de tesis, la posición de los acelerómetros fue determinada por un patrón arbitrario, de tal manera que se obtuvieran lecturas de cada sensor a lo largo de la estructura y se tuviera una distancia equidistante entre cada sensor.

La **Figura 3.15** presenta la distribución de los cinco sensores de aceleración a lo largo de la estructura, enumerados a partir de la ultima sección (cubo 1) en voladizo, hasta el inicio de la sección empotrada al muro de concreto (cubo 5).

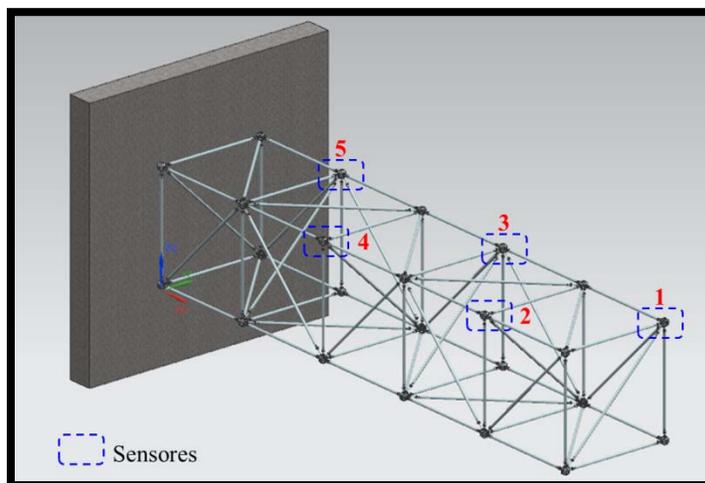


Figura 3.15. Ubicación de los sensores en la estructura Truss.

Es importante destacar que si no se cuenta con sensores suficientes, es conveniente colocar los disponibles lejos de la parte de anclaje, pues como ya se dijo, a medida que los sensores se colocan cerca del empotramiento las señales de vibración desaparecen.



La **Figura 3.16** simula el comportamiento de la señal de vibración a lo largo de la estructura. Nótese que la amplitud de la señal disminuye a medida que se acerca a la pared. Esto puede repercutir en el cálculo de los parámetros modales de la armadura.

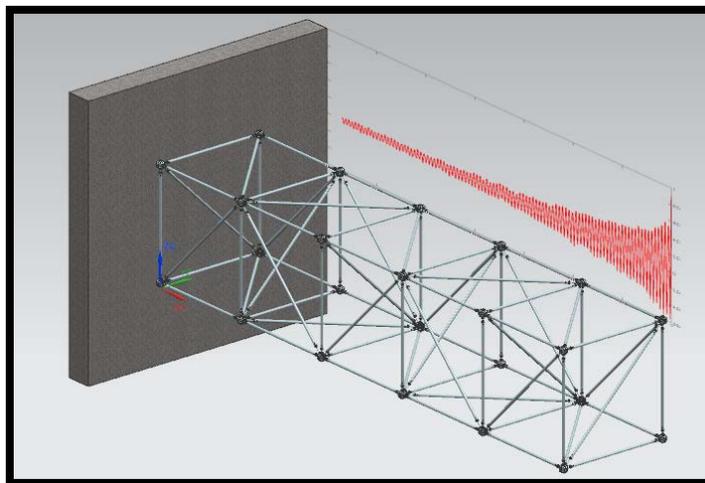


Figura 3.16. Comportamiento de la señal de vibración en la estructura.

Debido a que éste es un estudio experimental se optó por colocar el cuarto y quinto sensor al inicio y final de la cuarta sección de la estructura, (la cual se localiza cerca del muro), tanto para tener uniformidad en el patrón de los sensores anteriores, como para monitorear el estado de la estructura lo más completamente posible.

Un sexto sensor colocado en la última sección de la estructura carecería de sentido, ya que existe una alta probabilidad de no adquirir señales relevantes para el estudio, sin embargo si éstas llegasen a aparecer esto indicaría que la armadura no está correctamente anclada a la pared y se debe realizar el correcto ajuste de la misma.

3.3 Metodología de análisis de la falla.

Como primer paso de la metodología a seguir para el análisis de las fallas es generar la falla en la estructura. Una vez que la falla ha sido generada y colocada dentro de la estructura, las señales de vibración correspondientes para ésta, es adquirida y enviada a la PC para su análisis mediante la técnica de análisis FFT. Este punto es repetido hasta cumplir con todas las condiciones de falla propuestas. Posteriormente, se analizan estas señales por medio de un código en MATLAB, el cual manda llamar el archivo de texto



creado por el sistema de adquisición de datos y grafica dicha señales de vibración en el dominio de la frecuencia, para el eje y sensor que se requiera. Ya que se ha graficado la señal, lo que continúa es localizar la primera frecuencia natural, la cual es utilizada para el análisis de la falla en este trabajo. Una vez localizada la frecuencia natural, se procede a calcular el factor de amortiguamiento, la cual es estimada en base al lóbulo de la frecuencia natural. El factor de amortiguamiento se obtiene a partir de estas frecuencias, tal y como se mostró en la **Ecuación (4)**.

Finalmente ya que se tiene el factor de amortiguamiento de la estructura para dicha falla, se realiza el mismo procedimiento para los demás sensores y se grafican los valores obtenidos tanto de frecuencias naturales como de factores de amortiguamiento (por separado), de esta manera se puede visualizar gráficamente la tendencia del comportamiento de dichos parámetros modales cuando existe una falla en la estructura.



Capítulo 4

PRUEBAS Y RESULTADOS



4. PRUEBAS Y RESULTADOS

4.1. Puesta de Experimento

La **Figura 4.1** muestra la puesta de experimentación, la cual consiste en una estructura del tipo Truss espacial de aluminio de cinco cubos (también conocidas como secciones o “*bays*”).

Las pruebas modales (Figura 4.1a), fueron desarrolladas usando una masa de 14 Kg (137.34 N), como fuente de excitación, la cual, colgada en un extremo de la estructura (Figura 4.1b) por medio de sección de hilo de nylon de 18 cm, se hacía cortar para que dicha masa al caer produjera una excitación en la estructura. Las señales de vibración son adquiridas usando cinco acelerómetros distribuidos en cada cubo de la estructura (**Figura 4.1a**), del tipo MEMS triaxial (LIS3L02AS4) (**Figura 4.1d**). Los acelerómetros usados tienen una escala de $\pm 2g/ \pm 6g$ ($g = 9.81m/s^2$) y una resolución de 5×10^{-4} sobre un ancho de banda de 100Hz. La información adquirida por los acelerómetros es digitalizada usando un ADS7841 de 12 bits y cuatro canales, con una máxima frecuencia de muestreo de 200 KHz en cada canal. Las señales obtenidas por el acelerómetro son almacenadas en el Sistema de Adquisición de Datos (SAD), (**Figura 4.1c**) y son enviadas a la PC mediante el protocolo USB. El SAD usa una frecuencia de muestreo de 3.2KHz para obtener 16000 muestras en un periodo de 5 segundos.

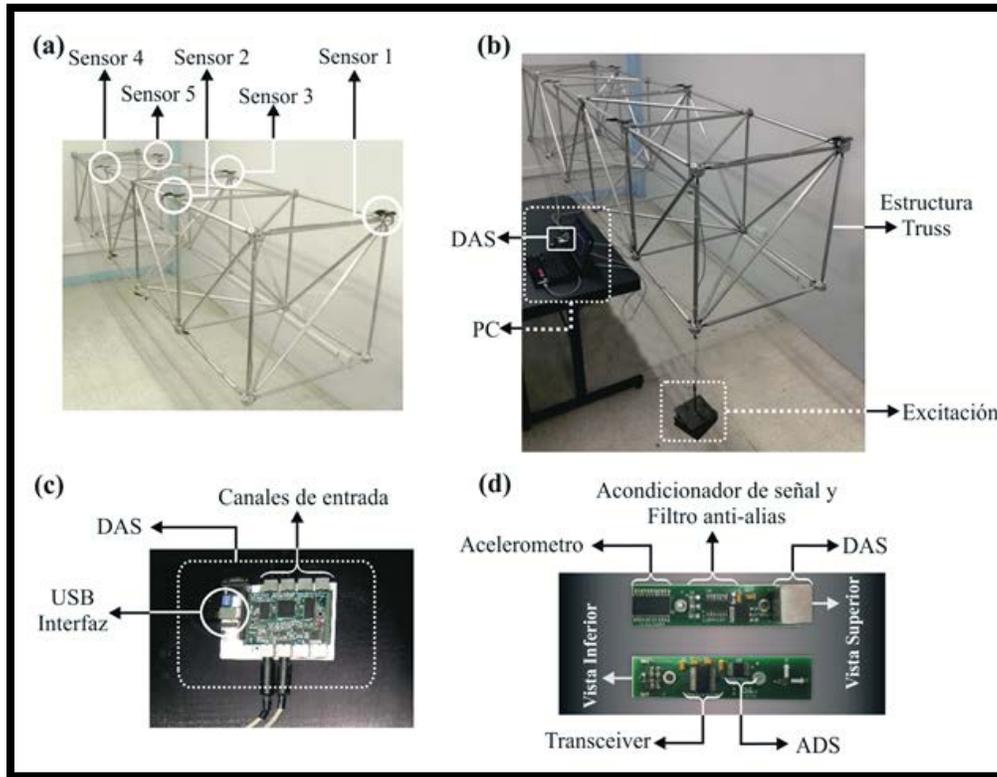


Figura 4.1 Puesta de experimentación.

4.2. Casos de estudio

Para poder validar la metodología propuesta, se analizaron tres casos de estudio para la detección de la primera frecuencia natural y el factor de amortiguamiento correspondiente de la estructura, en buen estado y con algún tipo de daño, los cuales se describen brevemente a continuación:

- **Caso de estudio 1.**

En el primer caso de estudio, *fallas en las uniones* de la estructura, son analizadas. Para llevar a cabo esta falla, un extremo de la barra es separada del nodo al cual está unido, de tal manera que el espárrago quede en el nodo y la barra con un extremo libre. Esta falla en la vida real simula una fractura en la soldadura, puesto que este tipo de estructuras tienen soldadas sus uniones. (Ver **Figura 4.2a**).



- **Caso de estudio 2.**

En el segundo caso de estudio se analiza la *reducción de rigidez* en algunos elementos de la estructura. Este tipo de falla consiste en reducir la rigidez de la estructura, disminuyendo la sección transversal de algunos de sus elementos, de tal manera que se pueda simular un daño en la estructura por una falla debido a la reducción en los elementos debida a diversas condiciones a las que podría estar expuesto el sistema. (Ver **Figura 4.2b**).

- **Caso de estudio 3.**

En el tercer caso de estudio se analizó la *falta de elementos* dentro de la estructura. Para recrear esta falla bastó con remover un elemento de cada sección de la estructura, uno a la vez. Esta falla es común cuando la soldadura no es correcta en un extremo del elemento y consecuentemente por vibraciones o cargas en la estructura, el elemento termina por colapsar. (Ver **Figura 4.2c**).

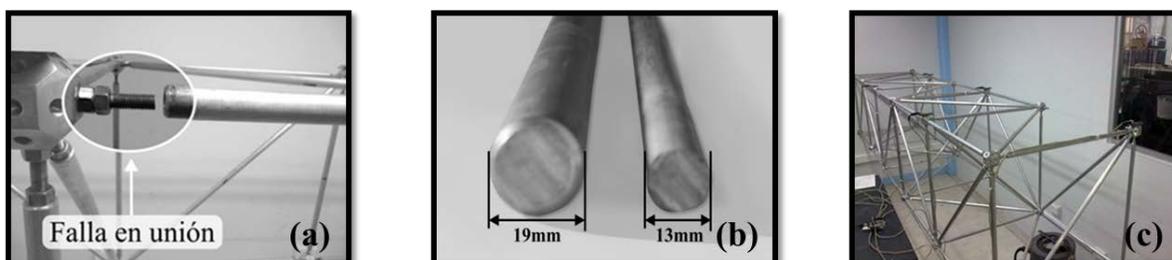


Figura 4.2. Casos de estudio: (a) Falla en la unión, (b) reducción de rigidez, (c) falta de elementos.



4.3. Resultados

Las pruebas realizadas para cada caso de estudio fueron analizadas y se obtuvieron gráficas que marcan la tendencia del comportamiento de la primera frecuencia natural, y del factor de amortiguamiento, en los diferentes casos de estudio. La adquisición de la señal realizada para cada prueba fue con una frecuencia de muestreo de 3200Hz , con la cual se obtienen 16000 muestras, ya que con todas estas muestras se asegura la captura de la vibración libre de la estructura, la cual tiene una duración aproximada de 5 segundos . La primera frecuencia natural y el factor de amortiguamiento son empleadas para el análisis. De acuerdo a la literatura citada, el emplear las frecuencias naturales como indicador de daño no es muy eficiente debido a que la magnitud puede variar poco o nada cuando existe una falla en la estructura. Por lo tanto, el emplear otro parámetro en conjunto con las frecuencias naturales como indicador de falla, es necesario.

Por cumplir con esta necesidad, en este trabajo de tesis se ha propuesto realizar la suma, resta, producto y cociente entre los valores ponderados de dos parámetros modales: la primera frecuencia natural y su factor de amortiguamiento, de tal manera que al unirlos se tenga un mayor rango de visualización y así, poder apreciar la falla y la ubicación de la misma. El valor de la primera frecuencia natural y su factor de amortiguamiento es ponderado empleando la **Ecuación (7)**.

$$\% = \left(\frac{X_{sana} - X_{falla}}{X_{sana}} \right) (100\%) \quad (7)$$

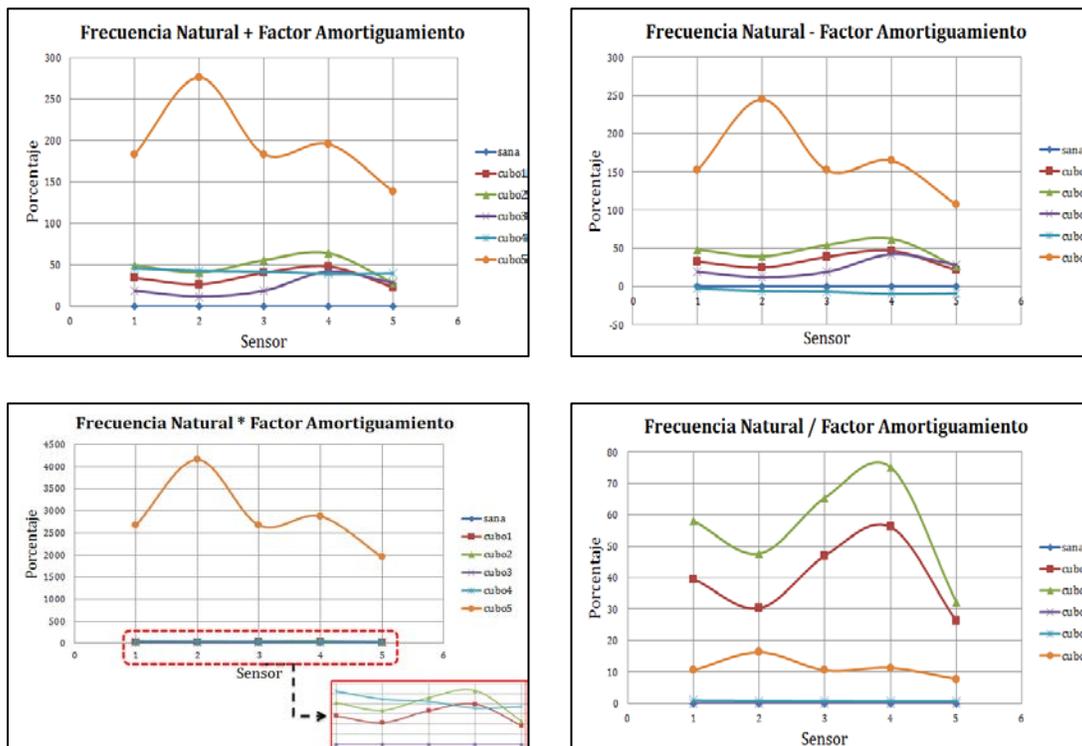
Donde X_{sana} representa el Factor de amortiguamiento ó la Frecuencia natural de la estructura en estado sano, X_{falla} representa el Factor de amortiguamiento ó Frecuencia natural obtenido cuando se aplica la falla a la estructura.



4.3.1. Caso de estudio 1: Falla en la unión.

El primer caso de estudio que se presenta es para observar el comportamiento de la estructura bajo fallas en las uniones por medio de la obtención de la primera frecuencia natural y su correspondiente factor de amortiguamiento. En la **Figura 4.3**, se muestra una serie de gráficas basadas en la ponderación y en la fusión de los datos obtenidos, donde es posible observar la tendencia de ambos parámetros cuando son fusionados con respecto a la falla y a la localización de ésta, a lo largo de la estructura.

Debido a que algunos datos obtenidos presentan valores cercanos entre sí, las gráficas pueden presentar un traslape cuando en realidad no existe. A fin de observar bien los resultados, se optó por realizar un *zoom* en aquellas zonas que así lo requirieron, de tal manera que se magnifique el rango de visualización y sea posible apreciar el comportamiento de los dos parámetros modales en conjunto.



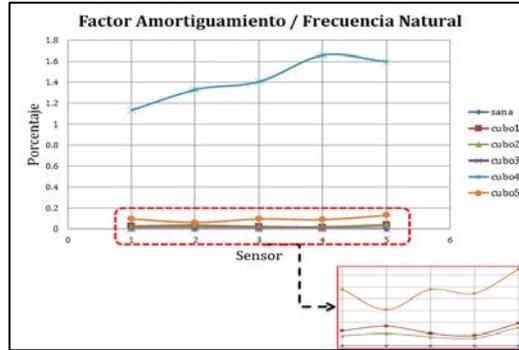
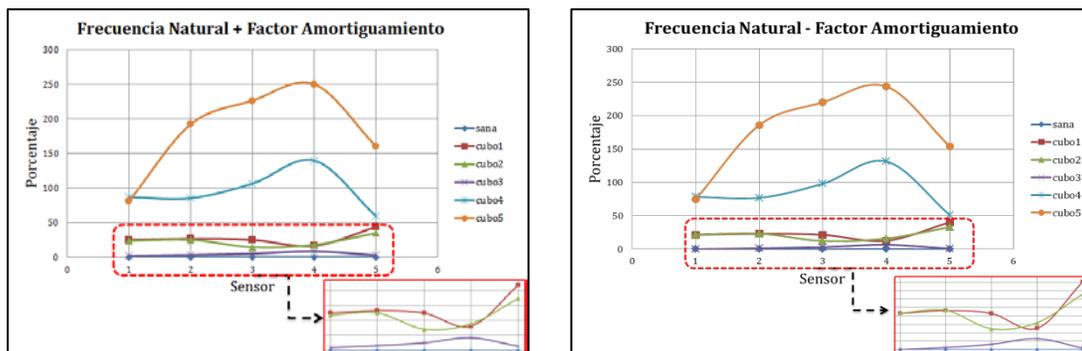


Figura 4.3. Caso de estudio 1: Comportamiento de la primera frecuencia natural junto con el factor de amortiguamiento a lo largo del sistema.

4.3.2. Caso de estudio 2: Reducción de rigidez.

El segundo caso de estudio que se presenta es para observar el comportamiento de la estructura bajo reducción de rigidez. Al igual que el caso de estudio anterior, la obtención de la primera frecuencia natural y su correspondiente factor de amortiguamiento son fusionados. Como se observa en la **Figura 4.4** las gráficas revelan distinta información dependiendo de la manipulación de los valores ponderados de los parámetros modales.

Similar al caso anterior, algunas de las imágenes presentan un zoom con el fin de poder observar con mayor claridad los resultados.



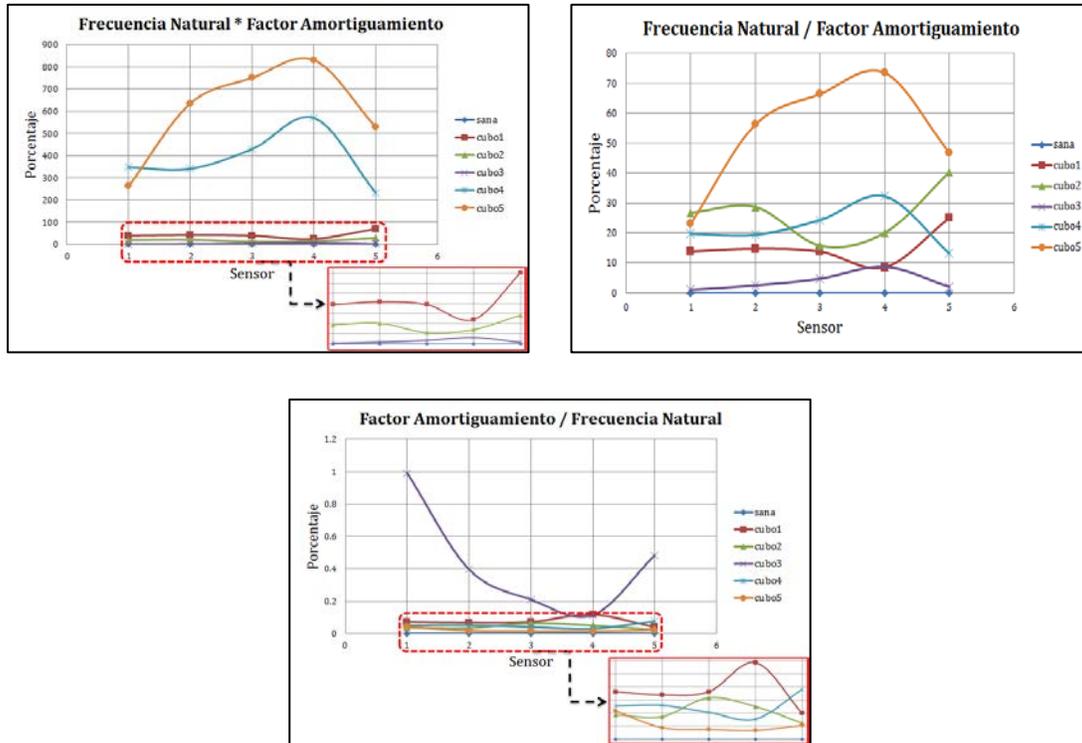


Figura 4.4.Caso de estudio 2: Comportamiento de la primera frecuencia natural junto con el factor de amortiguamiento a lo largo del sistema.

4.3.3. Caso de estudio 3: Falta de elementos.

El tercer caso de estudio que se presenta es para observar el comportamiento de la estructura cuando algunos elementos son removidos. La ponderación de los valores tanto de frecuencia natural y el correspondiente factor de amortiguamiento son graficados. La **Figura 4.5** muestra la tendencia de dichos valores según sea la gráfica, pues cada sensor permite la lectura de dicha información en una sección diferente de la estructura.

Similar al caso anterior, algunas de las imágenes presentan un zoom con el fin de poder observar con mayor claridad los resultados.

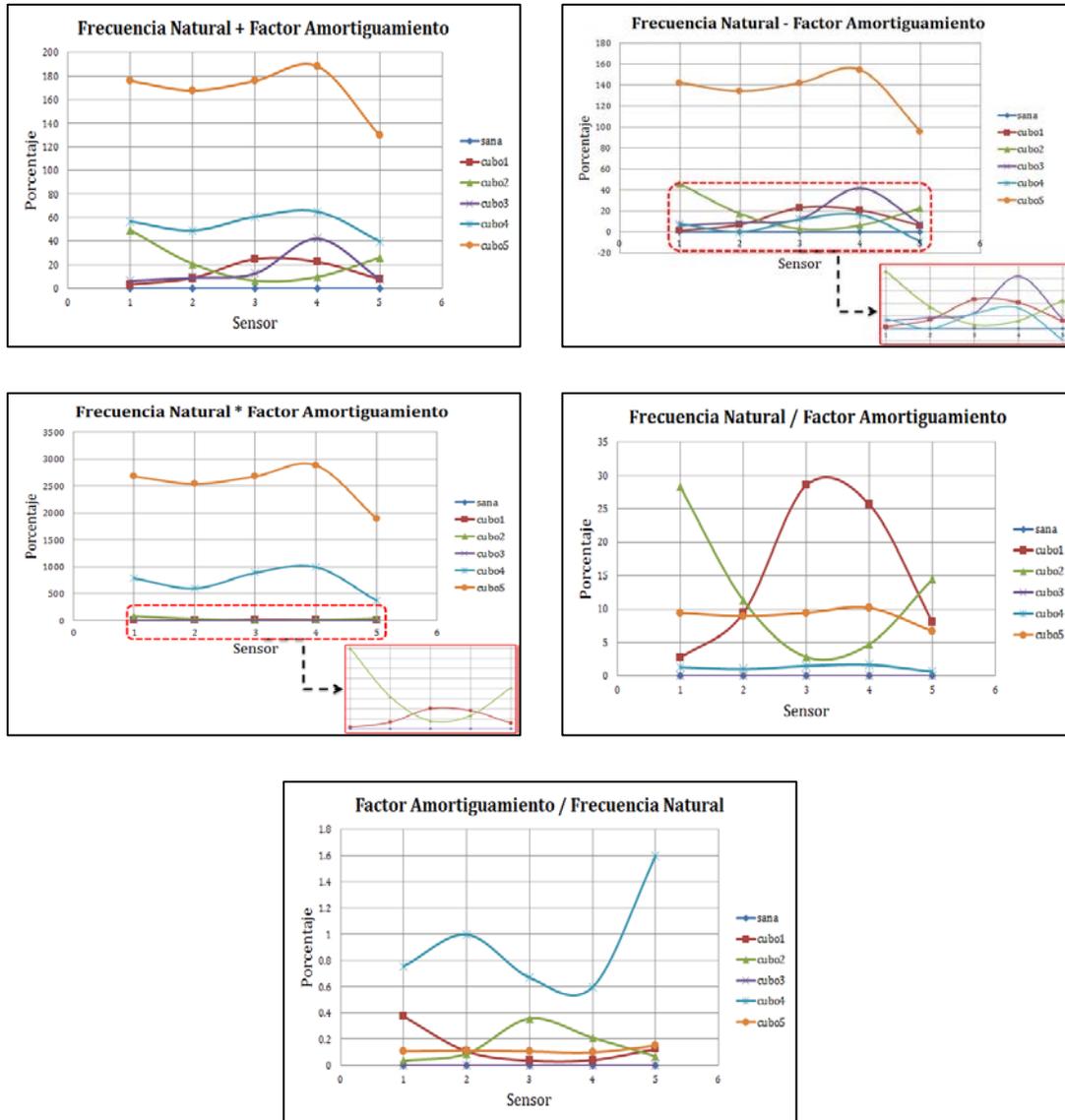


Figura 4.5. Caso de estudio 3: Comportamiento de la primera frecuencia natural junto con el factor de amortiguamiento a lo largo del sistema.



4.3.4. Discusión de resultados

Con los resultados analizados, dos puntos importantes quedan sujetos a discusión en este apartado, los cuales serán tratados a continuación.

El primero de ellos se refiere al uso de dos parámetros modales para facilitar la detección y localización de una falla. Las cuatro operaciones (suma, resta, producto y cociente), se realizaron para ampliar el rango de visualización y lograr dicho fin, pues a pesar que el factor de amortiguamiento es diferente para cada prueba realizada, la frecuencia natural en ocasiones tiende a repetirse, lo cual hace que el hecho de basarse en este último parámetro para evaluar la falla, sea poco confiable. Tal es el caso de la frecuencia natural que aparece en la *estructura sana* y la *falla en la unión en el cubo 3*, con un valor de 23.8 Hz para ambas, como lo demuestra la **Tabla 2**.

Condición	Sensor 1		Sensor 2		Sensor 3		Sensor 4		Sensor 5	
	f (Hz)	ζ								
E. Sana	23.8	0.0067	23.8	0.0071	23.8	0.0067	23.8	0.0065	23.8	0.0081
F.U. Cubo 1	24	0.0089	24	0.0089	24	0.0093	24	0.0095	24	0.0100
F.U. Cubo 2	24	0.0100	24	0.0100	24	0.0104	24	0.0106	24	0.0104
F.U. Cubo 3	23.8	0.0079	23.8	0.0079	23.8	0.0079	23.8	0.0092	23.8	0.0105
F.U. Cubo 4	18	0.0052	18	0.0058	18	0.0056	18	0.0056	18	0.0069
F.U. Cubo 5	20	0.0180	20	0.0257	20	0.0180	20	0.0182	20	0.0182
R.R Cubo1	24.2	0.0051	24.2	0.0053	24.2	0.0051	24.2	0.0055	24.2	0.0047
R.R Cubo2	24	0.0052	24	0.0054	24	0.0058	24	0.0054	24	0.0054
R.R Cubo3	23.6	0.0067	23.6	0.0069	23.6	0.0069	23.6	0.0069	23.6	0.0080
R.R Cubo4	22.8	0.0122	22.8	0.0129	22.8	0.0136	22.8	0.0153	22.8	0.0127
R.R. Cubo5	23	0.0119	23	0.0206	23	0.0217	23	0.0226	23	0.0210
S.E. Cubo1	24	0.0068	24	0.0077	24	0.0083	24	0.0079	24	0.0087
S.E. Cubo2	24.2	0.0099	24.2	0.0057	24.2	0.0064	24.2	0.0059	24.2	0.0062
S.E. Cubo3	23.8	0.0071	23.8	0.0021	23.8	0.0212	23.8	0.0073	23.8	0.0094
S.E. Cubo4	18	0.0088	18	0.0088	18	0.0091	18	0.0091	18	0.0094
S.E. Cubo5	19.8	0.0174	19.8	0.0179	19.8	0.0174	19.8	0.0176	19.8	0.0174

*F.U. = Falla en la Unión

*R.R. = Reducción de Rigidez

*S.E. = Sin Elemento

Tabla 2. Valores de los parámetros modales. Primera frecuencia natural (f) y factor de amortiguamiento (ζ) de la estructura en buen estado, comparados con los tres tipos de fallas analizados.

Para dar un mayor énfasis al uso del factor de amortiguamiento como auxiliar en la detección y ubicación de fallas, se ponderaron los valores según la **Ecuación (7)** antes descrita. Como se observa en la **Tabla 3**, este factor presenta un mayor “peso” con respecto



a la frecuencia natural, con lo cual demuestra la importancia de utilizar ambos parámetros modales en conjunto.

Condición	Sensor 1		Sensor 2		Sensor 3		Sensor 4		Sensor 5	
	f (%)	ζ (%)								
E. Sana	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F.U. Cubo 1	0.8403	33.255	0.8403	25.416	0.8403	39.453	0.8403	47.150	0.8403	22.051
F.U. Cubo 2	0.8403	48.75	0.8403	40	0.8403	54.947	0.8403	63.145	0.8403	27.136
F.U. Cubo 3	0	18.75	0	11.764	0	18.75	0	41.935	0	28.205
F.U. Cubo 4	24.369	21.493	24.369	18.333	24.369	17.361	24.369	14.695	24.369	15.242
F.U. Cubo 5	15.966	167.75	15.966	260.5	15.966	167.75	15.966	180.22	15.966	122.74
R.R Cubo1	1.6806	23.166	1.6806	24.793	1.6806	23.166	1.6806	14.342	1.6806	42.000
R.R Cubo2	0.8403	22.526	0.8403	24.166	0.8403	13.229	0.8403	16.827	0.8403	33.888
R.R Cubo3	0.8403	0.8474	0.8403	2.1186	0.8403	3.9989	0.8403	7.3537	0.8403	1.7383
R.R Cubo4	4.2016	82.675	4.2016	81.140	4.2016	102.24	4.2016	135.71	4.2016	55.240
R.R. Cubo5	3.3613	77.853	3.3613	189.13	3.3613	223.36	3.3613	247.15	3.3613	157.36
S.E. Cubo1	0.8403	2.2656	0.8403	7.9166	0.8403	23.958	0.8403	21.559	0.8403	6.7948
S.E. Cubo2	1.6806	47.520	1.6806	19.008	1.6806	4.7262	1.6806	7.9978	1.6806	24.348
S.E. Cubo3	0	6.25	0	8.8235	0	12.5	0	41.935	0	7.6923
S.E. Cubo4	24.369	32.222	24.369	24.444	24.369	36.354	24.369	40.752	24.369	15.270
S.E. Cubo5	16.806	159.18	19.8	151.01	19.8	159.18	19.8	171.42	19.8	112.66

Tabla 3. Valores ponderados de los parámetros modales: Frecuencia natural y Factor de amortiguamiento obtenidos por cada sensor a lo largo de la estructura

El segundo punto a discutir, tiene que ver con la instrumentación de la estructura, pues con los datos presentados, el posible uso de un sólo sensor para el monitoreo del estado de la armadura, es factible.

Los datos obtenidos por cada acelerómetro se analizaron con el objetivo de encontrar un sensor que fuera común para los tres casos de estudio y así localizar las fallas. Para ello la suma de ambos parámetros permite esto. En este caso, el sensor uno, presenta información suficiente para determinar el tipo de falla y dónde se localiza ésta, tal y como se muestra en la **Figura 4.6** en complemento con la **Tabla 4**.

Como se mencionó al principio, existen zonas en las que es difícil discernir cuando se presenta una falla y cuando no. Entonces, con el fin observar claramente los resultados, se optó por realizar un zoom a la región del sensor uno para magnificar el rango de visualización y apreciar el comportamiento de los dos parámetros modales en conjunto.

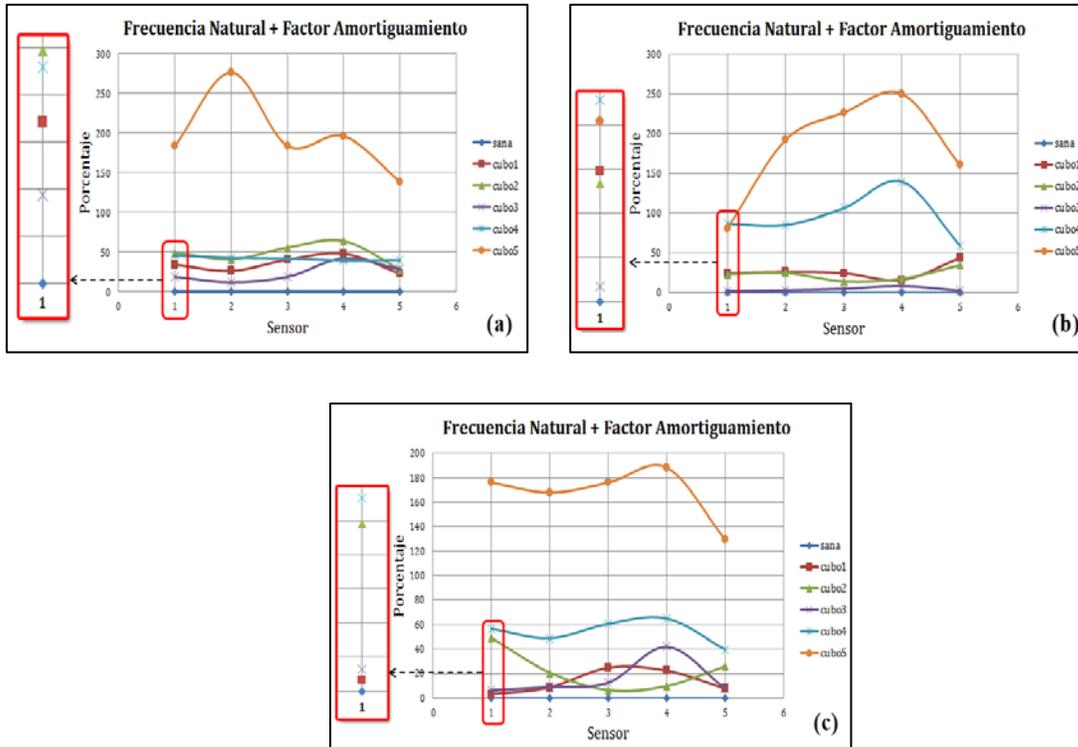


Figura 4.6. Tendencia de los parámetros modales según el sensor uno. a) Falla en la unión, b) Reducción de rigidez y c) Falta de elementos.

Condición	Sensor 1
	$f + \zeta$
E. Sana	0
F.U. Cubo 1	34.096
F.U. Cubo 2	49.590
F.U. Cubo 3	18.750
F.U. Cubo 4	45.863
F.U. Cubo 5	183.71
R.R. Cubo1	24.847
R.R. Cubo2	23.366
R.R. Cubo3	1.688
R.R. Cubo4	86.877
R.R. Cubo5	81.215
S.E. Cubo1	3.106
S.E. Cubo2	49.201
S.E. Cubo3	6.250
S.E. Cubo4	56.592
S.E. Cubo5	175.99

*F.U. = Falla en la Unión

*R.R. = Reducción de Rigidez

*S.E. = Sin Elemento

Tabla 4. Suma de parámetros modales ponderados: frecuencia natural (f) y factor de amortiguamiento (ζ) de la estructura en buen estado, comparados con los tres tipos de fallas analizados.



Los resultados arrojados en los casos de estudio muestran que es de suma importancia seguir adecuadamente los pasos propuestos en la metodología, ya que primeramente por medio de un análisis en frecuencia se obtiene una región de análisis, el cual permite observar las frecuencias naturales del sistema, y a partir de ellas poder obtener los factores de amortiguamiento. La fusión de estos parámetros permitió tener una mayor certeza en la detección de la falla y su localización



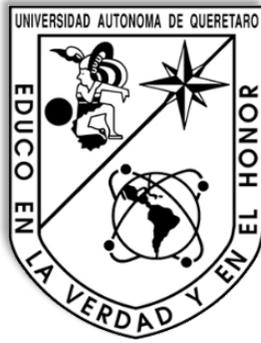
CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

En este trabajo se propuso una metodología novedosa para la estimación de frecuencias naturales y factor de amortiguamiento en estructuras Truss en diferentes condiciones de estudio, por medio del análisis modal. Dichas frecuencias naturales no sólo revelan el comportamiento del sistema, si no que son parte fundamental para la obtención de los factores de amortiguamiento del mismo. Sistemáticamente, el estudio experimental realizado, se estructura de tal manera que el sistema de instrumentación (encargado de adquirir la señal de vibración causada por la excitación) almacena los datos obtenidos y posteriormente los envía a una PC por medio del protocolo USB para su procesamiento. El primer paso del procesamiento de la señal vibración capturada consiste en transformarla al dominio de la frecuencia empleando la técnica FFT. Una vez que se cuenta con la señal en el dominio de la frecuencia, se procede a obtener las frecuencias naturales y el factor de amortiguamiento de la estructura, mediante el uso de un algoritmo en MATLAB.

Para la detección de fallas en la estructura, se utilizaron cinco sensores a lo largo de la estructura pues no se conocía el comportamiento de esta, sin embargo, en base a los resultados presentados tanto en la **Figura 4.6** y en la **Tabla 4** podemos concluir que con un sólo es posible discernir cuándo existe o no una falla en la estructura, de acuerdo a la información obtenida. En este caso, el sensor uno.

Los resultados obtenidos en los distintos casos de estudio analizados, revelan información importante sobre el comportamiento de los parámetros modales (estudiados en éste trabajo) de la estructura Truss, y respaldan la eficiencia de la metodología utilizada, pues el seguimiento de ésta garantiza la localización de las primeras frecuencias naturales del sistema (siendo éstas las más importantes) y por tanto el factor de amortiguamiento perteneciente a cada una de ellas. De esta manera se demuestra que cualquier variación en la rigidez y/o masa de la estructura repercute en los parámetros modales analizados, brindando así, datos importantes que revelan el estado en el que se encuentra el sistema mecánico.



Anexo A

**Artículo presentado en el
8° Congreso Internacional
de Ingeniería**



Monitoreo estructural basado en vibración para detectar daños en estructura del tipo Truss.

Vibration-based structural health monitoring to detect damages in type-truss structures.

Amando Aurelio Gallardo Amaya¹, Juan Pablo Amézquita Sánchez², Roque Alfredo Osornio Ríos³, Aurelio Domínguez Gozalez³, René de Jesús Romero Troncoso^{3, 4}, Arturo García Perez⁴.

¹Estudiante de Licenciatura de la Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería Campus San Juan del Río.

²Estudiante de Doctorado de la Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería Campus San Juan del Río.

³Profesor-Investigador de Tiempo completo de la Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería Campus San Juan del Río.

⁴Profesor-Investigador de DICIS-Universidad de Guanajuato, carretera Salamanca-Valle de Santiago km 3.5 + 1.8. Comunidad Palo Blanco, 36730 Salamanca, Gto. México.

RESUMEN. El monitoreo estructural es una área de investigación importante y de rápido crecimiento que está atrayendo el interés de los investigadores y de las agencias de gobierno relacionados con el mantenimiento y seguridad de los diferentes tipos de estructuras tales como edificios, puentes, estructuras del tipo *Truss*, etc., con el fin de permitir su operación o programar su reparación o retiro. Dichas estructuras están sometidas a fallas debidas a la corrosión, fisuras en los elementos o por una mala soldadura, siendo éstas las más usuales y el objetivo principal de análisis de este trabajo. Es por ello, que la finalidad del presente estudio es el análisis de una estructura tridimensional del tipo *Truss* mediante la adquisición de la señal de vibración procesada en una PC que permita conocer si la estructura está en buen estado o presenta alteraciones en su dinámica debido a una falla. La transformada de Fourier (FFT) es el método empleado para el análisis de las señales. Esta técnica permite el conocer los modos paramétricos de las estructuras tales como frecuencias naturales y factor de amortiguamiento de la estructura. Con los resultados obtenidos se contrastan las frecuencias naturales de la estructura en estado sano contra las de falla, así como el factor de amortiguamiento para ambos casos. Se puede concluir entonces, que la falla existe o no en la estructura, además de poder dar una buena aproximación de la ubicación de la misma.

Palabras clave: Estructuras *Truss*, Daños, Vibraciones, Modos Paramétricos.

1. INTRODUCCIÓN.

Monitoreo estructural es una área de investigación importante y de rápido crecimiento que está atrayendo el interés de los investigadores y de las agencias de gobierno relacionados con el mantenimiento y seguridad de los diferentes tipos de estructuras tales como edificios, puentes, estructuras del tipo *Truss*, etc., con el fin de permitir su operación o programar su reparación o retiro (Rytter, 1993). El monitoreo estructural consiste en

el proceso de implementar una estrategia de identificación de daños que envuelva la observación de una estructura a lo largo del tiempo empleando mediciones espaciadas y el análisis de estas para determinar el estado actual de la estructura. El termino daño puede ser definido como los cambios introducidos dentro del sistema que afectan negativamente su actual o futuro rendimiento y requiere una comparación entre dos estados diferentes del sistema, uno de los cuales representa el estado inicial y el estado actual, el cual debe ser evaluado como sano o dañado (Farrar et al., 2007). Este trabajo está enfocado en el estudio de daños en estructuras del tipo Truss.

Las infraestructuras civiles frecuentemente sufren de daños tales como corrosión, acumulación de crack, degradación de las columnas, fallas en las uniones y/o impactos de objetos extraños. Un caso especial son las estructuras del tipo Truss, las cuales son fáciles de ensamblar y poco peso; así, han llegado a jugar un papel importante en la economía y tienen numerosas aplicaciones tales como puentes, torres, techos, edificios, esqueletos, etc. (Dominguez et al., 2006). Por estas razones, varios trabajos han estudiado el comportamiento de estas estructuras bajo diferentes tipos de daños tales como fallas en la uniones (Shi et al., 2000), crack (Wang et al., 2001), falta de elementos (Kashangaki, 1991), reducción de rigidez (Szewczyk y Hajela, 1994), y corrosión (Chen et al., 2005).

La mayoría de los métodos de detección daños son visuales o procedimientos experimentales tales como la emisión acústica, la cual ha sido empleada para detectar crack en puentes (Ghorbanpoor y Rentmeester, 1993), la teoría fractal ha sido empleada para identificar daños en cables (Li et al., 2011), termo-grafía infrarroja para detectar crack en puentes (Zachar y Naik, 1992), ultrasonido para detectar crack en concreto, corrosión, y crack en puentes (Kisters y Kearney, 1991), campos magnéticos para identificar fatiga en engranajes bombas, miembros estructuras, etc., (Kisters y Kearney, 1991), corrientes de Eddy para identificar una variedad de propiedades de los materiales incluyendo crack, crack internos, etc., (Auld y Moulder, 1999), los rayos X para detectar daños en el concreto (Vossoughi et al. 2007). Sin embargo, todas estas técnicas requieren que la localización del daño sea conocida y que la estructura a ser inspeccionada tenga un fácil acceso. Estas limitaciones han conducido al desarrollo de técnicas globales de monitoreo basadas en el cambio de la vibración en la estructura. Esto debido a que cuando existe una falla en la estructura las características de la respuesta vibratoria cambian (parámetros modales)

Es por ello, que la finalidad del presente estudio es el análisis de una estructura tridimensional del tipo Truss mediante la adquisición de la señal de vibración procesada en una PC que permita conocer si la estructura está en buen estado o presenta alteraciones en sus parámetros modales debido a una falla. La transformada de Fourier (FFT) es el método empleado para el análisis de las señales. Esta técnica permite el conocer los parámetros modales de las estructuras tales como frecuencias naturales y factor de amortiguamiento. Con los resultados obtenidos se contrastan las frecuencias naturales de la estructura en estado sano contra las de falla, así como el factor de amortiguamiento para ambos casos. Se puede concluir entonces, que la falla existe o no en la estructura, además de poder dar una buena aproximación de la ubicación de la misma.

2. FUNDAMENTO MATEMÁTICO

2.1 FFT

El método más común que se usa para el análisis de señales estacionarias es mediante la FFT (Betta et al., 2001). La transformada discreta de Fourier (DFT) $Z_F(k)$ de una señal discreta en tiempo $z(n)$ con periodo de muestreo N , índice discreto de tiempo n e índice discreto de frecuencia k es obtenida aplicando un kernel de transformación W_N^{nk} , de acuerdo a la Ecuación (1).

$$z_F(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} z(n)W_N^{nk} \quad \text{for } 0 \leq k < N \quad \text{y} \quad 0 \leq n < N \quad (1)$$

2.2 Frecuencia natural

La frecuencia natural se conoce como la frecuencia a que un sistema mecánico seguirá vibrando después de quitar la fuente de excitación. Cualquier sistema mecánico puede ser modelado por medio de resortes, masas y amortiguadores como se muestra en la Figura 2. Los amortiguadores absorben la energía pero los resortes y masas no lo hacen. Al aplicar una energía a un sistema masa-resorte el sistema vibrará a su frecuencia natural y el nivel de vibraciones dependerá de la fuente de energía y de la absorción inherente al sistema. La frecuencia natural de un sistema resorte-masa no amortiguado se muestra en la Ecuación (2) (Amézquita et al., 2009).

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2)$$

2.3 Frecuencia de resonancia

La frecuencia de resonancia se presenta cuando la frecuencia de excitación es igual o muy cercana a la frecuencia natural del sistema $\omega_r = \omega_n$. La frecuencia de resonancia está denotada por la Ecuación (3).

$$\omega_r = \sqrt{1 - 2\zeta^2} \omega_n \quad (3)$$

donde ω_n es la frecuencia natural del sistema y ζ es el coeficiente de amortiguamiento y está denotada por la siguiente Ecuación (4).

$$\zeta = \frac{b}{2\sqrt{km}} \quad (4)$$

donde b es el factor de amortiguación.

Cuando se presenta un coeficiente de amortiguamiento pequeño la frecuencia de resonancia es mucho mayor y más aguda, que cuando el factor de amortiguamiento es grande presentándose una amplitud muy pequeña en la frecuencia de resonancia, pero si la amortiguación es $\zeta = 0$ el sistema incrementa su amplitud infinitamente debido a que la frecuencia de resonancia y la frecuencia natural son iguales $\omega_r = \omega_n$ (De Silva, 2000).

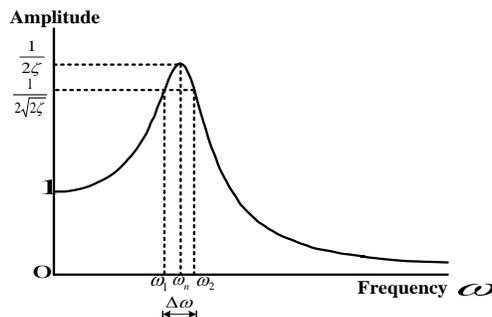


Figura 1. Método factor-Q para la medición del amortiguamiento.

La Figura 1 indica directamente si la resonancia es aguda o no y en qué medida lo es, donde la amplitud de la resonancia está definida por el factor Q está sustentado por la Ecuación (5).

$$Q_{factor} = \frac{\omega_n}{\Delta\omega} = \frac{1}{2\zeta} \quad (5)$$

3. METODOLOGÍA

La metodología propuesta en este trabajo consiste en el análisis de vibraciones de una estructura del tipo truss para el monitoreo de sus frecuencias naturales y factor de amortiguamiento. Se divide de acuerdo a la Figura 2. Lo primero propuesto en la metodología es el sistema de instrumentación que se encarga de adquirir la señal de vibración causada por la excitación y almacenarla para posteriormente enviar los datos almacenados a una PC para su procesamiento. El primer paso del procesamiento de la señal vibración capturada es transformarla al dominio de la frecuencia empleando la técnica FFT. Posteriormente con la señal en el dominio de la frecuencia se procede a obtener las frecuencias naturales y el factor de amortiguamiento de la estructura. Todo esto, empleando la FFT en Matlab.

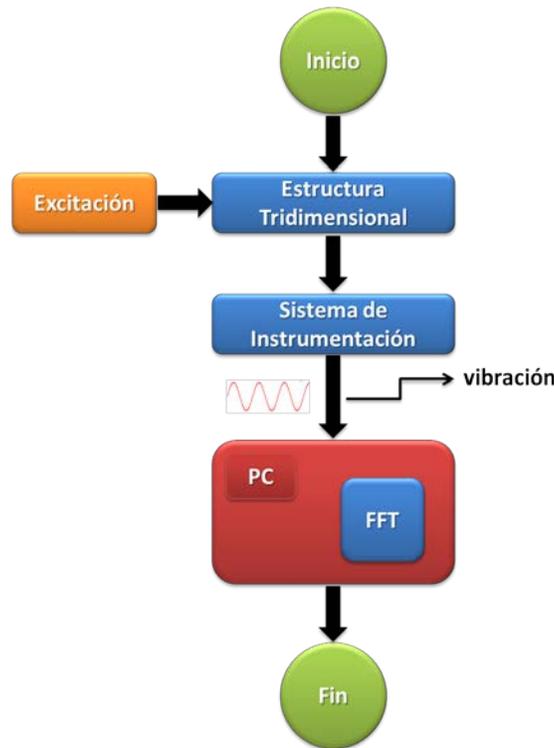


Figura 2. Diagrama a bloques de la metodología empleada

4. EXPERIMENTACIÓN

La Figura 3 muestra la puesta de experimentación, la cual consiste en una estructura del tipo Truss espacial de aluminio de cinco cubos. Las pruebas modales (Figura 3a), fueron desarrolladas usando una masa de 14 Kg (137.34 N), como fuente de excitación, la cual se colocaba en un extremo de la estructura (Figura 3b) usando un hilo de nylon, de tal manera que ésta colgara libremente y posteriormente cortar el segmento de hilo y se produjera una excitación en la estructura. Las señales de vibración son adquiridas usando cinco acelerómetros distribuidos en cada cubo de la estructura (Figura 3a), del tipo MEMS triaxial (LIS3L02AS4) (figura3d). Los acelerómetros usados, tiene una escala de $\pm 2g/\pm 6g$ ($g = 9.81m/s^2$) y una resolución de 5×10^{-4} sobre un ancho de banda de 100Hz. La información adquirida por los acelerómetros es digitalizada usando un ADS7841 de 12 bits y cuatro canales, con una máxima frecuencia de muestreo de 200 KHz en cada canal. Las señales obtenidas por el acelerómetro son almacenadas en el Sistema de Adquisición de Datos (DAS), (Figura 3c) y

son enviadas a la PC mediante el protocolo USB. El DAS usa una frecuencia de muestreo de 3.2KHz para obtener 16000 muestras en un periodo de 5s.

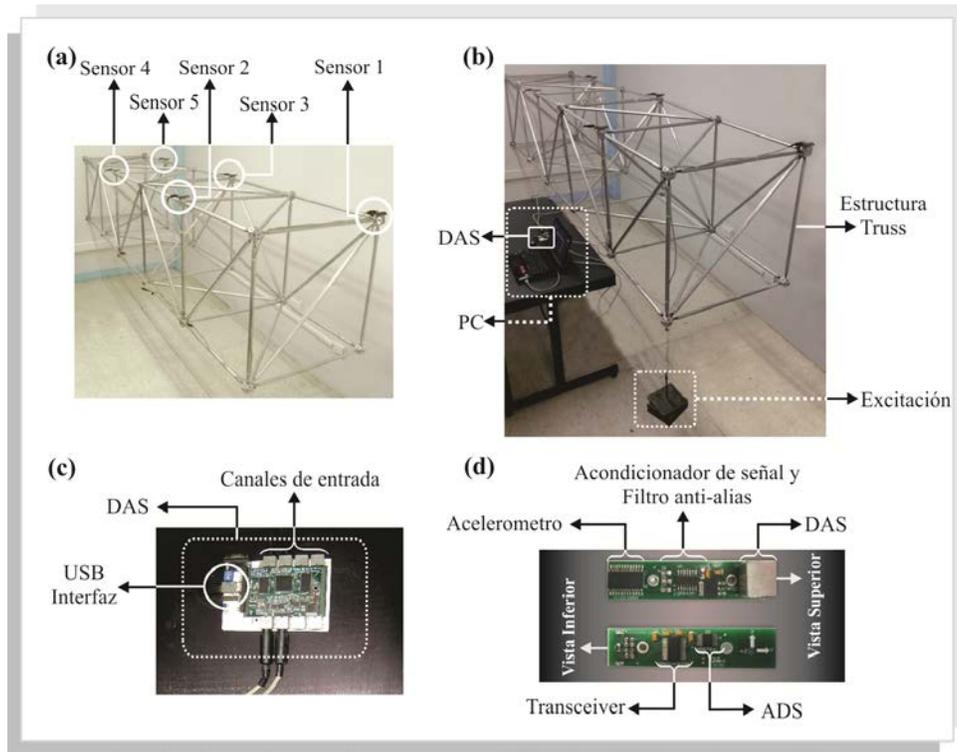


Figura 3. Puesta de experimentación

4.1 Sistema de instrumentación

La señal de vibración es adquirida utilizando el sistema de instrumentación mostrado en la Figura 4, el cual consta de un acelerómetro del tipo MEMS tri-axial (LIS3LV02). La señal es acondicionada y digitalizada utilizando un convertidor analógico a digital ADS7841 y finalmente la etapa del transceiver que permite la comunicación con el DAS, una vez que termina el DAS de capturar todos los datos se inicia el envío de los datos capturados a la PC por medio de la interfaz USB para poder iniciar el procesamiento de los mismos.

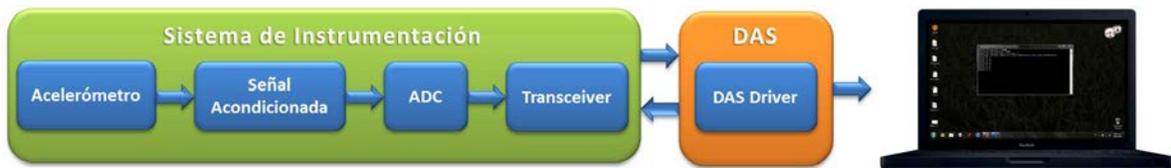


Figura 4. Sistema de instrumentación.

4.2 Caso de estudio.

Para poder validar la metodología propuesta se analiza un caso de estudio para la detección de las frecuencias naturales del sistema y factores de amortiguamiento de una estructura del tipo truss. En el caso de estudio se presenta la estructura en condiciones de daño por fallas en las uniones. Para llevar a cabo la prueba de falla en

las uniones, un lado del elemento barra es separada del conector como se muestra en la Figura 5(a). La Figura 5(b) muestra la localización del daño aplicado a la estructura. El daño en la estructura es aplicado un cubo a la vez. Por ejemplo, en el cubo 1 se genera la falla, se monitorea el comportamiento de la estructura con la falla permaneciendo los otros cuatro sanos, al terminar la captura de la señal se procede a reparar la falla. Posteriormente se genera la falla en el cubo 2, se captura su comportamiento tomando en cuenta que los otros cuatro cubos están en buen estado, se repara la falla y esto se repite hasta terminar los cinco cubos.

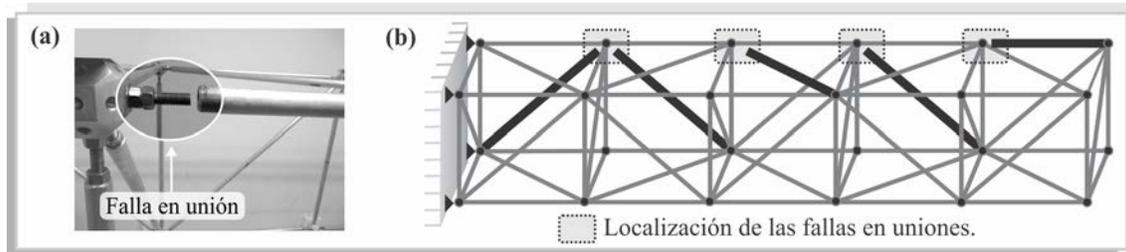


Figura 5. a) Falla en la unión, b) Localización de la falla en la estructura.

5. PRUEBAS Y RESULTADOS

Siguiendo la metodología propuesta, la estructura es excitada en condiciones de buen estado y de falla, durante la excitación la señal de vibración es adquirida y enviada a la PC para su procesamiento. La Figura 6(a) muestra la primer frecuencia natural de cada una de los casos de estudio, obtenida después de analizar las señales en el dominio de frecuencia. La Figura 6(b) muestra el cálculo del factor de amortiguamiento debido a la frecuencia natural. La Figura 6(c) muestra la suma de los dos parámetros modales (frecuencia natural mas factor de amortiguamiento) con el objetivo de poder discernir con mayor facilidad cuando excite o no un falla en la estructura.

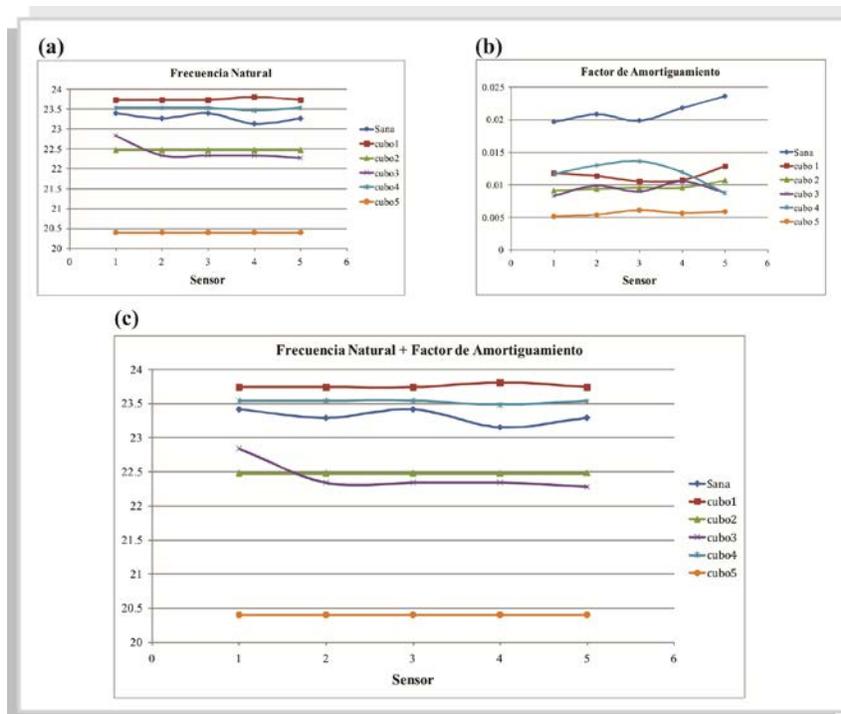


Figura 6. a) Frecuencia Natural, b) Factor de amortiguamiento, c) Suma de parámetros modales.

5.1 Discusión de resultados

De los resultados obtenidos en el caso experimental muestra que es de suma importancia seguir adecuadamente los pasos propuestos en la metodología, ya que primeramente por medio de un análisis en frecuencia se obtiene una región de análisis que permite observar las frecuencias naturales del sistema, y a partir de ellas poder obtener los factores de amortiguamiento. De acuerdo a los resultados mostrados en la Tabla 1, una falla en la estructura hace que la frecuencia natural sufra un corrimiento y esto repercute en el factor de amortiguamiento.

Tabla 1. Primera frecuencia natural (Hz) y su factor de amortiguamiento (ζ) de la estructura en buen estado y con falla.

Condición	Sensor 1		Sensor 2		Sensor 3		Sensor 4		Sensor 5	
	f	ζ								
E. Sana	23.4	0.0196	23.27	0.0208	23.4	0.0198	23.13	0.0218	23.27	0.0236
D. Cubo 1	23.73	0.0117	23.73	0.0113	23.73	0.0105	23.80	0.0107	23.73	0.0128
D. Cubo 2	22.47	0.0091	22.47	0.0093	22.47	0.0095	22.47	0.0095	22.47	0.0106
D. Cubo 3	22.83	0.0083	22.33	0.0098	22.33	0.0089	22.33	0.0105	22.27	0.0087
D. Cubo 4	23.53	0.0116	23.53	0.0129	23.53	0.0135	23.47	0.0119	23.53	0.0087
D. Cubo 5	20.40	0.0051	23.40	0.0053	23.40	0.0061	23.40	0.0056	23.40	0.0058

*D = Desoldado.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se propuso una metodología novedosa para la estimación de frecuencias naturales y factor de amortiguamiento en estructuras por medio del análisis de sus vibraciones. Dichas frecuencias naturales no sólo revelan el comportamiento del sistema, si no que son parte fundamental para la obtención de los factores de amortiguamiento. Para la detección de fallas en la estructura, se utilizaron los cinco sensores a lo largo de la estructura pues no se conocía el comportamiento de esta, sin embargo, en base a las gráficas de los resultados y a la Tabla 1 podemos concluir que con un solo sensor y en la posición del quinto sensor, basta para poder discernir cuándo existe o no una falla en la estructura, de acuerdo a la información obtenida.

7. REFERENCIAS

- Amézquita-Sánchez, J.P., Romero-Troncoso, R.J., Cabal-Yepez, E., Granados-Lieberman, D., y Urbina-Salas, I., 2009, Detección de las frecuencias naturales de un sistema mecánico acoplado a un motor de inducción, VII Congreso Internacional en Innovación y Desarrollo Tecnológico.
- Auld, B. A. y Moulder, J. C., 1999, Review of advances in qualitative eddy current nondestructive evaluation, *Journal of Nondestructive Evaluation*, 18(1), 3-36.
- Betta, G., Liguori, C., y Pietrosanto, A., 2001, A multi-application FFT analyzer based on a DSP architecture," *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement*, 50:825-832.
- Chen, B., Xu, Y. L. y Qu, W. L., 2005, Evaluation of atmospheric corrosion damage to steel space structures in coastal areas, *International Journal of Solids and Structures*, 42(16-17):4673-4694.
- De Silva, C. W., 2000, *Vibration Fundamentals and Practice*, CCR Boca Raton, Florida.
- Dominguez, A., Stiharu, I. y Sedaghati, R., 2006, Practical design optimization of truss structures using the genetic algorithms, *Research in Engineering Design*, 17(2):73-84.
- Farrar, C. L. y Worden, K., 2007, An introduction to structural health monitoring, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 365:303-315.
- Ghorbanpoor, A. y Rentmeester, A. T., 1993, NDE of steel bridges by acoustic emission, *Proceeding in Structural Engineering in Natural Hazards Mitigation*, ASCE, New York, N. Y., pp. 1008-1013.

- Kashangaki, T. A-L., 1991, On-orbit damage detection and health monitoring of large space trusses-status and critical issues, NASA report TM-104045.
- Kisters, F. H. y Kearney, F. W., 1991, Repair, evaluation, maintenance, and rehabilitation research program: evaluation of civil works metal structures, Construction Engineering Research LAB (ARMY) Champaign IL, Washington, D.C.
- Rytter, A., 1993, Vibration based inspection of civil engineering structures. Ph.D. thesis, Aalborg University, Denmark.
- Shi, Z. Y., Law, S. S. y Zhang, L. M., 2000, Optimum Sensor Placement for Structural Damage Detection, Journal of Engineering Mechanics-ASCE, 126(11):1173-1179.
- Szewczyk, P. Z. y Hajela, P., 1994, Damage Detection in Structures Based on Feature- Sensitive Neural Networks, ASCE Journal of Computing in Civil Engineering, 8(2):163-178.
- Vossoughi, F., Ostertag, C. P., Monteiro, P. J. M. y Albert, R. D., 2007, Damage characterization of concrete panels due to impact loading by motionless X-ray laminography, Journal of Materials Science, 42(9), 3280-3285.
- Wang, X., Hu, N., Fukunaga, H. y Yao, Z. H., 2001, Structural damage identification using static test data and changes in frequencies, Engineering Structures, 23(6), 610-621.
- Zachar, J. y Naik, T. R., 1992, Principles of infrared thermography and application for assessment of the deterioration of the bridge deck at the "zoo interchange", Materials: performance and prevention of deficiencies and failures, ASCE, New York, N. Y., pp. 107-115.



REFERENCIAS



Referencias

Amézquita Sánchez J. P. (2009). Análisis de vibraciones para motores eléctricos en el transitorio de paro. Tesis de maestría División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca. Universidad de Guanajuato.

Centro de Instrumentación y Registro Sísmico A.C. Red Acelerográfica de la Ciudad de México (RACM). (http://www.cires.org.mx/faqs_es.php).

Charles R. Farrar, Keith Worden. (2006). An introduction to Structural Health Monitoring. Phil. Trans. R. Soc. A 365, 303–315 (doi:10.1098/rsta.2006.1928).

Chávez Romero, R. (2010). Estudio de daños en estructuras usando análisis modal en un modelo instrumentado. Tesis Maestría. Universidad Autónoma de Querétaro.

Chen, B., Xu, Y. L. & Qu, W. L. (2005). Evaluation of atmospheric corrosion damage to steel space structures in coastal areas. International Journal of Solids and Structures, 42(16-17), 4673-4694.

Gallardo-Amaya, A.A., Amézquita-Sánchez, J.P., Osornio-Ríos, R.A., Dominguez-González, A., Romero-Troncoso, R.J. y García-Pérez, A., 2012, Monitoreo estructural basado en vibración para detectar daños en estructura del tipo Truss, VIII Congreso Internacional de Ingeniería.

Gao, Y. & Spencer, B. F. (2006). Online damage diagnosis for civil infrastructure employing a flexibility-based approach. Smart Materials and Structures, 15(1), 9-19.

Glen White (2010). “*Introducción al análisis de vibraciones*”, AZIMA| DLI

Guirong Yan, Shirley J. Dyke, Ayhan Irfanoglu. (2012). Experimental validation of a damage detection approach on a full-scale highway sign support truss, Journal of Mechanical Systems and Signal Processing, 195-197.

Hall S. R. (1999). “*The Effective Management and Use of Structural Health Data*”, Proceedings of the 2nd International Workshop on Structural Health Monitoring, 1999, 265-275.



Referencias

Hernández García, O., & López Ugalde, G. (2007). Diseño, análisis y fabricación de la estructura para auto de mini baja. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Querétaro-Facultad de Ingeniería.

Irwin, J.D; Graf, E.R (1979). “*Industrial noise and vibration control*”, Prentice Hall, New Jersey.

Jian, G., Yong, C. & Bing-nan, S. (2005). Experimental study of structural damage identification based on WPT and coupling NN. Journal of Zhejiang University SCIENCE, 6A(7), 663-669.

Mehrjoo, M., Khaji, N., Moharrami, H. & Bahreininejad, A. (2008). Damage detection of truss bridge joints using artificial neural networks. Expert System with Applications, 35(3), 1122-1131.

Paz Anaya, M. (2009). Diseño, fabricación y análisis de vibraciones por elemento finito de una estructura tridimensional reconfigurable. Tesis Licenciatura. Universidad Autónoma de Querétaro.

Proakis, J.G., and Manolakis, D.K. (2006). Digital Signal Processing, Principles and Applications, Fourth Edition, Prentice-Hall, New Jersey, USA.

Robert C. Juvinall (2005). “*Failure Theories, Safety Factors and Reliability*”. Fundamentals of Machine Component Design, 3rd Edition.

Stovack K. S. (2002). Piezoelectric-Based In-Situ Damage Detection of Composite Materials for Structural Health Monitoring Systems. Doctorate of Philosophy in Aeronautics and Astronautics at the Massachusetts Institute of Technology.

Taha, M. M. R. (2010). A neural-wavelet technique for damage identification in the ASCE benchmark structure using phase II experimental data, Advances in Civil Engineering, doi:10.1155/2010/675927.



Referencias

Wikipedia en inglés. “*Episode 25 – "Brown Note, Blown Away, Water Torture"*”.
http://en.wikipedia.org/wiki/MythBusters_%282005_season%29#Episode_25_.E2.80.93_.22Brown_Note.2C_Blown_Away.2C_Water_Torture.22.

Wired. Music Fans, Beware the Big Bass. <http://www.wired.com/medtech/health/news>.